

北極域研究
推進プロジェクト



Arctic Challenge for Sustainability

2015-2020
研究成果報告書



北極域研究
推進プロジェクト



Arctic Challenge for Sustainability

2015-2020
研究成果報告書

ArCSの北極研究活動 — 持続可能な未来への貢献 —



本プロジェクトの実施メニュー・テーマ

- 若** 若手研究者派遣による人材育成及び国際連携
- 専** AC等北極関連会合への専門家の派遣
- 拠** 国際連携拠点の整備
- T1** 気象・海水・波浪予測研究と北極航路支援情報の統合
- T2** グリーンランドにおける氷床・氷河・海洋・環境変動
- T3** 北極気候に関わる大気物質

- T4** 北極海洋環境観測研究
- T5** 北極気候変動予測研究
- T6** 北極生態系の生物多様性と環境変動への応答研究
- T7** 北極の人間と社会：持続的発展の可能性
- T8** 北極域データアーカイブシステム

※T1～T8は「国際共同研究推進」メニューの8テーマを表します。

本プロジェクトでは激しく変化する北極の自然環境について、研究分野ごとに網羅的な調査・観測や予測を行いました。そして、そこから得られた高精度な情報や、研究者が気づいた北極の諸変化を、今後北極どう向き合っていくのか判断するためのよりどころとして、さまざまな形で社会や人々に提供しました。



北極域研究推進プロジェクト～その5年間のあゆみ～

北極域研究推進プロジェクトは、2011年から5年間実施された GRENE 北極気候変動研究事業（GRENE 北極）を受けた新たな北極域の研究プロジェクトとして、文部科学省で公募が行われ、国立極地研究所を代表機関、海洋研究開発機構および北海道大学を副代表機関とする事業計画が採択され、2015年9月にスタートしました。2015年10月には、日本ではじめての北極に関する政策である『我が国の北極政策』が総合海洋政策本部で決定され、政策の具体的な取り組みとして、北極域研究推進プロジェクトによる、北極域研究に係る国際協力やステークホルダーとの協力を抜本的に強化すべきことが提言され、これをふまえて北極域での調査・観測、研究推進とあわせて、このような政策的・社会的な期待にも応えていくため取り組みを推進してまいりました。

北極域は、近年の温暖化の影響がもっとも顕著に現れるといわれている地域であり、海氷減少や氷河・氷床融解、生態系の変動など、その急激な変化は北極域に留まらず、異常気象の頻発や海面上昇など地球全体の気候環境にも影響をおよぼすものです。一方で、北極域の変化は、海氷減少にともなう北極海航路の利用や資源開発などにより、我が国の社会経済にも大きな影響をもたらしています。

本プロジェクトは、北極域の急激な変化とその影響への社会的な関心が高まるなか、北極域をめぐる諸課題に適切に対処していくために科学には何ができるのか、という観点を重視しました。すなわち、それらの諸課題に対して国内外のステークホルダーの適切な判断が可能となるような、精確な将来予測と環境影響評価を進めることを目指し、先行プロジェクトの GRENE 北極における自然科学研究の取り組み・成果を継承・発展させていくとともに、新たに人文科学・社会科学分野の研究テーマを設定し、文理融合による取り組みを推進する体制を確保しました。また、北極圏の8ヵ国で構成される北極評議会の作業部会や北極関連の国際会議にプロジェクトに参加する研究者を専門家として積極的に派遣し、国際的な動向に関する情報収集・発信に努めるとともに、北極域の課題は長期にわたる取り組みが必要になるため、若手育成の観点から、次世代を担う人材の海外への派遣にも取り組んでまいりました。

このような取り組みを通じ、自然科学研究では、先進的な機器や手法を用いた調査・観測、数値モデルの高度化などで多くの成果をあげるとともに、文理融合の取り組みでは、ロシア・サハ共和国での環境教材の開発、グリーンランドでの地域住民・先住民との対話の促進、北極の今後を多様な視点から捉えた冊子や北極域研究学習ツールの作成など、社会的な貢献につながる実績をあげることができました。また、北極関連国際会議への専門家派遣を通じては、我が国の国際的なプレゼンスを一層向上させ、若手人材の海外派遣では、多くの若手研究者に海外での研鑽の機会を提供したことに加えて産業界の人材も対象としたことにより、社会との連携の強化を進めていくことができました。なお、2018年にドイツ・ベルリンで開催された第2回北極科学大臣会合のサイエンスフォーラムに本プロジェクトの研究者を専門家として派遣したこと、大臣会合では日本からの発表において本プロジェクトの取り組みと成果が紹介されたこと、2020年の第3回会合の日本での開催が決定されたことは、北極域研究における我が国の存在感を高めていくうえで本プロジェクトが期待される役割を果たした大きな成果であったことを、あわせて紹介いたします。

本プロジェクトを実施してきたこの5年の間に、北極域をめぐる国内外の動向は変化し、社会的な関心は高まりを見せています。本プロジェクトは終了しますが、その成果は今後の我が国の北極域研究の貴重な財産として継承されていくものと確信しております。

最後に、本プロジェクトに多大なるご支援とご指導をいただいた、文部科学省をはじめとする関係省庁・関係機関の皆様には厚く感謝を申し上げますとともに、北極域の気候環境変動への対応とその持続的な利用に向けて、我が国の北極域研究の発展に引き続き尽力していくことを申し添え、巻頭言といたします。

2020年2月

北極域研究推進プロジェクト実施機関を代表して

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構
国立極地研究所長

中村 卓司

目 次

北極域研究推進プロジェクト～その5年間のあゆみ～	5
第1章：序論	9
1.1 北極域研究推進プロジェクトが目指したもの	10
1.2 本プロジェクトの実施体制	10
第2章：国際連携拠点の整備	13
第3章：若手研究者派遣による人材育成及び国際連携	17
第4章：国際共同研究の推進	23
4.1 第4章の概観	24
4.2 テーマ1：気象・海氷・波浪予測研究と北極航路支援情報の統合	26
4.2.1 全体概要	26
4.2.2 極端気象現象の予測可能性	28
4.2.3 気象観測網の強化と予測向上	31
4.2.4 波浪・着氷の実態把握とその予測	34
4.2.5 海氷予測精度の向上と北極海航路への利用可能性	36
4.3 テーマ2：グリーンランドにおける氷床・氷河・海洋・環境変動	41
4.3.1 全体概要	41
4.3.2 グリーンランドにおける気候・氷床変動	41
4.3.3 グリーンランドにおける氷河氷床・海洋相互作用	46
4.4 テーマ3：北極気候に関わる大気物質	54
4.4.1 全体概要	54
4.4.2 北極 BC の動態	55
4.4.3 北極下層雲の動態とエアロゾル影響	61
4.4.4 温室効果気体のトップダウン研究	63
4.4.5 温室効果気体のボトムアップ研究	68
4.5 テーマ4：北極海洋環境観測研究	75
4.5.1 全体概要	75
4.5.2 海氷減少にともなう北極海洋環境の変化と水循環・気候変動との関係の理解	76
4.5.3 温暖化・酸性化によるプランクトンへの影響評価	81
4.5.4 北極海淡水収支の季節・経年変動の理解	85
4.5.5 アラスカ沿岸における海水動態変動の理解	87
4.6 テーマ5：北極気候変動予測研究	90
4.6.1 全体概要	90
4.6.2 多圏相互作用過程	90
4.6.3 遠隔影響過程	94
4.6.4 中期気候変動予測	98
4.6.5 長期気候変動予測	100
4.7 テーマ6：北極生態系の生物多様性と環境変動への応答研究	104
4.7.1 全体概要	104
4.7.2 実施項目 [1-1] 栄養物質供給機構とその変動	106
4.7.3 実施項目 [1-2] 基礎生産と有機物フラックス・二酸化炭素との関係	107
4.7.4 実施項目 [1-3] 環境・有機物フラックスの変動が消費者の分布・生態に与える影響	108
4.7.5 実施項目 [1-4] 汚染物質の生態系への影響	110
4.7.6 実施項目 [1-5] 衛星による北極圏環境と海洋生態系変動の評価	110

4.7.7 実施項目 [1-6] MPA、北極生物資源管理に関する情報提供	111
4.7.8 実施項目 [2-1] シベリア北極域における移動性鳥獣の生態調査	112
4.7.9 実施項目 [2-2] ベーリング海北部で繁殖する海鳥の生態調査	113
4.7.10 実施項目 [2-3] ニシオンデンザメの生態調査	114
4.7.11 実施項目 [2-4] 北極圏陸域における生態系機能 - 生物多様性の関係の実態把握	115
4.7.12 実施項目 [2-5] 湖沼生態系の構造・環境把握	117
4.8 テーマ7：北極の人間と社会：持続的発展の可能性	119
4.8.1 全体概要	119
4.8.2 北極海航路の利用と資源開発	120
4.8.3 環境と人間の相互作用	125
4.8.4 北極ガバナンス	129
4.9 テーマ8：北極域データアーカイブシステム	133
4.9.1 全体概要	133
4.9.2 多様な観測対象分野のデータの横断的検索・切り出し機能の構築	134
4.9.3 北極域の環境変動問題を多くの者が体感できるデータや情報として取り出せる機能の構築	136
4.9.4 データサービスの基盤の開発	139
4.9.5 情報配信の強化－航路支援サービス「VENUS」－	142
4.9.6 データの利用	144
第5章：AC等北極関連会合への専門家の派遣	147
第6章：情報発信	151
第7章：まとめと今後の課題	157
研究業績	163
1 研究業績数	164
2 研究業績一覧	165
2-1 論文発表	165
2-1-(1) 査読あり論文 (published)	165
2-1-(2) 査読あり論文 (submitted)	190
2-1-(3) 査読なし論文 (published)	192
2-1-(4) 査読なし論文 (submitted)	197
2-2 誌上発表	197
2-3 書籍出版	199
参考資料	201
I 関係者	202
I-1 メンバー	202
I-2 委員	208
II 研究機関	209
III 海外連携機関・国際プロジェクト等	210
IV 活動実績	214
IV-1 会議開催実績	214
IV-2 予算推移	215
IV-3 「若手研究者派遣による人材育成及び国際連携」メニューの派遣実績	216
IV-4 「AC等北極関連会合への専門家の派遣」メニューの派遣実績	218
V 略語表	220

※第2～5章の順序は、本プロジェクト公募要領「(5) 事業の内容等【補助対象となるメニュー】」の記載順である。

地名について

- 米国・アラスカのバローは、2016年12月より正式名称が「ウトキアグヴィク」に変更されましたが、本報告書では慣例により「バロー」と記載しています。

文献の引用について

- 本プロジェクトの成果が含まれる論文・誌上発表記事・書籍を引用する場合、本文では(筆頭著者 et al., 出版年)と記載しています。論文名等の詳細は巻末の研究業績2をご参照ください。また、今後発表が予定されている成果については、(筆頭著者 et al., 投稿準備中)と記載しています。
- 本プロジェクトの成果以外の論文・誌上発表記事・書籍を引用する場合、本文では(筆頭著者 et al., 出版年)とし、出版年の右肩に²⁾のように片括弧付きの連番を節ごとに付しています。論文名等の詳細は各節の最後をご参照ください。

略語について

- 本報告書の第1～7章に記載のある機関名、プロジェクト名、データ名等は、基本的に略語を記載しています。正式名称は巻末の参考資料Vをご参照ください。

第 1 章

序論

1

北極域研究推進
プロジェクトについて

1.1 北極域研究推進プロジェクトが目指したもの

プロジェクトディレクター：深澤 理郎

北極域研究推進プロジェクト (ArCS) は、2015 年秋に決定された『我が国の北極政策』にのっとり、その骨子である「日本が北極問題の解決に科学をもって貢献し」、「北極域での秩序ある持続可能な発展に主導力を発揮する」ことへの裏付けを用意するために、国際共同研究の推進、北極域における研究・観測拠点の整備、若手研究者および専門家の北極関連研究機関あるいは会議への派遣という3つの柱を用意し実行してきた。国際共同研究の推進には、自然科学や工学を中心とする6つの研究テーマだけではなく、その科学的な成果を直接的に社会や人々と共有することを目指して、人文社会科学のプログラムが含まれている。ひとつの科学プロジェクトに人文社会科学からの視点を導入したことは、これまでの国家主導の研究プロジェクトとしてはとても珍しく、本プロジェクトの大きな特徴となっている。

2015年という年は、2000年9月にニューヨークで開催された国連ミレニアム・サミットで採択された国連ミレニアム宣言をもとにまとめられたミレニアム開発目標 (MDGs: Millennium Development Goals) が終了し、2030年までの持続可能な開発の指針として、持続可能な開発のための2030アジェンダ(2030 agenda) が新たに策定された年でもあった。2030 agenda は、自然環境、社会・経済、人間社会の持続を重要な3つの要素とし、これらの適切なバランスのうえに開発が行われることで、人類の尊厳が確保されるという主張が骨子となっている。北極域とは、地球温暖化の影響を地球上でもっとも激しく受け、海氷減少や永久凍土の崩壊、経済的な活動の急激な活発化、さらにそれら

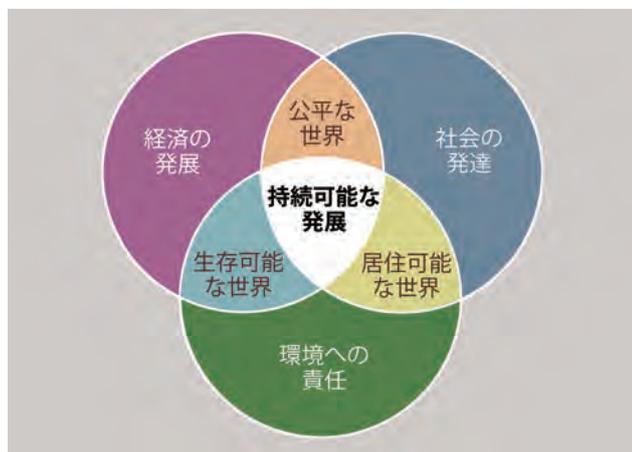


図 1-1. 持続可能な開発のための2030アジェンダ (2030 agenda) の概念

を原因とする現地住民の生活の変化が地球上でもっとも密接に絡み合い始めた地域である。北極域のこうした状況のなかで本プロジェクトは開始されたのである。

そこで、本プロジェクトでは、科学的な成果を政策決定者や日本の社会に知らせるということ以外に、日本が北極を研究することの意味と意義について社会からの理解を得ることを目指して、上述の3つの柱だけではなく、一般の方々を対象とした公開シンポジウムなどの広報も大事な活動とした。また2030 agendaを強く意識し、北極域での拠点整備、若手研究者や科学専門家さらには地方官庁職員の北極関連の研究施設、会議への派遣をインフラストラクチャーとして、6つの自然科学の研究テーマが科学的な成果を創出し、それらはデータセンターとしての北極域データアーカイブシステムに登録されるだけではなく、人文社会科学研究テーマにも共有され、統合的な情報として国内外の人々(ステークホルダー)に発信されるようなデータと情報の流れを用意した。

冒頭に述べたように、本プロジェクトは『我が国の北極政策』の実現に貢献することがもっとも重要なことであった。繰り返されるが、そのためには個々のプログラムから提出される無数の成果を統合し、社会にとって意味のある「情報」とすることが重要となる。そのために本プロジェクト執行部が、年1~2回程度開催される「プロジェクト全体会合」と、政策決定者を含む一般向けの「公開講演会」を企画し実行することと同時に、社会、特に企業や民間と本プロジェクトが北極に関連する会話をを行い、どのような情報が社会から望まれているかを知るために、北極研究者以外の人々を多数含む「評議会」、また、個々の研究テーマやメニューの成果が世界的に意味のあるものかどうかを吟味するために外国の著名な研究者からなる「国際助言委員会 (IAB: International Advisory Board)」をそれぞれ設けた。公開講演会以外の会議体の詳細については1.2で後述される。

また本プロジェクトのもっとも大きな目標は、政策決定者や民間に「社会情報」としての結果を具体的に伝達することにあると考え、本プロジェクトのまとめとして、すべての研究成果から、現状と将来の北極の姿を、自然環境のみならず、北極航路、北極の生態系、現地住民の生活という観点から平易な文章で解説する読みものを発行することとした。

1.2 本プロジェクトの実施体制

事務局

運営体制

本プロジェクトは、「北極域研究推進プロジェクト(環境技術等研究開発推進事業費補助金) - ArCSプロジェクト(Arctic Challenge for Sustainability Project) - 公募要領」に対する申請にもとづき、国立極地研究所を代表機関、海洋研究開発機構(JAMSTEC)と北海道大学を副代表機関とする事業として2015年7月1日付で採択された。2015年9月10日に初年度の交付決定通知がなされ、同3機関の共同運営体制により、

2020年3月31日までの約5年にわたり事業を実施してきた(図1-2)。

全体を総括するプロジェクトディレクター(PD)を置くとともに、PDを補佐しそれぞれの機関の担当課題を掌理するサブプロジェクトディレクター(SPD)を3機関それぞれに置いた。また、プロジェクト全体に関わる効果的な情報発信を推進するため、PDの下にコーディネーター(CDN)を置いた。

プロジェクトの中核となる拠点整備、研究者派遣、および国際共同研究については、「国際連携拠点の整備」、「若手研究者派遣による人材育成及び国際連携」、「AC等北極関連学会への専門家の派遣」の各メニューおよび「国際共同研究の推進」メニュー内の8テーマにわけられ、それぞれに実施責任者(PI)を置いた。なお、「国際共同研究の推進」メニューは、プロジェクト開始当初は14の研究メニューにわかれ、それらを5つの研究分野に整理して分野代表者を置いていたが、個々の研究テーマがより自由にそれぞれの研究を推進できるようにするため、プロジェクトの2年度目からは8つの研究テーマに整理し、分野代表者を廃止して各研究テーマの責任者をPIに一元化した。

移行後の「国際共同研究の推進」メニューでは、自然科学系の6テーマ(テーマ1～6)が北極域の気象・環境の急激な変化の実態把握やそのメカニズム解明、変化の将来予測や環境影響評価を、また、人文社会科学系の研究テーマ(テーマ7)が社会・経済への影響を明らかにするとともに、本プロジェクト

の研究成果の効果的な発信をサポートする役割を果たすことを目的とした。データマネージメントの研究テーマ(テーマ8)は分野横断的なデータを統合的に解析するツールの開発を行いつつ、得られたデータの公開・発信や国際的なデータ交流の促進、さらにステークホルダーに向けた発信を担った。

研究の遂行には、代表機関、副代表機関に加え、これら3機関から研究を委託された参画機関をはじめとする国内外約90機関に所属する研究者290名以上が関わった。

以上によりプロジェクトを円滑に運営、各実施メニューを推進する体制を確保し、会議および実施メニューの庶務に対応するため、国立極地研究所を中心とする3機関の共同事務局を置いて事業の事務的処理にあたった。

会議体

プロジェクトの重要事項を審議・決定するため、PDおよびSPDを委員とする運営委員会を設置した(図1-2①)。プロジェクト期間を通じて定期的に運営委員会を開催したほか、運営委員会以外にも、必要に応じてPDおよびSPDによる会合の場を設け、懸案事項などについて随時協議することで、プロジェクトの円滑な運営を図った。毎年度の各メニュー・テーマへの予算配分についても、あらかじめPD・SPDが各メニューの進捗状況などを点検しつつ各PIからの計画を精査・査定し、PD・SPDの会合における協議・調整を経て、最終的に運営委員会

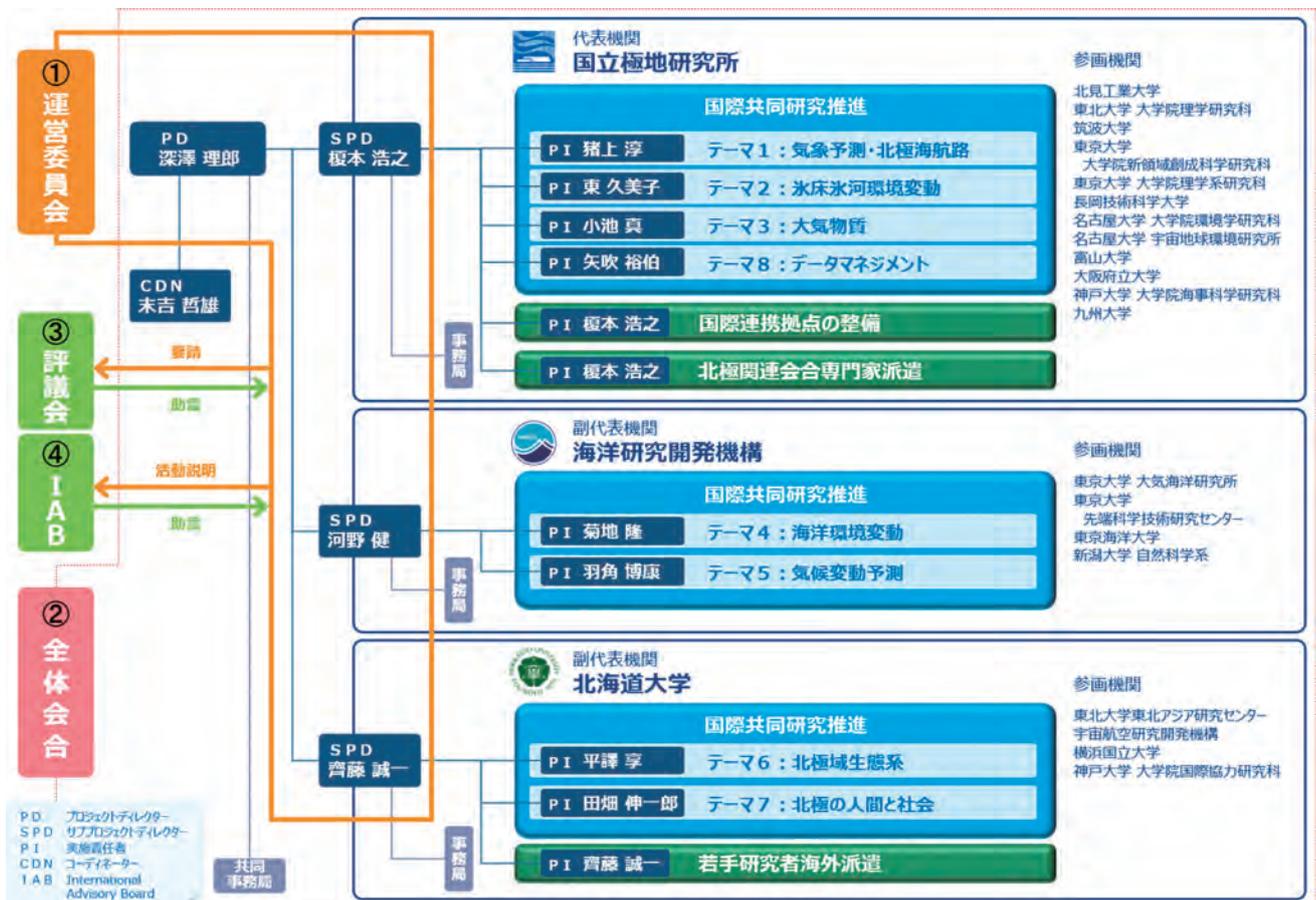


図1-2. 本プロジェクトの実施体制図

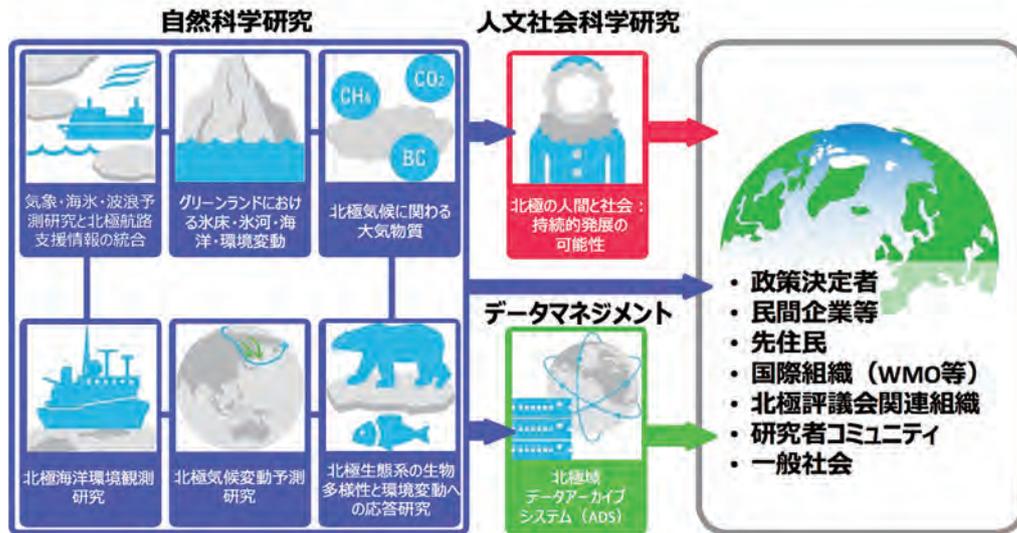


図1-3.「国際共同研究の推進」メニューと情報フロー

で審議・決定する手続きをとっており、これにより予算配分を最適化し、プロジェクトの計画をより効率的・効果的に推進することが可能となった。

プロジェクト参加者が一堂に会す場として、プロジェクト全体会合を年1～2回程度開催した(図1-2②)。PD、SPD、PI、CDN、および研究者が、機関、研究分野、そしてプロジェクトのメニューやテーマを超えて成果を報告し、情報交換、相互理解と連携を図る場として機能した。特に2年度目からは特定のトピックに関するセッションを設け、人文社会科学系の研究テーマと他テーマとの連携、北極域のデータ共有のあり方、国際連携拠点の現状と今後の展望、最終年度に向けた活動の進め方など、プロジェクト全体に関わる課題について広く議論した。

社会的課題・ニーズをふまえた意見交換と助言をいただくことを目的として、評議会を設置した(図1-2③)。評議会は、ステークホルダーとの会話を促進するものであり、その委員は民間企業、本プロジェクトに直接参加していない北極関連活動の専門家、日本の北極行政についての(民間)アドバイザーなどから構成された。計4回実施された会合では、プロジェクトで取り組む

べき課題、プロジェクトの出口を見据えた成果発信の方針などに関して意見を得た。

海外の主導的科学家を委員として迎え、プロジェクトの国際的な評価を勘案しつつ、その意義付けと活動方向に関して助言をいただくことを目的として、IABを設置した(図1-2④)。IAB委員は、海外の北極研究プロジェクトを率いた経験を持つ主導的科学家を中心に構成され、委員を日本に招聘して対面の会合を1回実施したほか、書面による評価を1回行った。4年度目に実施された会合では、これまでの科学的成果やアウトカム、今後の見込みや期待、課題として残りそうなことなどに関するプロジェクト側からの説明に対してコメントを受けたほか、委員から会合の内容をもとにした報告書の提出があり、冊子として関係各所に配布した。

プロジェクトに参加した機関や研究者、各会議体の開催実績等は、巻末の参考資料に一覧として掲載する。

データマネージメント

本プロジェクトに課せられたもっとも重要な目的のひとつは、研究活動とおして得られた北極域研究に関する極めて学術的価値の高いデータを、長期にわたり保管し、利用しやすい形で提供することであった。「国際共同研究の推進」メニューの1テーマ(テーマ8)であり、プロジェクトのデータセンターとしての役割を担う「北極域データアーカイブシステム(ADS: Arctic Data archive System)」がこれを担当し、テーマ8の主導で、各種データの取り扱いとその利用等についての基本的な方針をADSのデータポリシーと矛盾のないように定めた「北極域研究推進プロジェクト(ArCS)データポリシー」、ならびに、得られたデータの取り扱いについて必要な事項を定めた「北極域研究推進プロジェクト(ArCS)調査観測データ取扱要項」を制定し、プロジェクト実施期間中に得られたデータの収集・公開・活用等の促進を目指した。テーマ8の活動の詳細は4.9にて後述する。



図1-4. プロジェクト全体会合

第2章

国際連携拠点の整備

2

国際連携拠点の整備

榎本 浩之

概要

北極研究には、調査、観測、解析、衛星データ利用、理論追及、モデル計算等多くのアプローチがあるが、アクセスの困難さ、これまでの蓄積の不足などから、北極に関しては現在も現地調査・観測の必要性が相対的に高く、その足がかりとなる拠点の整備は研究を推進するために重要である。北極域はほとんどが北極圏国8カ国の領土であるため、地域ごとの事情を考慮しつつ、それらの国との信頼関係や協力によって共同研究の形をとって進める必要がある。一方、観測で取得したデータは、本プロジェクトの研究に使用するだけでなく、現地の研究者や各国の研究者などの国際研究活動に資するように保存、公開、利用促進されなければならない。この点でも北極域では国ごとの事情などに対応しつつ活動をを進める必要があり、個別に丁寧な対応が必要となる。このように研究拠点の整備は、北極域における共同研究とデータ共有・公開を推進するための出発点となるものである。

日本政府が2015年に策定した『我が国の北極政策』において、我が国が取り組むべき研究開発課題のひとつとして、北極圏国における研究・観測拠点を戦略的に整備することが求められている。本プロジェクトの「国際連携拠点の整備」メニューはこの要求に応えたものであり、日本人研究者による国際共同研究と人材育成の基盤として、北極海沿岸5カ国（米国、カナダ、ロシア、ノルウェー、デンマーク）に、本プロジェクト終了後も継続しうる国際連携拠点を整備するとともに、現地での観測や共同研究プロジェクトを通じたより緊密な国際協力を促進し、若手研究者等を派遣することにより人材育成を効果的に推進することを目指した。

本メニューの活動として、以下の10カ所の研究および/または観測のための拠点の利用に関する合意が締結・更新され、必要な経費を負担するとともに、これらの拠点の利用を促進するための支援を行った。

- 1) IARC [研究・観測拠点、米国]
International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks (アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター)
- 2) PFRR スーパーサイト [観測拠点、米国]
Poker Flat Research Range Flux super site (ポーカーフラットリサーチレンジフラックス観測スーパーサイト)
- 3) CHARS [研究・観測拠点、カナダ]
Canadian High Arctic Research Station (カナダ極北研

究ステーション)

- 4) CEN ステーション [観測拠点、カナダ]
Centre d'études nordiques (北方研究センター) ステーション
- 5) スパスカヤパッド研究林 [観測拠点、ロシア]
Spasskaya Pad Scientific Forest Station
- 6) ケープ・バラノバ基地 [観測拠点、ロシア]
Ice Base Cape Baranov Station
- 7) ニーオルスン基地 [研究・観測拠点、ノルウェー]
Ny-Ålesund Research Station
- 8) UNIS [研究拠点、ノルウェー]
University Centre in Svalbard (スバルバル大学)
- 9) EGRIP サイト [観測拠点、デンマーク (グリーンランド)]
East Greenland Ice-Core Project (東グリーンランド深層氷床掘削プロジェクト) サイト
- 10) GINR [研究・観測拠点、デンマーク (グリーンランド)]
Greenland Institute of Natural Resources (グリーンランド天然資源研究所)

図 2-1 に各地の国際連携拠点を示す。

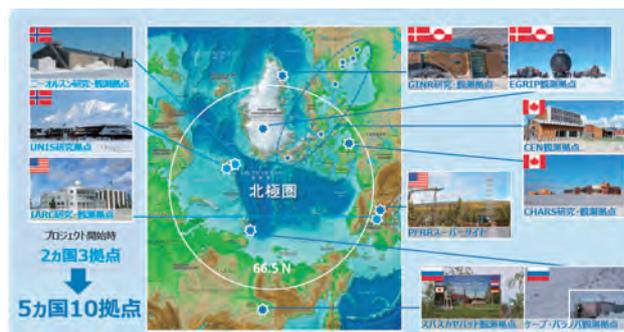


図 2-1. 北極海沿岸の5カ国10カ所に整備した国際連携拠点

国際連携拠点の選択

国際連携拠点の選択は、以下のA)～C)の戦略に沿って行われた。

- A) 新たに開始した連携（研究ニーズにもとづく研究・観測拠点の利用開始、国際共同研究プロジェクトとしての利用など）
CHARS、CEN、ケープ・バラノバ、EGRIP、GINR
- B) 国際共同研究の強化に向けた、既存の設備の改良と維持の支援
PFRR スーパーサイト、スパスカヤパッド、ニーオルスン、UNIS
- C) 国際共同研究の強化に向けた既存の連携枠組みの強化
IARC

ケープ・バラノバ基地、CHARS、CENステーションは従来の観測の空白域をターゲットとし、EGRIPサイト、GINRはグリーンランドで実施される研究・観測で利用、またはサポートを受けることを可能にした。PFRR スーパーサイト、スパスカヤパッド研究林、ニーオルスン基地、UNISは、これまで分野横断的に活用する研究者コミュニティが存在したが、包括的な合

意を締結することでその設備の更新・強化を行った。IARC については、アラスカでの人文社会科学も含めた広範な研究協力をサポートするという位置付けのもとで協力関係を強化し、研究者が実質的なサポートを受けられる体制を整えた。

新たな国際連携拠点における活動の立ち上げ支援

上記の A) に該当する拠点の多くは、研究戦略的に重要となる地域の研究機関・観測拠点と協力関係を構築し、新たに活動を開始した。このようなケースについては、新規参入を支援するため、プロジェクト3年度目となる2017年度から、以下のような新たな調査観測活動に対する「立ち上げ支援」を実施した。

- ・ケープ・バラノバ基地：ブラックカーボン (BC: black carbon) 観測
- ・ケープ・バラノバ基地：ラジオゾンデ観測
- ・CHARS: 陸域生態系調査
- ・CHARS、ケープ・バラノバ基地：降水・雪の同位体調査

共同研究推進のためのワークショップなど

国際連携拠点を維持・発展させていくためには、拠点を活用した共同研究の活性化が不可欠である。そこで本メニューでは、新しい共同研究を開拓し、既存の共同研究をより効果的に進めるために、国際連携拠点が設置されている国々や他の関連国とともにワークショップやセッションなどを実施してきた。これらの活動の結果として、主に本プロジェクトの開始後に整備された国際連携拠点で多くの共同研究・観測が新たに開始された。以下にいくつかの活動例を示す。

- ・日露北極研究ワークショップ (2018年1月15日・19日、東京)：ケープ・バラノバ基地での共同研究・観測に重点を置いた2日間のワークショップは、新所長である Dr. Alexander Makarov を含むロシア北極南極研究所 (AARI: Arctic and Antarctic Research Institute) の研究者と国立極地研究所など日本側機関の研究者との間で開催された。データ共有やラジオゾンデ観測に関する諸課題を協議するとともに、今後の観測計画の提案が行われた。ロシアの北極研究の長い歴史や観測点の少ない北極海沿岸に位置するケープ・バラノバ基地での観測の重要性を鑑みると、このワークショップの開催はロシアとの新たな協力体制を作るために重要なものであった。
- ・ArcticNet Annual Scientific Meeting 2018 におけるセッション (2018年12月12日、オタワ)：カナダと日本の研究者が共同で、「Functions of the Arctic Tundra Ecosystem under Rapid Environmental Change」と題したセッションを開催した。CHARS と CEN の研究者を含む約 80 名が参加し、研究の進捗と計画について議論を行うとともに、その内容を参加者間で共有した。
- ・IARC 北極域研究協力ワークショップ (2019年3月3～6日、フェアバンクス)：「Japan-U.S. Arctic Science Collaboration: Reflections on the Past Two Decades and Future Opportunities」という3日間の会合が開催され、中央北極海漁業協定、北極域の変化についての組織的・持続的な観測、北極域の変化への対応に関するアラスカ先住民の見解など、さまざまなテーマが扱われた。この一環として IARC

における共同研究の推進を目的とするワークショップを実施した。ワークショップをきっかけとして新たに計画が進んだ研究グループもあり、IARC における今後の研究活動やアラスカ側との連携の強化につながる貴重な機会となった。

- ・Canada-Japan Future Collaboration Workshop on Arctic Environment based at Canadian High Arctic Research Station (CHARS) Campus (2019年7月1～2日、ケンブリッジベイ)：カナダ極地知的基盤機構 (POLAR: Polar Knowledge Canada) と共同で、CHARS の周辺地域における日本・カナダの共同研究について情報交換するとともに、現地住民も含めた両国の協力体制を強化することを目的として開催した。

プロジェクト期間中の成果

○国際共同研究

本メニューによる国際連携拠点では、数多くの国際共同研究が実現した。具体的には第4章の各節で言及があるが、そのうちの代表的なものを図2-2に示す。特に本プロジェクト開始後に整備された拠点を中心に新たな共同研究・観測が開始されており、日本の研究者コミュニティの研究活動の幅を広げる効果があったといえる。



BC観測	テーマ3	PFRR	バラノバ	カバカガイト	ニールス
CO ₂ ・CH ₄ フラックス観測	テーマ3	PFRR	カバカガイト	ニールス	
陸域生態系調査	テーマ6	CEN	CHARS	ニールス	
降水・雪の同位体観測	テーマ4	IARC	CHARS	バラノバ	
永久凍土調査	テーマ3	IARC	ニールス		
グリーンランド氷床コア調査	テーマ2	EGRIP			
氷晶核・エアロソル観測	テーマ3	ニールス			

※本メニューによる整備後に当該調査・観測が開始した拠点

図2-2. 各拠点における主な研究・観測活動

○研究コミュニティの人材育成への貢献

次世代の研究者・技術者の育成は研究コミュニティとしての最重要課題であるが、国際連携拠点の活用・発展という観点からも、研究人材の育成と各拠点の長期的な運用は密接に関わる。IARC、ニールス基地は、本プロジェクトおよび従来からの日本の北極研究において多くの修士・博士の学位研究で活用されてきた。各拠点は今後同様に人材育成に活用され、発展することが望ましい。

これに加えて、人材育成を目的とする活動での利用例として、EGRIPサイトにおける若手氷床コア掘削者養成、スパスカヤパッド研究林における北海道大学 RJE3 プログラム^{*1}が本プロジェクト期間中の活動として実施された。

○データ共有推進への貢献

国際連携拠点で実施された国際共同研究によって取得されたデータは原則として ADS に登録・公開される。ADS は、図2-3に示すように北極研究のための国際的なオープンサイエンスの基盤としての整備が進められ、これらのデータは国際的に利用可能となっている。この基盤を利用することにより、環北極域に整備された国際連携拠点で得られたデータの公開と共有を推進した。これにより、持続的北極観測ネットワーク (SAON:

Sustaining Arctic Observing Networks) や国際北極科学委員会 (IASC: International Arctic Science Committee) が強化しようとしている国際観測網への貢献が可能になった。

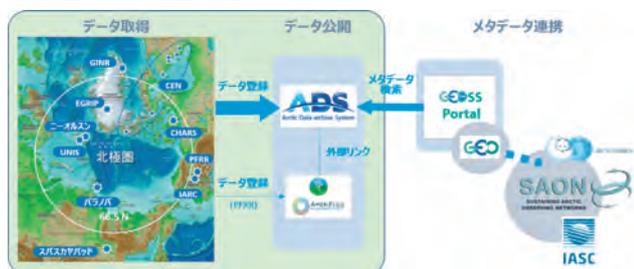


図2-3. 北極研究のためのデータ共有基盤

今後の国際連携拠点の活用と課題

本メニューでの活動をふまえて、プロジェクト終了後の拠点の維持活用および新たな研究活動の拡大に向けて考えられるアプローチ、ならびに留意すべき課題をあげる。

- ・研究立ち上げ支援の充実：各拠点において新たな共同研究を促進するためには、研究立ち上げの支援が有効である。本メニューにおいて3年度目から実施された立ち上げ支援は、対象がプロジェクト内に限定されていたが、同様のアプローチをプロジェクト外にも開いた形で継続的に実施することで研究の新規参入を促すことができる。諸外国の取り組みとしては、欧州連合 (EU: European Union) の観測拠点ネットワークプロジェクトである International Network for Terrestrial Research and Monitoring in the Arctic (INTERACT) は、研究や観測の提案の公募、実地調査のための小額の資金提供、測器の設置などを実施し、多くの研究が開始されるトリガーとなっている。スバルバル統合観測システム (SIOS: Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System) も同様のアプローチをとっている。
- ・拠点の長期的な維持：多くの観測研究において、長期的なデータの蓄積は最重要である。したがって拠点を長期間にわたり安定的に維持することは、同時に研究者コミュニティへの強いアピールとなる。潜在的なユーザーを開拓するうえでも、立ち上げ支援と合わせて拠点を活用した成果を周知していくことが必要であるが、そのためには拠点の安定的運用を実現する必要がある。
- ・研究コミュニティの人材育成：本プロジェクト期間中の成果に関する部分でも述べたとおり、各拠点の活用・発展と人材育成は表裏一体の関係にある。特に若手の教育課程における利用として、UNIS で開講されている学士、修士、博士向けの北極域の生物学、地質学、地球物理学、各種技術に関するさまざまなコース、IARC で開講されているサマースクールプログラムの活用と協力が期待される。
- ・コア設備の長期的な有用性の確保：国際連携拠点の設備を長期的に活用するため、設備の維持管理と更新、新規導入などを行う必要が生じる。このために設備の長期的なロードマップが必要であるが、大規模な補修管理は会計的な理由 (例：単

年度予算、4～3月という日本の年度暦) により困難である場合が多い。

- ・ケープ・バラノバ基地：国際連携拠点のなかでもっともアクセスの困難なケープ・バラノバ基地については、その立地からデータの重要性は高いものの、今後の活用については特に検討が必要である。日本人研究者が現地を訪問して調査・観測を行うことは困難であるため、自動測器による連続観測の実施が中心になると考えられるが、ロシア側の研究者による現地作業は、AARI との間で合意書を締結することではじめて可能となる。本プロジェクトでの新たな共同研究の開始にあたってはロシア側とのコミュニケーションに多くの時間と努力を割いたこと、特に合意書などの確認、データの公開・共有に関する問題の解決、機器の輸送・設置に関する当局からの許可取得などに長い時間がかかったことに留意が必要である。

まとめ

アクセスの容易でない北極域に拠点を整備し、観測や調査を実施する環境を整えることは、多くの研究者にとって、北極研究を始めたときからの課題であった。本プロジェクトにより、ほぼ環北極域をカバーするような拠点の整備が実現し、日本の北極研究の舞台は広がったといえる。政府の『第3期海洋基本計画』(2018年)でも、現在の枠組みと10カ所の国際連携拠点を維持することが要求されている。一方で各拠点の観測機能やデータの扱いにはまだ課題が残り、研究目的に沿った拠点の強化や設備の更新、今後の安定的な拠点運用などに向けて検討すべき点も多い。

5年間のプロジェクトにおいて得られた各国の研究者や研究機関との交渉・協力の記録は、今後の北極研究の基礎となるものである。また、国境やプロジェクトの枠を超えて、観測の協体制が構築されるよう、研究者コミュニティでの議論も行われている。国際連携拠点の整備は、有効な観測データを取得するだけでなく、これらの国際的な枠組みを構築する科学活動の中に日本も入っていくことを意味する。

新たな現象の発見やプロセスの検討では、短期観測やキャンペーン観測で成果を得ることができるが、急速に変化する環境の観測や社会への影響にとっては、5年間の観測は短い。また、国と国や研究機関同士の関係において、国際連携拠点の存在は信頼や協力の土台となる。この5年間の取り組みが布石となり、一層の協力関係が進展することが期待される。

注：
※1 East Russia-Japan Expert Education Program
<https://rje3.oia.hokudai.ac.jp/>

第 3 章

若手研究者派遣による
人材育成及び国際連携

3

若手研究者派遣による
人材育成及び国際連携

齊藤 誠一

本メニューの背景と意義

温暖化にともなう氷の融解と縮小により、北極域は国際社会において注視される新たなフロンティアとなりつつある。北極海では新たな航路開拓や資源開発が進み、グローバル経済への大きな貢献が期待されている一方、温暖化は環境や生態系に深刻な影響を与え、先住民を含む地域社会の権利の保持にも深く関係する。環境や生態系の保護と経済的利益の増進との整合性に関する検討や、既存の枠組みの可能性と限界の評価などが、北極域でのよりよいガバナンス構築のために求められている。このような現状において我が国のなすべき貢献は、(1) 高い専門性を持ちかつ異分野の視点を意識しながら、北極域が影響をおよぼす地球規模課題や北極域の地域課題に関する議論をリードできる研究者人材と、(2) 企業や官公庁における北極域の諸課題に通じた実務者人材という、北極域の諸課題の解決に深く貢献できる人材の育成である。

事業の目的

本メニューでは、北極域の諸課題について高い専門性と多角的視座から俯瞰でき、かつ多様なステークホルダーと協力して課題解決に取り組む若手研究者・実務者を育成することを目的として若手研究者海外派遣支援事業を実施した。本事業をとおして育成される若手研究者・実務者は、地域社会を含めた多様なステークホルダー間を調整する高い能力を修得し、我が国が北極域の多様な課題に長期的に取り組んでいくうえで、極めて重要な役割を担うことが期待される。

我が国の北極域研究を担う中核研究機関に所属する優れた研究者と、人材育成に関する豊富なノウハウを保有する大学の教員が協働し、なおかつ海外の中核研究機関等の協力を得ることにより、はじめて本事業の目的は達成される。さらに、本プロジェクトの代表機関と副代表機関の3者が別途取り組んでいる北極域研究共同推進拠点(J-ARC Net: Japan Arctic Research Network Center) 事業では、分野横断的に北極域の課題を俯瞰できる研究者の育成や、北極域の課題に精通し国際機関や企業等で課題解決に携わる実務者の育成を目的とした導入的な人材育成コースを実施している。将来的には、本事業およびJ-ARC Net 事業の育成プログラムで育成された人材が連携することにより、北極域の諸課題の解決における我が国の貢献度が相乗的に高まることが期待される。

制度設計と最終目標

本事業では、上述(1)の研究者人材と(2)実務者人材を育成するために、以下の短期派遣プログラムおよび中・長期派遣プログラムを設計し、中・長期派遣は本プロジェクト当初から、短期派遣は2017年度から開始した。短期派遣は2週間以内とし、大学院生と実務者を区別して募集した。中・長期派遣は2週間以上1年以内とし、研究者と実務者の区別なく募集した。表3-1にプログラムの概要をまとめる。

表3-1. 若手派遣プログラムの概要

	短期派遣	中・長期派遣
選航期間	2週間以内	2週間～1年間(最終年度10か月)
対象となる取り組み	●知識・技術修得等を目的とした国際会議・コース参加	●フィールド調査やデータ解析、国際共同研究体制の立ち上げや比較研究 ●国際会議・コース参加と研究機関等訪問の組み合わせ ※会議・コース参加のみは不可 ●大学・研究機関等の研究者 ●修士課程以上の大学院生 ●企業・官公庁等の実務者
対象者	●修士課程以上の大学院生 ●企業・官公庁等の実務者	●修士課程以上の大学院生 ●企業・官公庁等の実務者
提出書類	申請書、スケジュール・予算計画書、会議・コース等の概要資料(全5ページ程度)	申請書、受入内諾書、研究計画のロードマップ、予算計画書等(全20～30ページ程度)
審査プロセス	●書面審査のみ ●ヒアリングなし	●一次審査(書面)と二次審査(合議) ●必要に応じて書面でヒアリングを実施
成果発表会	発表資料提供やパネルディスカッション参加	成果発表会の企画・運営

1) 短期派遣：2週間以内

大学院生

・海外で開催される北極研究に関する国際会議や研修コース・サマースクール等に参加したうえで、情報収集や人的ネットワークの構築、知識や技術を修得する取り組み。なお、国際会議参加の場合は、原則として自身の発表を行うことを条件とする。

実務者

・海外で開催される北極に関する国際会議や研修コース等に参加したうえで、情報収集や人的ネットワークの構築、知識や技術を修得する取り組み。なお、国際会議に参加する場合は、自身の発表の有無は問わない。

2) 中・長期派遣：2週間～1年間

・2週間～1ヵ月程度の渡航により、北極科学サミット週間(ASSW: Arctic Science Summit Week)等の北極研究に関する国際会議や北極研究に関するサマーコース等への参加と、渡航先の北極研究に関する研究機関等を訪問して議論や情報交換を行うなどの異なる研究活動を組み合わせた取り組み。

・1～3ヵ月程度の渡航により、北極域のフィールド調査や、共同研究者のラボ等を訪問しデータ分析や議論を行うなどの取り組み。

・数ヵ月～1年間の渡航により、これまでとは異なる分野において研究活動を行うことを目的として、新たな研究者グループと国際共同研究体制を立ち上げ、北極域の異なる地域での比較研究を行うなどの取り組み。

対象分野は、大学院生・研究者については、北極に関する研究分野(自然科学系、人文社会科学系、工学・農学・医学等の

実学系など)、実務者については北極に関する分野全般とした。

応募できる申請者の年齢は原則として40歳未満とした。身分は以下のいずれかとし、2019年度より外国人留学生・研究者も対象とした。

- ・我が国の大学、学術研究機関等に所属する研究者
- ・我が国の大学等に所属する修士課程以上の大学院生
- ・我が国の企業および官公庁、NPO等に所属する実務者（フリーランスのジャーナリスト等個人事業主を含む）

派遣期間は最終年度を除き年度をまたいでの派遣を受け入れた。

派遣前後のフォローを含め、以下の人材育成システムを構築した。

- ・派遣前のオリエンテーションプログラム、短期および中・長期派遣プログラム、派遣後のフォローアッププログラムからなる人材育成プログラムを、国際的中核研究機関や調査・観測拠点等を含む多様なステークホルダーと連携して実施する。
- ・派遣候補者を選定するシステムと、派遣者の達成度を評価する手段を確立する。
- ・アクティブ・ラーニング形式のフォローアッププログラムとして、派遣者が企画・運営する報告会やセミナー等の開催や、先住民を含むステークホルダーへの成果還元システムの構築する。
- ・SNSを用いて派遣者の経験や人的ネットワークを共有できるシステムを展開する。

事業期間をとおして、短期派遣プログラム派遣者15名および中・長期派遣プログラム派遣者25名、合計40名の育成を最終目標とした。

本事業の運営

派遣プログラムの募集は、基本的に年2回の公募によって実施した。予算等の関係で2回の募集後も派遣が可能な場合は、3回目の募集を実施した。募集期間は各回約5週間とした。審査は、人材育成システムのもとに設置された人材育成ワーキンググループの審査委員が行った。審査委員は研究者6名、実務者2名で構成し、研究者・大学院生の各審査は研究者3名で、実務者の各審査は研究者2名、実務者1名の計3名で実施した。審査結果は、募集期間終了から1ヵ月後をめどに、申請書

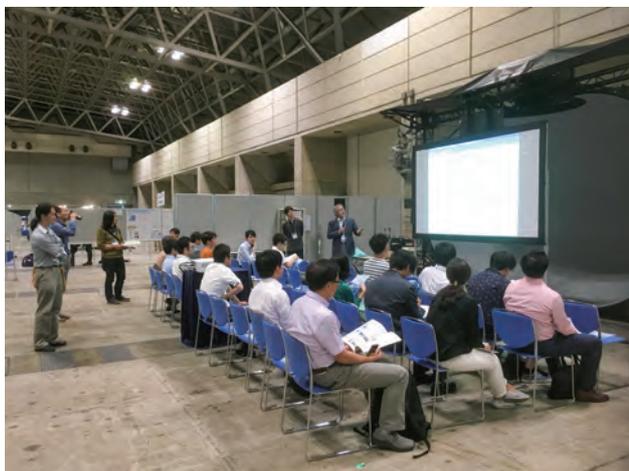


図3-1. JpGUでのトークイベント風景

記載の本人連絡先に書面にて通知した。また、募集締め切り後2ヵ月後に採択者を公表した。

募集に際しては、本プロジェクトのホームページへの掲載はもとより、各学協会のホームページへの掲載、関係機関へのメールによる周知を実施した。本事業をとおしてアンケート調査を実施し、その潜在的申請者の要望も明確になり、それらを反映しながら募集活動を推進した。さらに、JpGU^{※1}などの学会でのトークイベント(図3-1)を積極的に行い、潜在的申請者を得るような努力を行った。

本事業の成果

本事業全期間をとおした派遣プログラムの派遣者数は、短期派遣プログラム22名、中・長期派遣プログラム30名の合計52名である(表3-2)。最終目標の派遣者数40名を超えた。短期派遣プログラムでは2018年度に12名の最大派遣者数に達した。中・長期派遣プログラムでは2016年度に10名の最大派遣者数に達した。派遣実績は本報告書の参考資料IV-3に示す。派遣支援を受けた者が派遣による研究の成果をプロジェクト関係者に発表する成果報告会を年1回程度開催した。SNSネットワークへの参加者は29名に達している。

表3-2. 本事業の派遣者数

	2015	2016	2017	2018	2019	合計
短期派遣			3	12	7	22
中・長期派遣	1	10	6	5	8	30
合計	1	10	9	17	15	52

※表内の数字は各年度の派遣者数

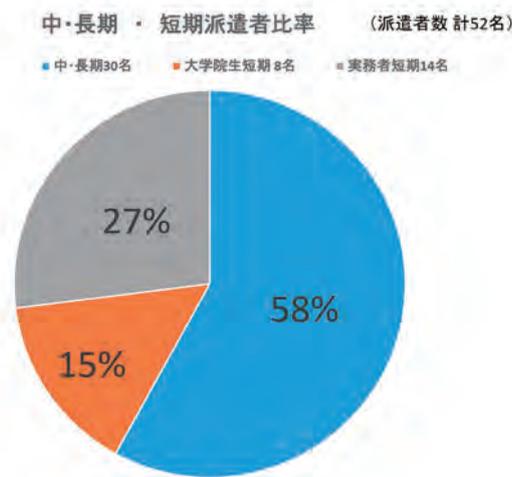


図3-2. 短期派遣、中・長期派遣者数の比率

短期派遣者の内訳は、大学院生8名、実務者14名である。中・長期派遣者の内訳は、研究者14名、大学院生15名、実務者1名の計30名である(図3-2)。

派遣者の男女比は男性71%、女性29%で約3割を女性が占め、理系研究者の男女比(総務省『科学技術研究調査報告』、2013年現在女子14.4%)と比べると女性の比率が大きく、北極

域研究への女性進出を示している(図3-3)。

研究者、大学院生、実務者の派遣者数比率は、研究者27%、大学院生44%、実務者29%で、大学院生の派遣比率が大きく、将来の北極域研究の発展に本事業が貢献する可能性を示している(図3-4)。また、実務者の派遣比率は約3割に達し、本事業は幅広くステークホルダーを包含していると結論付けることができる。

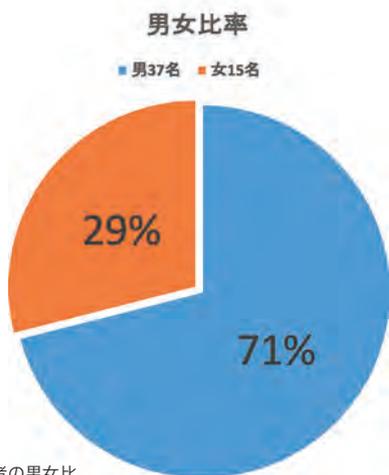


図3-3. 派遣者の男女比

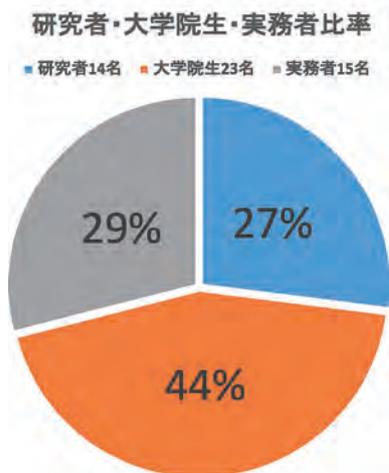


図3-4. 派遣者の研究者・大学院生・実務者の比率

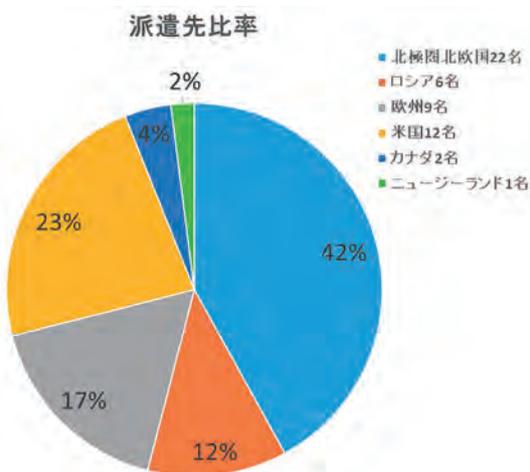


図3-5. 派遣者の派遣先比率

全期間の派遣者52名の派遣先は、北極圏北欧国22名、ロシア6名、欧州9名、米国12名、カナダ2名、ニュージーランド1名である(図3-5)。北極圏北欧国のうち、アイスランドに3名、ノルウェーに12名、スウェーデンに1名、デンマークに4名、フィンランドに2名の計22名である。このうち北極域に関する主要な国際会議である Arctic Circle に3名、Arctic Frontiers に10名を派遣している。欧州への派遣者のうちドイツに4名、うち AWI^{*2} に3名派遣している。ロシアへの派遣者のうち半数の3名はロシア科学アカデミー(RAS: Russian Academy of Science)に派遣している。米国への派遣者のうち5名をアラスカ大学フェアバンクス校(UAF: University of Alaska Fairbanks)へ派遣している。

派遣された大学院生、研究者、実務者の分野は、自然科学系34名、人文社会科学系3名、実学系15名であり、人文社会科学系の派遣者数は1割未満で全体的に少ない。

本事業のアウトカム

本事業全期間通じての論文発表、学会発表などのアウトカムを表3-3にまとめた。派遣から得られた成果を原著論文として発表した論文は14編、シンポジウムプロシーディングは4編、報告書等は2編である。派遣から得られた成果の学会発表のうち、国内学会では、口頭発表3件、ポスター発表1件の計4件である。国際学会では、口頭発表5件、ポスター発表6件の計11件である。この統計は2019年9月30日現在だが、ここには含まれていない2020年3月開催の第6回国際北極研究シンポジウム(ISAR-6: 6th International Symposium on Arctic Research)での発表も多く予定されているため、国際学会の発表数はさらに増加する見込みである。

表3-3. 本事業のアウトカム(1)

成果	形式	件数
原著論文	レフリー制(査読あり)	14
	非レフリー制	0
シンポジウムプロシーディング		4
著書		0
報告・解説・その他		2
国内学会	口頭	3
	ポスター	1
国内ワークショップ・シンポジウム	口頭	6
	ポスター	1
国際学会	口頭	5
	ポスター	6
アウトリーチ		1

また、全期間通じた進学や昇進などのプロモーションを表3-4にまとめた。大学院生では、修士課程修了後に民間会社へ就職した者2名、博士課程から日本学術振興会特別研究員(学振PD)へ進んだ者1名、博士課程を修了して海外研究員になった者1名、修士課程から博士課程へ進学した者3名である。研究者では、博士研究員から学振PDになった者1名、海外特別研

究員になった者2名、学振PDから海外研究員になった者1名、大学共同利用機関法人特別研究員から国立研究開発法人主任研究員に採用された者1名である。大学院生派遣者23名のうち7名(30%)、研究者14名のうち5名(35%)が派遣をきっかけに何らかのプロモーションを得られたことを示している。

表 3-4. 本事業のアウトカム(2)

派遣当時	異動先	人数
修士課程	民間企業へ就職	2
博士課程	学振PD 新潟大学	1
博士課程	海外研究員 インズブルック大学(オーストリア)	1
修士課程	博士課程	3
博士研究員	学振PD 東京大学大気海洋研究所	1
	海外特別研究員 マッセー大学(ニュージーランド)	2
	アラスカ大学(アメリカ)	
学振PD	海外研究員 Austral University of Chili(チリ)	1
大学共同利用機関法人特任研究員	国立研究開発法人 主任研究員	1

※ 2019年9月30日現在

注:

※1 JpGUは公益社団法人日本地球惑星科学連合(Japan Geoscience Union)の略称である。本組織は、地球惑星科学を構成するすべての分野および関連分野をカバーする研究者・技術者・教育関係者・科学コミュニケーター、学生や当該分野に関心を持つ一般市民の方々からなる個人会員、地球惑星科学関連学協会を団体会員、事業を援助してくれる賛助会員から構成される学術団体である。

※2 AWIはアルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所(Alfred-Wegener Institute for Polar and Marine Research)の略称で、ドイツのヘルムホルツ協会が管轄する16の組織を構成するひとつの研究所であり、極地海洋研究に関するドイツの国立研究センターである。本研究所は1980年に設立、地球物理学者アルフレッド・ウェゲナーの名前を冠する。

まとめ

次世代の北極域若手研究者・実務者の育成に焦点をあわせて制度設計し、約5年にわたり、若手研究者海外派遣支援事業を実施してきた。その結果、短期派遣プログラム派遣者22名、中・長期派遣プログラム派遣者30名の合計52名の派遣を実現した。派遣者は最終目標の合計40名より12名多く、当初の目標を30%超えることができた。派遣先としても北極圏国8カ国へ42名を派遣しており、全派遣者の80%に達した。北極圏国以外でも、北極域研究で世界をリードするドイツのAWIに3名を派遣している。

プロモーションを得た大学院生、研究者が派遣者全体の30~35%を占め、本事業をきっかけに3分の1の派遣者が将来への発展のチャンスを得ていることは本事業の成果のひとつといえる。

第4章

国際共同研究の推進

4.1

第4章の概観

末吉 哲雄・榎本 浩之・河野 健・齊藤 誠一

はじめに

本章は本プロジェクトの主要な活動である「国際共同研究の推進」メニューの成果について述べる。第1章で述べたとおり本プロジェクトの活動は3つの柱から構成されるが、プロジェクトの目的達成という観点からは大きく科学的な成果の創出（北極環境変化の実態の科学的な把握と予測研究）とその成果の発信（国内外のステークホルダーに向けた効果的な情報提供）というふたつに整理することができる。本メニューはこの前者に相当し、その成果は本プロジェクトの目的達成のための基礎となる部分である。

メニューの構成

プロジェクトの科学研究活動である本メニューの内容としては、対象とする北極の急激な環境変化の現状と国際協力を重視する背景のもと、北極評議会（AC：Arctic Circle）の作業部会・専門家グループ等への具体的な貢献を視野に入れること、また国際共同研究であることがプロジェクト公募時に求められた。北極域は中央北極海の一部を除きほぼ全域が北極国の主権下にあるため、すべての研究が何らかの形で必然的に国際共同となる性質を持つが、本プロジェクトでは日本のこれまでの北極研究の蓄積と長所を活かしつつ、北極諸国の研究機関との共同研究、あるいは国際プロジェクトの一部として実施される科学研究を中心に構成した（本報告書の1.2を参照のこと）。自然科学系テーマにおいても社会へのインパクトを意識しつつ、人文社会科学系研究と連携した学際的研究も重視して、以下の8つのテーマ（テーマ1～8）を設定して研究活動を実施した。このうち、テーマ1～6は自然科学系テーマであり、それぞれの課題設定にもとづいて北極の環境変化についての新たな知見を見出すべく研究が実施された。テーマ7は人文科学・社会科学のテーマであり、北極の環境変化が社会・経済へ与える影響を明らかにするために自然科学系と連携した研究を実施した。テーマ8はプロジェクトのデータセンターとしての役割を果たしつつ、データの可視化や船舶への配信などのデータサービスを実施した。

テーマ1：気象・海水・波浪予測研究と北極航路支援情報の統合

本テーマでは、北極域の気象・海水・海洋の予測精度向上に向けて、(1) 持続可能な北極観測網の構築を目指した国際集中観測とデータ同化を用いた観測システム実験、(2) 現業の世界の気象予報データを利用した北極変動を起因とする極端気象の

予測可能性研究、(3) 北極海航路上の海水予測と最適航路探索・波浪予測手法の開発を実施した。

テーマ2：グリーンランドにおける氷床・氷河・海洋・環境変動

本テーマでは、(1) グリーンランド最大の氷流の上流部で実施されているEGRIP計画に参加、氷床の変動メカニズムとその気候変動との関わり方の解明に取り組む一方、(2) 近年の環境変化が加速する一方でデータの空白域でもあるグリーンランド氷床の北西部に着目し、気候変動の影響を受けた氷河氷床と海洋の変動と相互作用、さらに生じている自然災害や社会への影響に関する研究を実施した。

テーマ3：北極気候に関わる大気物質

本テーマでは、北極の温暖化に重要な役割を果たす大気物質、特に温室効果気体であるCH₄や、太陽放射収支に影響するBCなどの短寿命気候影響物質（SLCF：Short-lived Climate Forcers）に着目した研究を実施した。SLCFの放射影響や削減効果に残る不確定性を低減するため、正確な動態把握、モデルの高度化、信頼性の高い収支推定を目指した。温室効果気体については、大気中濃度観測にもとづくトップダウン解析と、発生源観測にもとづくボトムアップ解析の両方を実施し、雲微物理とエアロゾルについても研究を実施した。

テーマ4：北極海洋環境観測研究

本テーマは、北極域における海洋環境変動の実態の理解と、その低次生態系や気候学的な影響の評価を目的として、(1) 海水減少にともなう北極海洋環境の変化と水循環・気候変動との関係の理解、(2) 温暖化・酸性化によるプランクトンへの影響評価、(3) 北極海淡水収支の季節・経年変動の理解、(4) アラスカ沿岸における海水動態変動の理解、を目指して研究を実施した。

テーマ5：北極気候変動予測研究

本テーマは、北極域に関連した気候変動の予測可能性を理解するため、(1) 気候予測可能性の科学的基盤の確立、(2) 中長期気候変動予測の手法の確立、を目指して研究を実施した。このために必要なステップとして、北極域環境を構成する大気・海洋・雪氷など多圏間の相互作用、および北極域外の気候への遠隔影響に関する研究、気候モデルを利用した季節から数十年の北極域気候の予測に関する研究を実施した。

テーマ6：北極生態系の生物多様性と環境変動への応答研究

本テーマは、北極域の環境変動に対する北極生態系の応答と生物多様性の変化の理解を目的とした。海洋生態系に関しては、生物資源の持続的利用と生物多様性の保全に向けた提案を行うため、海水・水温などの環境変化、漁業や海洋汚染、航路利用などに対する北極海生態系の応答を明らかにした。陸域生態系に関しては、大型哺乳類、海鳥、陸上植物、微生物などに着目し、生物相の現状と生態系機能の解明を目指すとともに、一部の研究課題では政策決定者向けの保全策を提供した。

テーマ7：北極の人間と社会：持続的発展の可能性

本テーマは、温暖化の進展により経済開発の可能性が高まった北極圏の状況を受け、このような開発の持続可能性を考察することを目的として設定した人文科学・社会科学の研究テーマである。経済開発、国際政治、環境と人間、の3つの観点から北極環境変化の影響を評価した。北極の環境変化が社会へ与える影響を明らかにするという位置付けから、基本的に自然科学系テーマと連携して研究を実施した。

テーマ8：北極域データアーカイブシステム

本テーマは、プロジェクトのデータセンターとしての役割を担い、海外の主要なデータセンターと連携して各種の研究データを国内外に発信する一方で、学際的な共同研究を促進するためのデータ解析プラットフォームの開発を行った。また、研究船舶の北極航海サポートのために気象・海氷予測データを配信し、社会実装を視野に入れた技術開発を行った。

本プロジェクトの特徴的な研究成果

本メニューでは、北極圏国の研究機関と連携する形で、本プロジェクトの国際連携拠点や海洋地球研究船「みらい」など国内外の研究基盤を有効に活用し研究を進めてきた。その成果について概観すると、プロジェクト全体を通じて、以下の点で特徴的な成果をあげてきたといえる。A) 日本のこれまでの北極研究による蓄積に立脚して国際的に認知された成果をあげていること、B) 日本が提案や議論を主導した国際的な観測計画から多くの成果があがっていること、あるいは日本の測定技術が基準となるなど、世界の調査・観測を牽引する役割を担ったこと、C) 異分野横断的な研究として、特に北極の地域住民と情報交換を行いながら実施する調査観測スタイルや環境教材の作成、教育ツールの作成などにおいて、今後の研究のモデルケースとなったことである。

以下、一部ではあるが上記 A) ～ C) の具体例をあげる。

A) の例

- ・「みらい」による初の初冬航海を実施し、初冬季の貴重な観測データを取得したこと
- ・温室効果気体に関し、長期観測データを航空機観測、地上観測の両面で継続して取得・公開していること
- ・北極の変動が中緯度気象に与える影響について国際的な成果を複数あげ、ACの作業部会における国際的な議論をリードしたこと
- ・海氷分布の季節予報システムの改良を進め、予測結果を毎年ウェブサイトで公開するとともに、海氷厚の推定手法を改良し、あわせてADSでの公開を行ったこと
- ・グリーンランドのEGRIPで掘削・分析に参加し、気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)などに貢献するデータを提供することが期待されること、氷の流動速に関して実験から新しい知見を見出したこと

B) の例

- ・極域予測年(YOPP: Year of Polar Prediction)において、

日本が提案を主導した国際的な北極気象集中観測の実施と予測精度を高めるための最適観測頻度の実証が行われたこと

- ・高精度のBC観測技術により、日本の観測を基準として従来の観測値の過大評価を明らかにし、ACの作業部会・専門家グループ会合においても認められたこと
- ・太平洋北極グループ(PAG: Pacific Arctic Group)の国際共同・連携観測を主導し、「みらい」による総合的な海洋観測を実施したこと

C) の例

- ・ロシア永久凍土地域における温暖化が従来の牧畜に与える影響について明らかにし、また日露の研究者グループで地域住民を対象とする環境教材を作成したこと
- ・北極の環境変化を題材にしたボードゲームを開発し、日本科学未来館での体験会参加者やメディアのみならず、国際学会においても参加者から高い評価を受けたこと
- ・グリーンランドで、地域住民と定期的にワークショップを開催し、データを提供する一方で在来知にもとづく情報提供を受け、さらに観測調査への協力を得るなど双方向の関係を築いたこと
- ・海洋・陸域の生態系研究において、国際的な規制の枠組みへの情報提供や保全策の提言を行ったこと

以上に加えて、期間を限定した包括的研究プロジェクトにおいては一般に困難とされるデータマネジメントについても、本プロジェクトではメタデータの収集・公開、ならびに実データへのアクセスの確保(データセンターとしてアーカイブ、または海外のデータセンターへリンク)を実現した点で、オープンデータ・オープンサイエンスへ貢献し、データ共有が共通の課題である北極研究において特徴的な成果をあげたといえる。

本メニューの成果指標について

本プロジェクト期間に研究成果として発表された査読ありの学術論文は合計で570件^{*1}となった。一方、人文社会科学、ならびに工学の分野を含み、目的達成のために異分野間連携が求められる本プロジェクトにおいては、自然科学の成果を社会に結び付ける多様な連携研究を奨励してきた。したがってその成果は、学術雑誌への論文発表のほか、専門書および啓蒙書籍や環境教育資料、シンポジウムやセッションの企画、講演会でのパネル討論など、さまざまな形態で公開されており、成果指標としては発表論文数やその被引用数などの一般的な指標に加えて、幅広い活動内容に対する総合的な観点からは高く評価されるべきものであるといえる。

注:

※1 2019年9月30日時点

4.2

テーマ
1気象・海氷・波浪予測研究と
北極航路支援情報の統合

4.2.1 全体概要

猪上 淳

本テーマの目的

海氷の減少にともない、北極海が商業航路として利用されるようになってきた。北極海航路^{*1}の利用や資源開発等の経済活動は、今後ますます加熱すると考えられる。また、北極圏の雪氷変動が一要因として考えられている大陸上の異常寒波形成などは、社会的・経済的にも影響が大きい。したがって、高精度な北極域の気象・海氷・波浪予測情報のニーズは、北極海でのローカルな活動に限らず中緯度域でも高まると予想される。しかし、予測計算に必要な北極海上の気象観測データは限定されるため、予測の不確実性をどのように軽減するかが問題となっている。本テーマでは、想定される社会的なニーズにもとづいた北極域の気象・海氷・海洋の予測精度向上に向けて、世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization)の極域予測プロジェクト(PPP: Polar Prediction Project, Jung et al., 2016)の枠組みのもと、北極域で国際共同研究を実施した。具体的には(1)持続可能な北極観測網の構築を目指した国際集中観測とデータ同化を用いた観測システム実験、(2)現業の世界の気象予報データを利用した北極変動を起因とする極端気象の予測可能性研究、(3)北極海航路上の海水予測と最適航路探索・波浪予測手法の開発、の3つを軸とした観測的・数値的研究を推進し、北極域を取り巻く予測可能性を包括的に理解することを目標とした。具体的には海洋地球研究船「みらい」を用いた高層気象観測や波浪ブイ観測などを実施するとともに、地球シミュレータ等を用いたデータ同化・予測実験等から観測データの影響評価を行った。

本テーマでは、気象・海氷・波浪・工学など多岐の分野の研究者が、観測・数値モデル・データ同化などを駆使して研究を遂行した。成果の詳細は各論にて解説するが、ここでは本テーマ内における共通項に着目し、全体像を示す。

北極低気圧

北極海上の低気圧は、強風・海水移流・波浪・着氷・濃霧による視程の悪化などをもたらすため、北極海を航行する船舶にとって影響力の大きい存在である。また、海氷の減少は波による海岸侵食を引き起こし、北極域の先住民等の生活を脅かしつつある。したがって、北極域における低気圧の正確な予測は、人間社会に対して重要な課題となってきた。

そこでまず、極端に発達した北極低気圧が現業予報機関でどの程度確からしく予報できているかを、5つの気象予報機関(CMC、

ECMWF、JMA、NCEP、UKMO)の予報データセット(TIGGE: THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)を用いて調べた。その結果、3.5日以下の予報期間において北極低気圧が予報される存在率は0.9以上で、これは北半球中緯度域で見られる温帯低気圧の予報精度よりも低かった(Yamagami et al., 2018a)。これは予報に使われる北極域での観測データが少ないことが一要因であると考えられる。予報機関別にみると、欧州中期予報センター(ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)の北極低気圧の予報が、存在率・位置・中心気圧・強さにおいて、予報期間が1日長くても他機関の予報より高精度であることがわかり、北極域での予報情報としての利用価値が高いことが示された。

この高精度のECMWFの予報データを強制力として用いた海水・海洋結合同化システムTOPAZ4(Xie et al., 2017¹⁾)の出力データについて、北極海航路の海域の一部である東シベリア海の海水厚の予測精度を、大気予測可能性の観点から調べた。3年分の海水厚の予測出力を解析した結果、初夏の海水厚分布は3日以下の予測期間において高精度に予測できたものの、それ以上の予測期間になると急激に予測精度が悪化した(Nakanowatari et al., 2018a)。これは、総観規模の大気変動(低気圧等)の予測可能性にともなう影響によるものであり、Yamagami et al. (2018a)とも整合的な結果を得た。さらにOno et al. (2016)は、極端に発達した北極低気圧の事例(Yamazaki et al., 2015²⁾)に関して、北極域でのラジゾンデの追加観測をデータ同化した大気強制で海水・海洋結合モデルを駆動することによって、より高精度に海水分布を予測できることを示した。気象観測の強化で海水予測が高精度化されるのは、低気圧の事例だけではなく高気圧の事例にも当てはまることも示されている(Inoue et al., 2015)。したがって、気象予測に含まれる誤差情報を把握することは、北極海航路上の海水分布の把握、および安全な船舶の運航に極めて重要だといえる。

大気強制の不確実性は、北極海の波浪予測にも影響がおよぶ。2016年8～10月に行われた「みらい」北極航海(MR16-06)によってポーフォート海に投入された2基の波浪ブイのデータを解析した結果、4m以上の高波高の事例が9月と10月にそれぞれ観測され、それらは低気圧による強風由来のものであることがわかった。ECMWFが提供するデータセットERA-Interimの大気再解析データでは波高は概ね再現されていたが、10月の事例については過小評価されていた(Waseda et al., 2018b)。波浪モデル(Wave Watch III)による再現実験では、与える再解析データの風を差し替えてもこの過小評価の結果は変わらなかった。10月の再解析データに同化されている観測データの数を調べると、9月の観測数の2割程度にとどまり、それが大気強制の不確実性を増大させたものと考えられる(Nose et al., 2018)。

北極域の追加観測の効果

Inoue et al. (2015)やOno et al. (2016)が指摘するように、北極域での追加観測は当該地域の気象予測・海水予測に有効である。しかし、中緯度の気象循環への影響については、冬季・

夏季ともに十分に実証されていない。中緯度で頻発する極端気象による災害リスクを軽減する可能性など、北極の研究活動が社会へどのような恩恵をもたらすかを調査することは本プロジェクトにとって重要な視点である。

本テーマでは、冬季と夏季のふたつの典型的な気象現象の予測可能性について、北極の追加観測の影響を調査した。冬季については、日本域と北米東海岸で卓越する寒気吹き出しの事例を扱った。2015年2月に実施された北極域でのラジオゾンデの追加観測の情報は、北極海上の対流圏上部の渦位偏差に取り込まれ、その流れに依存して情報が伝播することが明らかとなった(Sato et al., 2017)。渦位偏差は中緯度の温帯低気圧の発達に重要であるが、その渦位の再現性が追加観測で精緻化されると、4日以上予測期間において、大陸東岸で西高東低の冬型気圧配置を構成する低気圧の強さや経路の精度が向上することが示された。同様のメカニズムは、夏季の日本域での台風や北米のハリケーンにおいても確認され(Sato et al., 2018a)、北極域の追加観測が予測の初期場に取り込まれることによって、中緯度の気象現象の予測精度が向上する場合があることを実証した。

前段「北極低気圧」の結果もふまえると、北極域での気象観測を強化することは、中・高緯度の気象予測、および北極域の海水・波浪予測の精度向上に貢献することから意義深い活動であることは確かである。しかし、観測にかかるコストを考慮すると、観測頻度を最適化する必要もある。Inoue et al. (2015)では、「みらい」北極航海で実施した1日8回のラジオゾンデ観測データについて、データ同化する頻度を漸減させる観測システム実験を行った。その結果、観測頻度は多いほど予測精度の向上は見込まれるものの、4回と8回では大きな差は生じず、観測コストを考慮すると4回が最適であると結論付けている。この結果はPPPにおける集中観測期間のラジオゾンデの観測頻度を定める重要な成果となった。

「みらい」北極航海における支援体制の構築

気象・波浪・海水予測における不確実性の把握は、北極海を航行する際の基礎情報となる。しかしながら、実際には気象情報のエンドユーザーは、各気象機関の予報情報の不確実性を吟味せずに、扱いやすい予報情報に頼っているのが現状である。北極海では通信環境に限られているため、研究者がどの気象機関のどの予報情報が有益かを説明することが望まれる(Jeuring et al., 2019³⁾)。

2018年の「みらい」北極航海(MR18-05C)では、日本の研究船でははじめて、チュクチ海での初冬(11月)航海に挑み、気象・海水・波浪の予測可能性研究のための高頻度のラジオゾンデ観測、海水縁でのCTD観測、波浪ブイ観測などを実施した。初冬の航海は海水や気温などの制限が加わり例年より高度な判断が必要となるため、必然的に気象・海水の予報データを利用する機会が増えた。この航海では、PPPのYOPPにおけるサポートとしてECMWFやカナダ環境・気候変動省(ECCC: Environment and Climate Change Canada)の気象・海水予報データを船上にてリアルタイムで利用した。テーマ8が中心

となって開発した航路支援サービス「VENUS」が、この予報データを自動的に取得・可視化し、船内で利用可能にすることにより、研究者や乗組員の負担を大幅に軽減した。

定線観測の場所や期間の設定、ベーリング海峡を南下するタイミングの決定には、海水の張り出しの予測が極めて重要となるが、上記の予報データは日々の観測ミーティングで常に検討され、首席研究者および船長の意思決定に大いに役立った。特に研究者が予報誤差等も含めた解説をすることで、船内の誰でもアクセス可能な「VENUS」を通じて、船長・乗組員が予報データを解釈できる機会を提供できた。これは、観測活動と安全な航海を両立するうえで極めて貴重なステップである。

取得された観測データは、予報データの検証にも利用可能である。航海中にはECMWFの気温予報が船上の気温よりも3°C程度高めに予報される時期があり、その原因としてECMWFの海水密度が小さく見積もられていること(Nose et al., submitted)などが想像された。そのような情報について、ECMWF主催の観測研究者とモデル研究者が集まるワークショップでECMWFの海水モデル担当者と直接対話する機会を作り、交換することができた。「みらい」による気象・海洋観測の結果が現業予報のシステムを改善させるきっかけを与えたことは、本プロジェクトの研究成果を適切な形でステークホルダーへ情報伝達できた一例といえる。

北極海航路上の海水予測を高分解能で実施するために、本テーマにおいても海水・海洋結合モデルIcePOMによる海水予測情報を「みらい」に提供した。ECMWFやECCCに比べて海水温が低めに設定され、このモデルの予測結果では海水が形成されやすいなどの不具合を航海中に見出し、改良の糸口を掴んだ(De Silva et al., 2020)。これを受けて境界条件の設定などを改良し、ECCCの再現性の高い海洋構造を初期場にECMWFの10日間大気予報データを強制力としたところ、2019年の「みらい」北極航海(MR19-03C)において、10日先までの高解像度(2.5km)の海水予測が実現した。

「北極海航路支援情報の統合化」とは?

本テーマでは、当初テーマ8と共同して、海水予測にもとづいて最適な航路そのものを計算し、それを北極海を航行する船舶に提供するシステム(北極海航路探索システム)の構築を試みていたが、海水厚を適切に設定せずに、マイクロ波放射計(AMSR2等)による海水密度のみで航路計算するのは不相当であると判断した。また、実際の航路予測には、高分解能の海水の予測データが必須である。そこで本テーマでは、まず海水密度と海水厚をもっともらしく再現・予測しているプロダクトを検討した。その結果、ノルウェーのナンセン環境リモートセンシング研究センター(NERSC: Nansen Environmental and Remote Sensing Center)で開発されたTOPAZ4を用いた予測データが、現在得られる海水の中期予測データとして最適であることを示した(Nakanowatari et al., 2018a)。これは、1週間程度の予測期間で最高性能を誇るECMWFの気象予報データを強制力として海水を予測しているため、大気予測に起因する不確実性が低い海水予測データといえる。TOPAZ4

による海氷情報と航路上の航跡・速度データの関係調べると、船の行動は海氷状況に依存する場合があることが示された(Nakanowatari et al., 2018a)。しかし、実際の船舶の氷中航行特性を解析すると、統計的には気象条件・海氷条件などとの関連は薄く、経験的な航路選択や意図的な速度調整などの影響が支配的で、北極海航路探索システムを提供するには別のアプローチが必要である。現状では船舶の仕様が公開されることはまれであるため、ビジネスを生業とする特定の船社・船主に対して、汎用的な航路探索システムを本プロジェクトとして提供することは極めて困難である。

一方で、「みらい」北極航海で活用実績を積んだ「VENUS」は有効な情報統合ツールであることが示された。特にECMWFとECCCの気象・海水予報データ、あるいはそれらのよいところを取り込んだIcePOMによる海水予報データは、MR18-05C、MR19-03Cにおいて船の行動の意思決定に積極的に活用され、これが事実上の「北極海航路支援情報の統合化」としての成果といえる。

本プロジェクト終了後も「VENUS」なしでは、日本の北極航海は成り立たないであろう。その際、船主・運航会社は独自にECMWF等の高精度の予報データを購入・入手する必要がある。また、ここで強調しておくべきことは、「VENUS」の導入とともに、その予測情報の便益を的確にユーザーに説明できる研究者の存在である。各気象機関の予報情報の癖、パラメーター間の関係、不確実性に関する基礎的な知識、予測計算における観測データの重要性などを、専門の研究者が利用者(船長、アイスパイロット、首席研究者等)に対して航海前に説明する機会があると有効である。この過程は今後、北極域の研究砕氷船などが運用されることになった場合においてさらに重要となる。

持続可能な観測体制へ向けた展望

YOPPにおける国際的な研究成果から、高頻度のラジオゾンデ観測は北極域・中緯度域の気象予測に有効である場合があること(Inoue et al., 2015; Sato et al., 2017, 2018a; Lee et al., 2019a)、その効果は特に衛星データの同化の効果薄い対流圏下部や冬季に有効であること(Lawrence et al., 2019⁴⁾; Day et al., 2019⁵⁾、ロシア域の観測精度は低いこと(Naakka et al., 2019⁶⁾)などが示されている。

観測誤差に関しては、本テーマではあまり扱っていないが、良質な観測データを提供することは北極域の観測網の持続可能性を考えるうえでの大前提である。ロシアのケープ・バラノバ基地においてAARIと共同で実施したラジオゾンデ観測データは、現業のロシアのラジオゾンデ観測の精度問題を検証する重要なデータ源である(Hori and Inoue, submitted)。データ解析の結果、世界で広く使われているフィンランドのバイサラ社製のセンサーに比べて、ロシア製のセンサーは十分な精度で観測できていないことが明らかとなり、Naakka et al. (2019)⁶⁾と矛盾しない結果となった。これは日本の気象予測にとって、風上であるロシア域の大気の基本場の精度がよくないことを示唆する。

ラジオゾンデ観測全般における懸念事項としては、以下のふたつの理由から持続可能な観測システムとはいえない状況と

なっている。ひとつは、環境負荷である。ゴム気球が破裂し観測が終了すると、陸上/海上に落下した測器はごみとなる。国連が提唱する持続可能な開発目標(SDGs: Sustainable Development Goals)やG20大阪サミットでは、海洋ごみを大幅に削減する目標が掲げられ、気象分野としても早急に対策を講じる必要がある。ふたつ目は、浮力材としてのヘリウムガスの枯渇である。中東の地政リスクおよび北米の産出方法の変革にともない、2018年以降調達量が回復する見込みは立っていない。観測資源の確保・運用に関する最適化が目下の課題であり、既存のメジャーな気象観測システムを新観測システムに大きく変革・転換させることが今後必要となる可能性が高い。北極海航路上での各船舶において、予測情報の利用者自らが観測活動にも参画する体制になれば、航路上の気象・海水予測精度の向上、あるいはロシア域での観測精度向上にもつながるだろう。

まとめ

本テーマでは、北極域の観測データは数日程度の精緻な気象・波浪・海水予測に極めて有効であること、中緯度の気象現象の予測にも効果があることなど、YOPPの国際共同研究の枠組みを利用して、効果的に成果を発信した。さらにECMWF等の現業の気象・海水予測データを活用することで、研究航海の安全と観測活動の両立を図ることに成功し、北極海を航行する際の予測情報の利用に関するモデルケースを示すことができた。また、大気と海洋の現業予報における初期値・予報値の最適な組み合わせを検討し、高空間分解能の海水・海洋結合モデルIcePOMの開発・精緻化に成功した。この予測情報の統合化の結果、北極海航路上の10日程度の海水予測を行う基盤モデルの目処が立った。

4.2.2 極端気象現象の予測可能性

松枝 未遠・山上 晃央・堀 正岳

はじめに

北極海航路および北極空路を利用する際に、北極大気の詳細な予測は航路決定のための重要な情報となる。本項では、北極大気の詳細な予測可能性研究のひとつとしてアンサンブル予報データを用いた研究について述べる。まず、TIGGE Museum^{※2)}およびS2S Museum^{※3)}の管理・運営について述べる。次に、北極域の顕著現象のひとつである北極低気圧の予測可能性についての解析結果について説明する。最後に、気候変動リスク情報創生プログラムによる「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)」(Mizuta et al., 2017⁷⁾)を用いた、北極・中緯度相互作用について解析した結果について説明する。

準リアルタイムアンサンブル予報プロダクトウェブページ

TIGGE MuseumとS2S Museumは、1～2週間先の気象予測精度の向上を目的としたWMOのThe Observing system Research and Predictability Experiment (THORPEX) プ

プロジェクトによる中期アンサンブル予報データベース TIGGE (Swinbank et al., 2016) のデータ、および2週間～2ヵ月程度先の気象予測精度の向上を目的とした Sub-seasonal to Seasonal (S2S) プロジェクトによる延長アンサンブル予報データベースのデータ (S2S データ、Vitart et al., 2017⁸⁾) をそれぞれ用いた準リアルタイムアンサンブル予報プロダクトウェブページである。TIGGE Museum および S2S Museum の管理・運営では、新規プロダクトの追加や各予報機関のモデルの仕様変更への対応を行った。特に S2S Museum については本プロジェクトと同時期にデータ提供が開始されたため、ウェブページの立ち上げから着手した。S2S Museum では14種類のプロダクトを予報初期時刻から21日遅れで提供しており、そのなかには海水氷接度の予測や北極域での地上風、地上気温、降水の予測、北極域の気象へ影響をおよぼすさまざまなテレコネクション (大気の大気遠隔応答) の予測などが含まれる。図4-2-1は海水氷接度と海面水温の予報プロダクトの例であり、2019年8月15日を予報初期日として4週間先 (9月6～12日) を対象としたものである。航路上である東シベリア海およびバレンツ海では、大部分の数値予報機関が海水に覆われていない予報を示す。一方、ラプテフ海付近では、海水縁が陸まで届く予報を示す機関もあれば、陸と海水縁の間が開いている予報を示す機関もある。また、中国 (CMA: China Meteorological Administration) やフランス (METFR: Météo France) では、9月の前半に海水の大部分が融解する予報となっている。このように、予報プロダクトを利用することで、複数の数値予報機関による予報を容易に比較でき、予報の不確実性の把握が可能となる。

S2S Museum は1ヵ月で約100名のアクティブユーザーがおり、特に顕著な大気現象が起こった際にアクセス数が増加することから、予測可能性研究において活用されていることがわかる。

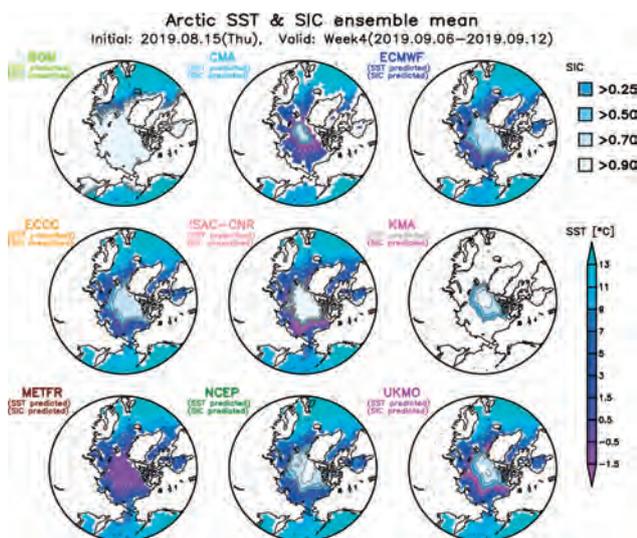


図4-2-1. S2S Museumにおける海水予測プロダクト。2019年8月15日を初期日とする4週間先 (2019年9月6～12日) を対象とするアンサンブル平均の予測。各パネルはそれぞれ異なる現業数値予報機関による予報を示す。

北極低気圧の予測可能性研究

北極低気圧は、強風・海水移流・波浪・着氷・霧による視程の悪化などをもたらすため、北極海を航行する船舶や航空機に対して影響の大きな現象である。また、海水の減少は波による海岸侵食を引き起こし、北極域の先住民の生活を脅かしつつある。したがって、北極低気圧の正確な予測は、人間社会に対して重要な課題となってきた。本研究では、特に顕著な北極低気圧の予測可能性を、現業数値予報モデルにより調べた。顕著な北極低気圧事例として、最盛期の中心気圧が980hPa以下、中心位置が70°N以北、上層の暖気核 (250hPaの温度偏差の中心から800km平均) が5K以上という基準を用いた。

2008～2016年の夏季 (6～8月) に発生した北極低気圧のうち、顕著な事例は10事例存在し、2016年8月の事例のように1ヵ月近く持続する事例もあった (Yamagami et al., 2017など)。これらの10事例を対象として、北極低気圧の最盛期における存在・中心気圧・中心位置が最先端の現業数値予報モデル (カナダ (CMC: Canadian Meteorological Centre、図4-2-2 黄破線)、欧州 (ECMWF、図4-2-2 青破線)、日本 (JMA: Japan Meteorological Agency、図4-2-2 赤破線)、米国 (NCEP: National Centers for Environmental Prediction、図4-2-2 緑破線)、英国 (UKMO: United Kingdom Met Office、図4-2-2 紫破線)) でどの程度予測できていたかを調査した。

最盛期における北極低気圧の存在 (図4-2-2 (a)) は、6.5日前からの予測ではすべての機関のモデルが8割以下 (ECMWF以外は6～7割) のアンサンブルメンバーのみしか予測できていなかった。5.5日前からの予測においてECMWFで、4.5日前からの予測ですべてのモデルにおいて存在率が8割を超え、3.5日前からの予測でようやくすべてのモデルで9割を超えた。このことは、北極低気圧そのものの発生予測の改善が、現時点での数値予報モデルの1番の課題であることを示している。北極低気圧の最盛期の中心気圧の予測精度 (図4-2-2 (b)) は、6.5～4.5日前からの予測ではJMAがもっとも低く、3.5～0.5日前からの予測ではNCEPがもっとも低かった。すべての予報時刻において、CMCとECMWFがもっとも精度が高く、北極低気圧の発達を捉えられたメンバーが多かった。また、最盛期の位置の予測 (図4-2-2 (c)) では、5.5～2.5日前からの予測でCMCがもっとも精度が低く、1.5～0.5日前からの予測ではECMWF以外の機関のモデルは同程度の精度、0.5日予測ではECMWFとJMAがもっとも高い精度を示した。10事例の顕著な北極低気圧の平均的な半径を基準とすると、中心位置を平均半径の半分 (469.1km) 以下の誤差で予測できるのは、ECMWFが4.5日前の予測から、JMA、NCEP、UKMOが3.5日前の予測から、CMCが2.5日前の予測からであった。

これらの結果から、最盛期における北極低気圧の存在率、中心気圧、中心位置の予測精度は、平均的にECMWFがもっともよく、その予測精度は他機関と比較して1日程度の差があることがわかった。すなわち、ECMWFの4日予報の精度が他機関の3日予報の精度に相当することとなる。一方で、現業の数値予報モデルを用いても2～4日前からしか正確な北極低気圧の位置が予測できないことが示された。これは現業アンサ

ンブル予報による北極域の平均的な予測スキルである7～9日 (Jung and Matsueda, 2016⁹⁾) と比較してかなり短い。また、顕著な北極低気圧の発生、維持、発達への予測にも課題があることが示された。

さらに、米国大気海洋庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) が提供する長期アンサンブル再予報データ (Global Ensemble Forecast System (GEFS) 再予報) を用いて同様の解析を行い、北極低気圧の中心気圧や予測スキルの長期変化傾向について調査した。1985～2016年の夏季には26事例の顕著な北極低気圧が発生し、もっとも発達した事例は1995年8月と2012年8月の事例 (中心気圧964.7 hPa) であり、もっともサイズの大きな事例は1988年6月の事例 (半径1,512.8km) であった。26事例の北極低気圧の中心気圧・サイズ・発生頻度について、長期変化傾向はみられなかった。26事例の北極低気圧を対象として予測スキルを調べた結果、9割以上のアンサンブルメンバーが北極低気圧の存在を予測できていたのは最盛期の3日前の予測からであった (図4-2-2 (a) 黒線)。また、最盛期の3日前の予測から、平均的な中心位置の予測誤差が26事例の最盛期における平均半径の半分 (433.1 km) 以下となり (図4-2-2 (c) 黒線)、そのときの中心気圧の予測誤差は6.1hPaであった (図4-2-2 (b) 黒線)。

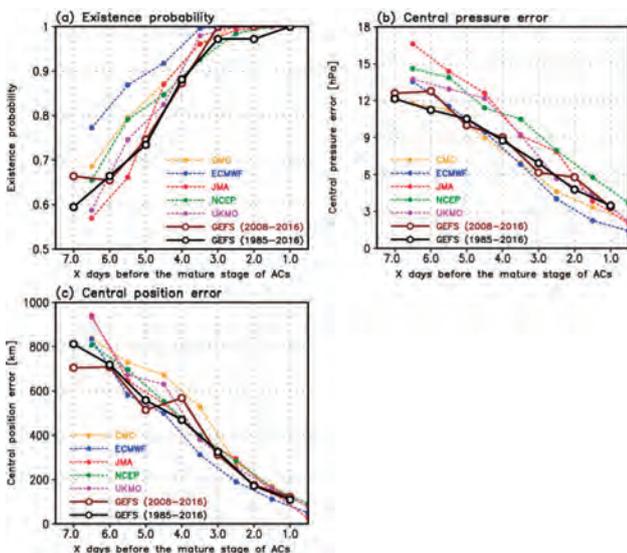


図4-2-2. 北極低気圧の (a) 発生予測率、(b) 中心気圧誤差、(c) 中心位置誤差。黒と茶はそれぞれ26事例 (1986～2016年) と10事例 (2008～2016年) に対するGEFS再予報、破線は10事例 (2008～2016年) に対する代表的な5つの数値予報機関の現業アンサンブル予報を示す。

これらの結果と2008～2016年の10事例に対する予測スキル (図4-2-2 茶色線) は同程度であった。この結果は、顕著な北極低気圧の予測スキルには長期的な改善傾向がみられないことを示唆している。個々の事例の予測スキルからも同様の傾向がみられ、顕著な北極低気圧の予測スキルは事例依存性が高いことが示された。10事例に対するGEFS再予報の予測スキルとTIGGEデータによる現業アンサンブル予報の予測スキル (図4-2-2 破線) を比較した結果、GEFS再予報の存在予測のスキルは、各予報時間における存在率ももっとも低い数値予報モデルであるJMAおよびUKMOと同程度であることがわかった。

またGEFS再予報の中心気圧と中心位置の予測スキルは、長い予報時間 (4.0～6.0日) ではもっともよいECMWF (図4-2-2 (b) (c) 青破線) と同程度である一方、短い予報時間 (1.0～3.0日) では5つの現業予報の中間程度であることが示された。さらに、中心位置の予測スキルの確率的な検証を行った場合もこれらの結果と一貫した結果が得られた (Yamagami et al., 2019)。

過去30年間のうちもっとも顕著な夏季北極低気圧のひとつであった2012年8月に発生した北極低気圧の予測について、TIGGEデータを用いて詳細に解析を行った。この北極低気圧は70°N以南から侵入する低気圧と東シベリア海上に存在した北極低気圧が併合し、上層の暖気核が併合することにより持続、発達した事例である。最盛期における中心気圧と位置それぞれを用いてアンサンブルメンバーを分類したところ、もっとも予測精度の高い5つのメンバーでは最盛期における対流圏上層の暖気核の発達が正確に予測できていたのに対して、予測精度の低い5つのメンバーでは最盛期にふたつの暖気核が別々に存在することがわかった。これは、暖気核の併合と発達が北極低気圧の発達に重要であることを示唆している。さらに、暖気核の併合と発達の正確な予測には、上層の極渦やトラフの位置や深まりの正確な予測が重要であることが示された (Yamagami et al., 2018a)。この結果から、数値モデルの改良と北極域でのさらなる観測の必要性 (初期値の不確実性の低減) が示唆された。

数値予報モデルの予測精度を向上させるもっとも単純な方法としてモデルの高解像度化が考えられる。北極低気圧の予測に対するモデルの水平解像度の依存性を調べるために、ECMWFが研究・教育の用途で公開している簡易版現業予報モデルOpenIFSを用いた予測実験を行った。前述の2008～2016年における顕著な北極低気圧10事例に加え、2017～2018年の夏季に発生した北極低気圧のうち同様の基準を満たした顕著な3事例を含めた13事例について実験を行った。実験対象の解像度は、T639 (赤道上約32km)、T511 (同約40km)、T319 (同約60km) の3種であり、T639がECMWFの現業アンサンブル予報で使用されている解像度である。初期値および境界値はECMWFが提供するデータセットERA5の再解析データから作成した。実験の結果、事例依存性は大きいものの、13事例を平均すると解像度が高くなるほど予測精度が高く、T639の予測精度がもっとも高いことがわかった (図4-2-3)。

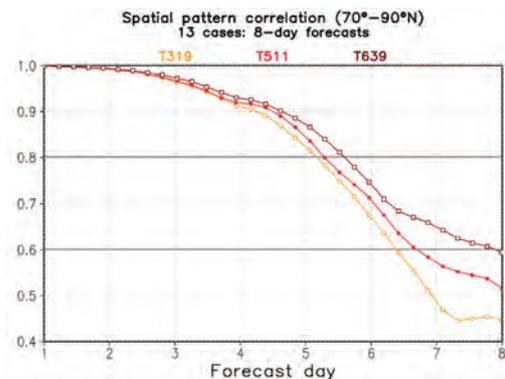


図4-2-3. 北極低気圧13事例の予測について、予測結果と観測 (ERA5) の空間相関の時系列変化。各事例について最盛期の8日前からの予測をし、スコアを平均したものを示す。スコアの計測範囲は北緯70度以北。

事例に関わらず予報期間4日までは解像度依存性は小さいが、5日以降は事例によって大きく差が開く事例とそうでない事例に二分された。3日程度の予報期間では解像度による違いは明らかでないが、それより長い予報期間では精度の高い予測に数値モデルの高度化が必要であることを示している。予測誤差の空間分布を調べると、解像度が変化しても誤差の分布はほとんど変化しなかった。したがって、北極低気圧は事例ごとに異なる予測にくい要素があり、それは高解像度化ではほとんど改善されないことが示された。これらの結果より、北極低気圧の予測において、わずかな誤差が非線形的に大きく成長するカオスの影響が比較的小さいことが示唆されている。

アンサンブル気候予測データベースを用いた北極・中緯度相互作用の研究

近年、冬季における北極の温暖化とバレンツ・カラ海を中心とした海水の減少とともにユーラシア大陸上の寒冷化が引き起こされている可能性について議論が盛んになっている。「Warm Arctic and Cold Eurasia (WACE)」パターンと呼ばれる、観測上顕著にみられるこの寒冷化は、モデル実験による再現性が低いため、気候システムの内部変動によるものではないかという指摘もされている。そこで、d4PDFを用いて、100メンバーの大気循環モデル (AGCM: Atmospheric General Circulation Model) 実験による20世紀再現実験と非温暖化実験によるWACEパターンの再現性と比較を行った (Hori and Oshima, 2018)。その結果、モデル内で再現されているWACEパターンの正のトレンドは北極海上の海面水温の変化にともなうものであるが、WACEパターンの振幅そのものは20世紀再現実験と非温暖化実験間で差は小さく、中緯度ユーラシアにおける寒冷化を説明できないという結果が得られた。一方、モデル内のバレンツ・カラ海の海水が少ない場合に特に極端なWACEパターンが発生しており、海水変動はWACEパターンの発生頻度をとおして中緯度寒冷化に影響している可能性を明らかにした (図4-2-4)。

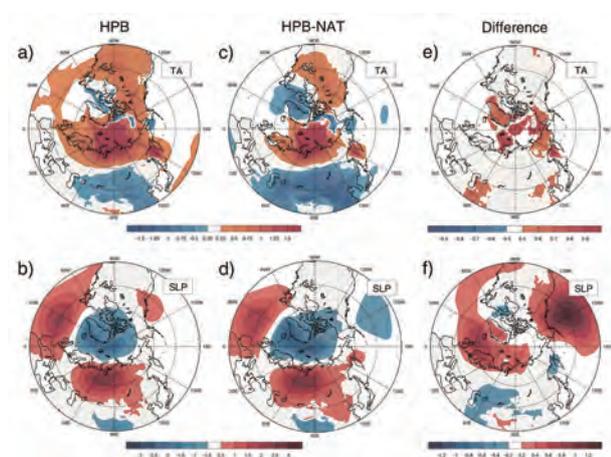


図4-2-4. d4PDFの20世紀再現実験 (HPB) と非温暖化実験 (HPB-NAT) におけるWACEパターンの事例に対する合成図。a), c) は地表面気温、b), d) は海面更正気圧、e), f) は2実験間の差。

4.2.3 気象観測網の強化と予測向上

猪上 淳・佐藤 和敏・堀 正岳

数値予測と気象観測

精度が年々向上している数値予報 (Jung and Matsueda, 2016⁹⁾) は、数値予報モデルと気象観測の両輪で情報が日々更新される。数値予報において観測データが重要なのは、数値予報モデルに与える最初の大気の状態 (初期場) の品質によって、予測精度が左右されるからである。本研究では、1週間以下の時間スケールの数値予報において、気象観測が手薄な北極域の観測点や観測頻度が強化された場合、北極域および中緯度域の気象予報、ならびに北極域の海氷・波浪予測がどのように向上するかを調査した。天気予報の利用者にとって北極域の気象観測が有用で価値のある活動であることを科学的に実証し、北極域の気象観測網を持続可能なものとするための科学的知見を発信することが本研究の目標である。この研究は観測・予測の両面からアプローチする点において独自性があり、WMOの推進するYOPPにおける観測・予測研究と直結する。

YOPPにおける観測活動

YOPPは、2018年2月1日～3月31日の冬季 (SOP1)、および2018年7月1日～9月30日の夏季 (SOP2) のふたつのSpecial Observing Periods (SOP) で特徴付けられる。各気象機関および研究機関は、WMOによってラジオゾンデの増発や氷上ブイの展開を要請された。欧州を中心にSOP1では約1,900個、SOP2では約3,000個のラジオゾンデの増発がなされ、これまでにない組織的な国際観測キャンペーンとなった。本プロジェクトとしては、AARIとの共同研究により、ロシアのケーブ・バラノバ基地 (79°18'N, 101°48'E) におけるSOP中の観測頻度を1日1回から2回に増発した。また、YOPPではSOP以外の観測も推奨され、2018年のMR18-05Cでは、船上でのラジオゾンデ観測 (129個) を実施した。なお、2019年のMR19-03Cにおけるラジオゾンデ観測 (107個) は、Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAiC、2019年9月20日から約1年間) に対応した活動として位置付けられている。

海洋・海氷分野においては、2018年10～12月および2019年9～11月のMR18-05C、MR19-03Cにおいて海水縁を毎日観測する定線観測を実施した。1週間以上の海水縁観測 (2018年11月:12日間、2019年10月:10日間) およびCTD観測により、ECCCの現業海水予報および本テーマで開発しているIcePOMの海水予報のための検証データを取得した。また、波浪ブイの展開を行い (2018年11月:2機、2019年10月:3機)、波浪予測の研究に資するデータも取得した。

YOPPにおける予測研究

ここでは、北極域の観測データの有無による中・高緯度の諸現象の予測可能性への影響を調べた結果を紹介する。

2016年は、8月に日本域で台風10号が東北地方に上陸し、

農作物などに多くの被害が出たほか、9月には北米でもハリケーンが温帯低気圧化し、それが欧州へ到達し大雨をもたらすなど、熱帯低気圧に関する被害が多い年であった。台風は一般に中緯度帯に差しかかると、上空の偏西風の影響を受けて進路が転向するため、その進路予測には中緯度および高緯度の気象循環の影響も考慮する必要がある。この年、北極域では8月にドイツ砕氷船と韓国砕氷船、およびロシアのケーブ・バラノバ基地で、9月に「みらい」でラジオゾンデ観測が行われていた。これらの観測が、偏西風の蛇行やそれともなう熱帯低気圧の進路予測にどの程度の影響を与えるのかを、JAMSTECのアンサンブル気象データ同化システム(ALEDAS2: AFES-LETKF ensemble data assimilation system ver. 2)を用いて調べた。その結果、上記のラジオゾンデ観測データを初期値に取り込んだ場合、北極域の対流圏上部の渦位の再現性が改善することが示された。この結果、熱帯低気圧の進路予測に重要な偏西風の予測精度が向上し、4日程度の予測期間においては観測データを取り込まない場合に比べて進路予測が改善することが明らかとなった(Sato et al., 2018a)。このメカニズムの一般性は、6つのハリケーンの事例を用いた解析によっても示されている(Sato et al., submitted)。2019年10月に甚大な被害をもたらした台風19号についても、同様の実験を「みらい」とMOSAicのラジオゾンデ観測データを用いて実施し、北極域の観測活動の有効性を実証する予定である。

中緯度に卓越する冬季モンスーン、いわゆる大陸東岸での寒気の吹き出し事例についても、上記と同様の手法で調査した。2015年2月は北米東岸で記録的な寒波に見舞われ、各地で最低気温を更新した。これは、ニューヨーク沖の北大西洋で発達した低気圧とそれともなう寒冷前線により、北極域の寒気が南下したためである。この冬型の気圧配置の予測可能性にも、それを構成する低気圧と南下する高渦位の予測精度が重要で、それには北極域での渦位の正確な再現が必要であることがわかった(Sato et al., 2017)。北極域の渦位場は、ラジオゾンデの特別観測(ノルウェー研究船、パロー等の4つの地上観測点)によって、例年よりも高精度に表現できており、流れに依存した観測データの伝播過程を経て中緯度の気象予測へ影響した。これは逆に、北極域で観測が不足すると、誤差をとまった渦位が中緯度の予測誤差の原因となることを示唆する。

北極域の観測強化は、初期場が改善することから、北極域自体の気象予測にも好影響を与えることがある。北極海航路上では、低気圧以外にも強風をもたらす現象があり、そのひとつとして高気圧縁辺部の強風があげられる。Inoue et al. (2015)では、「みらい」やその他の陸上観測点によるラジオゾンデの特別観測によって、この高気圧の中心位置が高精度に予測でき、観測がない場合に比べて北極海航路上の海上風が 5 m s^{-1} 程度強く予測されることがわかった。これは、観測がないと海上風を過小評価する可能性を示唆する。

海氷・波浪予測への波及効果

北極域の観測強化による海上風の精度向上は、海水予測や波浪予測にも影響がおよぶ。例えば、Ono et al. (2016)では、

2012年8月に発生した北極低気圧について、北極域の特別観測の有無を調べた大気予測データ(Yamazaki et al., 2015²⁾)を海氷・海洋結合モデルの強制力として与え、海氷分布への影響を調べた。低気圧の位置のずれにともなう海上風の差は 10 m s^{-1} に達し、北極海航路上の海上風偏差にともなう海水の移流偏差が海氷分布予測を大きく変化させることがわかった。また、高気圧の事例を扱ったInoue et al. (2015)では、気象観測データによって適切に表現された大気予測データを境界条件に与えることにより、数日間続く強風が海水移流を強化し、北極海航路を閉ざすタイミングをより高精度に予測できることを示した。

海氷・海洋結合モデルに高精度な大気強制を与え、現業の海水予測に利用されている例として、NERSCのTOPAZ4があげられる。TOPAZ4はECMWFの10日予報を強制力として使用しているため、他の気象機関の予報データを使うよりも大気予測誤差を起因とする海氷・海洋予測への不確実性の伝播は抑制されていると考えられる(ECMWFの予測精度の優位性は4.2.2参照)。Nakanowatari et al. (2018a)では、観測データ(衛星とブイ)を使用した検証を通じて、東シベリア海の海氷厚の予測可能性は大気予測可能性と同程度の3日程度で、それ以降では急激に悪化することを示した(4.2.5参照)。

本テーマで開発しているIcePOMにも強制力としてECMWFの10日予報を使用している。海洋の境界条件を改良した結果、ECMWF(10日予報、 0.1 度格子)とECCC(48時間予報、 $3\sim 8\text{ km}$ 格子)のハイブリッドプロダクトとなり(10日予測+ 2.5 km 格子)、海水予測は航海計画に大いに役立った(De Silva et al., 2020, 4.2.5参照)。2019年のMR19-03CのアイスパイロットからもIcePOMの精度向上が評価された。

波浪予測に関しては、その成果の解説は4.2.4に譲るが、波浪予測に使用する大気強制、特に海上風の不確実性が、波高計算の不確実性と関連する可能性があることに言及しておく。特にブイや船舶の観測数が少なくなる10月以降は9月に比べて大気強制の不確実性が高くなり、波浪予測結果は「みらい」で投入した波浪ブイの波高データと比較して 1 m 程度過小評価する場合があった(Nose et al., 2018)。

予報情報の統合的利用とステークホルダーとの情報交換

2018年のMR18-05Cでは、日本船舶としてはじめて11月の北極航海を実施した。「みらい」は気温や海氷密度によって活動海域が制限されるため、船体性能を引き出しながら結氷期の海氷縁観測を行うには精緻な気象・海氷情報が必須である。YOPPのサポートの一環として、ECMWFの高解像度大気10日予報データを無償で入手し、その予報データをテーマ8が提供する「VENUS」に統合し、船上での意思決定に活用した。ECMWFの気象・海氷予報を考慮しつつ、直近の観測活動と1週間程度の大きな観測活動の計画を、船長やアイスパイロットを交えながら日々の観測ミーティングで議論できたことは、予測情報の有用性と誤差の解釈の仕方を共有する重要な機会となった。2018年の経験をふまえて臨んだ2019年のMR19-03Cでは、10月としては最北の北緯 78.1 度にまで到達した。北緯 77 度以北での観測期間が10日間以上にもおよび、

毎日通信途絶の時間帯を経験した。安定した通信環境の整備の必要性は、乗船したアイスパイロットからも指摘を受けている。通信量を減らすためには、利用者のニーズを満たしながらも「VENUS」に実装する予測情報の取捨選択が必要不可欠である。2018年のArctic Circleにて日本の外務大臣が「VENUS」の利用促進に言及したが、研究船とは目的が異なる一般の船舶にとって、情報取得にかかる高額な通信費に見合う効果が得られるかどうか今後の「VENUS」導入の判断材料となるだろう。「VENUS」については本報告書の4.9で詳述される。

ECMWFの数値予報は高精度ではあるが、海氷予報に関しては、特に海氷縁での海氷密度について過小評価する傾向であることがMR18-05Cの海氷縁観測からわかってきた(Nose et al., submitted)。これはECMWFが使用する海氷データ自体に問題があるためである(4.2.4参照)。ECMWFでは、このようなモデルの不具合について、ユーザー側からの積極的なフィードバックを求めており、2019年6月にECMWF(英国・レディング)で開催された「Workshop: Observational campaigns for better weather forecasts」は、本テーマから4名の研究者が参加し、ECMWFのモデル開発者と直接対話できる機会となった。海氷密度のバイアスは氷上気温にも影響を与えるため、ECMWFも使用する海氷データの更新を積極的に行うとのことで、今後のさらなる高精度化が期待される。MR19-03Cは、このECMWFの海氷予報の過小バイアスが顕著で、本テーマで独自に用意したIcePOMによる海氷予報の方が精緻に海氷縁を表現できていた。

観測網の最適化と課題

観測活動において、費用対効果は熟慮すべき事項のひとつである。Inoue et al. (2015)では、「みらい」の高頻度ラジオゾンデ観測データを用いて、北極海上の強風イベントの予測精度と観測頻度との関係を示し、1日4回の観測が理想的であることを示した。この観測頻度は、YOPPにおけるSOPの観測頻度を定める重要な成果となった。さらに、Yamazaki et al. (submitted)では、全球のラジオゾンデ観測網において、予測に貢献する感度の高い観測点は北極域に集中することを示した。

YOPPにおける海外の研究成果から、ロシア域のラジオゾンデ観測データが質的な問題で、予報に十分反映されていないという指摘がなされた(Naakka et al., 2019⁶⁾)。一般に数値予報の初期値を作成する際には、前の時間ステップから求めた第1推定値を観測データによって補正する。ECMWFではロシア域のラジオゾンデ観測データの質的な調査を独自に行い、ほかの地域に比べてこの補正の重み付けが小さいことを示した(Ingleby, 2017¹⁰⁾)。その理由のひとつとして、ロシア製のラジオゾンデによる気圧データ(高度)の誤差が指摘されている。

本テーマではAARIの協力のもと、ケープ・バラノバ基地においてフィンランド・バイサラ社製のラジオゾンデ(RS92-SGP)を使用した観測をSOP1およびSOP2に行い、その近隣のロシア現業気象官署が置かれるフェドロバ(ケープ・バラノバ基地の南南東185kmに位置)における観測データとの直接比較によ

る精度検証を試みた。ケープ・バラノバ基地のデータは気象通報されていないため、検証データとしての利用価値が高い(Hori and Inoue, submitted)。

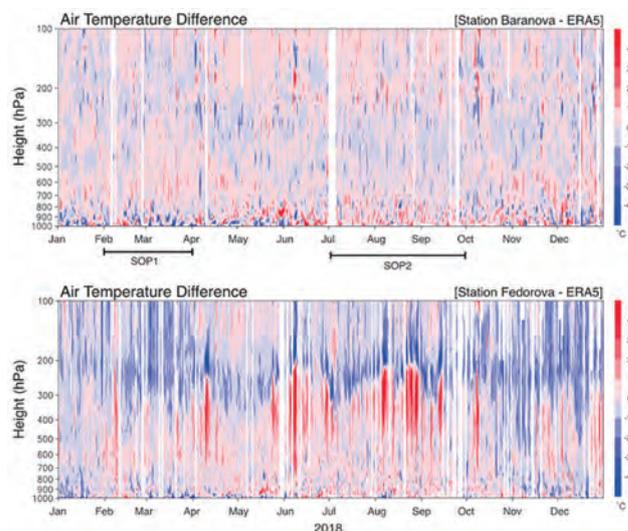


図 4-2-5. 観測値と再解析値(ERA5)との気温差。(上図) ケープ・バラノバ基地、(下図) フェドロバ。

ECMWFのデータセットERA5の気象再解析データの気温と各観測点での気温の差の時間高度断面をみると(図4-2-5)、フェドロバの観測データの方がERA5のデータとの差が大きい結果となった(図4-2-5下)。特に夏季の対流圏界面を境とする正負の差が大きく、これは圏界面高度の位置ずれにともなう誤差と考えられ、Ingleby et al. (2017)¹⁰⁾の指摘を支持する結果となった。また、ケープ・バラノバ基地近傍の再解析値は観測値をよく再現していることから、フェドロバの観測データそのものに系統的なバイアス等が内在することを示唆する。冬季にその誤差が小さくなる理由のひとつとしては、予報システムに使用する対流圏上層の主要な観測データ源である衛星データが、冬季は海水域や積雪域の拡大等によって精度が悪くなり利用可能なデータが減少するため(Lawrence et al., 2019⁴⁾)、相対的にラジオゾンデ観測データの依存度が大きくなるためと考えられる。ロシア製のラジオゾンデは、ロシア国内の他の観測点でも展開されているため、観測データの質的な問題が広域に顕在化していることが予想される。このようにケープ・バラノバ基地の観測データを用いることで、既存の観測点の精度検証ができたことは、今後の北極域の観測網を質的に向上させるための重要な知見を提供できたといえる。

まとめ

本研究では、北極域の気象観測の強化により、気象・海氷・波浪の予測が向上することを示した。YOPPの貴重な国際的枠組みを利用し、日本の観測研究・予測可能性研究を効果的に発信できた。また、ケープ・バラノバ基地のデータ解析結果が示すとおり、観測データの質的な評価も北極域の持続可能な観測網の構築には重要であることが示された。

YOPPにおけるラジオゾンデ観測の増発は、各国の気象局や

研究機関による資金的・人的な協力が依存している。しかし、ヘリウムガスの高騰や、観測ごみによる環境負荷など、観測強化にともなう予測精度の向上とはトレードオフの関係にある複数の事案があることも事実である。高品質な観測データを、安価・簡便・高頻度で取得できる次世代の持続可能な気象観測システムを社会実装する取り組みが今後必要となる。

世界経済フォーラム (WEF: World Economic Forum) は、社会経済に対して起こりうる最大のリスクとして極端気象現象をあげている (WEF, 2020¹¹⁾)。研究機関や現業気象予報機関に依存した気象観測網の維持・強化は、長期的には期待できないことを考慮すると、地域社会や企業が新たな観測システムの社会実装をサポートし、気象リスクに対するレジリエンスを強化する体制が必要となるだろう。これはSDGsの特徴のひとつである「すべてのステークホルダーが役割を」を実践する挑戦的なステップである。北極域においては、北極海沿岸の地域社会や北極海航路上の船舶・運航会社がそのサポーターとなることが望まれる。

4.2.4 波浪・着氷の実態把握とその予測

早稲田 卓爾・小平 翼・野瀬 毅彦
伏見 修一・尾関 俊浩・山口 一

北極海の波浪

夏季北極海の家氷域の減退にともない開放水面が新たに形成され、そこに海洋波が発生している。そして開放水面の拡大にともない有効吹送距離 (フェッチ) が増大した結果、波浪は増大し、氷縁域 (MIZ: Marginal Ice Zone) を通過して氷盤を破壊し融解を促進する。さらに増大したフェッチにより、波浪はさらに増大するという正のフィードバックが働く可能性が指摘されている。一方、増大した波浪とそれにより動かされる氷塊は北極海航路を航行する船舶にとって脅威となる。波浪が増大すると飛沫現象や船体着氷の機会も増えるため、波浪に関するさまざまな知見の蓄積が必要となる。このような北極海の波浪の予測精度を向上するために、2016年、2018年、2019年に波浪観測および飛沫観測を実施した。また、新たに構築した波浪モデルによる波浪推算および波浪再解析データの解析も行った。以下その成果を報告する。

2016年開放水面波浪観測、長期変化とモデル精度

2016年のMR16-06で、2基の漂流型波浪ブイを展開し、およそ2ヵ月にわたる波浪の計測を行った。我が国がはじめて実施した北極海での長期的な波浪計測であると同時に、2ヵ月におよぶ連続観測は世界的にも珍しい。バロー沖でブイ2基を同じ位置に投下した (2016年9月10日)。ブイは2度の大きな低気圧の通過にともないやがて東西にわかれて漂流し、2016年11月2日に信号が途絶するまで連続してデータを送信した。観測の目標は開放水面の波浪推算精度の検証である。

まずはじめにECMWFのデータセットERA-Interimの波

浪再解析データとの比較を行った。その結果、想定以上の一致がみられたため、長期的な波浪変動について解析を行った。通説に反し、2016年に観測された有義波高5m近いイベントは低気圧起因であり、そのことから、長期変動においても低気圧起因の高波高イベントに着目した。経年的には開放水面の面積が拡大するので最大波高が増大することは想定されるが、しかし、ある閾値を超えると低気圧の空間スケールが開放水面よりも小さくなる。そのため、極大イベントはフェッチ起因ではなく低気圧が開放水面を通過する確率で決まるということがわかった。すなわち開放水面の最大風速と最大波高の期待値が40年間ともにゆっくりと上昇していることを解明した (図4-2-6、Waseda et al., 2018b)。

一方、開発した高解像度波浪モデル (16km) との比較から、9月と10月との間でモデル精度に相違があることが判明した。さまざまな要因を精査した結果、波浪モデルを駆動する風速の精度が原因であることがわかった (Nose et al., 2018)。これは、海面気圧の計測点数が10月は9月よりも少なく、データ同化による大気場のモデル誤差の補正が不十分であることが理由と推察した。このように、開放水面における波浪の予測精度は海盆スケールの波浪と同様に風の精度に強く依存することがわかった。

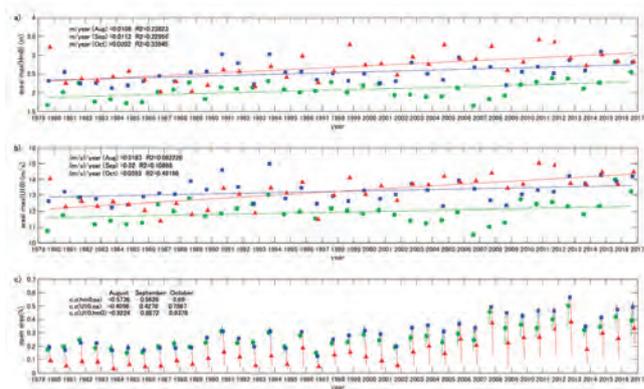


図4-2-6. 最大波高の期待値の経年変動 (上)、最大風速の経年変動 (中)、開放水面面積 (下)

2018年MIZ周辺における波浪観測

MIZは波浪が活発に海水と相互作用し、海洋と大気に影響をおよぼす特殊な海域である。MR18-05Cでは、2018年11月にチュクチ海のMIZを横切る測線における観測を12日間継続した。その間、波浪ブイを2基展開すると同時に、画像による海水分布の記録、衛星合成開口レーダー画像の取得を行った。現場の海水記録と衛星放射計から推定した海水密接度を照らし合わせることで、実は、衛星放射計からの推定値に大きなばらつきがあることがわかった。6つの異なる推定値を境界条件として波浪推算を行ったところ、図4-2-7左に示すような海水域に吹き込む南風の際に、MIZ近辺で大きく波浪推算値がばらつき、そのばらつきが海水密接度のばらつきと強い相関があることがわかった (図4-2-7右、Nose et al., submitted)。

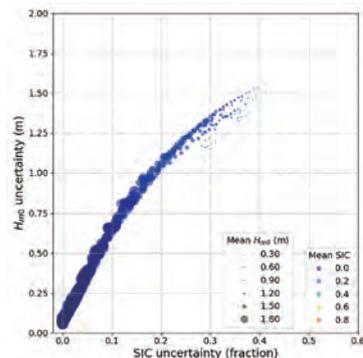
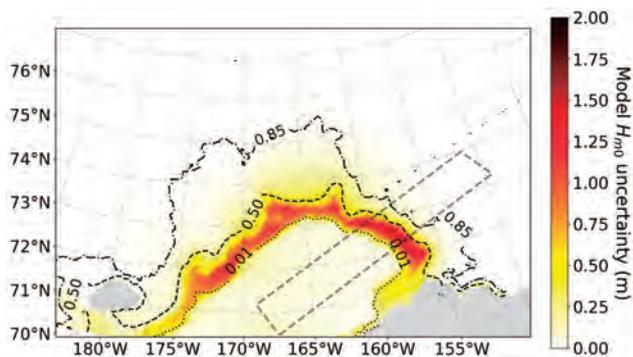


図 4-2-7. 南風の際の波高の不確かさと海水密度平均値 (左)、衛星海水密度の不確かさと波浪推算の不確かさの相関 (右)

2018 年チュクチ海結氷の遅延

11 月にも関わらず、図 4-2-7 に示すように広域に開放水面が広がっていた原因は暖かい海面水温に起因することがわかった (Kodaira et al., 投稿準備中)。近年、波浪による混合で暖水が沸き上がり、海水が融解するという事例が報告されているが、2018 年 11 月は波浪が低く、解析の結果 9 月の太平洋からの異常な南風によるチュクチ海への暖水の侵入が原因であることがわかった (図 4-2-8)。すなわち、チュクチ海が太平洋水の運んだ熱を貯蔵し、11 月になっても高い海面水温が保たれたため、チュクチ海の結氷が遅れたのである。

MIZ ではこのように海洋の影響も受けながら波浪と海水が相互に作用し、ときには波浪が海水を破壊し、ときには波浪が海水の生成に寄与することがわかった。この成功に引き続き、MR19-03C では、2019 年 10 月に MIZ における波浪観測を観測ブイ 3 基とステレオカメラ画像により行った。そして、波浪予測モデルを実行し、リアルタイムで「VENUS」を介してデータを送信して航行支援を行った。今後北極海の MIZ は急速に広がり、波浪を介した新しい海洋 - 大気 - 海氷の相互作用が活発化すると思われる、このような観測を継続することが望ましい。

船体着氷研究の現状

船体着氷は、甲板作業効率の低下・甲板機器等の機能の低下・転倒または落水のリスクの増加・復原力の低下などをもたらす、北極海を含む寒冷海域を航行する船舶にとって安全性に大きく影響する問題である。特に小型船においては、着氷が進行するとトップヘビーとなり、最悪の場合転覆する恐れもある。船体着氷の主要因は船体と波浪の相互作用によって発生する海水飛沫であることが知られている (Zakrzewski, 1987²¹)。海水の減少により、北極海における航行可能範囲が拡大するとともに、波が激しくなることが予想される。したがって、船体着氷は北極海の有効活用を検討するにあたり、大きな課題となる。

船体着氷の予防・予測のためにはこれまで数多くの研究がなされている。現在一般に広く使われている着氷予測として、風速・大気温・海水温・海水結氷温度から計算される着氷指標 PR (Overland et al., 1986¹³) があげられる。PR は NOAA により一般利用可能な状態で公開されている。しかしこの指標は、主にアラスカでみられる典型的な 20 ~ 75m 程度の船舶を対象にした予測であり (Overland, 1990¹⁴)、将来の北極海を航行する船舶の増加に備え、本指標の大型船への拡張が望まれている。また、近年においては、ノルウェーの大学と研究機関が共同で開発した MARICE と呼ばれる、着氷予測のための数値シミュレーションモデルが注目を集めている。MARICE は Kulyakhtin and Tsarau (2014)¹⁵ などにより実用例が紹介されている。一方で、Kulyakhtin and Tsarau (2014)¹⁵ は、海水飛沫などの実観測データが不足しており、MARICE のバリデーションを十分に行うことが難しいという点を問題点としてあげている。

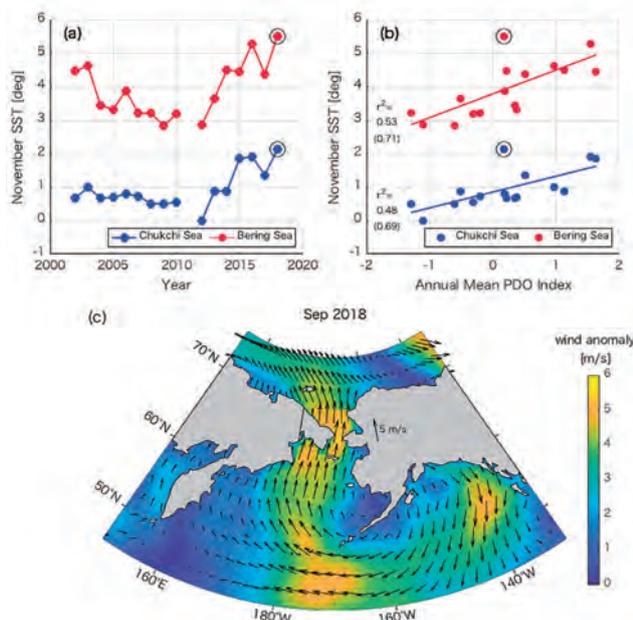


図 4-2-8. (a) チュクチ海 (青) とベーリング海 (赤) の水温の変化、(b) 11 月水温と太平洋十年規模振動 (PDO) との相関、(c) 2018 年 9 月の異常な南風

船体着氷・海水飛沫観測

先に述べたように、船体着氷は寒冷海域航行における大きな障害であるため、着氷予測モデルが望まれている。しかし、その予測モデルの開発において、特に大型船舶の着氷の主要因である海水飛沫の観測データの不足がボトルネックである。このような状況をふまえ、我々は Spray Particle Counter (SPC) と Marine Rain gauge type Spray gauge (MRS) の 2 種類の飛沫観測センサーの開発を行った (Ozeki et al., 2016)。これらのセンサーを極域を航行する「みらい」や「しらせ」に取り付け、海水飛沫データを取得することに成功している。特に 2018 年の MR18-05C において、船首方向を調整することによって飛沫

を抑えられる可能性を検討するため、「みらい」による飛沫観測試験航行が3回実施された。このような大型船舶において海水飛沫観測に焦点を置いた操船は世界初の試みである（この飛沫観測試験航行は2019年のMR19-03Cでも3回実施）。また、同航海においては、大規模な船体着氷が確認された（図4-2-9）。この際、バラスト水調整のための空気弁やウィンドラスも凍結した。また、船体が冷やされることにより収縮し、塗料が浮き剥がれる事象も確認された。これらの事象から、大型船においても船体着氷が重要なハザードとなりうるということが明確に確認された。

飛沫観測試験航行をはじめとする、これまでに取得された飛沫データの解析結果から、海水飛沫発生には、船首方向からの相対風速や平均出会い周期が大きく影響することが明らかとなった。船首からの相対風速、平均出会い周期ともに船速・船首方向を調整することにより大きく変化する値であるため、激しい船体着氷が予想される海域における減速や蛇行が大型船においても十分有効であるとデータとして示された。したがって、風向、風速、波高、波の周期等の情報より、海水飛沫が起りやすい海域の抽出可能性が示唆された。



図4-2-9. MR18-05Cにおいて発生した大規模な船体着氷

飛沫着氷の組成分析

船体着氷の主因は飛沫であるが、荒天時は飛沫が激しく発生するだけでなく、しばしば強い降雪をともなう。我々は飛沫着氷の酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）により、飛沫着氷の重量に対する雪の寄与率を見積もった。飛沫着氷に対する着氷の寄与率 f_s は着氷試料の $\delta^{18}\text{O}$ (δ^i) と海水の $\delta^{18}\text{O}$ (δ^w)、積雪の $\delta^{18}\text{O}$ (δ^s) を計測し、次の同位体質量収支式より求めた。

$$\delta^i = (1 - f_s) \times (\delta^w + f) + f_s \times \delta^s$$

ここで f は分別係数である。海水の成長における分別係数は 3.0‰ (O'Neil, 1968¹⁶⁾) や 2.9‰ (Lehmann and Siegenthaler, 1991¹⁷⁾) が用いられることが多い。しかしこれはゆっくりとした結晶成長の場合であり、速い結晶成長では分別係数が小さくなる (Eicken, 1998¹⁸⁾)。そこで、我々は飛沫着氷成長時の $\delta^{18}\text{O}$ の分別係数を確かめるため、低温室において飛沫着氷実験を行った (Ozeki et al., 2019)。分別係数は着氷の成長速度のみならず、飛沫が衝突してからの流下距離にも依存することが示唆された。上記実験結果をもとに、船体着氷が想定される温度

帯での分別係数として $f = 1.5$ を提案した。

上記 f 値を用いて、いくつかの飛沫着氷イベントで得られた着氷サンプルについて、雪の寄与率を求めた。その結果、着氷量に対する雪の寄与率は着氷イベントによって大きく異なり、完全に海水飛沫からなるものから、ほぼ着氷のみのものまで分散した。

海水飛沫着氷にみられる湿潤成長では、物体に衝突して流下する飛沫の冷却熱量が成長速度を律速する場合がある。降雪の取り込みは固体での供給であり、熱収支としては成長に有利に働くことから、今回の結果より、雪の寄与率は着氷の成長量を予測するうえで十分に考慮される必要があることがわかった。

4.2.5 海水予測精度の向上と北極海航路への利用可能性

山口一・中野渡拓也・小山朋子

TOPAZ4 海水予測

海水厚の正確な情報や予測データは北極海航路での安全な船舶の航行や運航計画の立案において必須である。特に、海水厚の情報は砕氷船の安全な航行や最適な航路選択において、重要な情報のひとつといえる。しかし、海水厚の情報は海水分布と異なり、現場データや衛星データが時間的にも空間的にも非常に限られるため、正確な情報を得るのが難しい。また、数値モデルによる推定値もバイアスやばらつきが大きく、各国の現業気象予報機関で再現性の向上に向けた海水モデルの開発が実施されている (Uotila et al., 2019¹⁹⁾)。

ノルウェー気象研究所では、NERSC で開発された海水・海洋結合データ同化システム (TOPAZ4, Sakov et al., 2012²⁰⁾; Xie et al., 2017²¹⁾) を用いて北極海の10日先までの海水予測プロダクトを生成しており、プロダクトは2016年より欧州の地球観測プログラム Copernicus のサービスにより無償提供されている。TOPAZ4 は、他の予報機関が用いているシステムと比べて水平解像度が 12 ~ 16km と高いモデルをベースに構築されていることに加えて、Ensemble Kalman Filter (EnKF) による優れたデータ同化手法によって海水密度や海水厚データを同化している特徴がある。また、モデルの強制力として大気の子報データとしてはもっとも予報精度が高い ECMWF の高解像度予報値が用いられている。

北極海航路上に位置する東シベリア海やその周辺海域における夏季の TOPAZ4 の海水厚の再現性を評価するために、ワシントン大学の海水モデルの同化データ (PIOMAS^{※4)}) や、人工衛星レーダー高度計やマイクロ波放射計から推定される海水厚の推定値 (CS2SMOS) との比較を行った結果、TOPAZ4 は東シベリア海における海水の舌状分布を再現しており、海水厚の差も ±約 20cm の範囲に収まっていることがわかった (図4-2-10)。また、融解期における Ice Mass Balance (IMB) プイによる海水厚の現場観測データとの比較から、東シベリア海の周辺海域で 8.3cm の正のバイアス、30cm の平均二乗誤差であり、この海域では TOPAZ4 による海水厚データの再現性は優れているこ

とが明らかになった (Nakanowatari et al., 2018a)。

この TOPAZ4 の海水厚分布の予測精度の検証を空間相関解析で実施した結果、海水厚の予測精度は4日目(予報初期日を除く)に低下することが明らかになった。予測精度の低下は、海水の漂流速度やその駆動源である海上風にもみられ、海水厚の予測精度は大気予測精度と密接に関係していた。海水の漂流速度は風速の2.2%で、風の向きに対して20～40度偏向することから、自由漂流理論で説明される。また、4日目の予測精度の低下の要因については、2015年7月の事例に着目すると移動性低気圧の発達予測誤差に起因していた。

2014年7月に東シベリア海で砕氷船が航行困難となった事例に着目し、自動船舶識別装置(AIS: Automatic Identification System)^{※5}から取得した航行データを解析することによって TOPAZ4 による海水厚データの精度を検証した。船速が低下した海域では、150cm以上の海水が分布していた。船速と海水分布の統計的解析より、船速は海水厚と有意な負の相関(相関係数: -0.56、99%信頼限界で有意)があることがわかった。この結果は、TOPAZ4による海水厚データが船舶航行の支援に有用であることを強く示唆する。

現在、TOPAZ4の後継バージョンとして、モデルの水平解像度が6～8km、海水密度度を高性能マイクロ波放射計2(AMSR2: Advanced Microwave Scanning Radiometer-2)による推定値に変更した新システム(TOPAZ5)の開発が進められている。今後、さらに高精度の海水厚情報が利用できるようになり、現場レベルでの航路計画や最適航路探索システムの構築に活用されることが期待される。

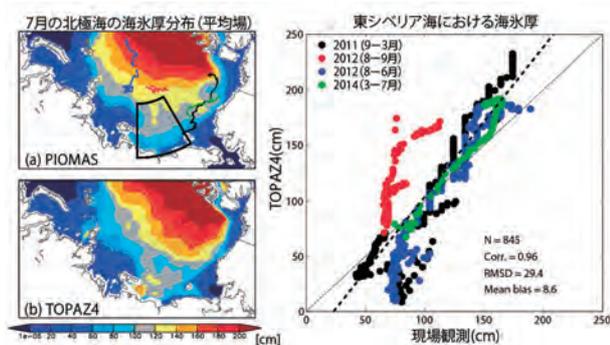


図4-2-10. 2011～2014年の7月における月平均海水厚の平面的な空間分布(a) PIOMAS、(b) TOPAZ4。(c) 東シベリア海((a)の黒枠領域)や周辺海域で得られた4つの漂流ブイ((a)に各ブイの軌跡を色ごとに表示)による日平均海水厚の現場観測データ(845点)と対応するTOPAZ4の日平均海水厚の散布図と回帰直線(破線)。

領域モデルによる短期海水予測

海水力学モデルとして一般に広く用いられている弾粘塑性体モデルに氷縁付近での氷盤衝突レオロジーを取り入れた拡張モデルと、Princeton Ocean Model (POM) を海洋モデルとする海水-海洋結合モデル IcePOM により、北極海全体を対象とする解像度20kmの中解像度モデルと、解像度2.5kmの高解像度領域モデルを作成し、それを用いて、航行支援のための海水予測の実用化に取り組んできた。研究開発の結果、「10日予報で氷縁誤差10海里(約18.5km)以内」という船員インタビュー

から得られた目標精度が達成されたので、ADSの協力を得て、2018年、2019年のMR18-05C、MR19-03Cにおいて海水予測データ配信実験を行った。YOPPのサポートの一環としてECMWFの大気予報データを取得し、それをもとにIcePOMの計算をワークステーションで実施し、10日先までの海水予測を翌日に船に配信するという実験を毎日繰り返した。

図4-2-11は、MR18-05C中の氷縁予測誤差の比較である。誤差計算のもととなる観測データは水循環変動観測衛星「しずく」に搭載のAMSR2による観測値を用いた。IcePOMは、当初海水温データの初期値と境界条件値として気候値の海水温データを用いたため実際の水温より低く、海水を過剰に生成してしまった。そのため、海水温をECCCの予報システムであるRegional Ice-Ocean Prediction System (RIOPS) によるデータに置き換えて再計算した(赤線)。IcePOMの氷縁予測誤差は10～15km程度に収まっており、TOPAZ4、ECMWFより高精度になっている。RIOPSの精度はIcePOMと同程度であるが、RIOPSは48時間先までしか予報していない(De Silva et al., 2020)。

これらの配信実験と船員および乗船研究者からのフィードバックにより、モデル計算そのものに限らず、データ加工、配信方法等、実用に向けて重要な情報とノウハウを得ることができた。

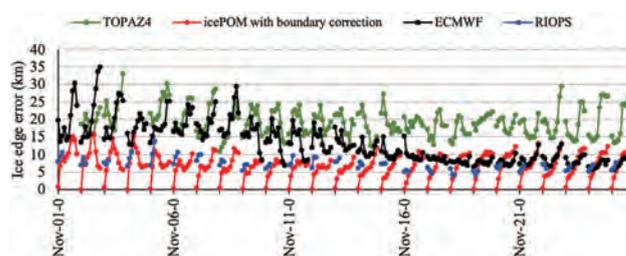


図4-2-11. MR18-05C海水予測データ配信実験における氷縁予測誤差の比較。IcePOMの配信は毎日行なったが、すべてを描くと図がわかりにくいので、10日置きに誤差成長過程を描いた。

氷海流出油挙動計算

氷海域での流出油の移流・拡散挙動は、海水の影響を受け、海水のない通常海域と大きく異なる。これは、油の表面張力が水と接した部分では油を広げる方向に、氷と接した部分では油の拡散を抑える方向に働くからである(林・山口, 2004²¹⁾)。そのため、通常海域で用いられる流出油の移流・拡散シミュレーションコードは、氷海域では役に立たない。また、氷海域での流出油挙動を予測するためには、海水分布の正確な予測がまず必要になる。上記のように海水数値予測の精度が本研究により高まったため、林・山口(2004)²¹⁾の流出油モデルを改良して、流出油挙動の数値シミュレーションを実施した。まず、開水面、全面海水、部分海水それぞれの条件における実験室実験と比較し、本モデルがすべての条件に対して油の広がりを精度よく再現できることを確認した。そして、油流出ポイントと流出量を仮定して、流出油挙動計算を繰り返した。

図4-2-12は、北極海航路の難所のひとつとなるサニコフ海峡付近で油流出を仮定し、駆動力である気象条件を変化させて

計算した油到達確率マップの例である。流出油は海岸に到着する前に回収するべきであり、この図から、15日以内に洋上回収もしくは分散、燃焼などの対策をするべきことがわかる。このような計算を繰り返し、重大な流出事故につながりやすい海域を特定すれば、船速規定などの規則を定める一助となる。進捗状況から考えて、本プロジェクト期間中に全域を計算するのは難しく、今後は、上述の例をもとに全域の計算を進めていく。また、エマルジョン化など、流出後の油の改質のモデル化も行った。

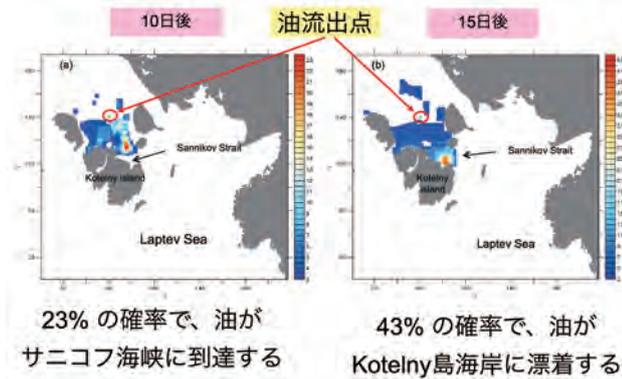


図4-2-12. 北極海航路のサニコフ海峡付近で仮定した氷海油流出事故の油の移流・拡散計算例。初期条件を1日ずつずらして計算を繰り返した結果による、油の到達確率マップ。

航行シミュレーションによる航行可能性の長期評価

IPCCの気候モデルによる海水変化の長期予測結果は解像度が粗いため、最適航路探索に向けた航行可能性の長期評価には、いくつかの仮定を設けたデータ処理が必要となる。そこで、テーマ5と連携して、海洋・海水のみ解像度を高めた計算（北極海で10km程度）を実施した。計算機資源と人員の関係で、RCP8.5シナリオ⁶のみを実施した。

その結果を用いた航行可能性評価が図4-2-13である。今世紀終わりには、ほぼ半年の間、通常船で極点付近をとる最短航路をとれることがわかる。

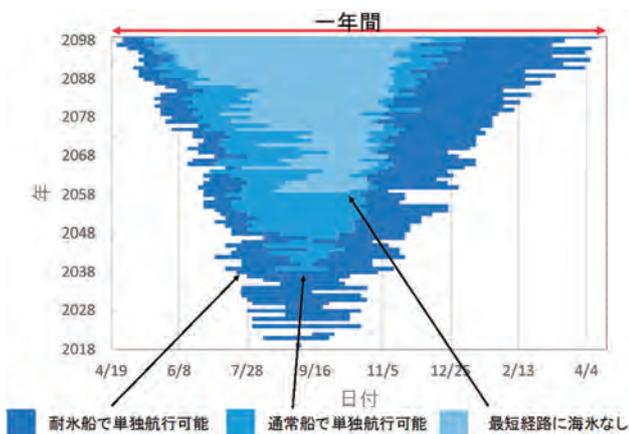


図4-2-13. 長期航行可能性評価

海況・氷況に加え船舶の種類を考慮した航路探索法

ロシア北極海沿岸からベーリング海に通じる北極海航路は、

その有用性が高まっており、液化天然ガス(LNG: Liquefied Natural Gas)がヤマル半島サベツ港から2017年12月に出荷されて以降、航行量が増加している(Humpert, 2019²²)。北極海航路は従来の航路に比べ航行距離が短く、海賊や政治的不安定な地域を回避できる。その一方で、急激な天候不順、海況・氷況の変化が起こりやすい。また、十分な装備や高出力なエンジンを備えていない船舶が航行する際は、海水に対する安全対策がさらに重要となる。各船舶の砕氷・耐氷性や氷況などを考慮し、最適航路を統計的に探索することが可能か調査を行った。先行研究に船型を考慮した探索法(今井, 2017²³)はあるが、入手困難な船舶の仕様に関する詳細情報が必要となり、多くの条件を仮定しなければならない。

最適航路を探索するうえで、各船舶について「航行時間が最短である場合に人件費を含む運航費用が圧縮され、過去の航行ではおよそ最適航路を航行した」という仮説を立てると、高い砕氷・耐氷能力を有する船舶は海水の有無やその厚さに関わらず最短距離に近い航路を選択し、砕氷・耐氷能力がない船舶は海水域を避ける航路を選択したことを客観的に示す結果が期待できる。調査対象期間は、海水域が最小となる9月を中心とする6~12月とし、2014~2017年のデータを利用した。問題単純化を図るために、北極海航路に沿う形でノヴォシビルスク諸島周辺、東シベリア海、およびチュクチ海という3つの区域を定義し、区域別に重回帰分析を行った。ノヴォシビルスク諸島周辺では、ドミトリーラプテフ海峡もしくはサニコフ海峡を航行するか、ノヴォシビルスク諸島北側を迂回する3つの選択肢がある。両海峡通過には喫水の制限が生じるものの、航路が海水に覆われる可能性はノヴォシビルスク諸島北側航路より少ない。東シベリア海とチュクチ海航行にあたって喫水の制限はないが、チュクチ海で夏季に海氷があることはまれであり、船舶の砕氷・耐氷性を示すアイスクラスが船速におよぼす影響はないと考えられる。それぞれの重回帰式の目的変数とする船速は、AISの受信データから作成した。説明変数は航行時の海況・氷況に加え、公表されている船舶の仕様に関する値(アイスクラス、喫水、トン数など)とした。Yamaguchi, et al. (2019b) が導入した到達速力を目的変数へ加える代わりに、各船舶の最大速度をAISデータから求めて利用した。海況・氷況は対象領域内からランダムに抽出した多数の格子点における温度、海水厚、海水密度で代表できると仮定し、北大西洋と北極海の領域で現業海水予報に利用されている海水-海洋結合データ同化システムTOPAZ4による再解析データを用いた。

3つの区域で重回帰分析を行ったところ、推定された偏回帰係数は統計的に有意でないものが多く、決定係数⁷が小さいという結果になった。これは、調査期間が北極海航路の航行量が増加する以前であることに加え、仮定条件を満たさない船舶(タグボート、サルベージ船、海洋調査船など)を対象外としたため、重回帰を行うデータサイズが小さ過ぎたことによる。対象領域を1回横断したデータは連立方程式のなかのひとつの関係式になるが、海況・氷況をより詳しく表現するために再解析データ格子点1点分の情報を加えようとすると3つの未知数(温度、海水厚、海水密度の係数)が増加することになる。数学的に

n 個の説明変数を持つ関係式を解くために n 個の関係式が必要になるので、領域内の海況・氷況を精度よく反映し、決定係数が大きい重回帰解析結果を得るためには多数の航路データが必要となる。さらに北極海航路の利用が進むことで有効な航路データの蓄積が見込めるため、今回の手法を発展させた航路探索法が有用となる可能性は残る。

最適航路探索法を実用化するための主な留意点は、新規航路が利用される可能性が非常に低く、「効率のよさ」は船速のみで決定されないという事実である。海水がなく航行距離が短縮できる可能性を示す航路が存在しても、運航者は安全性が確保されている既存航路を選択する。また、LNG タンカーであれば産出スケジュールや出荷先の調整のために速度を落として運航する機会が少なくない。その一方で海上貨物輸送船にとって効率的なのは、予定スケジュールに近い航行をすることである。航行ルート上に非常に強い低気圧が予想される場合は、被害を避けるために船舶の種類に関わらず航路や船速が逐次変更されることになる。他にも航路や船速を変更するさまざまな要因が存在する。ユーザーにとって有益となる最適航路探索法の開発のために、北極海航路を利用する海運業者と緊密な連携をとり、新たな探索法を机上の空論にさせない努力が必要である。

まとめ

本項では、北極海の船舶航行支援を目的とした研究群の成果を紹介した。まず、ノルウェーで開発された海水・海洋結合データ同化システム TOPAZ4 を用いた海水予測プロダクトについて、その計算結果の特性を、特に海水厚に注目して解析・評価した。海水厚の情報は、海水密度とつながり船舶の水中航行に重要なパラメーターである。一方、衛星による海水厚観測はいまだ研究段階にある。特に船舶航行が多くなる夏季は海水表面に多くのメルトポンドができるため、衛星アルゴリズムによる海水厚データの信頼性は極めて低くなる。その点でも、数値モデルへの期待が大きくなる。今回の解析の結果、TOPAZ4 の海水厚データは、現場観測データや船舶の航行速度変化との整合性がよく、今後の利用に期待できることがわかった。現在はまだ水平解像度が粗いが、現在開発中の TOPAZ5 では水平解像度が 6 ~ 8km になる予定であり、より有用性が増すものと期待される。

IcePOM の 2.5km 高解像度領域モデルの海水予測精度はすでに船員の要求を満たす実用レベルに達しており、2018 年、2019 年の MR18-05C、MR19-03C において海水予測データ配信実験を行った。その結果、IcePOM の氷縁位置予測精度が確認されるとともに、実利用に向けての多くの知識とノウハウが得られた。そして MR19-03C では、「みらい」のアイスパイロットにより「IcePOM の予測が、精度・水平解像度とももっとも優れており、実航行においてももっとも有用であった」という評価を得た。船舶の水中抵抗は開水面中の抵抗に比べて桁違いに大きく、一般に、ショートカットを狙って水中突破をするよりも、海水を迂回した方が、安全であるだけでなく燃料消費も航行時間も少なくなる。加えて「みらい」は砕氷船首を有していないため水中航行ができない。すなわち、海水厚の実測データが得られな

い。そのため、今回は氷縁位置の誤差を精度評価の第 1 項目とした。IcePOM と TOPAZ は競合するものではなく、お互いに欠点を補い合う関係になっている。本プロジェクトの間中は両者の連携に至る予算的・時間的余裕がなかったが、今後は、両者の連携を深め、両者ともにそれぞれの分野で利便性を増すことを目的とした活動が期待される。

水海域の流出油挙動は、海水の影響を受け、通常の開水面のものとはまったく異なる。今回、開水面、全面海水、部分海水のすべての条件に対して同一のモデルで計算できるようになったのは、大きな成果である。また、流出油挙動の予測精度は、海水の予測精度に大きく左右される。上記のように海水予測精度が大きく向上したのも、流出油挙動モデルの予測精度向上に寄与している。今回、さまざまな季節、海域の自然条件の統計値に対して計算を繰り返し、ハザードマップ的なものを作成する企画は、例を示すに留まったが、この研究は今後も継続し、例えばある海域での船舶の航路規制や、船速制限、場合によっては航行禁止区域の策定などにも生かされるべきである。

海水予測と最適航路探索を組み合わせ、気候モデルによる長期海水変動予測結果を用いた将来の航行可能性評価を行った。紙面の都合で説明を省略したが、中期海水予測、短期海水予測と最適航路探索を組み合わせた研究も行った。このような研究は、科学的な予測研究と実用面を、効果的かつ効率的につなぐものとして、今後も発展させるべきである。

AIS による大量の実航行データと海況・氷況データを組み合わせ、船舶の水中航行特性解析を行った。そして、新しい重回帰モデルを考案した。しかし実際のデータには、例えば燃料節約を狙った意図的な減速、経験の多い航路の人為的選択、入手した海況データに含まれない霧などの局所的な現象による減速や避航が含まれていると考えられるため、データのばらつきが非常に大きい。これが統計的な解析を困難にする。今後は、演繹的な船舶パフォーマンスモデルの作成と精度向上を行いつつ、今回のような統計的な解析の合理的パラメーターの抽出と考案、さらには機械学習などの近代的な手法を使った解析を進めるなど、船舶工学的な知識をも取り入れた解析が必要となるであろう。

注:

- ※1 Northern Sea Route (NSR)。ロシア沿岸を通じて大西洋と太平洋を結ぶ北極海の航路。正確には、ロシア北極海沿岸を通じて大西洋と太平洋(ベーリング海峡)を結ぶ航路は北東航路(Northeast Passage)と呼ばれており、ロシアはこのうちノバヤゼムリヤ島東岸からベーリング海峡の区間のことを北極海航路と定義している。
- ※2 TIGGE Museumについてはホームページ(<http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/TIGGE/>)を参照。
- ※3 S2S Museumについてはホームページ(<http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/S2S/>)を参照。
- ※4 ワシントン大学のJinlun Zhang氏が開発した北極海の海氷-海洋結合モデルによる同化データ。人工衛星によって取得された海面水温と海氷密接度を同化しており、北極海の海氷厚分布の再現性が高い。
- ※5 衝突予防と人命安全のために、SOLAS条約によって定められる対象船舶は、搭載が義務付けられている装置である。AISが発する電波は衛星でも受信することができ、船の位置や速度などを、衛星を通じて知ることができる。
- ※6 2100年時点で $8.5W\ m^{-2}$ の放射強制力に対応した温室効果気体濃度(CO₂濃度換算で約1,370ppm超)を仮定した濃度シナリオ。
- ※7 回帰分析によって求められた目的変数の予測値が、実際の目的変数の値とどのくらい一致しているかを表している指標である。0~1の範囲内の値をとり、予想が当たっているほど1に近い値となる。

引用文献:

- 1) Xie, J. et al., 2017. Quality assessment of the TOPAZ4 reanalysis in the Arctic over the period 1991-2013. *Ocean Science*, 13, 123-144.
- 2) Yamazaki, A. et al., 2015. Impact of radiosonde observations on forecasting summertime Arctic cyclone formation. *Journal of Geophysical Research*, 120, 3249-3273.
- 3) Jeuring, J. et al., 2019. Toward valuable weather and sea-ice services for the marine Arctic: exploring use-producer interfaces of the Norwegian Meteorological Institute. *Polar Geography*. doi: 10.1080/1088937X.2019.1679270.
- 4) Lawrence, H. et al., 2019. Use and Impact of Arctic Observations in the ECMWF Numerical Weather Prediction System. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.3628>.
- 5) Day, J. et al., 2019. Increased Arctic influence on the mid-latitude flow during Scandinavian Blocking episodes. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.3673>.
- 6) Naakka, T. et al., 2019. The Impact of radiosounding observations on numerical weather prediction analyses in the Arctic. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2019GL083332>.
- 7) Mizuta, R. et al., 2017. Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 1383-1398. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0099.1.
- 8) Vitart, F. et al., 2017. The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 163-173.
- 9) Jung, T., Matsueda, M., 2016. Verification of global numerical weather forecasting systems in polar regions using TIGGE data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142, 574-582.
- 10) Ingleby, B., 2017. An assessment of different radiosonde types 2015/2016. ECMWF Technical Memorandum, 807, pp69. <https://doi.org/10.21957/0nje0wpsa>.
- 11) WEF, 2020. The Global Risks Report 2020. World Economic Forum, http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf 最終閲覧2020年1月27日
- 12) Zakrzewski, W. P., 1987. Splashing a ship with collision-generated spray. *Cold Regions Science and Technology*, 14, 65-83.
- 13) Overland, J. E. et al., 1986. Prediction of vessel icing. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25, 1793-1806.
- 14) Overland, J. E., 1990. Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures. *Weather and Forecasting*, 5, 62-77.
- 15) Kulyakhtin, A., Tsarau, A., 2014. A time-dependent model of marine icing with application of computational fluid dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 104-105, 33-44.
- 16) O'Neil, J. R., 1968. Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water. *Journal of Physical Chemistry*, 72, 3683-3684.
- 17) Lehmann, M., Siegenthaler, U., 1991. Equilibrium oxygen- and hydrogen-isotope fractionation between ice and water. *Journal of Glaciology*, 37, 23-26.

- 18) Eicken, H., 1998. Factors determining microstructure, salinity and stable-isotope composition of Antarctic sea ice: Deriving modes and rates of ice growth in the Weddell Sea. *AGU Antarctic Research Series*, 74, 89-122.
- 19) Uotila P. et al., 2019. An assessment of ten ocean reanalyses in the polar regions. *Climate Dynamics*, 52, 1613-1650.
- 20) Sakov P. et al., 2012. TOPAZ4: an ocean-sea ice data assimilation system for the North Atlantic and Arctic. *Ocean Science* 8, 633-656.
- 21) 林 昌奎, 山口 一, 2004. 氷海域の流出油変動シミュレーションモデル. *生産研究*, 56(6), 67-70.
- 22) Humpert, M. 2019. Russia's Northern sea route sees record cargo. *ArcticToday*.
- 23) 今井 克哉, 2017. 航行シミュレーションによる北極海航路の可能性評価. 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻 修士論文.

4.3

テーマ
2グリーンランドにおける
氷床・氷河・海洋・環境変動

4.3.1 全体概要

東久美子・杉山 慎

IPCC 第5次評価報告書 (IPCC-AR5) や SWIPA 報告書 (AMAP, 2017¹⁾) 等で述べられているように、北極域では温暖化が加速的に進行し、グリーンランドとその周辺地域では、氷床氷河、海洋、気候、環境が急激に変化している。このような変化は海面上昇および、地球規模の海洋循環や気候の急激な変化を招く恐れがあり、社会・経済への影響が懸念されるとともに、グリーンランド沿岸の地域住民の生活や伝統文化に影響を与えつつある。このような背景をもとに、本テーマでは、グリーンランドの内陸部を研究対象とする実施項目 I「グリーンランドにおける気候・氷床変動」と、沿岸部を研究対象とする実施項目 II「グリーンランドにおける氷河氷床・海洋相互作用」について研究を実施した (図 4-3-1)。

実施項目 I では、グリーンランド氷床の変動メカニズムと、その気候変動との関わりを解明するため、グリーンランド最大の氷流 North East Greenland Ice Stream (NEGIS) の上流部で実施されている EGRIP に参加した。EGRIP は、デンマークが主導し、正式な参加国は日本、米国、ドイツ、フランス、スイス、ノルウェーであるが、英国、スウェーデン、中国、イタリア等も非公式に参加している。EGRIP では、これらの国々との国際共同研究により、氷床コアの掘削・解析と氷床観測を実施している。EGRIP で掘削された氷床コア (EGRIP コア) だけでなく、過去にグリーンランドで掘削された氷床コアの解析も行った。さらに、氷床流動と海水準変動の研究のため、氷の

力学試験、および氷床モデルと Glacial Isostatic Adjustment (GIA) モデルを用いた計算機シミュレーションも実施した。得られた成果はグリーンランド氷床研究や全球規模の気候変動・海水準変動・海洋変動の研究コミュニティに対する科学的貢献となり、IPCC 第6次評価報告書 (IPCC-AR6) や、政策決定のための情報提供となることが期待される。

実施項目 II では、データ空白域であり、かつ自然環境の変化が加速しているグリーンランド北西部に着目し、最北の村カナック (Qaanaaq) 周辺 (図 4-3-2) で、気候変動の影響を受けた氷河氷床と海洋の変動、また両者の相互作用、さらにその結果生じる自然災害、人間生活や社会活動への影響に関する研究を実施した。スイス連邦工科大学・コペンハーゲン大学・フィレンツェ大学・地域住民との共同観測・研究、GINR・カルガリー大学と連携したカナック村での人文社会科学研究、Greenland Ice Sheet-Ocean interactions (GRISO) と連携した観測網整備を行った。氷河氷床・海洋変動の定量化、変動メカニズムの解明、さらに人文社会科学までをカバーする新しい研究成果を発信することで、グリーンランド研究に関する国際コミュニティや、AC 作業部会に対して貢献することを目標とした。

4.3.2 グリーンランドにおける気候・氷床変動

東久美子・本間 智之・中澤 文男・平林 幹啓・永塚 尚子・小室 悠紀
繁山 航・奥野 淳一・Ralf Greve・猿谷 友孝・高田 守昌・東 信彦
川村 賢二・大藪 幾美・齋藤 冬樹・阿部 彩子

研究の背景と目的

近年、グリーンランドと南極の氷床、および世界各地の氷河で氷の質量が減少しており、海面上昇への影響が懸念されている。特にグリーンランド氷床は質量減少が加速しており、今後、海面上昇への寄与がますます大きくなることが予想されている (IPCC-AR5 等)。グリーンランド氷床の質量損失加速の原因は、

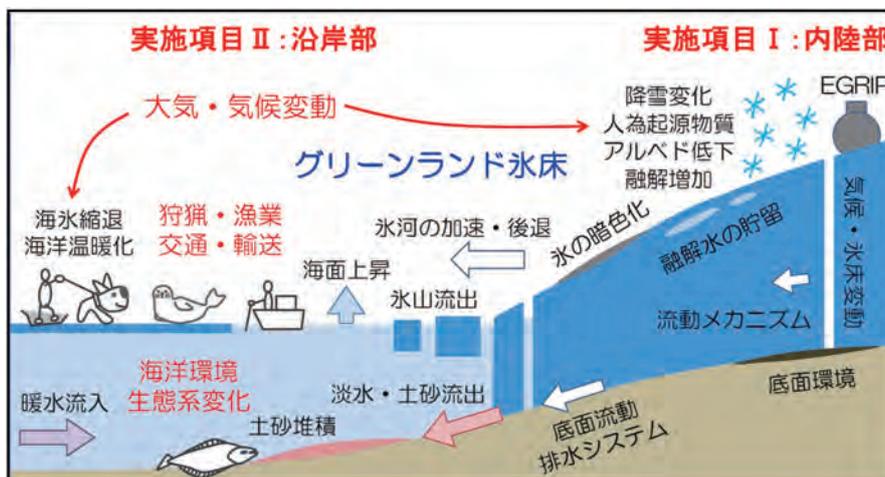


図 4-3-1. 本テーマの概要



図 4-3-2. 観測・研究実施地点

氷流から海への流出が加速していることや、表面質量収支の変化、融解水の海への流出の増加などであると考えられているが (Vallelonga et al., 2014²⁾)、その詳細は不明である。実施項目 I では、EGRIP 地点における近年の表面質量収支の変動を観測した。一方、氷流の流動メカニズムの解明には氷の流動特性の理解が不可欠であるため、氷の力学試験を行い、氷の流動則を高度化した。海水準変動に対するグリーンランド氷床の寄与を推定するため、氷床流動モデルを用いた数値シミュレーションを行った。さらに氷床流動モデルの制約に必要である GIA モデルの開発を行い、最終氷期においてグリーンランド氷床とそれ以外の氷床が全球の海水準におよぼした影響を推定した。

氷床の質量損失の増加によって多量の淡水が海へ流入すると、海水準上昇を招くだけでなく、海洋循環や大気循環が変化して、気候・環境が変化する可能性が高い。本研究では、温暖化が環境におよぼす影響を調べるため、グリーンランドで掘削された氷床コアを分析し、過去の気候・環境を復元した。

近年の氷床表面質量収支の変動

本研究では、グリーンランド内陸部における近年の氷床表面質量収支の変動を調べるために、EGRIP 地点において、2016～2019年の春～夏にピット観測を行った。本稿では2016年のピット観測から得られた結果を報告する (Nakazawa et al., submitted)。2016年には4.02mと3.18mの深さのピット(それぞれピット1およびピット2と呼ぶ)を掘り、層位観察と密度測定を行うとともに、ピットの壁面から約3cmの間隔で試料を採取した。採取した試料は国立極地研究所において質量分析

計により水の安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$ および δD) を、イオンクロマトグラフによりイオン成分の濃度を測定した。図4-3-3に、ピット1における層位、水の安定同位体比、過剰重水素 ($\delta^{18}\text{O}$ および δD から $\delta\text{D}-8\times\delta^{18}\text{O}$ によって計算される値で d-excess と呼ぶ)、メタンスルホン酸イオン (MSA) 濃度、密度を示す。水の安定同位体比、過剰重水素、密度が明瞭な季節変化を示していることがわかる。グリーンランドでは水の安定同位体比が夏にピークを示すことが知られており (例えば、Kuramoto et al., 2011³⁾)、そのピークの位置を夏としてピットの年代を決定した。秋にピークとなる過剰重水素、および夏にピークを示す MSA 濃度のピーク (例えば、Kuramoto et al., 2011³⁾) も補助的に用いた。ピット2についても同様の方法で年代決定を行った。年代決定の結果、ピット1は2006～2016年の10年間、ピット2は2009～2016年の7年間をカバーしていることがわかった。

ピット1と2のそれぞれについて、ピット観測の結果から得られた各年の年層の厚さと密度のデータを用いて、各年の表面質量収支(年間の積雪堆積量)を求めた(図4-3-4)。各年の表面質量収支(水等量:w.e.)は、ピット1では58～202mm w.e./yrの間で、ピット2では126～188mm w.e./yrの間で変動していた。ピット1では10年間の平均表面質量収支は138mm w.e.であった。ピット1と2で年が重複する7年間の平均表面質量収支は、それぞれ145mm w.e.および149mm w.e.であり、両者は非常に近い値であった。表面質量収支の年々変動は、降雪量の変動だけでなく、後述するように表面融解による融け水の移動や、風による積雪の再配分によって生じると考えられるが、EGRIPにおいては数年の平均をとるとこれらの影響が小

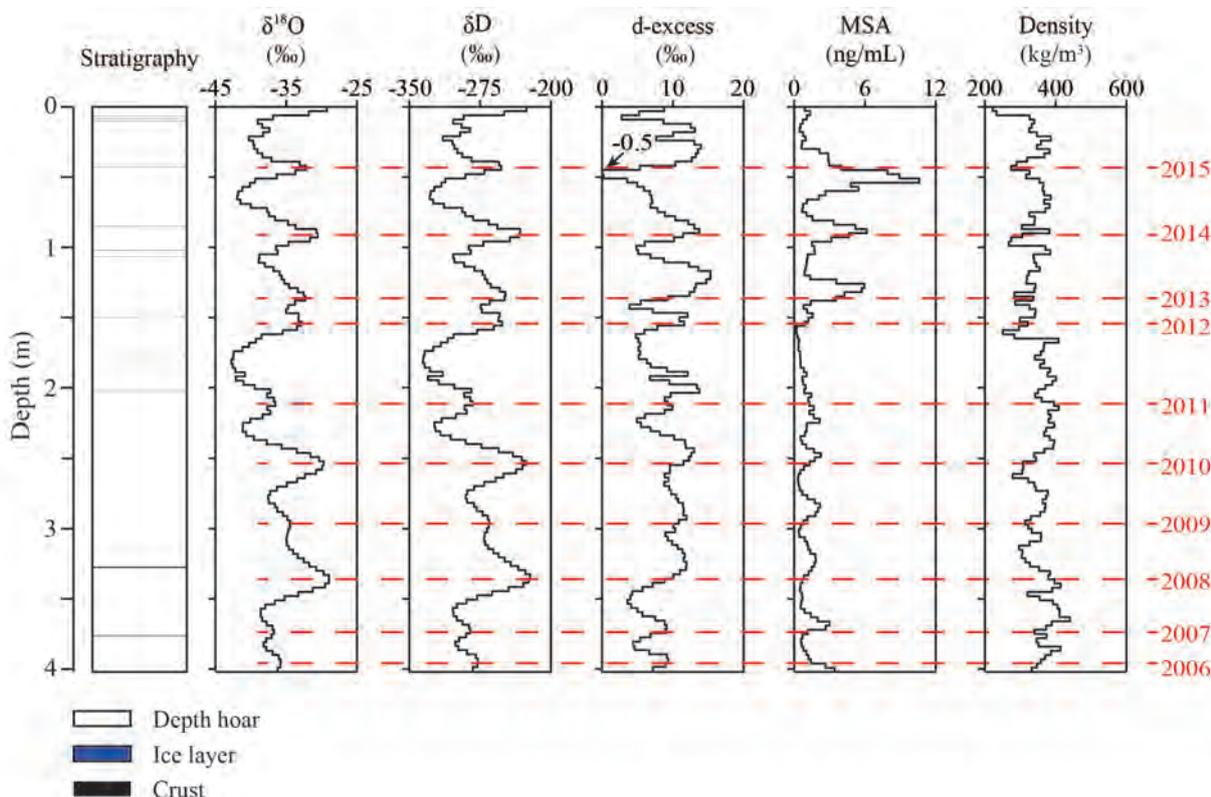


図4-3-3. EGRIPで2016年に掘ったピット(ピット1)における層位、水の安定同位体比、過剰重水素、MSA濃度、密度の鉛直プロファイル。各年の夏の位置を破線で示し、その年を図の右の赤字で示す。

さくることがわかった。これはグリーンランド内陸部の氷床表面質量収支の特徴を理解するうえで重要な知見であるとともに、EGRIP コアのデータを解釈する際に、重要な情報となる。

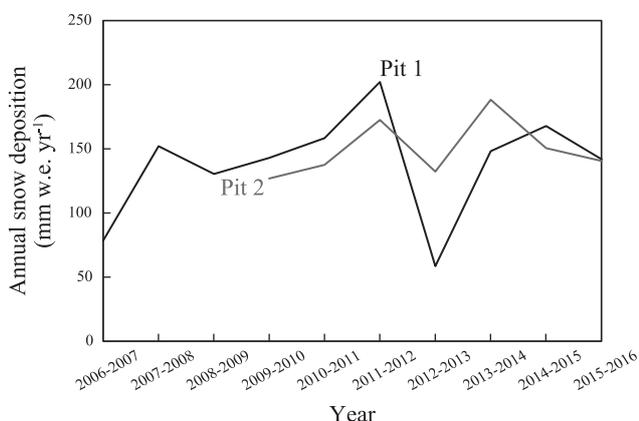


図 4-3-4. ピット 1 およびピット 2 から求めた表面質量収支 (年間の積雪堆積量) の変動

ピット 1 においては深さ 1.76m と 2.02 m に、ピット 2 においては深さ 2.04m と 2.25m に氷板が観測された。氷板が観測されたのは、2011 年夏と 2012 年夏の層の間である。2012 年 7 月にグリーンランド氷床のほぼ全域で表面融解が生じた (Nghiem et al., 2012⁴); Aoki et al., 2014⁵) が、これらの氷板はその際に生じた融け水が流下し、2011 年夏と 2012 年夏の層の間で再凍結して形成されたものであると考えられる。ピット 1 およびピット 2 では、融け水の移動によって、みかけ上、2012 ~ 2013 年の表面質量収支が低下し、2011 ~ 2012 年の表面質量収支が増加したと考えられる。

氷の流動特性

グリーンランド氷床では、降り積もった雪がやがて自重により押し固められて焼結し、氷となって氷床内部でクリープ変形し、その結果、氷床が流動すると考えられている。このような氷床流動により氷床末端で氷が海洋に流出し、結果的に海水面の上昇をもたらす (Larour et al., 2017⁶)。先行研究により、氷床氷中の結晶粒のサイズや結晶配向、不純物 (鉱物微粒子、塩微粒子、生物起源微粒子等) が流動に影響をおよぼすことが知られている (Faria et al., 2014⁷) が、その詳細は不明である。これまで氷床の流動モデルは、以下に示す Glen の流動則を用いて記述されてきた (Glen, 1955⁸); Goldsby and Kohlstedt, 2001⁹)。

$$\dot{\epsilon} = A \frac{\sigma^n}{d^p} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 A はエンハンスメント・ファクター、 σ は負荷応力、 d は平均結晶粒径、 p は粒径パラメーター、 R は気体定数、 T は絶対温度である。この法則では、 n 値として 3 が用いられてきた。しかし、近年の研究では n 値は 4 程度となることが報告されている。また、不純物を含まない人工微細

氷を用いた実験でも、 n 値が 2 程度を示すことが報告されている (Goldsby and Kohlstedt, 2001⁹)。このように、現在一般的に氷床モデルで適用されている Glen の流動則を用いて議論を続けることは困難であることがわかってきており、今後氷床モデルを高度化する際に考慮に入れる必要がある。

そこで本研究では、人工氷中に不純物を模擬した SiO_2 微粒子を含有させ、低温室内で力学試験 (本研究ではクリープ試験) を実施することで、固体微粒子が氷の変形挙動にどのような影響をおよぼすかを検証した。あわせてグリーンランド最大の氷流 NEGIS の流動メカニズム解明のため、NEGIS の上流部の EGRIP 地点で氷床コアを掘削し、EGRIP コアの物理分析や掘削孔観測等を実施した。EGRIP 地点は水平方向の流動速度が従来の深層氷床コア掘削地点に比べて非常に大きい (約 65 m yr^{-1} , Vallelonga et al., 2014²) のが特徴であり、氷床流動メカニズムの解明に適した地点である。EGRIP コアの一部を用いたクリープ試験も実施する予定であったが、EGRIP コアの入手が遅れたことから、同じグリーンランド氷床のコアとして、North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM, NEEM community members, 2013¹⁰) コアから不純物濃度の異なる試料を選定して力学試験を行い、不純物が氷の変形におよぼす影響を検討した。

人工氷を用いたクリープ試験 (Saruya et al., 2019)

純水と直径 300nm の SiO_2 微粒子を混合してボトルに入れ、それを液体窒素中に噴霧することで粉末を作成し、得られた粉末を機械的に圧縮して焼結体を得た。このようにして作成した不純物含有氷と純水から作成した焼結体を重ね合わせてクリープ試験を実施したところ、不純物含有氷で顕著に塑性変形が生じ、不純物が氷の軟化に影響をおよぼすことを可視化することができた (図 4-3-5)。このように粉末を焼結することで、人工氷を作成し、さらに純水に SiO_2 微粒子を混合することで疑似的に氷床を模擬した実験が可能になった。

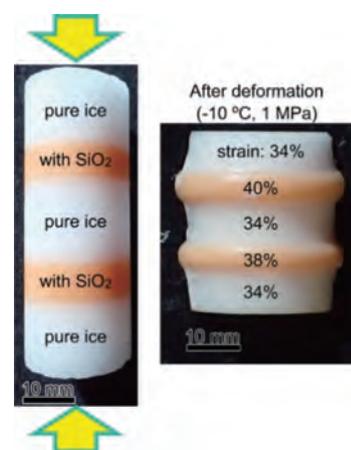


図 4-3-5. 人工氷に不純物を含有させ、クリープ変形させた試料

同様に、不純物含有氷のみをクリープ変形に供し、クリープ試験を実施した。不純物添加の効果を確認するため、ひずみ速

度 - ひずみ線図の特徴を純水氷と比較したところ (図 4-3-6)、不純物を分散することでクリープ速度が加速することが明らかとなった。不純物が変形の初期から影響をおよぼすことがわかり、測定した全ひずみ範囲にわたって、軟化することを示している。人工氷を用いた実験で特にユニークな特徴は、ひずみ速度 - ひずみ線図に明瞭なひずみ速度の回復領域が現れない点である。一般的には、ひずみの増加とともに結晶粒内にひずみが蓄積することで、変形中に結晶粒内に新しい結晶がうまれる現象 (再結晶) が起こり、これにより、ひずみ速度は途中で増加傾向を示すが (Wilson et al., 2014¹¹)、微細な人工氷を用いることで、ひずみが単調に低下することが明らかとなった。

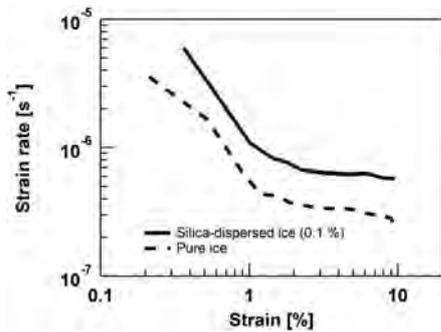


図 4-3-6. - 20°C、1MPa でクリープ変形して得られたひずみ速度とひずみ線図

ひずみ 10% までの変形に対して、光学顕微鏡を用いた組織観察を行ったところ、SiO₂ 微粒子を純水中に分散させることで、変形初期から結晶粒径が約 40 μm まで微細化していることがわかった。この結果は、氷床内に取り込まれる不純物の濃度が季節変動や気候変動などにもなって高くなることで、氷床内で局所的に結晶粒が微細化する層が存在することを示唆している。EGRIP 地点でも、曇って見え、cloudy band (Faria et al., 2014⁷) と呼ばれる水平方向のバンド状の層が観察されており、このような層では、結晶粒が微細化し、氷中に多量の不純物が含有されていることが多い。したがって、このような層は変形速度が大きいと考えられる。

本研究では、不純物を含有させた人工氷を用いて、温度一定でクリープ試験を行い、負荷応力を変化させてひずみ速度を測定することで応力指数 n を算出した。また、応力一定でクリープ温度を変化させてひずみ速度を測定することで活性化エネルギー Q を算出した。このようにして求められた n 値と Q 値は、不純物含有の有無によらず $n=1.8-2.0$ 、 $Q=60-66\text{kJ/mol}$ であった。

圧密氷を作成する際に、空気を入れながら圧密化を行うと、わずかに結晶粒が大きい人工氷を作成できることがわかった (純水氷で直径 100 μm 程度)。また、種氷を用いて純水氷を結晶化させることで、粗大な結晶粒径を有する人工氷を作成することにも成功した。これらの人工氷を用いて、Glen の流動則中の p 値を求めたところ、1.4 に収束することがわかった (図 4-3-7)。このことは、氷床の深層部で不純物を多く含有する層では、流動速度が変化することで、氷床流動に大きな影響をおよぼす可能性を示唆しており、氷床中の不純物自体の解析をさらに進めることが、氷床流動の本質を理解するために重要であると考えられる。

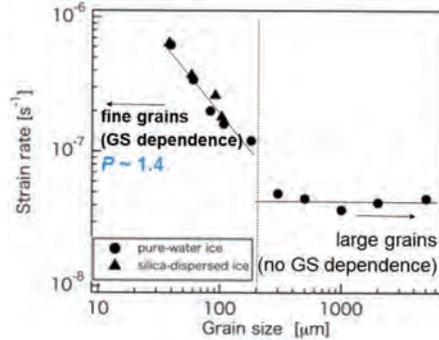


図 4-3-7. - 20°C、1MPa でクリープ変形して得られたひずみ速度の粒径依存性

氷床コアを用いたクリープ試験

不純物が氷床流動におよぼす影響を理解するため、人工氷に加えて NEEM コアを用いた変形実験を実施した。一般的に氷床氷は特徴的な c 軸方位分布を有し、 c 軸方位分布が氷床の (圧縮) 変形や流動に大きな影響をおよぼすことが知られている (Faria et al., 2014⁷)。純粋に氷床氷中の不純物の影響を理解するには、 c 軸方位分布の違いの影響を除去する必要がある。そこで、特徴的な c 軸方位分布を有する NEEM コアに対し、高圧をかけて相変化を起こさせることで結晶粒を微細化するとともに、 c 軸方位分布のランダム化を実現することに成功した。

NEEM コアから選んだ 4 つの試料 (#2815、#3575、#3775、#3925) について、上記の方法で c 軸方位分布のランダム化を行った後、変形実験を行った。試料 #3575 がもっとも不純物濃度が高く、#3575 > #2815 > #3925 > #3775 の順に不純物濃度が高かった。これらの試料を相変化させた後、- 10°C で 1 週間放置し、ひずみを取り除いた。その後、- 20°C、1MPa の条件で最大ひずみ 5% までクリープ変形させた際の、ひずみ速度 - ひずみ線図を図 4-3-8 に示す。大雑把には不純物濃度が高いと軟化 (ひずみ速度が上昇) し、低いと硬化 (ひずみ速度が低下) する傾向がみられたものの、ひずみ速度と不純物濃度の関係には、明確な相関関係が認められなかった。この結果から、クリープ変形速度は必ずしも不純物濃度に依存しないことが示唆された。

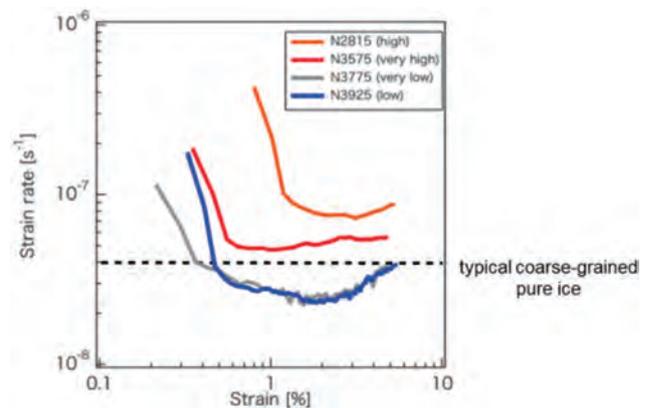


図 4-3-8. 相変化実験後に - 10°C で 1 週間放置し、ひずみを取り除いた後のクリープ試験結果 (- 20°C、1MPa)

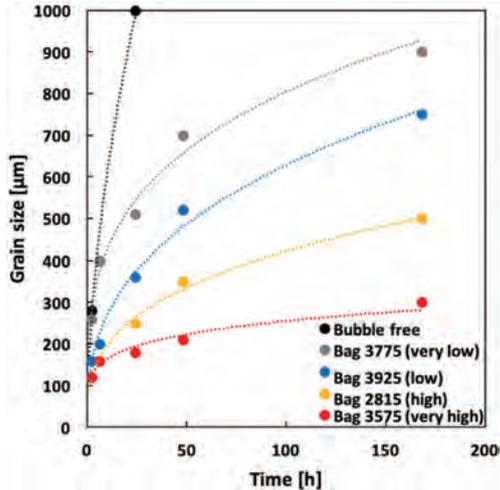


図 4-3-9. 相変化させた NEEM コア試料を -10°C で放置し、ひずみを取り除いた際の粒成長挙動

一方、相変化実験後に -10°C で放置し、ひずみを取り除いた際の NEEM コアの結晶粒径 (直径) の変化 (図 4-3-9) は、不純物濃度と粒成長挙動が一致することを示唆している。このことから、氷床氷中の不純物は、Zener ドラッグ^{*1} による結晶粒微細化に大きな影響をおよぼす可能性が高いことがわかった。つまり、不純物が直接変形を促進しているのではなく、不純物が存在することで結晶粒微細化を起こすため、変形速度が大きくなると考えられる。

氷床モデルおよび GIA モデルによるシミュレーション

海水準変動の高精度予測のためには高精度の氷床モデルを構築する必要がある。氷床モデルの制約条件として過去の氷床量を正確に求める必要があり、高精度の GIA モデルの開発が不可欠である。そのため、本研究では、氷床モデルと GIA モデルの高度化を行った。

NEEM の掘削孔観測データと NEEM コアの不純物データを解析したところ、不純物濃度の高い寒冷期の氷において氷床流動のエンハンスメント・ファクターが大きく変形速度が大きいこと、数千年スケールの気候変動にともなう不純物濃度の変動に対応してエンハンスメント・ファクターが大きく変動すること、最終氷期と最終氷期よりも前の氷期とでエンハンスメント・ファクターが異なることが明らかになった。この結果を考慮した氷床モデルを用いてグリーンランドのスピナアップ・シミュレーションを行ったところ、グリーンランドで、地形と表面流速が観測値とよく一致するようになった (図 4-3-10、Greve, 2019)。また、パリ協定と整合する RCP2.6 シナリオ^{*2} にもとづく温暖化予測シナリオを用いてふたつの氷床モデル SIMulation COde for POLythermal Ice Sheets (SICOPOLIS) および Ice Sheet System Model (ISSM) によって比較実験を行った。その結果、2300 年までのグリーンランド氷床の質量損失は海水準相当で 62 ~ 88mm であると推定された (Rückamp et al., 2018)。

GIA モデルについては、現実的な下部マントル粘性構造を考慮した GIA モデルを開発し、海水準変動、低次のジオイド変動を再現した (Nakada et al., 2016)。その結果、低次のジオイ

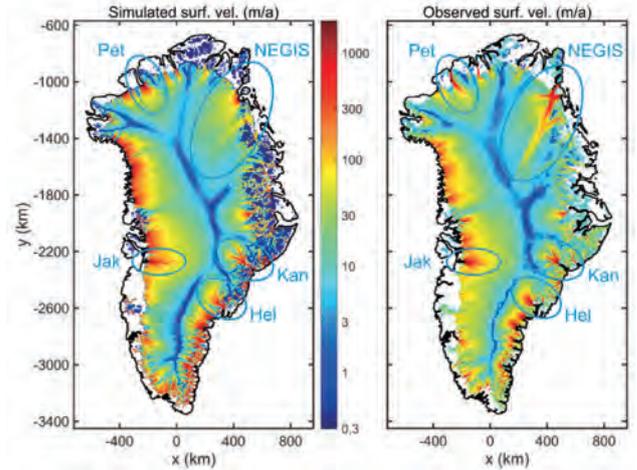


図 4-3-10. 氷床モデル (左) および衛星観測 (右) から得られたグリーンランド氷床の表面流速 (Greve, 2019)

ドデータが平均的な全球氷床量変動と下部マントル粘性構造の推定に有効であることを示した。さらに、最終氷期の海面低下期における詳細な氷床量変動を明らかにし、グリーンランド氷床を含めた各氷床の寄与を定量的に求めた。このような知見は、最終氷期以降のグリーンランド氷床変動史を構築するうえでの貢献となり、氷床モデルに重要な制約を与える。

過去の気候変動にともなう環境変動

NEEM コアのイオン分析結果から、過去 13 万年間の陸域環境の変化を復元した (図 4-3-11、Schübach et al., 2018)。その結果、北米の陸域植物の活動は、グリーンランドで現在よりも $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 温暖だったと考えられている完新世初期と、現在よりも 8°C 程度温暖だったと考えられている最終間氷期とで、ほとんど違いがみられなかった。一方、東アジアの乾燥域が起源と考えられている鉱物ダストの発生量は、最終間氷期の方が完新世初期よりも 3 割程度大きかったことが示唆された。これは、最終間氷期におけるグリーンランドの温暖化の度合いが北極の温暖化増幅によって全球平均よりも大きかったことを考慮すれば、将来の地球温暖化を $1.5 \sim 2^{\circ}\text{C}$ に抑えることができれば、北半球中緯度～高緯度において、それほど大きな陸域環境の変化が起きない可能性を示唆するものである。

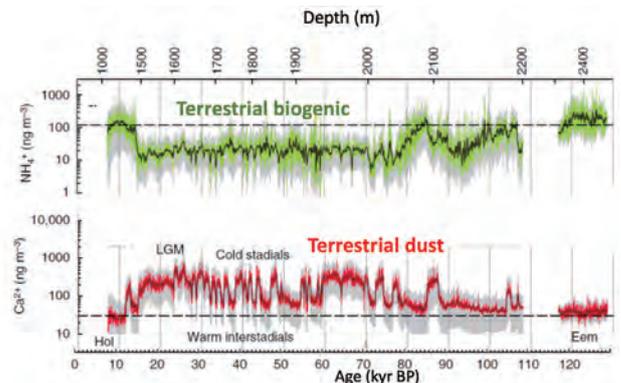


図 4-3-11. グリーンランド氷床コアから復元された過去 13 万年間の陸域環境変動。緑のアンモニウムイオンは北米の陸域植物起源、赤のカルシウムイオンは東アジア乾燥域の鉱物ダスト起源であると考えられている (Schübach et al., 2018)。

本研究では、さらに、NEEM コアの Br 分析の結果から、過去 11 万年間の海水変動を復元した (Spolaor et al., 2016)。その結果、カナダ北極域において、氷期の寒冷期には多年氷が多かったこと、完新世初期には多年氷が減少し、一年氷の面積が過去 11 万年のなかで最大となっていたことがわかった。この結果は、地球温暖化の進行により、北極海の多年氷が今後さらに減少することを示唆する。

本テーマでは、テーマ3との連携により、グリーンランド北西部の SIGMA-D 地点で掘削された氷床コアから過去 350 年間の BC の変動を復元した。その結果、20 世紀前半に人為起源の BC が大きく増加したこと、人為起源 BC により、BC の季節ピークが夏から冬にシフトしたことなどが明らかになった。また、夏には大規模な森林火災によって BC 濃度が短期間大きく増加したことが度々あったが、温暖化が進んでいる最近 20 ~ 30 年間でも、その頻度や規模の増加傾向はみられなかった。一方、同じコアから過去 100 年間の鉱物ダスト粒子の組成を調べたところ、寒冷だった 1950 ~ 1980 年代はダスト粒子の大部分が東アジア起源と考えられる鉱物であったのに対し、温暖だった 1920 ~ 1940 年代および 1990 ~ 2010 年代は、グリーンランド沿岸部が起源と考えられる鉱物粒子の割合が寒冷期に比べて多くなっていたことが明らかになった。温暖期にはグリーンランド沿岸部で、氷河の後退または季節積雪に覆われる期間の短縮により、ダストの発生量が増えていたことが推定される。この結果から、今後の温暖化の進行により、グリーンランド沿岸部のダストの影響が大きくなることが予想される。

本研究では EGRIP コアの BC 分析を実施し、BC 濃度に明瞭な季節変動がみられることや、20 世紀前半と考えられる深さで BC 濃度の増加が生じたことなどがわかった。また、深さ 1,384m までは火山噴火によって生じる硫酸のピークを利用した初期的な年代決定を行った (Mojtabavi et al., submitted)。より詳細なコアの年代決定や BC 濃度データの解析により、過去の温暖化にともなう森林火災の頻度や規模の変化などについての知見が得られると期待される。

4.3.3 グリーンランドにおける氷河氷床・海洋相互作用

杉山 慎・的場 澄人・飯塚 芳徳・Ralf Greve・古屋 正人
Evgeny Podolskiy・館山 一孝・山崎 新太郎・渡邊 達也
高橋 美野梨・林 直孝・漢那 直也・安藤 卓人・榊原 大貴

研究の背景と目的

氷河氷床の急激な質量損失を受けて、グリーンランド沿岸における環境変化が著しい。本研究では、気候変動の影響を受けて後退する氷河氷床と海洋の相互作用に焦点を当て、グリーンランド沿岸部の環境変化を総合的に解析した。特に、海洋の影響を受けて縮小する氷河氷床の質量変動を定量化し、その変動に海洋が果たす役割および氷河変動が海洋環境と生態系に与える影響の解明を、研究の中心目的とした。

この目的を果たすために、グリーンランド北西部に位置する

人口約 600 人のカナック村にて研究を実施した (図 4-3-12)。この地域では 1990 年代から日本の研究者が調査活動を行っており、日本人冒険家による活動の歴史は 1970 年代にまで遡る。また 2012 年以降には GRENE 北極による研究活動が実施された。上記の課題を解決するため、これらの実績にもとづいて、現地で重点的な観測を行うとともに、衛星データ解析と数値モデリングを実施した。

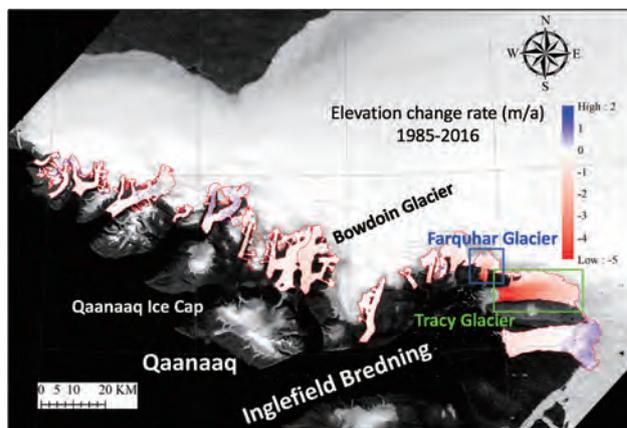


図 4-3-12. 研究対象地グリーンランド北西部カナック周辺の衛星画像。カラースケールは、1985 ~ 2016 年における溢流氷河の表面標高変化を示す (Wang et al., 投稿準備中)。

さらに本研究では、氷河・海洋とそれらを取り巻く自然環境の変化が、グリーンランド沿岸に生活する人々の暮らしに与えるインパクトにも着目した。具体的には、調査活動期間中に発生した河川洪水や地すべり災害の要因を調査するとともに、ワークショップ開催やアンケート調査によっても、環境変動と社会影響に関する情報を収集した。研究活動によって明らかになった科学的な知見を地域住民に還元し、進行する環境変化とその社会への影響を住民自身と議論することで、北極域の持続可能な未来に資することを目指した。

氷河氷床変動の定量化

カナック地域における氷河・氷床・氷帽の変動を定量化するため、衛星データにもとづいて、氷河氷床の表面標高、末端位置、流動速度を測定した。その結果、氷床から独立した氷河氷帽およびグリーンランド氷床から溢流する海洋性のカービング氷河 (末端が海に流入する氷河) で顕著な氷損失が明らかとなった。まずカナック村近くに位置する 6 つの氷帽における 2006 ~ 2010 年の標高変化を測定したところ、平均 -1.1 m a^{-1} の表面低下すなわち氷損失速度が得られた (Saito et al., 2016b)。この値は、それ以前の報告 (2003 ~ 2008 年) から氷損失が 2 倍に加速していることを示す。さらに、対象域に位置する 19 本すべての海洋性カービング氷河が、2000 年以降に後退傾向にあることが明らかになった (図 4-3-13, Sakakibara and Sugiyama, 2018)。いくつかの氷河は流動の加速をともなって急速に後退しており、氷厚減少にともなって氷河底面が不安定になった可能性が高い。すなわち、氷河・海洋の底面地形によって定まる閾値よりも氷が薄くなり、氷河末端に作用する浮力が重力を上回った可能性を示唆している。また氷河の流

動は夏に加速して顕著な季節変動を示す。この加速が、融解水による氷河底面の潤滑によるものであることが確認され、気候が氷河変動に与えるさらなる影響が示された (Sakakibara and Sugiyama, 2019)。さらにコペンハーゲン大学と協力して、1985年に撮影された航空写真を活用して過去30年間の表面標高変化を測定した。その結果、後退の激しい氷河では 5m a^{-1} を上回る速度で氷が失われていることが示された (図 4-3-12、Wang et al., 投稿準備中)。さらに、2000年頃まではほぼ一定であった標高が21世紀に入って減少傾向に転じており、研究対象地において氷河質量が減少に転じたタイミングが解明された。

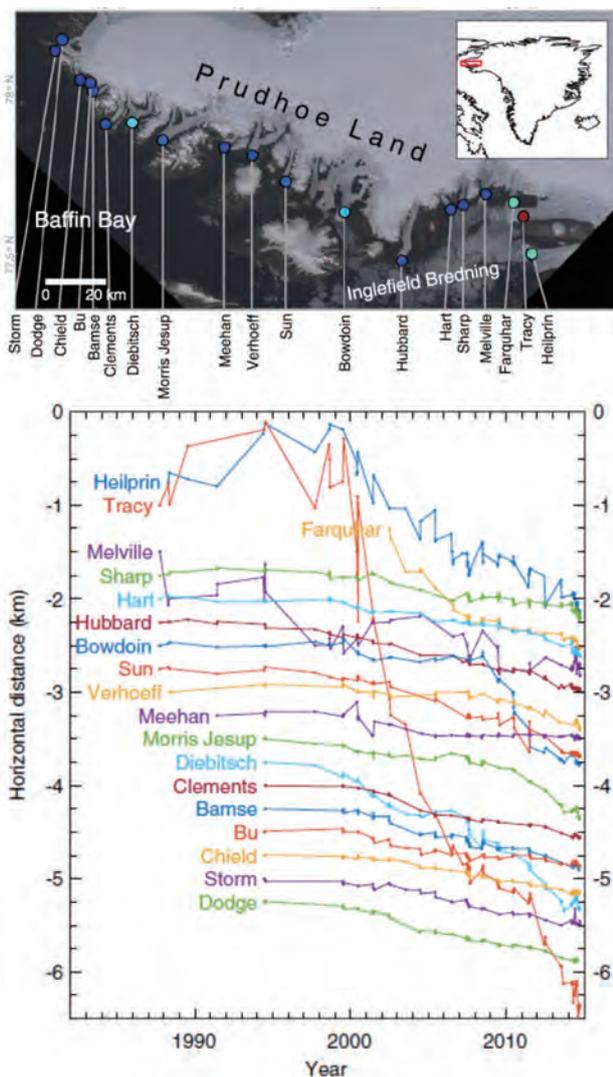


図 4-3-13. カナック周辺に位置するカービング氷河の末端変動 (Sakakibara and Sugiyama, 2018)。地図中のカラースケールは2000～2014年の変動速度。2000年以降に全氷河が後退傾向にあることが判明した。

カナック村近傍のカナック氷帽では、2012年に開始した質量収支と流動速度のモニタリングを継続した。質量収支と流動速度は、氷河氷床変動を決定する重要なプロセスである。氷帽から村の西側へ溢流するカナック氷河の流線上に6カ所の測定地点 (243～968m a.s.l.) を設け、6月末～8月上旬にかけて雪尺高さや移動量、積雪量などの測定を行った。その結果、2012～2019年にかけて7年間の年間質量収支が定量

化された (図 4-3-14、Tsutaki et al., 2017b; 近藤他, 2019)。質量収支は2014～2015年に大きな負の値 (カナック氷河流域平均で約 -0.7m w.e. a^{-1}) を示した後増加に転じ、2016～2017年と2017～2018年には流域平均で質量増加を示すデータが得られた。しかしながら続く2018～2019年には、2014～2015年に匹敵する大きな質量損失が測定され、顕著

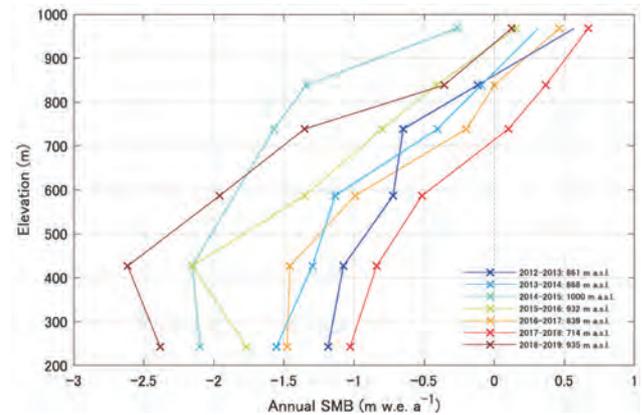


図 4-3-14. カナック氷帽において観測された2012～2019年の年間質量収支 (Tsutaki et al., 2017b; 近藤他, 2019)

な年々変動が明らかになった。観測期間中の平均質量収支は明らかに負の傾向を示しているものの、気温と降雪に影響を受けたその変化は複雑で、長期的なモニタリングの重要性が明らかになった。以上の質量収支データは国際連合教育科学文化機関 (UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) や WMO のもとで氷河変動データを収集する世界氷河モニタリングサービス (WGMS: World Glacier Monitoring Service) に報告するとともに、グリーンランド沿岸における質量収支測定を取りまとめる研究取り組みに提供された (Machguth et al., 2016)。一方の流動速度は、2012年夏の大きな表面融解によって加速した後、夏季の流動変化は観測されなかった。年間平均の流動速度は氷厚減少に応じて減少傾向にあることが判明した (近藤他, 2019)。この他、氷帽表面標高変化 (Tsutaki et al., 2017a)、氷温度など (Tsutaki et al., 2017b)、氷河の変動メカニズムを明らかにするうえで重要な測定結果を得て報告した。

カービング氷河の変動メカニズム

カービング氷河の急激な後退メカニズム、特に海洋との関係性を明らかにするため、カナック村から20kmに位置するボードイン氷河末端付近にて現地観測を実施した。2013～2015年に毎年実施された観測を受けて、スイス連邦工科大学と共同で2016～2019年に実施したものである。GPSによる表面標高測量を実施して衛星データと比較解析したところ、氷河末端部において -5m a^{-1} を超える表面低下速度が明らかになった。さらに、表面質量収支、氷河の上流側や陸に末端を持つ近隣氷河との比較から、海洋との相互作用によって生じる末端消耗 (カービングと水中融解) が氷河変動に大きな役割を果たしていることが判明した (図 4-3-15、Tsutaki et al., 2016)。つまり、温暖化による表面質量収支の減少に加えて、何らかの原因で末端

消耗が増加したことが氷河の質量損失の原因といえる。さらに、新しく開発した無人観測船を活用して氷河近傍で水深を測定し (Yamasaki et al., 2017)、氷厚測定の結果と合わせて末端付近の基盤地形を精査したところ、2007年以降に急速な後退が起きた地域で基盤が氷河上流に向けて深くなっていることが判明した (浅地他, 2017, 2018)。この結果は、従来数値実験などで示されてきた、基盤地形がカービング氷河の末端変動に与える影響を確認するものである。地域最大のフィヨルドであるイングレフィールド湾に流入する他のカービング氷河についても同様な観測を行った結果、過去の氷河後退と海底地形との関係性が明らかになった。

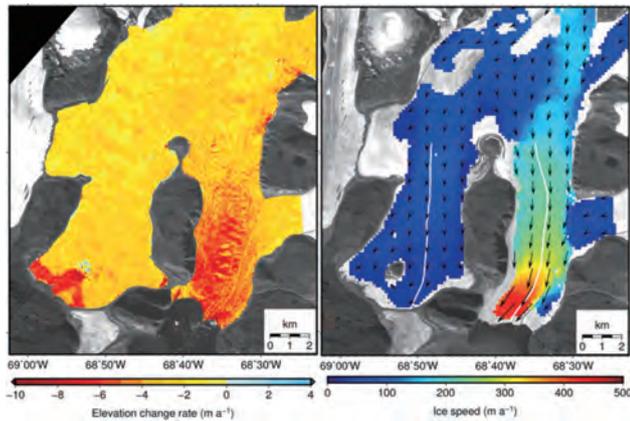


図 4-3-15. ボードイン氷河とタクト氷河における 2007～2010 年の表面標高変化 (左) および流動速度 (右) (Tsutaki et al., 2016)。流動速度の大きいカービング氷河であるボードイン氷河 (東側) でより大きな氷厚変動が明らかになった。

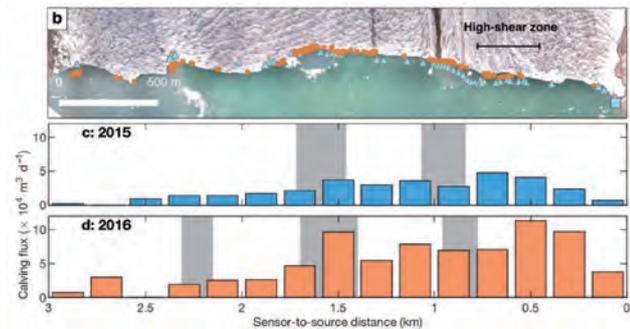


図 4-3-16. 2015 年と 2016 年夏季における、ボードイン氷河末端部のカービング発生地点とカービングフラックスの空間分布 (Minowa et al., 2019)

スイス連邦工科大学との共同取り組みとして、カービングに関する詳細な観測を実施した。従来観測が困難であったカービング端を無人航空機 (UAV: unmanned aerial vehicle) によって高い時空間分解能で観測した結果、クレバス発生から巨大なカービングイベントに至る一連のプロセスが詳細まで明らかになった (Jouvet et al., 2017, 2018)。さらに地震計を使って微細な氷河振動を測定したところ、カービングのきっかけとなるクレバスの形成頻度が潮汐によって変化する現象が見出された (Podolskiy et al., 2016)。一方、氷河前のフィヨルドに水圧センサーを設置してカービングに起因する津波をモニタリングしたところ、カービングが発生した位置とその規模を定量化することに成功した (図 4-3-16、Minowa et al., 2019)。この成果は、

津波測定によってカービングを定量化する新しい試みであり、氷河末端消耗の観測技術を大きく推し進めるものである。

以上の観測で得られたデータと衛星データにもとづいて、氷河数値モデルによる数値実験を実施した。氷河の末端部約 10km について 3 次元流動モデルを構築し、夏季の流動変化を再現したところ、潮汐が氷河流動に与える影響が確認された (図 4-3-17、Seddik et al., 2019)。さらに、融解水や降雨による氷河底面の流動性の変化が強く示唆され、カービング氷河の流動が環境変化に著しく敏感であることが定量的に示された。さらに、氷河末端部数百 m の領域に 3 次元流動・破壊モデルを適用し、クレバスの成長とカービング発生に関する実験を行った。その結果、氷河の水中形状がカービングに大きな影響を与えることが定量的に示された (van Dongen et al., 2019)。

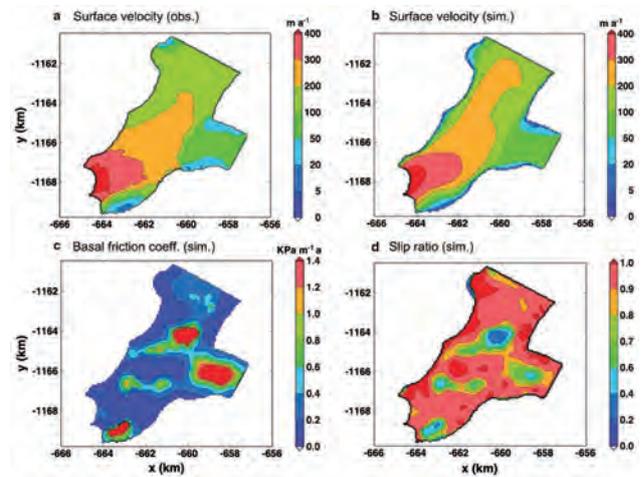


図 4-3-17. 3 次元数値モデルによって計算されたボードイン氷河の流動速度、底面摩擦係数、表面流動速度に対する底面流動の割合 (Seddik et al., 2019)

氷河流入フィヨルドの海洋環境と生態系

ボードイン氷河が流入するボードインフィヨルド、およびイングレフィールド湾において、2016～2019 年の 7～8 月に海洋観測を実施して、氷河と海洋の相互作用について解析を行った。ボードインフィヨルドにおいて水温・塩分等の物理特性を測定したところ、約 200m 以深に大西洋由来の塩分濃度の高い暖水 (Atlantic Water)、その上層には極域由来の冷水 (Polar Water) の存在が確認された (図 4-3-18、Ohashi et al., submitted)。夏季間に各水塊が占める深度は著しい年々変動を示し、氷河融解水の流入がその変動の要因と考えられる。海水中に融解水が湧昇する様子を再現する数値モデルを構築して実験したところ、融解水の流出量に加えて、フィヨルドの成層状態が、湧昇水の拡散に大きな影響を与えることが判明した (松村他, 2017)。氷河融解水がフィヨルドの循環に与える影響の詳細を測定するため、2016～2019 年にはボードインフィヨルド内で係留系を使った通年測定を実施した。特に氷河の前縁 1km での測定は強い季節変動を示し、夏季に氷河底面から融解水がフィヨルドに流出して湧昇することで強い循環を駆動していることが明らかになった (藤支他, 2019)。そのようなメカニズムはこれまでも提唱されていたものの、本研究は氷河近傍の長

期観測でその実態を明らかにしたはじめての例となる。

氷河から流出する融解水の影響は、フィヨルドの物理的環境のみならず、海洋生態系に大きな役割を果たす。ボードインフィヨルド内で詳細な測定と採水・分析を行ったところ、フィヨルド深部に多く含まれる栄養塩が融解水とともに表層へ湧昇し、海洋生産に主要な貢献を与えていることが判明した(図4-3-19、Kanna et al., 2018)。この研究を報告した論文は、米国地球

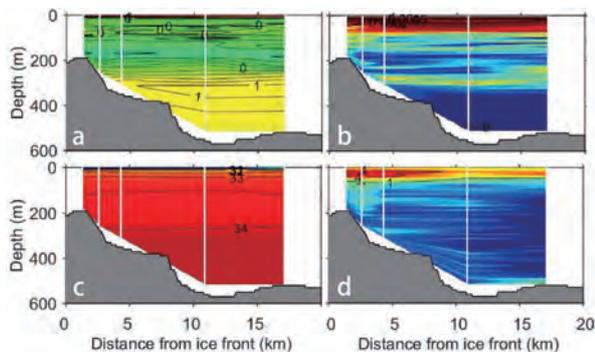


図4-3-18. 2016年7月に測定された、ボードインフィヨルドにおける温度、塩分、プラント・パイサラ振動数、濁度の分布 (Ohashi et al., submitted)

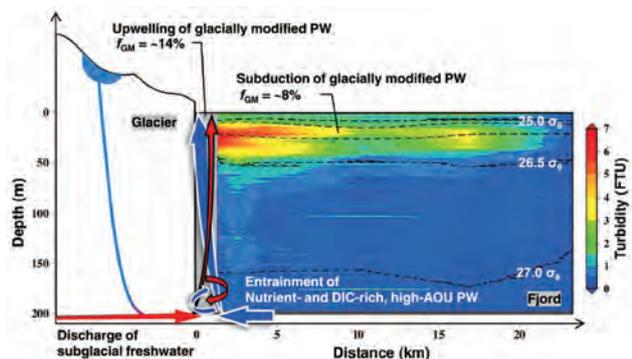


図4-3-19. ボードイン氷河前のフィヨルドにおける、濁度分布および栄養塩の輸送を示す模式図 (Kanna et al., 2018)。氷河底面から排水される融解水の湧昇が、栄養塩を表層に輸送するメカニズムが明らかになった。

物理連合 (AGU: American Geophysical Union) の広報誌にてハイライトを受けたほか、出版1年余りで IPCC の『変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する IPCC 特別報告書』を含めて15件の引用を受け、当該分野内外で大きな注目を浴びている。カービング氷河の前縁には無数の海鳥が集まり、アザラシなどの海生哺乳類も多いことが知られていた。ボードイン氷河においてこの特殊な氷河前生態系を調査したところ、潜水を苦手とする海鳥が、湧昇によって表層にもたらされる動物性プランクトンや魚を狙って群集を形成することが明らかになった(図4-3-20、Nishizawa et al., 2019b)。氷河前のフィヨルド表層には、通常は海底地形に分布する大型の動物プランクトンが観測された (Naito et al., 2019)。これらの結果は、湧昇流が栄養塩だけでなく小型動物を輸送して、高次捕食者の採餌を支えていることを示している。以上の研究成果は、カービング氷河が海洋生態系に果たす役割を定量的に示し、氷河前の特殊な生態系の理解を推進するものである。

このほか、グリーンランド北西部の広い範囲で、氷河氷床から海洋に流出する懸濁水の分布を定量化した (Ohashi et al.,

2016)。その結果は、気温の上昇にともなって海洋が懸濁水に覆われる範囲が増加することを示しており、温暖化による海洋環境変動を示唆するものである。



図4-3-20. ボードイン氷河の前縁に集まる海鳥の群れ (Nishizawa et al., 2019b)。枠内は魚を捉えた海鳥を示す。

雪氷・大気環境変動

グリーンランドにおける雪氷と大気環境の変動を明らかにするために、これまでに掘削された氷コアの分析と新規氷コアの掘削を行った。カナック地域の内陸に位置する SIGMA-A 地点 (1,490m a.s.l.) では2017年5月に長さ60mの氷コア掘削に成功した (Matoba et al., 2018)。このコアを解析した結果、過去100年間に温暖な時期が3期間あったことが推定された。また同時に観測した降雪の同位体を分析した結果、バフィン湾の海面温度や海水状態が氷床降雪の同位体に与える影響が明らかになった (図4-3-21、黒崎他, 2018a)。また2014年に同地域のさらに内陸に位置する SIGMA-D 地点(2,100m a.s.l.)にて掘削された長さ225mの氷コアを解析し、約400年間の降水量を復元することに成功した。

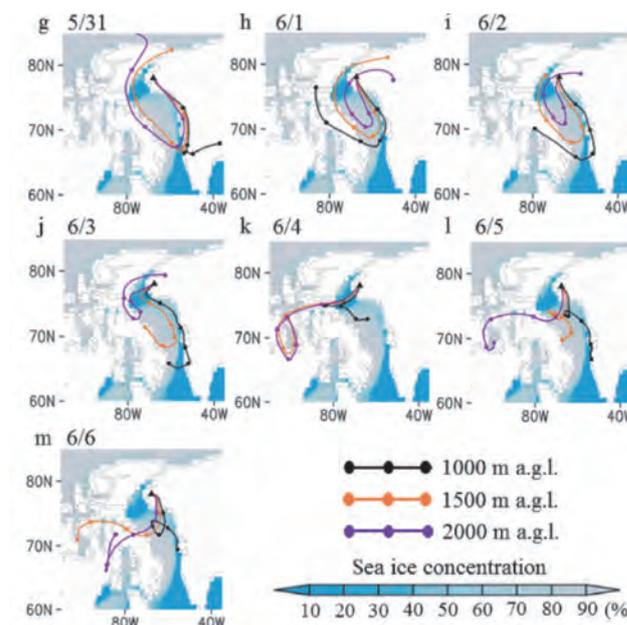


図4-3-21. 2017年5月に SIGMA-A 地点で観測された降雪の水蒸気の輸送経路と海氷密接度の解析結果 (黒崎他, 2018a)

一方、グリーンランド南東部の SE-Dome で掘削された氷コアの解析では、密度測定により高涵養領域の圧密過程の特性が明らかになった (Iizuka et al., 2017)。また水同位体分析から年代を詳細に決定して海氷面積と降水量の関連を見出したほか (図 4-3-22、Furukawa et al., 2017)、過去 60 年間に遡るエアゾルの沈着量と組成の時間変動を復元した (Iizuka et al., 2018; Ando et al., 投稿準備中)。さらに有機不純物の分析によって、北半球の森林火災の歴史を復元することに成功した (Parvin et al., 2018)。また近赤外光を用いた新しい氷コア解析手法を開発した (柴田他, 2018; Ando et al., 投稿準備中)。

以上に述べた氷コア解析の他、カナック氷帽の積雪調査から氷床表面の汚れ物質の堆積プロセスに新しい知見を得た (羽月他, 2018)。また SIGMA-A と SIGMA-B において 2012 年から運用されている自動気象観測装置の保守運用を行い、長期にわたる貴重なデータ収集を行っている。この気象観測は WMO の全球雪氷圏監視 (GCW: Global Cryosphere Watch) による CryoNet ステーションに正式認定され、そのデータは ADS を通じて研究コミュニティに公開されている。

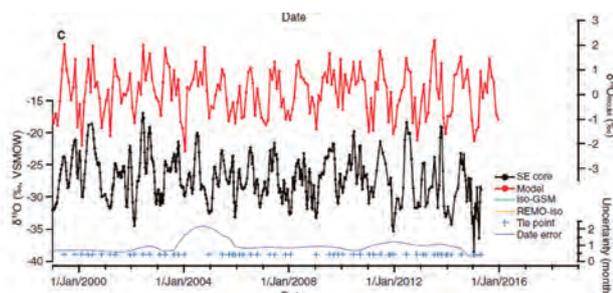


図 4-3-22. SE-Dome 氷コアにおける酸素同位体変動と数値モデルの比較 (Furukawa et al., 2017)。季節スケールでの時間変動が明らかになった。

海水分布とその変動

衛星による観測データを用いて、カナック沖の春季海水分布を定量化した。また衛星高度計を用いた海水厚の測定手法を改良し、海水厚の推定精度と空間分解能を向上することに成功した (星野他, 2018)。また、現在は水循環変動観測衛星「しずく」に搭載された高性能マイクロ波放射計 (AMSR2) を用いた海水観測が一般的であるが、気温の変化や水蒸気を多く含む雲などが観測値に影響をおよぼしていることが明らかになってきた。この問題を解消するために、客観解析データから衛星による観測データを補正する新たな海水厚推定アルゴリズムを開発した (図 4-3-23、Tateyama et al., 2018)。このアルゴリズムによって得られた AMSR2 推定海水厚データと、カナックから 50km の位置にあるシオラパルク周辺で 2013 年から取得されている現地海水厚データの比較を行い、衛星観測データの推定精度を検証した。またカナックにおいて春季に氷上観測を実施し、高緯度かつ低温下における回転翼および固定翼ドローンをを用いた観測手法を確立するとともに、2018 年と 2019 年の定着氷・座礁氷山の氷厚データの取得に成功した (図 4-3-24)。空撮データを蓄積することにより、座礁氷山量の経年変化について調査した。

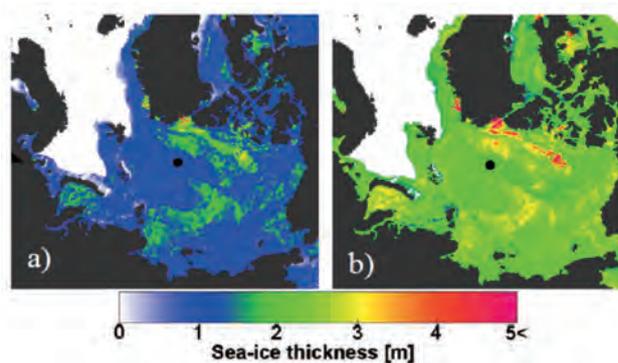


図 4-3-23. (a) 従来のアルゴリズムと、(b) 新しいアルゴリズムによって衛星データから測定された北極海の海水厚分布の比較 (Tateyama et al., 2018)

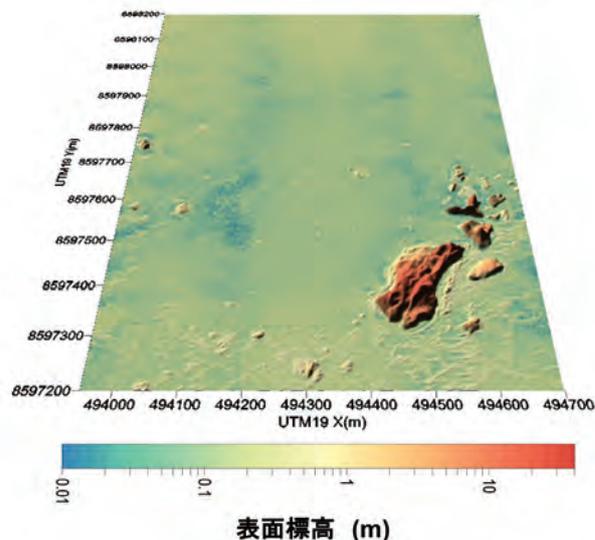


図 4-3-24. ドローンによって測定された、カナック沖の海水と座礁氷山の表面標高分布 (2019 年 3 月、幅 750m × 長さ 1,600m の範囲を測定)

人文社会科学的アプローチ

自然と人間の関わりが多様性、自然の定義の複数性、事物に対する人間の基本的態度の多様性といった、人間と自然との関係を規定する視角は、極めて多元的である。また、自然の変化が人間に与える影響と同時に、人間活動が自然に与える影響も並列的に捉え、両者の相関を通時的に理解していくことが肝要である。Hayashi and Walls (2019) は、気候変動に対処する地域住民の動きを、単に一方的に描くのではなく、地域住民の主体性を内包した「地域づくり」の一貫として捉え直す研究視点の提案を行った。その議論は、カナックおよびシオラパルクでの堅実な人類学的フィールドワークをもとにしている。また、高橋 (2020) および Takahashi (2019e, 2019f) は、こうした地域づくりのひとつの形として、北極域における非生物資源開発と、しばしば在来知などと呼ばれる先住民族の知識や世界観に即した開発の持続可能性とが、いかにして有機的に結び付きつつ機能していくことができるのかを、政治学の知見にもとづきながらグリーンランドを事例に考察した。加えて、人間と自然との相関を、捕鯨を事例に、国際政治学の知見に依拠しながら考察したものとして、高橋 (2019a) がある。そこでは、グローバルレベルで形成されるルールが、いかなる正当性にもとづき運用されているのかを、EU を事例に明らかにした。結果、正当性

の諸相は極めて複合的だが、特に政治的(集会的)な正当性がある決定の効用を高めることに貢献していることが明らかになった。このように、人文社会科学的アプローチは、人間と自然との双方向的な関係の諸相を実証していくことに貢献した。

以上の活動に加えて、カルガリー大学の文化人類学研究者と共同で、カナックおよびシオラパルク村にて調査を実施した。地域住民が記した生活史について聞き取り調査を行ったほか、共同で住民とのワークショップを開催した。

環境変化がグリーンランド社会に与える影響

カナックでの研究活動期間中、現地で行った自然災害現象に遭遇した。いずれも気候・環境変動が原因と考えられ、今後北極域に共通して発生しうる現象と推測される。そこでこれらの災害を調査して原因を解析し、将来の災害発生について検討を行った。

2015年と2016年には、カナック氷河から流出する河川が増水して氾濫し、カナック村と空港を結ぶ主要道路が破壊された。この災害を受けて、2017～2019年には河川流量と氷河上の積雪融解を測定し、気象データと合わせた解析を行った。その結果、2015年の洪水が高温ともなう雪氷融解が原因であったのに対して、2016年は積雪の融解で広がった裸水域に多量の降水があったためと判明した(図4-3-25、Kondo et al., 投稿準備中)。融解量の増加と降雨イベントの頻発に加えて、氷帽上の積雪が減る影響によって、今後洪水のリスクは増加すると考えられる。

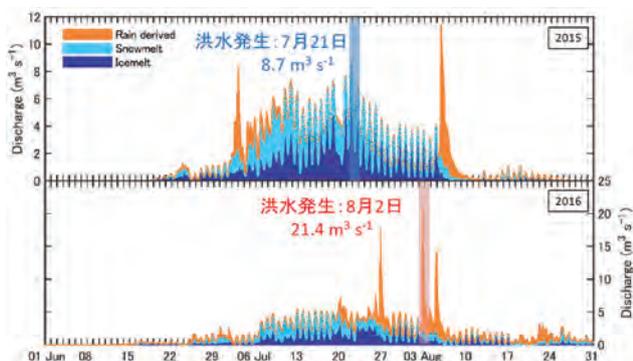


図4-3-25. 氷帽融解・流出モデルによって計算されたカナック氷帽河川流量。2015年と2016年の洪水イベントが再現された(Kondo et al., 投稿準備中)。

2018～2019年には、シオラパルク村において発生した地すべり災害の調査を行った。全球測位衛星システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)とドローンを用いた測量、崩壊斜面の地質調査の結果、斜面に大量の岩屑を保持できる独特の地質構造と、凍結融解作用の影響を受けやすく、風化によって砂粒子程度の碎屑物を形成しやすいという岩石の存在が示された。したがって本地域では、不安定で大量の碎屑物が斜面上部に存在しており、わずかな降雨でもそれらが飽和に達して流動化し、大規模な地すべりが発生するという特徴が明らかになった。これは、グリーンランド北部に広く分布する堆積岩地域に共通した特徴であり、この地域では比較的低強度の降雨イベントで地すべり災害が発生する可能性が示唆される(Watanabe et al., 投稿準備中)。気候変動によって地すべりを

発生させる降雨イベントが今後増加すれば、災害が増加する可能性があり、さらに地すべりによって生産された土砂が海洋に大量供給されるという状況は海洋環境にも影響を与える。過去の降雨-地すべりイベントの頻度の解析、さらに地すべりによる土砂流出による周辺環境への影響の分析は次の重要課題として注目される。なお、シオラパルク村では研究結果をもとに地すべりハザードマップ(図4-3-26、Yamasaki et al., 2019^{※3})を作成し、地域住民に配布して説明を行うとともに、地すべりが起きる条件や避難方法などについて説明・注意喚起を行った。

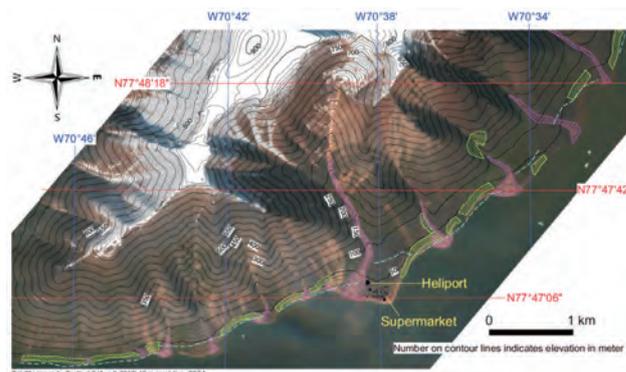


図4-3-26. 本研究にもとづいて作成されたシオラパルク村の地すべりハザードマップ^{※3}

自然環境の変化とその社会影響について地域住民にその情報を伝え、お互いの知識・問題点を共有するために、カナック村にてワークショップを開催した。この取り組みは、現地の観測協力者からの提案がきっかけになったもので、第1回の2016年には50名以上の村人が参加し、本プロジェクトと研究成果の紹介、環境変化と社会影響に関する意見交換を行った(図4-3-27)。その後2019年まで毎年同様に開催を継続したほか、2018年からは近隣の小村ケケッタにて同様のワークショップを開催した。グリーンランド語への通訳を介してスライドを使った説明を行ったほか、観測データを使った海底地形図の頒布、海洋循環に関する実験の実演など、さまざまな形で地域住民との交流を図った。その結果、現地での研究活動に理解と協力が得られたほか、住民の目で確認できる自然環境の変化について情報を得るとともに、気候変動にもなう生活・社会への影響について知見を得た。



図4-3-27. 2016年7月にカナックで開催したワークショップにて発言する地域住民。50名以上の住民と情報交換・意見交換を行った。

自然環境変化と社会影響に関して住民の意識を知るために、カルガリー大学の文化人類学研究グループと共同でアンケート調査を行い、カナック村内で29名からの回答を得た。その結果、80%以上の回答者が自然環境の変化を感じており、海水の縮退や夏の降水増加などにもっとも急激な変化を認めていることが明らかになった(図4-3-28、Sugiyama, submitted)。

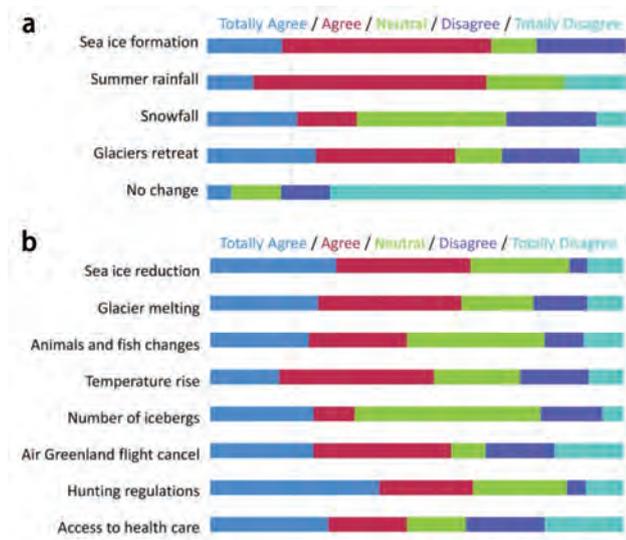


図4-3-28. カナック住民29名に実施したアンケート結果。質問は、(a) どのような自然環境に変化がみられるか、および(b) 各事象がどの程度生活に影響を与えるか(Sugiyama, submitted)。環境変化とその社会影響に対する、カナック住民の意識が示された。

さらに、グリーンランドの自然環境とその変化を一般市民に伝えるため、日本国内でさまざまなイベントを実施した。2016年12月には、グリーンランドの著名な音楽グループであるナマークのメンバーと、グリーンランドで活動経験のある日本の山岳冒険家を招いて、講演会「グリーンランドをめぐる「音楽」・「冒険」・「サイエンス」-北極域の持続可能な未来にむけて-」を札幌で開催し、約100名の参加者があった。また2019年2月にはカナック村の研究協力者大島トク氏を招いて、札幌、紋別、東京にて講演会やイベントを開催した。日本科学未来館で開催したトークセッション「ARCTIC LIFE ~極北の狩人と雪氷学者を囲んで」では、子供を含めた約40名の参加者と、アザラシの毛皮



図4-3-29. 2019年2月に日本科学未来館にて開催したワークショップ。カナックの研究協力者と参加者が車座になって意見交換を行った。

を使ったアクセサリーの作成や、伝統的な毛皮・革製品の展示、狩猟文化に関する自由討論などを実施した(図4-3-29)。いずれのイベントも、テレビや新聞での報道を受けるなど、大きな反響があった。

実施項目IIのまとめ

実施項目IIでは、2012年にGRENE北極で開始した活動を受けて、グリーンランド北西部カナックにおける研究を実施した。2016~2019年にわたって毎年現地での観測を実施したほか、衛星データの解析、数値モデリングによって、氷河氷床、海洋、雪氷・大気環境、海水の変動を解析した。さらに、捕鯨制度を政治学的に解析するなどの社会科学的な研究を実施した。

研究の結果、急激に縮小する氷河氷床の質量損失速度を定量化し、その変動メカニズムの解明に貢献する成果をあげた。特にカービング氷河の変動と末端プロセスに関して、多くの新しい知見を得てその成果を発表した。さらに氷河氷床から流出する融解水が海洋におよぼす影響、特にフィヨルドに栄養塩を供給する役割を定量的に示すことにはじめて成功した。また動植物プランクトンから海鳥、海生哺乳類に至る、フィヨルド生態系に氷河が果たす役割が示された。一方陸上では、近年頻発する氷河河川洪水や地すべりなどの自然災害について、そのメカニズムと将来の見とおしを明らかにした。また大気中の物質輸送や降雪、海氷や氷山の分布を明らかにして、グリーンランド沿岸域の環境変動を定量的に示した。

以上の活動は、スイス連邦工科大学、カルガリー大学、コペンハーゲン大学等との国際共同研究として実施され、またカナックの現地協力者の支援を受けて実施したものである。研究成果を地域住民にフィードバックするために、カナック現地でのワークショップを開催し、さまざまな議論を重ねた。また日本国内でも各種のイベントを実施して、グリーンランドと北極の環境変化に関するアウトリーチに努めた。

以上の成果は、グリーンランド沿岸部における氷河氷床の変動と海洋との相互作用の理解に貢献し、陸域・海洋・大気も含めた自然環境の変化が北極域の人間社会に与える影響について重要な知見を提供したものである。

注：

- ※1 結晶粒界に粒子が取り残されて、それ以上の粒成長を抑制する効果。
- ※2 温室効果気体の濃度にもとづく排出シナリオのうちのひとつで、放射強制力を工業化以前と比較して放射強制力が今世紀末に $2.6\text{W}/\text{m}^2$ 上昇するというシナリオに対応。詳しくは以下のページを参照。 <https://www.nies.go.jp/whatsnew/2011/20110926/20110926.html>
- ※3 Yamasaki, S, Watanabe, T., Sugiyama, S., Hazard map in Siorapulk. July 2019.

引用文献：

- 1) AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xiv + 269 pp.
- 2) Vallelonga, P. et al., 2014. Initial results from geophysical surveys and shallow coring of the Northeast Greenland Ice Stream (NEGIS). *The Cryosphere*, 8, 1275-1287. doi: 10.5194/tc-8-1275-2014.
- 3) Kuramoto, T. et al., 2011. Seasonal variations of snow chemistry at NEEM, Greenland. *Annals of Glaciology*, 52, 193-200. doi: 10.3189/172756411797252365.
- 4) Nghiem, S. V. et al., 2012. The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012. *Geophysical Research Letters*, 39. doi: 10.1029/2012GL053611.
- 5) Aoki, T. et al, 2014. Field activities of the "Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic" (SIGMA) Project in Greenland in 2011-2013. *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 3-20. doi: 10.5331/bgr.32.3.
- 6) Larour, E. et al., 2017. Should coastal planners have concern over where land ice is melting? *Science Advances*, 3, e1700537. doi: 10.1126/sciadv.1700537.
- 7) Faria, S. H. et al., 2014. The microstructure of polar ice. Part I: Highlights from ice core research. *Journal of Structural Geology*, 61, 2-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.09.010>.
- 8) Glen J.W., 1955. The creep of polycrystalline ice. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 228, 519-538. doi: 10.1098/rspa.1955.0066.
- 9) Goldsby, D. L., Kohlstedt, D. L., 2001. Superplastic deformation of ice: Experimental observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106, 11017-11030. doi: 10.1029/2000JB900336.
- 10) NEEM community members, 2013. Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*, 493, 489-494. doi: 10.1038/nature11789.
- 11) Wilson, C. J. L. et al., 2014. Microstructure and fabric development in ice: Lessons learned from in situ experiments and implications for understanding rock evolution. *Journal of Structural Geology*, 61, 50-77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.05.006>.

4.4

テーマ
3

北極気候に関わる大気物質

4.4.1 全体概要

小池 真・滝川 雅之・森本 真司・檜山 哲哉

北極気候に関わる大気物質

全球平均の約2倍の速さで進んでいる北極温暖化の主な原因は、全球での大気中CO₂の濃度増加と考えられる。しかし同時に他のSLCF、すなわち温室効果気体であるCH₄や、太陽放射を強く吸収するBCエアロゾル（大気中に浮遊する微粒子）も重要な役割を果たしていると考えられる。BCは大気加熱効果とともに、雪氷面への沈着によりそのアルベド（反射率）を低下させ、アイスアルベド・フィードバックを促進している可能性もある。これらのSLCFの排出量の削減は、CO₂と比べてはるかに短い時定数で大気中の濃度を減少できるため、北極温暖化を減速させる有効な手段となる可能性が指摘されている。このため、ACの作業部会のひとつである北極圏監視評価プログラム作業部会（AMAP：Arctic Monitoring and Assessment Programme）では、2015年にCH₄とBCの評価報告書をそれぞれ出版し（AMAP, 2015a¹⁾, 2015b²⁾）、その科学的知見を得ることの重要性を改めて世に示した。

しかしながら、SLCFの放射影響や削減効果には大きな不確定性がある。第1に、北極大気中のBC濃度は、長年にわたり複数の観測地点において欧米の研究機関により観測されてきているが、その測定精度の検証は必ずしも十分ではなく、また系統的な相互比較も行われてきていない。したがって、BCの大気中の濃度には大きな不確定性がある。同様に前述のAMAP評価報告書（AMAP, 2015b²⁾）でも参照されている従来の雪氷中のBC濃度測定も、十分な検証がされていない。第2に数値モデルにも大きな不確定性があり、世界の多くの数値モデルは北極地表面での大気中BC濃度を大きく過小評価しており、季節変化の特徴も再現できていない。このことは、BCの降水による除去過程など、鍵となるプロセスの理解とそのモデル化が不十分であることを示している。第3にCH₄にはさまざまな放出源（湿地、化石燃料、森林火災、反芻動物など）が存在するが、それらの広域分布や変化を把握することは困難であるため大気中CH₄濃度変動メカニズムが解明されていない。そして第4に、上記の3つの不確定性により、さまざまな対策（政策）の根拠となるべき北極CH₄およびCO₂とBCの発生源・消失源収支の寄与推定に大きな不確定性がある。さらに永久凍土の融解はCO₂やCH₄の潜在的な発生源であり、北極温暖化において正のフィードバックとなりうることが指摘されているが、定量的な議論は困難な状況となっている。

このような状況において本プロジェクトでは、正確な観測に

よる動態把握、鍵となるプロセス表現の改良によるモデルの高度化、そして信頼性の高い発生源寄与（収支）推定を指針として研究を展開した。温室効果気体の研究では、トップダウン的^{*1}な大気中濃度観測にもとづく収支解析と、ボトムアップ的^{*2}な森林など個々の発生源観測にもとづく収支解析の両方を実施した。また放射強制力をうみ出す大気物質を統合的に扱うために、雲微物理とエアロゾルの影響についての研究も実施した。

北極BC研究

BC研究では、これまで我々が開発してきた高精度の大気中BCの質量濃度測定器 Continuous Soot Monitoring System (COSMOS) により、北極の代表的な6観測地点において継続的な観測を実施する体制を立ち上げた。COSMOSはこれまでもその精度が検証されてきているが、本研究では改めて北極圏スバル諸島のニーオルスンでも高精度のBCデータが得られていることを、信頼性の高いレーザー誘起発熱法との比較により示した。このような統一された規格の測定器により、はじめて北極内での大気中BCの時空間分布を明らかにするとともに、従来の他の観測手法のデータの不確定性評価が可能となった。

本研究ではまた、2014年以降に毎年実施された海洋地球研究船「みらい」の北極航海においても高精度のBC観測を成功させ、広域の動態や発生源影響評価を実施した。さらに本研究では、大気中BCに加え、積雪中および降雪中BCの高精度分析技術を確立し、北極の広域での積雪中BC濃度測定を実施した。この結果、AMAP報告書などで広く引用されている先行研究の積雪中BC濃度が、大きく過大評価されていたことを明らかにした。

BCの数値モデル計算では、北極外の発生源から北極への輸送の鍵となる湿性沈着（降水による除去過程）の表現の改良を行った。そしてBCの混合状態の表現方法、混合状態の変化のパラメタリゼーション、あるいは降水除去につながる雲粒活性化の過飽和度の表現などにおいて改良を実施し、各種観測をよりよく再現することに成功した。これらの数値モデルにより、積雪中BCの動態の評価など、BCの放射影響推定の精度向上につながる研究を実現した。

北極雲・氷晶核研究

北極域の下層雲は短波・長波放射への影響を通じて、北極域の気候に大きな役割を果たしていると考えられている。我々が開発してきた高精度の氷晶核^{*3}数濃度の計測技術を使った観測を実施したところ、冬季の濃度は海洋上での観測と同程度であったが、夏季の濃度は約1桁高くなっていた。この夏季の氷晶核数濃度の増加は、北極域のアウトウォッシュ・プレーン^{*4}等で発生したダストによって生じており、しかもその主成分である鉱物ではなく、微量に含まれる有機物の存在によって高められていたことを明らかにした。この結果は、今後の北極温暖化によって氷晶核数濃度も変化していく可能性を示すものである。

本プロジェクトではまた北極圏ではじめてとなる、雲微物理量

の直接かつ連続的な観測を実施した。この結果、夏季に極大となる雲粒数濃度の季節変化を示すとともに、新粒子生成で形成されるような微小なエアロゾルが雲微物理量に影響していることが明らかとなった。また水雲では、エアロゾル数の増加に対する雲粒数の増加割合で定義される Aerosol Cloud Interaction (ACI) 指数は、新粒子生成の影響が大きい夏季と、北極ヘイズと呼ばれる人為的エアロゾルの影響が大きい冬・春季において、値には大きな変化はなく、雲微物理過程から期待されるものと整合的であることを示した。このことは数値モデルの水雲の計算方法の指針を与えるものである。

本プロジェクトではさらに人工衛星搭載センサー CloudSat のリトリーバル解析アルゴリズムを開発し、降雪粒子の抽出を行うことが可能となった。また北極域で卓越する下層雲や混合相雲を高精度で解析するために、新たに多重散乱を考慮した理論と手法を開発するとともに、偏光情報も利用した解析法を確立した。さらに 2022 年打ち上げ予定の衛星「EarthCARE」搭載ライダー ATLID のデータ解析のための氷粒子タイプの識別可能性を示した。

温室効果気体：トップダウン研究

北極域を含む北半球高緯度域には、温室効果気体の全球規模循環に影響を与える放出・吸収源が多数存在しており、それらの現状を把握することは急務である。本研究では、地上観測基地（ニーオルスン、カナダ・チャーチル）、「みらい」北極航海、さらに民間定期航空機（日本・パリ便）を利用した大気中の CH₄ を含む温室効果気体および関連気体の濃度・同位体比観測と、大気輸送モデル、陸域生態系モデルの高度化、そしてそれらによる収支解析を行った。

地上観測基地と「みらい」による大気観測によって、温室効果気体の変動と、陸上生物圏と海洋それぞれの CO₂ 吸収量、CH₄ 濃度変動における微生物起源 CH₄ の重要性が明らかになった。さらに観測値とモデル計算値を用いた解析により、東シベリア域北極海陸棚やカナダ・ハドソン湾低地からの従来の CH₄ 放出量推定値が過大評価であることを示した。航空機観測からはユーラシア大陸上空の対流圏上部・成層圏下部での温室効果気体の変動が詳細に明らかになり、対流圏・成層圏間の物質交換や大気輸送に関する情報が得られた。

大気輸送モデルの高度化と高解像度化によって地上 CH₄ 濃度や上空の長寿命気体 (SF₆ など) の再現性が向上した。さらに高解像度大気輸送モデルを用いたインバージョン（逆解放）によって、ロシア全域の従来の CH₄ 放出量が過小評価であることを示した。また、陸域生態系モデルの高度化を行い、北方湿原からの CH₄ 放出分布と変動をシミュレートした結果、西シベリア低地とハドソン湾低地が重要な CH₄ 放出源となっており、さらに近年は北米内陸部、アラスカ、西シベリア低地からの CH₄ 放出量が増加している可能性を指摘した。インバージョンに必要な CH₄ 放出量分布の先験値を観測によって高精度化するため、西シベリア域で広域 CH₄ 放出量観測を行い、従来の中栄養沼地からの CH₄ 放出量が過小評価であることを明らかにした。

温室効果気体：ボトムアップ研究

北半球高緯度域における CH₄ 収支を長期観測によって明らかにした研究例は少ない。特に、永久凍土域の北方林（タイガ）における CH₄ 収支の長期観測は非常に少ないため、陸域生態系モデルによる CH₄ 収支の推計には大きな不確実性が残されていた。本プロジェクトでは、東シベリアのカラマツ林における CH₄ 収支を観測することに成功し、夏季、群落スケールで CH₄ を放出していることを示した。また、内陸アラスカのクロトウヒ林において CH₄ 収支を長期観測し、環境変動に対する生態系 CH₄ 収支の応答を明らかにした。これらの観測データを用いて陸域生態系モデルのパラメーターを調整し、高緯度陸域生態系の CH₄ 収支の広域推計を行った。その結果、高緯度陸域生態系の CH₄ 放出量には、水循環変動に起因した土壌水分量の変動や水位の変動が大きく関わっていることが明らかになった。

北半球高緯度域では、永久凍土の融解によって温室効果気体が放出され、地球温暖化がさらに加速すると考えられている。しかしながら、永久凍土の組成や永久凍土の上部に多量に存在する地下水に含まれる有機炭素量を調べた研究例はほとんどなかった。本プロジェクトでは、アラスカとスバル諸島の地下水に含まれる有機炭素量を調べ、地下水の気泡中に含まれる CH₄ 濃度や CO₂ 濃度に、サイト間で大きな違いがあることを明らかにした。また、地下水に含まれる CH₄ と CO₂ の炭素安定同位体組成を調べ、地下水中の CH₄ の生成過程を二酸化炭素還元型と有機酸発酵型に区分し、考察を行った。その結果、二酸化炭素還元過程を経た地下水は比較的寒冷期に形成され、有機酸発酵過程を経た地下水は比較的温暖期に形成された水であることがわかった。このように、地下水中の CH₄ と CO₂ の濃度と炭素安定同位体組成を調べることで、過去の気候変動と永久凍土の形成過程を詳細に理解できる可能性を示した。

上記の研究に加え、本プロジェクトでは、アラスカ内陸部のポーカーフラットリサーチレンジ (PFRR: Poker Flat Research Range) において、陸域生態系の生態系呼吸量の気候（温暖化・乾燥化）応答に関する解析を行うとともに、温室効果気体収支の大きな境界条件となる植生の衛星モニタリングとその地上検証を行った。また、光ファイバーを用いた高解像度の地温観測を行った。

4.4.2 北極 BC の動態

小池 真・近藤 豊・東 久美子・大畑 祥
森 樹大・茂木 信宏・大島 長・松井 仁志
滝川 雅之・金谷 有剛・竹谷 文一・宮川 拓真

BC とは何か

大気中に浮遊する BC は、グラファイト構造を持った炭素を主元素とする直径数十 nm から数 μm 程度の大きさの黒色の微粒子（エアロゾル）で、太陽放射を強く吸収する。IPCC-AR5 によると、BC の全球平均の正の放射強制力 (1750 ~

2011年)は、CO₂、CH₄に次いで3番目に大きいと見積もられている(IPCC, 2013³⁾)。BCは煤粒子(soot particle)とも呼ばれ⁵⁾、石油や石炭などの化石燃料や「まき」などのバイオ燃料の燃焼、さらに森林火災や焼き畑などのバイオマス燃焼などから生成する(Bond et al., 2013⁴⁾)。BCの大気からの主たる消失は、BCを含むエアロゾルが雲粒へと活性化し、降水(雨・雪)として地表面まで落下することで生じる。BCが大気中に排出されてから除去されるまでの時定数は、1~2週間程度と見積もられている。BCは大気中に排出された時点では、一般に他のエアロゾル成分にあまり被覆されていない裸に近い形態で存在するが、大気中で無機・有機の化学成分に徐々に被覆され、その「混合状態⁶⁾」が変化していく。BCの混合状態の変化は、北極温暖化への影響推定において以下のふたつの点で重要である。第1に、BCは不溶性のために裸の状態では雲凝結核(CCN: cloud condensation nuclei)特性が低いが、他の水溶性のエアロゾル成分に被覆されることによりエアロゾル全体として高いCCN特性を持つようになる。この結果、BCは北極へと輸送される間に雲・降水過程により除去されやすくなる。いい換えると、BCの混合状態はBCの大気中での寿命を支配し、北極外の発生源から北極へのBC輸送効率を決めている。第2に、BCが厚く被覆されるとより効率的に太陽放射を吸収するようになり、そのレンズ効果により大気中での光吸収率が最大2倍程度まで増幅する(Bond et al., 2006⁵⁾)。このレンズ効果やBCを含まない他のエアロゾルの存在は、後述するようにBCの測定精度にも影響をおよぼす。

大気中BCの動態(地上定点観測)

本プロジェクトのBC研究の第1の目的として、我々は正確なBC濃度の測定を実現することを掲げた。図4-4-1および表4-4-1には、これまで我々が開発してきた高精度の大気中BCの質量濃度測定器COSMOSにより、BCの連続観測を実施している観測地点を示した。この北極BCのCOSMOS観測ネットワーク(ABCM-net: Arctic BC COSMOS Measurement Network)では、国立極地研究所・東京大学と、JAMSTECがそれぞれ4地点と2地点において観測を立ち上げるなどして、継続的なBC濃度データを取得することが可能となっている。

北極大気中BCの質量濃度の実時間測定⁷⁾のほとんどは、フィルター捕集と光学測定を組み合わせた方法を用い

ている。COSMOSもこの測定原理にもとづいている。しかしCOSMOSは従来のPSAP(particle soot absorption photometer; Radiance Research, Seattle, WA)やアセロメーター(Aethalometer; Magee Scientific, Berkeley, CA, USA)といった測定器(Delene and Ogren, 2002⁶⁾; Sharma et al., 2013⁷⁾)と異なり、エアロゾルをフィルター上に捕集する前段で300°Cに加熱したステンレス管を通過させることにより、揮発性エアロゾル成分(BCの被覆として、あるいはBCとは独立した粒子として存在する)の大部分を揮発させ除去している(Miyazaki et al., 2008⁸⁾; Kondo et al., 2009⁹⁾, 2011¹⁰⁾)。PSAPやアセロメーターは、これらの揮発性エアロゾル成分をBCとともに捕集してしまうため、それらのエアロゾルの光散乱の寄与を、別のエアロゾル測定データにより補正することが必要である。しかし、この補正には不確実性があるため、BCによる光吸収量を精度よく測定することができない。さらに、測定された光吸収量から、BCの質量濃度を得るために必要となるBCの質量吸収係数(MAC: mass absorption cross section)も、レンズ効果などによりBCを被覆する成分などの影響を受ける。この結果、これまで10~29m²g⁻¹とバラバラな値が用いられてきているが⁸⁾(Hirdman et al., 2010¹¹⁾; Eleftheriadis et al., 2009¹²⁾; Sharma et al., 2004¹³⁾, 2006¹⁴⁾)、この効果により生じるMACの変動の大きさの評価は原理的に困難である。COSMOSではこれらの他成分の影響をほとんど受けないため、アジアの都市域、アジア大陸の下流域、北極のどの場所でもMACとして10.0m²g⁻¹という一定値を使用することができる。またCOSMOS観測では、直径1μm以上のエアロゾルを除去するPM1サイクロンも取り付けられているため、光源(LED)

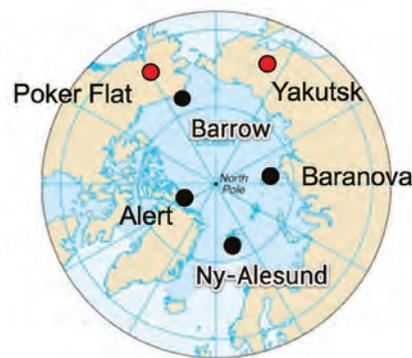


図4-4-1. COSMOSを用いた北極域でのBC質量濃度観測網、ABCM-net。黒丸および赤丸はそれぞれ、国立極地研究所・東京大学およびJAMSTECが立ち上げた観測点。

表4-4-1. COSMOSを用いた北極域でのBC質量濃度観測地点

観測地点	国	緯度、経度、高度	データ取得開始時期	ArCSでの主たる研究機関	共同研究相手機関	参考文献
ニーオルスン	ノルウェー	78.92° N, 11.93° E, 474 m	2012	国立極地研究所・東京大学	NPI/ストックホルム大学	Sinha et al., 2017
バロー	米国(アラスカ)	71.32° N, 156.61° W, 10 m	2012	国立極地研究所・東京大学	NOAA	Sinha et al., 2017
バラノバ	ロシア	79.3° N, 101.6° E	2017	国立極地研究所・東京大学	AARI	
アラート	カナダ	82.5° N, 62.5° W	2018	国立極地研究所・東京大学	ECCC	
ヤクーツク	ロシア	62.23N, 129.62E, 239m	2017	JAMSTEC	IBPC	
ポーカーフラット	米国(アラスカ)	65.13N, 147.49E, 210m	2016	JAMSTEC	IARC	

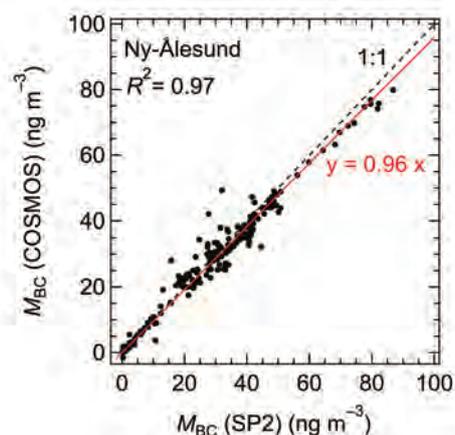


図 4-4-2. ニーオルスンで実施された COSMOS と SP2 の BC 質量濃度の同時観測の比較結果。1 時間値を示している (Ohata et al., 2019)。

からの光を減衰させる不揮発性の土壌粒子・海塩粒子などの粗大粒子の影響も小さい。

図 4-4-2 には、ABCN-Net のニーオルスンで COSMOS とレーザー誘起白熱法 (SP2) とで測定された BC 質量濃度の比較結果を示した (Ohata et al., 2019)。SP2 は、測定の手間がかかるために長期観測には不向きであるが、BC の質量濃度測定でもっとも信頼性が高いと考えられる。この図で示されているように、北極圏で得られた COSMOS の BC 測定値は SP2 と低濃度条件においても約 10% の差で一致することが確認された。この結果は、本研究において北極で展開してきた COSMOS の BC 観測の高い精度を改めて保証するものである。

北極圏のバローとニーオルスンにおける COSMOS による BC 観測値と、観測年は異なるが先行研究で示された値 (Hirdman et al., 2010¹¹⁾; Sharma et al., 2013⁷⁾) とを比較したものを図 4-4-3 に示した (Sinha et al., 2017)。これらの先行研究の PSAP やアセロメーターの BC 濃度は、COSMOS の値と比較して、バローで 1.3 倍程度、ニーオルスンで 2 ~ 3 倍程度も高い。PSAP やアセロメーター観測は、上記のとおり、BC 以外のエアロゾル成分の影響を受けやすく、その影響の大きさは大気条件にも依存する。したがって、これらの観測誤差を生じる要因の大きさを定量的に推定することは困難である。これらの結果は、高精度の BC 観測の重要性を改めて示すとともに、今後は北極 BC の動態理解のために、信頼性の検証された COSMOS の観測値が使用されることが期待される。さらに、これまでの北極域での BC 観測は、各研究機関により互いに独立して行われ、ほとんど相互比較や検証がなされてこなかった。本プロジェクトでは COSMOS という統一された測定器を用いることにより、北極圏内での BC の時空間変動の絶対値を、従来よりも正確に示すことが可能となった。例えば、図 4-4-3 に示されているとおり、冬季の BC 濃度はニーオルスンと比較してバローでは約 1.8 倍高く、また冬季の値は夏季の値よりも両観測地点で 3.6 ~ 4.1 倍程度高い。これらの値は、北極域内での BC 動態の理解と数値モデル計算の検証において重要である。また、バローにおいて PSAP を用いて 1998 ~ 2015 年の間に測定されてきた BC

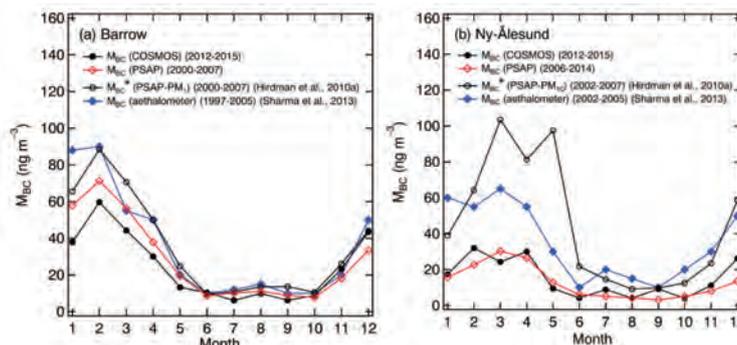


図 4-4-3. 北極圏バローおよびニーオルスンで得られた大気中 BC 質量濃度観測値 (月平均値) の比較。黒丸は COSMOS の値、赤いひし形は同時観測された COSMOS の値に一致するように決められた係数によりスケールされた過去の PSAP の値、白抜き黒丸および青いひし形は PSAP やアセロメーター観測にもとづき先行研究で示された値 (Sinha et al., 2017)。

の相対濃度を COSMOS で規格化し、COSMOS データより精度は低いもののこの期間の BC の絶対濃度の変化を推定することができた。

大気中 BC の動態 (船舶・航空機観測)

北極域における大気中 BC について、中緯度、特にアジア域からの寄与をより正確に評価することは、本プロジェクトにおける我々の重要な研究目標のひとつにあげられる。この目的に資するため、COSMOS を用いた ABCN-Net に加え、「みらい」の北極航海において SP2 を用いた大気中 BC の数濃度、粒径分布観測を毎年継続的に実施してきた。本観測は「みらい」最上階の観測室に設置された装置にチューブを介して外気を導入し、連続観測を行うもので、自船の排気の影響を取り除くため、同時に取得している風向・風速データを用いて後方からの影響を除外して解析を行っている。2014 年に行った観測結果を解析したところ、北極海上 (北緯 70 度以上: 2014 年 9 月 4 ~ 27 日) の測線上 (図 4-4-4) で観測された BC 濃度は変動 0.01 ~ 20 ng m⁻³ と 3 桁におよび、その平均濃度は 1.0 ng m⁻³ と、最寄りの陸上の観測地点 (バロー) のこれまでの 9 月の月平均 BC 濃度 (10 ng m⁻³) の 10 分の 1 程度の値であることがわかった (Taketani et al., 2016)。

本プロジェクト開始前には海洋上で数週間にわたる BC 船舶観測例は基礎的な観測でさえもほとんど行われていないのが現状であり、本観測のような非常に広い濃度幅での高精度・広域観測は輸送途上での除去過程等を精査するうえで極めて貴重な基礎データとなっている。また、これら観測を支援するために周北極域を対象とした化学天気予報システムを構築し、関係者に予測情報を提供 (Takigawa et al., 2018) し、降雪時における試料採取やゾンデ、係留気球観測の実施計画の立案支援を行うなど、観測 - 数値モデルの連携体制を構築している。

また北極への BC 輸送過程は地上観測だけでは十分には理解できないため、ドイツの AWI の航空機観測 PAMARCMiP2018 に参加し、北極大気中 BC の高度分布などの観測を実施した。この結果、高度 5 km 付近に高濃度 BC

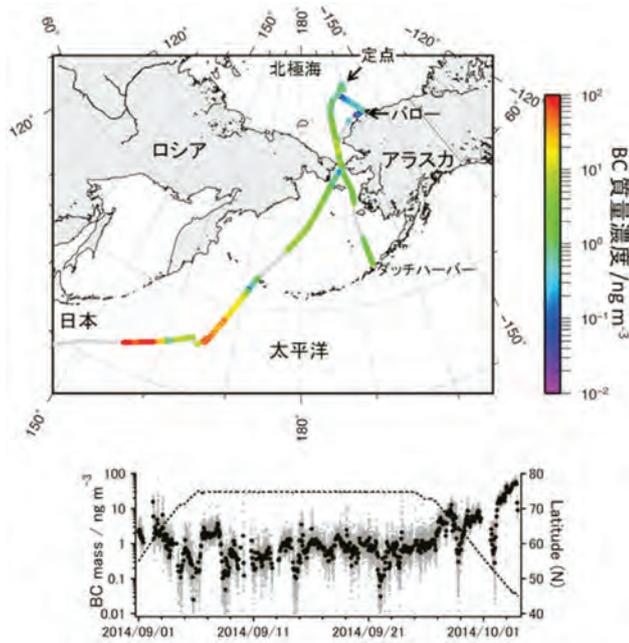


図 4-4-4. 海上 BC 質量濃度の観測結果。航路上の濃度変化（上）および時系列変化（下）(Taketani et al., 2016)。

の大気層が3日間にわたり観測され、発生源の影響を強く受けた空気が広い領域にわたり存在していたことがわかった。

積雪中 BC の濃度

本プロジェクトでは大気中 BC とともに、積雪中 BC 濃度の正確な測定も目的として掲げた。図 4-4-5 には、2012～2016 年の間に積雪中 BC 濃度測定のために積雪を採取した場所と、各領域での積雪中 BC 濃度の中央値を示した (Mori et al., 2019c)。これらの試料は、融雪が始まる前の、積雪中 BC 量が最大となる時期 (2～5 月) に採取されたものである。採取された試料中の BC 濃度は、BC 質量濃度測定でもっとも信頼性が高いとされる SP2 より定量された。この方法は、土壌粒子と区別して BC のみを測定できることが特徴である。これらの

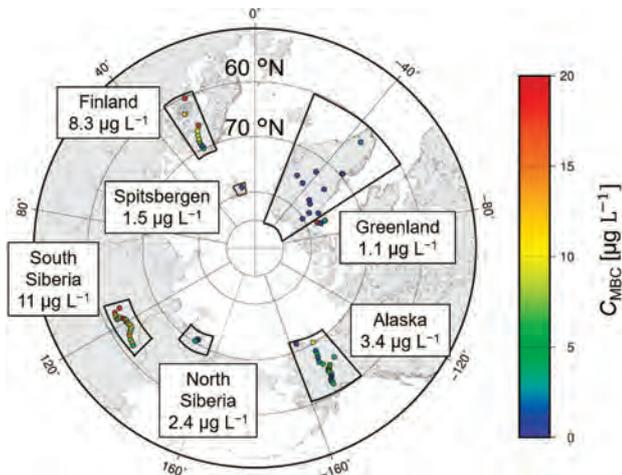


図 4-4-5. 積雪中 BC 濃度測定のために積雪を採取した場所。採取地点を示した丸印の色は、積雪中 BC 濃度を示す。また各領域での濃度の中央値を示した (Mori et al., 2019c)。

高精度測定の結果、積雪中 BC 濃度は南シベリアやフィンランドで濃度が高く、グリーンランドやスピッツベルゲン島で低濃度となっていることが明らかとなった。これらの濃度分布は、BC 発生源からの距離や、大気中での輸送や標高に応じた降水による雪氷面への沈着過程を反映したものと考えられる。さらに SP2 で測定された積雪中の個々の BC 粒子の質量 (大きさ) にもとづき粒径分布を解析したところ、積雪中 BC 濃度が低くなるにつれて BC 粒径分布の極大径はより小粒子側へとシフトしていることが明らかとなった。この傾向は、一般に大きな BC 粒子ほど降水による除去を受けやすいことと整合的である。すなわち発生源から北極へ BC が輸送される間に降水除去が進むが、大きな BC 粒子ほど除去効率が高いため、小さな粒子が相対的により多く大気中に残ったためと考えられる。

図 4-4-6 には本研究で得られた各領域での積雪中 BC 濃度の中央値と、先行研究 (Doherty et al., 2010¹⁵) で示された値を試料採取の年は異なるが比較した。この先行研究は北極の広域にわたり数多くの試料を分析した結果として、AMAP の評価報告書などで広く引用されているものである。この図からもわかるように、この先行研究の値は、本研究の値より 13 倍程度高いという結果となった。この先行研究では簡易光吸収法である Integrating Sphere/Integrating Sandwich spectrometer (ISSW) 法が使用されている。この BC 測定法は試料中に共存する土壌粒子の影響により BC 濃度を過大評価する傾向があることが他の先行研究 (Schwarz et al., 2012¹⁶) で示されている。本研究は、従来の北極積雪中の BC 濃度は過大評価されていたこと、そして今後は、本研究で得られた値により数値モデルの検証などをやり直す必要があることを示している。また今後の積雪の調査・研究においては、本研究で確立された水中に浮遊する BC のサイズ分布測定手法が広く使用されることが期待される。

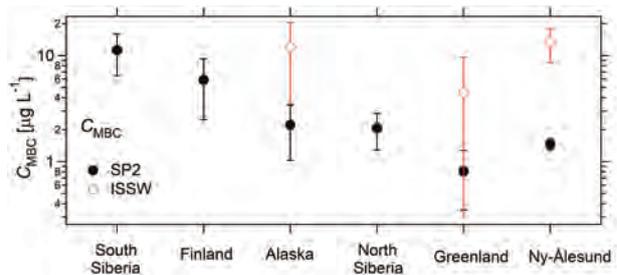


図 4-4-6. 各領域での積雪中 BC 濃度の中央値 (黒丸)。先行研究の値を赤丸で示した (Mori et al., 2019c)。

降雪中 BC の濃度 (地上定点観測)

大気中の BC が雪氷面上に沈着する過程としては、降雪中に含まれた BC の沈着 (湿性沈着) と、降雪をともなわずに BC が直接雪氷面に沈着する (乾性沈着) というふたつのプロセスがある。本研究ではニーオルスンにおいて、北極圏においてはじめてとなる降雪中の BC 量を測定し、積雪中 BC 濃度と比較した (Sinha et al., 2018)。降雪の採取は当初は吹き流し式の採取方法 (windsock) を用いた。しかし、採取の間に大気中 BC が雪試料に接触・混入する懸念があるため、建物のペラン

ダに容器をおいて採取する方法を採用した。積雪試料はニューオールの観測基地近くの基準地上放射観測網 (BSRN) 周辺と、ブレッガー氷河とで行った。BC の定量は、SP2 を使って実施した。水換算された単位体積の降雪中の BC の数濃度と質量濃度は、積雪中の値とそれぞれ 5% および 16% で一致した。いい換えると、BC の積算された沈着量は、水換算された積算降雪量・積雪量に対し、同じ傾きの直線上にのることがわかった (図 4-4-7)。このことは、積雪中の BC 量は降雪にともなう BC の沈着により、測定誤差の範囲で説明できることを意味しており、乾性沈着の寄与が小さいことを示している。また積雪中 BC 量が降雪中 BC 量により説明できる事実は、雪氷アルベドを低下させる原因となる BC が、どの降雪イベントによりもたらされたのか同定可能であることを示している。さらにその大気中の BC がどの発生源からどのように輸送・沈着されたのかまで遡れる可能性を意味するものである。本研究は、数値モデルの新たな検証材料を提供するとともに、検証された数値モデルにより雪氷アルベド低下に対する発生源寄与と推定への道筋を示すことができた。

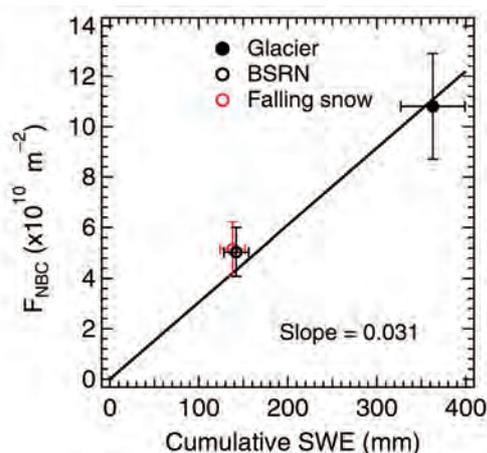


図 4-4-7. BC の積算された沈着量と、水換算された積算降雪量・積雪量との関係 (Sinha et al., 2018)

降水中 BC の濃度 (船舶観測および相互比較)

降水 (降雨および降雪) 中の BC 含有量について、ニューオールンに加えて「みらい」北極航海および富山大学でも測定を実施した。試料採取については、「みらい」コンパスデッキおよび富山大学理学部屋上 (36.70° N, 137.19° E) で円筒形サンプラーおよびパウダフリーのプラスチックバッグを用いて捕集し、「みらい」においては降水イベントごと、富山大学においては 1 日単位で採取した。また、独立な手法を用いた検証として、札幌にて採取した同一の融解済み雪試料を用い、気象庁気象研究所気候研究部と共同で水中 BC 濃度定量の相互比較を実施した。気象研究所では熱光学的手法 (Kuchiki et al., 2015¹⁷⁾) を、JAMSTEC では SP2 を用いた分析をそれぞれ行い、試料液中の BC 質量濃度を比較したところ、熱光学的手法の昇温プロトコルによる元素炭素 (EC)・有機炭素 (OC) 分離の不確定性、SP2 の可測粒子径範囲の不確定性などを考慮すると、両者は整

合する結果を示すことを確認した (Tanigawa et al., 投稿準備中)。

また、2016 年度「みらい」北極航海 (MR16-06) 時に採取した降水中 BC について、領域モデルによるシミュレーション結果と比較したところ、北極海上での降雨・降雪イベントについて概ね観測結果と整合的な結果が得られていること、および大気からの湿性除去過程については雲内洗浄過程が主な経路であることを確認した (図 4-4-8)。これは、北極域における下層雲内の雨滴等の生成が、大気からの BC 除去にも非常に重要であることを示している。

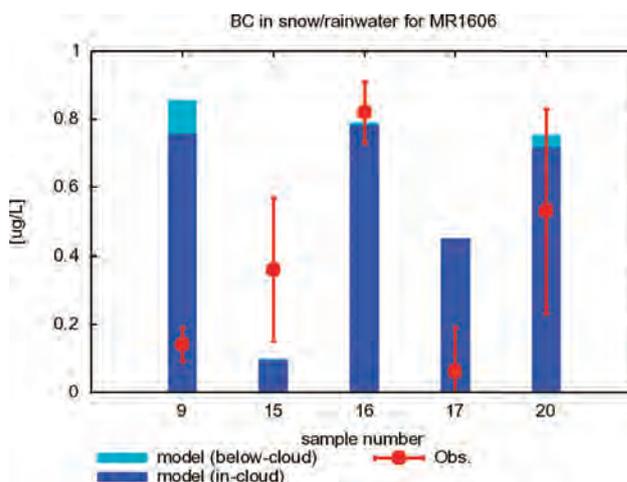


図 4-4-8. MR16-06 における降水中 BC 濃度。横軸は 2016 年 9 月における降水 (9 月 20 日は降雨、それ以外は降雪) のあった日を示す (Takigawa et al., 投稿準備中)。

数値モデルにおけるエアロゾル混合状態の表現

世界の多くの数値モデルは一般に、北極域の地表面での BC 質量濃度を過小評価する傾向にあり、また冬季から春季に極大を持つ季節変化のパターンを再現できない問題がある (Lee et al., 2013¹⁸⁾; Eckhardt et al., 2015¹⁹⁾)。この数値モデルの問題の主原因は、全球的な BC 発生源から北極へ輸送される BC の降水による除去過程 (湿性沈着) の表現の問題と、北極内の発生源の不確定性にあるとされている。北極大気中の BC は、アジアなど中緯度の人為的発生源、ロシアやカナダなど高緯度の森林火災、そして北極内でのガス燃焼 (フレアリング) などがある (図 4-4-9)。北極域下層の寒冷な (低い温位を持つ) 空気はポーラードームと呼ばれる空気塊を形成し、内外の空気の混合を妨げている。アジアなど北極域外の BC 発生源から輸送されてきた空気は高い気温 (温位) を持つため、高い高度へと輸送される。この空気の上昇にともなう降水により、BC が湿性除去される。BC は不溶性のために大気中への排出直後の裸の状態では CCN 特性が低い、他の水溶性のエアロゾル成分に被覆されることによりエアロゾル全体として高い CCN 特性を持ち降水過程により除去されやすくなる。本研究では、この BC の混合状態の変化 (大気化学過程) と雲から降水への変換にともなう除去過程 (物理過程) について数値モデル表現の改良を実施した。

BC の混合状態については、乾燥直径と、エアロゾル中の

BCの質量比率の2変数によりエアロゾルを表現する Aerosol Two-dimensional bin module for foRmation and Aging Simulation (ATRAS) モデルを開発し、米国大気研究センター (NCAR: National Center for Atmospheric Research) のコミュニティーモデル CAM5 に実装した (Matsui, 2017; Matsui and Mahowald, 2017)。このモデルでは、エアロゾルの個数濃度と各エアロゾル成分の質量濃度をそれぞれの直径と BC 質量比率ごとに予報する (2 次元ビンモデル)。この表現によりはじめて、大気中に排出されたときの BC 粒径分布の影響や、大気中でのエアロゾルの凝縮 (condensation) および凝集 (coagulation) 過程による BC の CCN 特性や光吸収特性の変化を精度よく計算することが可能となった。実際に全球スケールにさまざまな場所での BC などのエアロゾル観測と比較した結果、BC の混合状態を解像したモデルの方がより整合的であることが示された。図 4-4-10 には、従来の多くの数値モデルで採用されているエアロゾルを粒径分布のみで表現する 1 次元エアロゾル表現による計算と、より現実的に BC の混合状態も解像する 2 次元エアロゾル表現による計算を比較した。この図に示されているとおり、BC 混合状態を現実的に表現することにより、北極や南極の地表面 BC 濃度は、従来計算と比較して 100% 以上も増加した。このことは、BC の化学過程の高精度計算が、その影響評価に不可欠であることを示している。

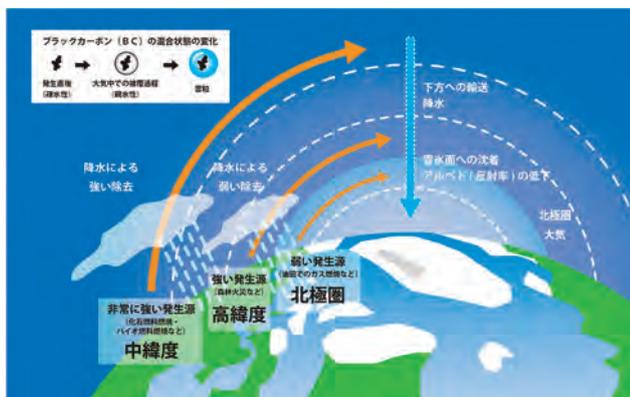


図 4-4-9. 全球的な発生源からの BC 輸送と沈着過程を示した模式図

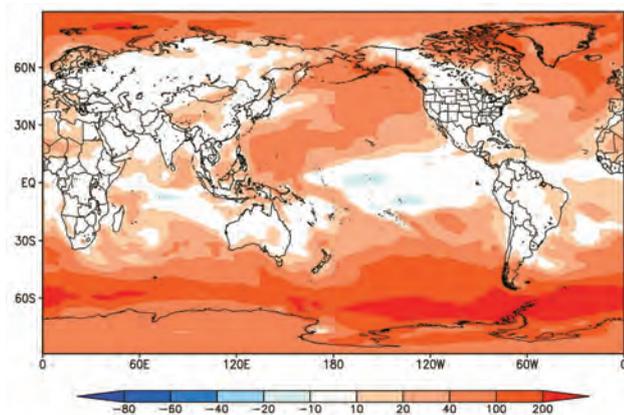


図 4-4-10. ATRAS モデル計算において、ふたつの異なるエアロゾル表現の結果得られた地表面 BC 濃度 (5 年間平均) の差 (%)。エアロゾルの粒径分布のみを解像する 1 次元エアロゾル表現による計算と、BC の混合状態も解像する 2 次元エアロゾル表現による計算を比較した (Matsui and Mahowald, 2017)。

数値モデルにおける雲内での過飽和度の表現

雲内での上昇流中で雲粒へと活性化される BC の割合は、降水による BC の除去効率を支配する主要因となっている (Ohata et al., 2016a)。空気が雲内で経験する最大の過飽和度 (相対湿度 100% を超える割合) よりも低い臨界過飽和度を持つエアロゾルは、雲粒へと活性化されると考えられる。この最大過飽和度は、上昇流速度と、その空気内に含まれるエアロゾル全体の CCN 特性により決まる。全球モデルで解像できる空間スケール (計算格子の大きさ、一般に 100km 程度) よりも、雲や乱流の空間スケールはずっと小さいため、雲内での上昇流速度のばらつきによる正味のエアロゾル活性化の効率を計算することは容易ではない。そこで本研究では、上昇流速度から過飽和度を推定するのではなく、エアロゾル除去量の観測にもとづき過飽和度を推定する、という逆転の発想にもとづく推定を行った。具体的には東京および沖縄での大気中と降水中の BC 粒径分布観測から、さまざまな種類の降水によるエアロゾル除去の平均的な実効過飽和度として、0.08% という値を得た。そしてこの一定値の過飽和度を、数値モデルでの計算格子で解像される雲と、格子サイズ以下の (サブグリッド・スケールの) 雲の両方を与え計算を実施したところ、北極地表面での冬季から早春季の BC 濃度が 10 倍程度増大し、観測結果とより整合的な結果を与えることができた (図 4-4-11、Moteki et al., 2019)。全球的に一定の過飽和度を与えることは必ずしも現実的ではないが、この研究結果は雲内での過飽和度の推定の不確実性が北極 BC 濃度に大きな影響を与えること、そして観測により束縛された計算は現実をよりよく再現させることを示すものである。

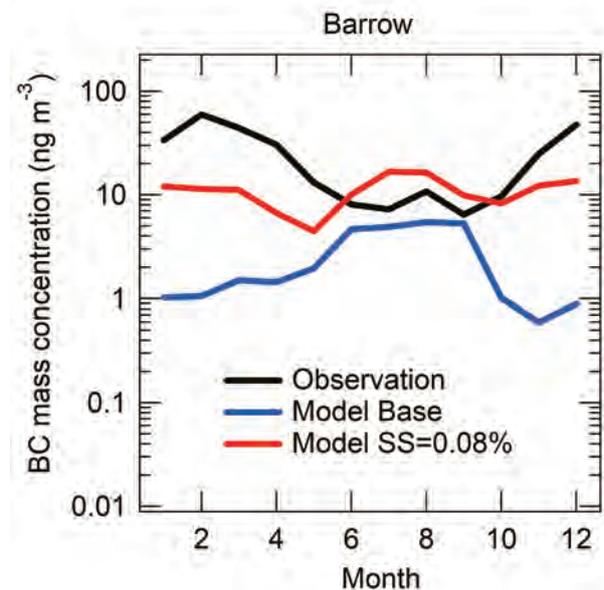


図 4-4-11. アラスカのパローの地表面での大気中 BC 濃度の季節変化。黒が観測結果。青が ATRAS モデル内で計算された過飽和度を使った計算値。赤が過飽和度を 0.08% に固定した計算結果 (Moteki et al., 2019)。

エアロゾル混合状態のパラメタリゼーションと大気中・積雪中 BC 濃度の再現

BC の混合状態を詳細に表現したモデルは、より精度よく北極を含む全球的な BC 濃度を計算可能であるが、計算コストは高いものとなる。そこで本研究では長期的な時間積分も念頭に、BC 混合状態の変化を、詳細なボックスモデルにもとづいて簡易的に表現したパラメタリゼーション (Oshima and Koike, 2013²⁰⁾) を、気象研究所の地球システムモデル (MRI-ESM2) に実装した。この数値モデル計算結果を、アラスカのバローの地表面での大気中 BC 濃度と比較したところ、冬季から早春季の濃度増大の傾向をよりよく再現することに成功した (図 4-4-12)。もともとの計算では、排出直後の裸の BC が、輸送中に他のエアロゾル成分で被覆される時定数として、全大気中で 24 時間という一定値を使用していた。これは現在でも、世界の多くの数値モデルで仮定されている設定である。一方この BC の混合状態変化を表現するパラメタリゼーションでは、BC を被覆するエアロゾル成分の生成速度や、そのエアロゾル成分が BC を含むエアロゾルと含まないエアロゾルに分配される比率をエアロゾル濃度に応じて決めている。このような比較的簡易的なパラメタリゼーションが観測をよりよく再現できるということは、BC 以外のエアロゾル成分を精度よく計算することが、BC 計算精度を高めるうえで重要であることを改めて示すものである。

新しい BC 混合状態のパラメタリゼーションを実装した MRI-ESM2 により、2008 ~ 2015 年の 2 ~ 3 月の平均的な積雪中 BC 濃度を計算し、それを本研究で 2012 ~ 2016 年に得られた測定値と比較した (図 4-4-13)。数値モデル計算は東シベリアやフィンランドで相対的に濃度が高く、グリーンランドやスピッツベルゲン島で濃度が低いといった観測の特徴をよく再現することがわかった。

本研究ではこのように、大気中、降雪中、積雪中 BC 観測により多角的に数値モデルを検証し、BC の放射影響推定の精度向上につながる研究を実現した。

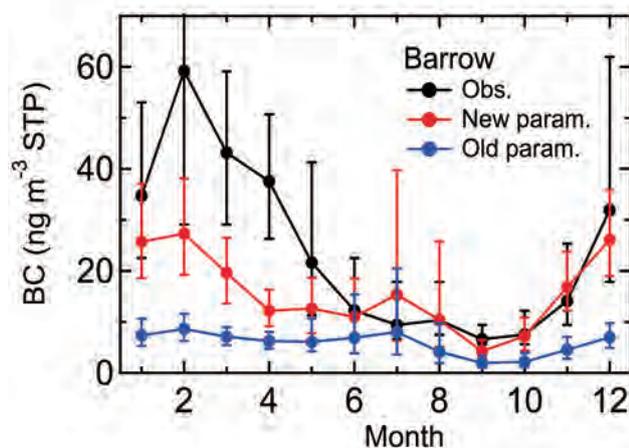


図 4-4-12. アラスカのバローの地表面での大気中 BC 濃度の季節変化。黒が観測値。青が MRI-ESM2 による BC の混合状態の変化の時定数を 24 時間で一定と仮定したモデル計算値。赤が新しいパラメタリゼーションを用いた計算結果。

Mean Snowpack BC Conc. Layer1 (ng/g) Feb-Mar 2008-15

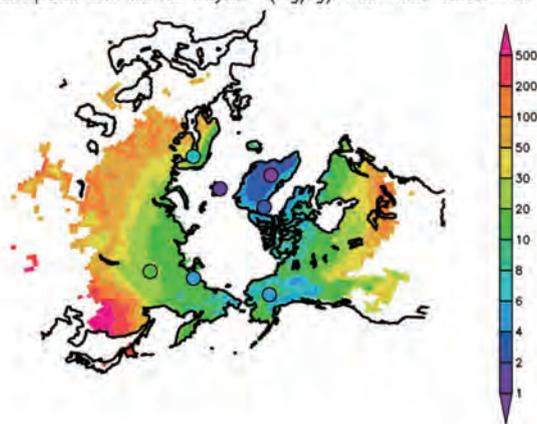


図 4-4-13. 本研究で得られた積雪中 BC 濃度の測定値 (丸印) と MRI-ESM2 数値モデル計算値との比較。単位は単位水質量あたりの BC 質量濃度 (ng/g)。

4.4.3 北極下層雲の動態とエアロゾル影響

小池 真・當房 豊・岡本 創
佐藤 可織・塩原 匡貴・浮田 甚郎

北極の雲と氷晶核

北極域の下層雲は短波・長波放射への影響を通じて、北極域の気候に大きな役割を果たしていると考えられている (Curry and Ebert, 1992²¹⁾; Graverson and Wang, 2009²²⁾)。しかしながら北極下層雲は、その気候影響評価や数値モデルによる再現に必要な観測的な知見が十分ではない。本プロジェクトにおいては研究すべき重要な課題として、北極下層雲の微物理の特徴、北極全体での動態、北極において氷晶核として働くエアロゾルの物理化学的特性の 3 つの課題を設定し、研究を推進した。

北極域の氷晶核

北極域の下層大気 (上空数百 m ~ 数 km) では、混相雲 (約 -38 ~ 0°C の温度条件下でみられる過冷却水滴と氷雲粒によって構成される雲) が年間をとおして頻繁に発生しているため、北極域の気候に大きな影響をおよぼしている。混相雲内での氷晶の形成は、氷晶核として働くエアロゾル粒子 (INP: Ice Nucleating Particle) の助けを借りることによって、誘発されると考えられている。混相雲内での氷晶の占める割合が少しでも増えると、雲の放射特性や寿命などは大きく変化するため、北極域の大気中に、INP がどの程度存在し、またどこから供給されているかを理解することは、非常に重要である。

本研究ではまず、大気中にごく微量でしか存在しない INP を検出するための測定技術の開発に取り組んだ。その結果、従来の水滴凍結法 (エアロゾル粒子を含む水滴を低温ステージ上で冷却することで、それらの粒子の INP 特性を計測する手法) を大きく改良することによって、約 -30 ~ 0°C と非常に幅広い温度範囲内において、INP を検出することが可能なオリジナルの

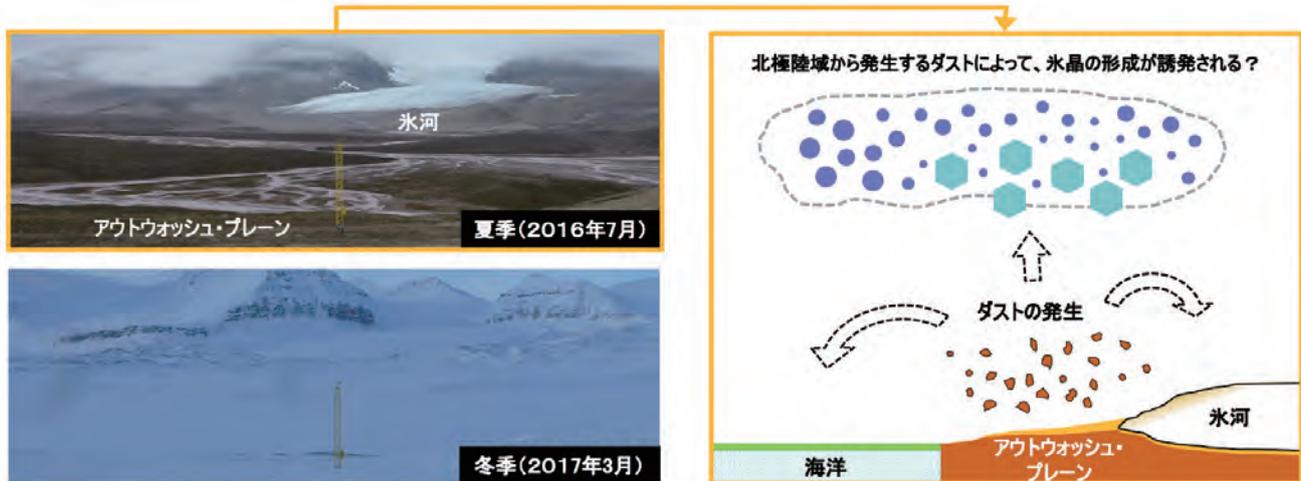


図 4-4-14. (左) 夏季と冬季におけるスバルバル諸島のプレッガー氷河とその周辺の様子。(右) 夏季の北極圏で発生するダストが氷晶形成におよぼす影響の概念図(国立極地研究所・プレスリリースより転載)。

氷晶核計出装置 (CRAFT: Cryogenic Refrigerator Applied to Freezing Test) を確立することに成功した (Tobo, 2016)。

次に、スバルバル諸島のツェッペリン山観測所にて集中観測を複数回実施し、CRAFT を用いた大気中の INP 数濃度の計測に取り組んだ。その結果、冬季の計測値は海洋大気 (海洋上空の大気) で報告されている計測値とほぼ同程度だが、夏季の計測値は約 1 桁高くなっていたことを明らかにした (Tobo et al., 2019)。また、大気中で採取されたエアロゾル試料の電子顕微鏡観察や数値モデルシミュレーションの結果などから、夏季のスバルバル諸島上空での氷晶核数濃度の増加は、北極域のアウトウォッシュ・プレーン等で発生したダストによって生じていた可能性が高いことを示した (図 4-4-14)。

さらに、スバルバル諸島に分布するアウトウォッシュ・プレーンにおいてダストを採取し、CRAFT を用いて、その INP としての能力を調べたところ、アウトウォッシュ・プレーンに由来するダストは、低～中緯度の乾燥地帯で発生する鉱物ダスト (通常、温度が -15°C 付近にまで下がらないと氷晶核としては機能しない) よりも INP としての能力が圧倒的に高いことを明らかにした (Tobo et al., 2019)。詳細な分析の結果、アウトウォッシュ・プレーン由来のダストの INP としての能力は、その主成分である鉱物ではなく、微量に含まれる有機物の存在によって高められていたことを示した (Tobo et al., 2019)。

北極下層雲の直接観測

従来の雲微物理量の直接 (in situ) 観測のほとんどは、スナップショット的な航空機観測に限られていた (Wendisch et al., 2019²³⁾)。そこで本研究では、ニーオルスンのツェッペリン山観測所 (79°N , 12°E 、標高 474m) で、北極域ではじめてとなる雲微物理量 (雲・降水粒子の粒径分布) の直接かつ連続観測を実施した (Koike et al., 2019)。この結果、雲粒数濃度 (N_c) は夏季に最大 (65 個 cm^{-3} 程度)、冬季に最小 (8 個 cm^{-3} 程度) となる明瞭な季節変化を示すことが明らかとなった。この季節変動は CCN 数濃度の指標として採用した直径 70nm 以上のエ

アロゾル数濃度 (N_{70}) の変動の傾向と整合的であるが、冬季には N_{70} よりも N_c はだいぶ低い値となっていた。 N_{70} と N_c の相関を調べてみたところ、気温 0°C 以上および一部の気温 0°C 以下のデータは明瞭な正相関を持つ一方、特に気温が低い場合には、 N_c はこの相関から期待される濃度よりも低い値となっていた (図 4-4-15)。ライダーによる偏光消度観測から、前者 (CCN コントロールされた雲) は水雲、後者は氷を含んだ雲であることが明らかとなった。ツェッペリン山の気温は、 0°C 以上となるのは 7～8 月のみであるが、冬季でも -10 から -15°C 程度である。この結果、CCN コントロールされた雲 (水雲) は 1 年をとおしてみられ、CCN として働くエアロゾルが重要であることがわかった。また北極域ではエアロゾル数濃度が低いため、直径 30～50 nm 程度の小さなエアロゾルまでが雲粒へと活性化されていることが明らかとなった。このことは、新粒子生成が雲微物理量に影響していることを示唆するものである。

CCN コントロールされた雲について、 N_{70} の増加に対する N_c の増加割合で定義される ACI 指数 $1/3 (d \ln N_c) / (d \ln N_{70})$ を調べたところ、新粒子生成の影響が大きい夏季と、北極ヘイズと呼ばれる人為的エアロゾルの影響が大きい冬・春季において、値には大きな変化はなく、0.22 程度であることが明らかとなった。ACI 指数は、気候モデルなどで計算されるエアロゾルの雲微物理影響の妥当性を評価するうえで用いられている。従来の人工衛星観測や航空機観測にもとづく推定値は 0.0～0.19 程度と報告されており (Coopman et al., 2016²⁴⁾; Garrett et al., 2004²⁵⁾; Tietze et al., 2011²⁶⁾)、過小評価されていたことがわかった。

観測されたエアロゾル粒径分布にもとづき、上昇する空気塊中でのエアロゾルからの水雲粒生成過程を 0 次元モデルで計算したところ、上昇流速度 10 cm s^{-1} 程度で観測された N_c の絶対値と ACI 指数を再現できることがわかった (図 4-4-15)。観測された N_c は、雲外空気のエントレインメントや降水などさまざまな雲物理過程の影響を受けていると考えられる。しかし本研究の結果は、その変動が基本的に CCN からの雲粒活性という既知の雲微物理過程により説明できることを示しており、数値

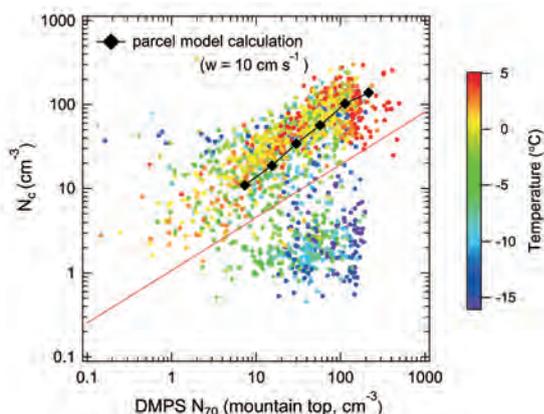


図4-4-15. 乾燥直径70nm以上のエアロゾル数濃度(N_{70})と雲粒数濃度(N_c)との散布図。エアロゾルは雲粒内のももまとめて測定している。 N_{70} はCCNの指標となる。気温が高いときには、 N_c がCCNによりコントロールされていることがわかる。黒いひし形は、観測されたエアロゾル粒径分布を用い、上昇流速 10cm s^{-1} を仮定したときの数値モデル計算結果。モデルの水雲計算の指針を与えるものである。

人工衛星のリトリーバル解析手法の向上と北極雲

衛星「CloudSat」は、レーダー反射因子と気温による2次元ダイアグラムを利用したKu-typeアルゴリズムを開発し、降雪粒子の抽出を行うことが可能となった(Kikuchi et al., 2017b)。「CloudSat」とGPM主衛星による極域を含む降雪の頻度比較解析を行った。GPM主衛星ではKuバンドとKaバンドの2周波のレーダーを搭載しており、この反射因子の比であるDual Frequency Ratio (DFR)を指標にして非常に大きい降雪粒子(HIP: Heavy Ice Precipitation)の抽出が可能となる。この「CloudSat」の降雪識別結果にさらに条件を課し、大粒子の降雪粒子(LS: Large Snow)を新たに抽出した。2015年冬季の3ヶ月間の解析を実施し、GPM主衛星によるHIPと「CloudSat」によるLSの抽出結果を比較すると、高緯度ではグリーンランド沖で0.5%以上を示すなどよい対応を示していた。またLSのグリーンランド付近の分布は、GPM主衛星の観測範囲外の高緯度まで広く分布していることがわかった。「CloudSat」の標準プロダクトであるCloudSat-2C-snowでは、これらの領域では降雪がそもそも検出されていなかった。また同様な「CloudSat」を用いた夏季の極域解析結果は、下層では霧雨を含んだ混合相雲の出現頻度が降雪や他のタイプより多いことがわかった。

北極域では下層雲や混合相雲が卓越していることが知られている。従来偏光ライダーの信号解析には、モンテカルロ法(MC)が必要であったが、時間がかかるため衛星による雲巨視的物理解析や微物理特性解析には適用できないという問題があった。これらの雲を、衛星搭載ライダーで解析するうえで重要な多重散乱の理論的な取り扱いについて、新たにスカラー多重散乱理論である物理モデルPhysical Model (PM)法と、偏光特性を計算するためベクトル化したVectorized Physical Model (VPM)法を開発した。PM法では、 n 回散乱の位相関数の解析解を利用し、VPM法では n 回散乱の 4×4 行列の位相マトリックスの解析解を利用することで、偏光状態の解析が計算可能となった。地上偏光ライダー、スペースシャトルに搭載されたライダーLITE、衛星「CALIPSO」に搭載されたセンサー

CALIPOPの場合に、VPMをベクトル型のライダー用MCを用いて検証した結果、MCよりはるかに高速に平均的に約2%の誤差で解を求めることが可能になったことがわかった(Sato et al., 2018b, 2019, Sato and Okamoto 2020)。

氷粒子の多様な形状と配向を考慮した波長355nmにおける後方散乱特性の理論計算を実施した。レーザー光の傾斜角として、2022年打ち上げ予定のEarthCARE衛星搭載ライダーATLIDの傾斜角である3度の場合について、水平方向に配向した氷粒子と3次元にランダムに配向した氷粒子の計算をはじめて実施した。高スペクトル分解ライダーによる消散係数と後方散乱係数の比で定義されるライダー比と、偏光解消度の2次元ダイアグラムを作成し、このダイアグラムによって氷粒子タイプ識別が可能になることを示した。これは氷雲の微物理特性の抽出解析の不確定性を減らすことにつながる(Okamoto and Sato, 2019; Okamoto et al., 2019)。

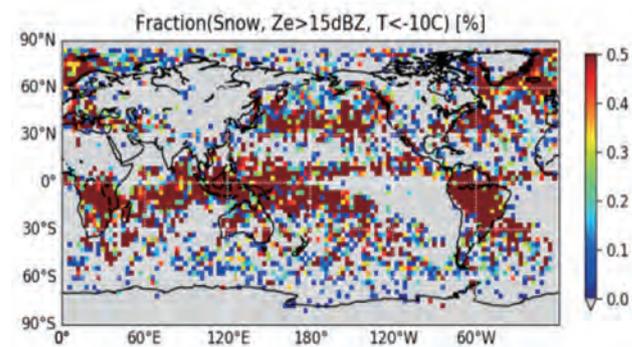


図4-4-16. CloudSatより解析された2015年冬季の降雪大粒子(LS)の出現頻度分布

4.4.4 温室効果気体のトップダウン研究

森本 真司・滝川 雅之・後藤 大輔・村山 昌平
遠嶋 康徳・石戸谷 重之・町田 敏暢・稲飯 洋一
Shamil Maksyutov・伊藤 昭彦・Prabir K. Patra

はじめに

北極域を含む北半球高緯度域には、温室効果気体の全球規模循環に影響を与える放出・吸収源が多数存在している。さらに、温暖化による土壌有機物や湿地からの温室効果気体放出量増加、北極海の海水減少による大気-海洋間 CO_2 交換量の変化など、今後の温室効果気体収支の変化が予想されている(Collins et al., 2014²⁷⁾)。そのため、北極域での温室効果気体放出量を定量的に評価することや、環境変化と放出量の関係を明らかにすることは、将来の温暖化にともなう放出量変化の予測精度を高めるためにも極めて重要である。本研究では、地上観測基地や「みらい」の北極航海、航空機によって大気中の温室効果気体と関連気体の高精度観測を行い、それらの分布と変動を明らかにするとともに、温室効果気体放出源・吸収源の変動に関する解析を行った。

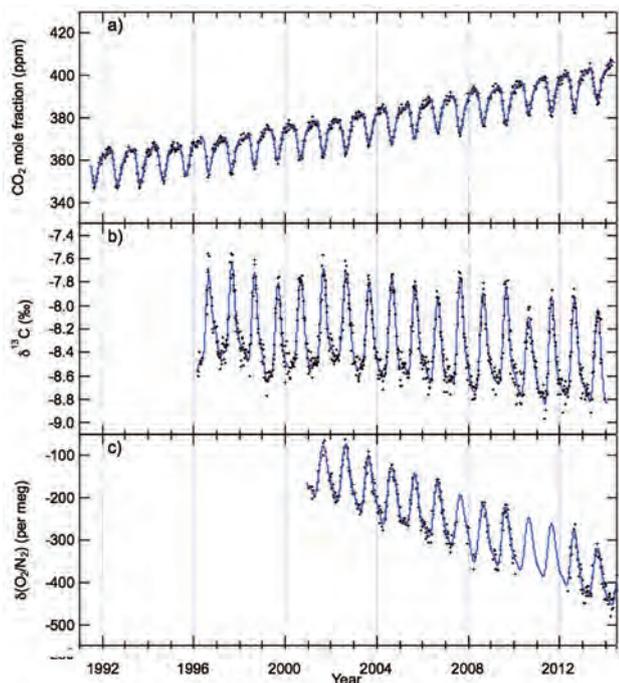


図4-4-17. ニーオルスンにおいて観測された大気中 (a) CO₂、(b) δ¹³C および (c) δ(O₂/N₂) の時間変動。黒点および実線はそれぞれ観測値とベストフィットカーブを示す (Goto et al., 2017b)。

北極域対流圏下部での温室効果気体と関連気体の観測

CO₂ 収支の定量評価の方法として、大気中 CO₂ 濃度とその炭素同位体比 (δ¹³C) を組み合わせた解析手法 (δ¹³C method, Tans et al., 1993²⁸⁾) や、CO₂ と O₂ 濃度 (δ(O₂/N₂) として定義) を組み合わせた解析手法 (O₂ method, Keeling and Shertz, 1992²⁹⁾) が考案されている。国立極地研究所および東北大学では、CO₂ 収支の定量理解を目的として、ニーオルスンにおいてグラブサンプリング法による CO₂ 濃度、炭素同位体比 δ¹³C および大気中 δ(O₂/N₂) の観測を実施している (Morimoto et al., 2001³⁰⁾; Ishidoya et al., 2012³¹⁾)。さらに 2013 年 9 月に CO₂、CH₄、CO 濃度の現地連続観測を開始した。

図 4-4-17 にニーオルスンにおける大気中 CO₂ 濃度、δ¹³C および O₂ 濃度の変動を示す (Goto et al., 2017b)。CO₂ 濃度は明瞭な季節変化をとめないながら経年的に増加しており、1996 ~ 2013 年の平均年増加率は 2.0 ppm yr⁻¹ であった。O₂ method により推定した陸上生物圏と海洋による CO₂ 吸収量は、2001 ~ 2013 年の平均としてそれぞれ 1.6 ± 0.8 GtC yr⁻¹ および 2.3 ± 0.5 GtC yr⁻¹ であった。一方、δ¹³C method を用いて推定された同期間の陸上生物圏と海洋による CO₂ 吸収量はそれぞれ 1.3 ± 0.6 GtC yr⁻¹ および 2.6 ± 0.5 GtC yr⁻¹ であった。両手法による結果はよく一致しており、これらふたつの手法の有効性を示している。陸上生物圏による CO₂ 吸収量は年々の変動が大きく、エルニーニョが発生した 1995 ~ 1996 年および 2002 ~ 2003 年には CO₂ 吸収量が減少している。これは、エルニーニョ発生時には干ばつや異常高温が生じるため、陸上生物圏の正味の CO₂ 固定量が減少したためと考えられる。一方で、海洋による CO₂ 吸収量は年々の変動は小さいが、近年吸

収量が増加傾向にあることが見出された。人為起源の CO₂ 放出による急激な大気中濃度増加は大気 - 海洋間の CO₂ 分圧差を増加させるため、海洋による CO₂ 吸収量も増加すると考えられる。

レーザー分光法による分析計 (Picarro) を用いてニーオルスンでの CO₂、CH₄、CO 濃度の連続観測を実施した。観測された短周期変動を詳細に調べると、各成分間で対応した数日スケールの変動がみられ、夏季以外の季節には各成分間で正の相関が、夏季は CO₂ 濃度と CH₄ 濃度間で負の相関がみられることが多い。NOAA の大気物質輸送モデル HYSPLIT を用いた 5 日間の後方流跡線解析を行ったところ、夏季以外には大陸起源の気塊が到達したときには各成分について高濃度になり、洋上起源のときには低濃度になる傾向がみられた。これは、陸上生物活動による呼吸 (CO₂) や湿地からの放出 (CH₄)、バイオマス燃焼や化石燃料燃焼による放出 (各成分) 等により、大陸起源の気塊が洋上起源のものより相対的に高濃度になっているものと推察された。一方、夏季には陸上生態系による光合成吸収の影響で、大陸起源の気塊は洋上起源のものとは比べて CO₂ 濃度は相対的に低くなり、CH₄ や CO 濃度変動に対して負の相関を示しているものと考えられた。

ニーオルスンとチャーチルにおいて、系統的な大気採取による大気中 CH₄ 濃度とその炭素・水素同位体比 (δ¹³C、δD) の時系列観測を実施した (Fujita et al., 2018; Morimoto et al., 2017)。チャーチルで観測された CH₄ 濃度の季節変化について、各 CH₄ 放出源カテゴリー (微生物、化石燃料、バイオマスバーニング) の寄与を、CH₄、¹³CH₄ および CH₃D に関する 1 ボックスモデルを使用して評価した。チャーチルで観測された CH₄ 濃度の季節変化に対する各 CH₄ 放出源グループの寄与を図 4-4-18 に示す (Fujita et al., 2018)。この図から、微生物起源 CH₄ の寄与が夏季に最大になり、かつ 1 年をとってもっとも大きな影響を与えていることがわかる。さらに化石燃料起源 CH₄ が冬のはじめにある程度寄与していることが示されている。化石燃料起源 CH₄ の放出量が季節変化がないとされているため、冬季に長距離輸送された化石燃料起源 CH₄ のシグナルが検出された可能性がある。

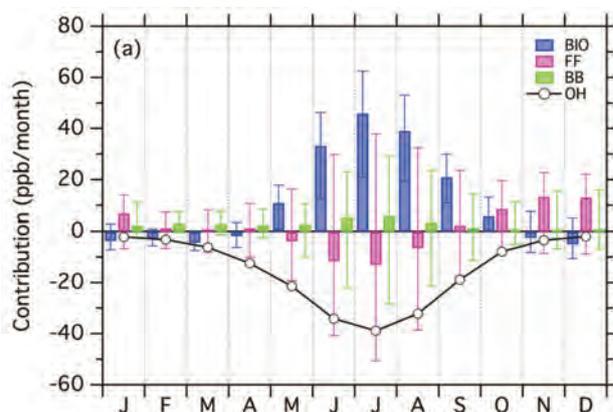


図 4-4-18. チャーチルで観測された CH₄ 濃度の季節変化に対する各 CH₄ 放出源グループの寄与。BIO、FF、BB は、それぞれ微生物起源、化石燃料起源、バイオマスバーニング起源を示す。OH との反応による CH₄ 消費の寄与は白丸で示した (Fujita et al., 2018)。

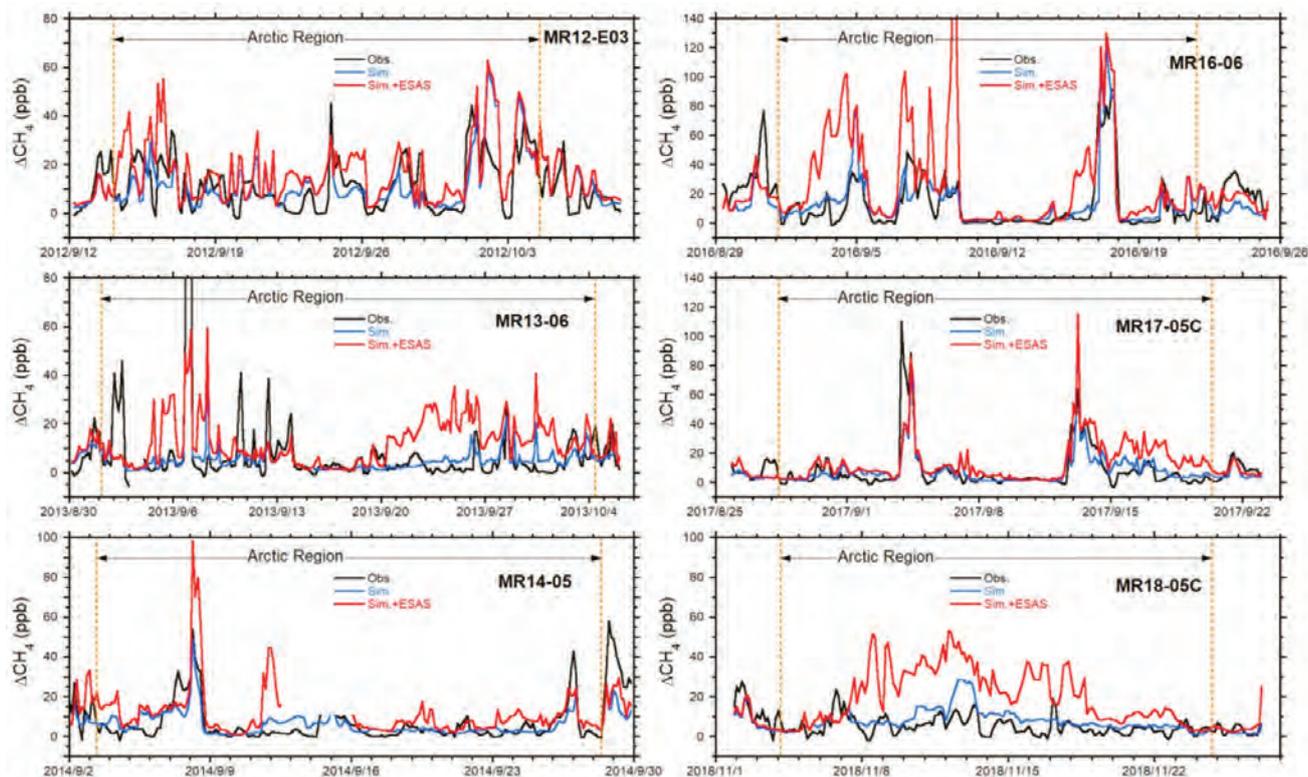


図 4-4-19. 2012～2018 年度「みらい」北極航海 (MR12-E03, MR13-06, MR14-05, MR15-03, MR16-06, MR17-05C, MR18-05C) における ΔCH_4 の時系列。黒線は観測結果、青線は NICAM-TM 4D-Var で求められた CH_4 フラックスを用いた計算結果、赤線は ESAS 領域のフラックスを $4.5 \text{TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ にした場合の計算結果。

全球的な大気観測から、大気中の CH_4 濃度は 2000 年までは増加していたが、2000～2006 年の間はほぼ濃度増加が停止し、その後 2006 年以降現在に至るまで濃度が引き続き上昇していることが明らかになっている。ニーオルスンにおける CH_4 濃度の平均増加率は、2000 年後半から 2005 年後半までは $0.3 \pm 0.2 \text{ppb yr}^{-1}$ であったが、2005 年後半から 2013 年末には $5.5 \pm 0.2 \text{ppb yr}^{-1}$ へ増加した。このような CH_4 濃度の変動を生じさせた CH_4 放出源の $\delta^{13}\text{C}$ 値 (δ_s) を、大気中 CH_4 と $^{13}\text{CH}_4$ の収支式を用いて求めたところ、 δ_s として $-56.9 \pm 4.1 \text{‰}$ が得られた。 δ_s が微生物起源 CH_4 の $\delta^{13}\text{C}$ 値に近いことから、2005 年後半にニーオルスンで観測された CH_4 濃度の再増加には、微生物起源 CH_4 が重要な役割を果たしていると考えられる (Morimoto et al., 2017)。

毎年秋から初冬に実施されてきた「みらい」北極航海において、大気中の CO_2 、 CH_4 および CO 濃度の船上連続測定を実施した。北極圏においても CH_4 濃度が数十 ppb 以上高まる短期変動がしばしば観測された。このような地域的な CH_4 放出と大気輸送によってもたらされる CH_4 濃度の短期的な変動 (ΔCH_4) に着目して解析を行った。ラグランジアン粒子拡散モデルにもとづいて開発された FLEXCPP (Zeng et al., 2013³²) を用いて濃度変化に影響をおよぼした領域を「みらい」の航路に沿って計算し、その領域と NICAM-TM 4D-Var (Niwa et al., 2017³³) インバージョンで求められた地表面 CH_4 フラックス^{※8} から大気中 CH_4 濃度の変動分 ($\Delta \text{CH}_4^{\text{sim}}$) を求めた。観測結果からは地域的な放出の影響を受けていない「ベースライン」から

の増加分 ($\Delta \text{CH}_4^{\text{obs}}$) を求め、上記の計算結果と比較した。図 4-4-19 に、2012～2018 年度「みらい」北極航海 (MR12-E03, MR13-06, MR14-05, MR15-03, MR16-06, MR17-05C, MR18-05C) で観測された ΔCH_4 の時系列 (黒) と対応する計算結果 (青) を示す。Shakhova et al. (2010)³⁴) は、海底から気泡として漏出する CH_4 の観測結果にもとづき、東シベリア域北極海陸棚 (ESAS) 領域からの CH_4 の年間放出量を約 8 (6.3～9.7) $\text{TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ と推定している。また、Berchet et al. (2016)³⁵) は、北極周辺における大気観測と大気輸送モデルから、ESAS 領域からの放出量を $0 \sim 4.5 \text{TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ と下方修正した。一方、NICAM-TM 4D-Var による ESAS 領域からの 9 月の CH_4 放出量は、2012～2017 年の平均で $0.46 \pm 0.01 \text{TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ であった。ESAS 領域の CH_4 放出量を $4.5 \text{TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ として $\Delta \text{CH}_4^{\text{sim}}$ を計算すると (図 4-4-19 の赤線)、明らかに観測結果を過大評価することがわかった。そこで、 $\Delta \text{CH}_4^{\text{obs}}$ と $\Delta \text{CH}_4^{\text{sim}}$ の差が最小となるように各観測における ESAS 領域からの CH_4 放出量を計算したところ、2014、2016、2017 年 9 月の放出量は NICAM-TM 4D-var によるこの領域の放出量とほぼ一致するが、2012 年は $1.1 \pm 0.4 \text{TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ 、2013 年は $-0.1 \pm 0.3 \text{TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ と比較的大きな変動を示す結果となった。これらの結果から、少なくとも 9 月については ESAS からの CH_4 放出量は $0 \sim 1.1 \text{TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ 程度であると推定され、Shakhova et al. (2010)³⁴) や Berchet et al. (2016)³⁵) は過大評価している可能性を示唆するものとなった。

大気中 O_2 濃度と CO_2 濃度の観測結果から計算される大気

ポテンシャル酸素 (APO = O₂ + 1.1xCO₂, 1.1は陸上生物活動におけるO₂とCO₂の交換比)は陸上生物活動による保存量であり、主に大気海洋間のO₂交換を反映した変動を示すことが知られている。「みらい」船上で大気中のO₂およびCO₂濃度の船上観測を実施し、得られたAPOの変動を大気輸送モデルによる計算結果および航路上の大気-海洋間O₂フラックスの変動(F_{O₂_obs})と、さらにF_{O₂_obs}と大気-海洋間O₂フラックス平均気候値(F_{O₂_cli}, Garcia and Keeling, 2001³⁶⁾)を比較した。その結果F_{O₂_obs}はF_{O₂_cli}にはみられない日々変動を示し、9月を中心として観測が行われた2012～2017年にはF_{O₂_cli}より平均的に高い値を、11月を中心とした2018年には逆に低い値を示した。APOの観測値とモデル値の差の変動パターンに、F_{O₂_obs}とF_{O₂_cli}の差を反映した変動がみられた。Ishidoya et al. (2016)ではF_{O₂_obs}とF_{O₂_cli}の系統差から北半球中・高緯度の秋季におけるF_{O₂_cli}の過小評価の可能性を示唆したが、2018年のF_{O₂_obs}とF_{O₂_cli}の比較から、初冬においては秋季とは逆にF_{O₂_cli}が過大評価である可能性が示唆される。今後、APOとO₂フラックスの同時観測を展開することで、北半球中・高緯度でのAPOの短周期変動メカニズムの解明とF_{O₂_cli}の評価・改良のための有用な情報が取得できると期待される。

ユーラシア大陸上空での大気中温室効果気体の航空機観測

本プロジェクト開始以前よりユーラシア大陸上空を飛行する民間航空機を利用して高緯度上部対流圏下部成層圏(ExUTLS: Extratropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere)における系統的な温室効果気体濃度の観測を行い、それらの時空間変動と変動要因を明らかにした。大気試料は日本-パリ間の航路上12地点で採取した。観測頻度は9～10回 yr⁻¹、観測範囲は東経7.6～138.1度、北緯42.1～70.1度、高度8.5～12.5kmであった。各種温室効果気体濃度の時空間変動を把握するために、客観解析場である気象庁55年長期再解析(JRA-55)データを利用して観測された空気塊を高度方向に分類した。すなわち、渦位2PVU面をExUTLS領域における対流圏界面と定義し、対流圏界面からの温位差25Kごとに観測された空気塊を分類して、それぞれについて時系列解析を行った。

一例として、ExUTLS領域各高度におけるCO₂濃度の時系列変動を図4-4-20に示す。圏界面からの温位差(Δθ)が負であれば対流圏、正であれば成層圏であることを示している。上部対流圏(Δθ<0K)におけるCO₂の季節変動は平均的な振幅が9.3ppmで夏季に極小値を示すが、下部成層圏の4層目(37.5K<Δθ<50.0K)では位相は逆で振幅はわずか2.6ppmである。下部成層圏の2層目(12.5K<Δθ<25.0K)が物質輸送的な境界になっていると考えられ、CO₂濃度の振幅は0ppmに近い。CO₂濃度の経年増加率は上部対流圏も下部成層圏(4層目)も2.6ppm yr⁻¹と同等であるが、下部成層圏の濃度増加の方が上部対流圏のそれよりも1.3年ほど遅れていることが示された(Inai et al., 2019)。ExUTLS領域の大気塊の起源を特定するためにECMWF ERA-Interimデータを用いた10年間の後方流跡線解析を実施した。得られた流跡線は地理的情報や気象パラメーターによって、成層圏、熱帯対流圏、中緯度下

部対流圏(LT: Lower Thermosphere)、高緯度LT起源に分類され、各起源大気の「混合比率」を等価緯度、温位、月の関数として評価した。また、成層圏を起源とする大気塊については、空気塊の成層圏平均滞在時間(成層圏大気の年齢)も合わせて評価した。以上のように評価された混合比率、成層圏大気の年齢を用いて、ExUTLS領域における大気輸送場と輸送されてくる大気の組成の季節変動について詳細な議論を行った(Inai et al., 2019)。推定された混合比率は顕著な季節変動を持ち、ExUTLS領域でも比較的高度の高い領域では、北半球夏季から秋季は熱帯対流圏の、冬季から春季は成層圏の混合比率が支配的であった。一方、低い高度域においては、冬季は熱帯対流圏の混合比率が大きく、夏季のみ中・高緯度LTの混合比率が大きくなると推定された。

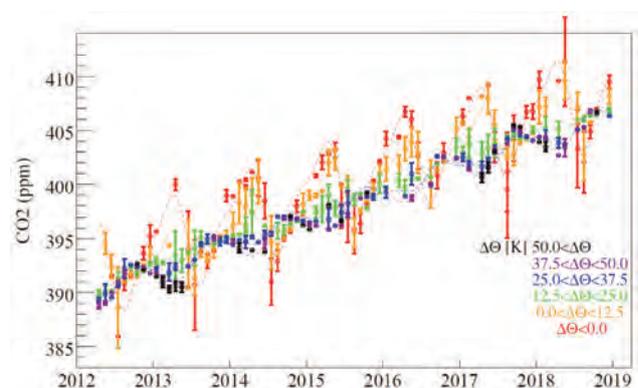


図4-4-20. ExUTLS領域における対流圏界面からの温位差(Δθ)ごとのCO₂濃度の時系列

大気輸送モデル・陸域プロセスモデルの高度化とモデルを用いた大気中温室効果気体の収支解析

AGCM-based Chemistry Transport Model (ACTM, Patra et al., 2016)は全球大気大循環モデルをもとに温室効果気体の輸送過程をオンラインに評価するもので、Global Carbon Project (GCP)やAtmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project (TransCom)などの国際的なプロジェクトに結果を提供するなど、世界最先端の温室効果気体輸送モデルのひとつである。本プロジェクトの研究でもCH₄の収支評価や観測データの輸送経路推定等に広く利用されているが、これまで鉛直座標系にσ座標系を用いており、成層圏-対流圏物質交換などの際に鉛直混合を過大評価している可能性があった。本研究における炭素収支をより精緻に評価するため、鉛直座標系をσ-Pハイブリッド座標系に変えたとともに、ベースモデルを第5次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)などに利用されたMIROC4に更新(MIROC4-ACTM)し、パッシブトレーサーであるSF₆や²²²Rnを用いて輸送過程の検証を行ったところ、以前のCCSR/NIES AGCM 5.7bベースのモデル(AGCM57b-ACTM)と比較して大気中における気塊年代などが観測結果にもとづく推定値とより整合的になっていることを確認した(図4-4-21)。これは、気候モデルにMIROC4を用いることにより上部対流圏における低温バイアスが取り除かれたため、積雲対流によって上層

に輸送される量が減少したことに起因すると考えられる (Patra et al., 2018)。中緯度域から北極域への輸送に際しては上部対流圏での極向きフラックスが重要であり、本成果は CH₄ 等の広域収支推定の精緻化に資するものと考えられる。

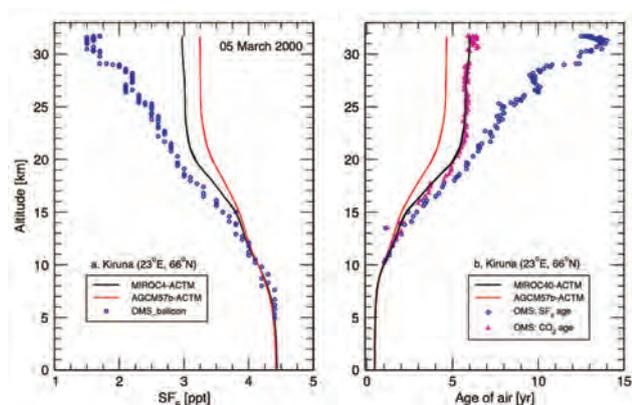


図 4-4-21. キルナにおける 2000 年 3 月 5 日の SF₆ 濃度鉛直分布 (左図)、および CO₂ 観測などを用いて推定した気塊年代の鉛直分布。黒線が新モデル、赤線が旧モデルを、また○および▲は観測(推定)値をそれぞれ示す (Patra et al., 2018)。

チャーチルの位置するカナダ北方のハドソン湾周辺 (HBL: Hudson Bay Lowland) は CH₄ の大きな放出源と考えられているが、その放出量推定値にはいまだ不確定性が大きい。大気化学輸送モデル ACTM (Patra et al., 2016) で計算したチャーチルにおける CH₄ 濃度変動を実際の観測値と比較することにより、ACTM に与えた CH₄ 放出量の評価を行った (Fujita et al., 2018)。

使用した CH₄ 放出量シナリオとして全球インバージョンによる修正値を用いた。解析期間は 2007～2013 年とした。放出量シナリオによる CH₄ 濃度計算値はニーオルスンでの観測値と比較的よい一致を示したが、チャーチルの観測値とは大きく異なり特に夏季の差が大きかった。チャーチルでの夏季の CH₄ 濃度変動にどの領域の放出源が影響しているかを調べるため、ACTM を用いたタグ・トレーサー実験を行った結果、夏季には HBL 周辺の空気塊の移流がチャーチルでの CH₄ 濃度変化の主な原因であることが示された。つまり、ACTM での CH₄ 濃度計算に使用したシナリオは、HBL での CH₄ 放出量を過大評価している可能性がある。チャーチルでの CH₄ 濃度計算値が観測値と一致するように ACTM に与える HBL からの CH₄ 放出量を調整したところ、HBL からの CH₄ 放出量は、 $2.7 \pm 0.3 \text{ TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ と推定された。これは大気中の CH₄ 濃度観測値と大気輸送モデルを用いて求められた先行研究とよく一致しているが、地上 CH₄ フラックス観測や陸域モデルから求められた推定値よりも小さい。

シベリア域も重要な CH₄ 放出源のひとつと考えられているが、その放出量推定値についてもいまだ不確定性が大きい。本研究では、中程度解像度 (緯度経度 2.5 度) および高解像度 (0.1 度) 大気輸送モデルを用いてインバージョンを行い、大気中の CH₄ 濃度観測値を再現可能な地表からの CH₄ 放出量を逆推定した。空間解像度 0.1 度の全球大気輸送インバージョンモデル

(NIES-TM-FREXPART-VAR) と、シベリア各地の温室効果気体観測ネットワーク (JR-Station: Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network) で観測された大気中の CH₄ 濃度データを用いて、地表からの CH₄ 放出量を逆推定した。その結果を中解像度インバージョンの結果と比較すると、高解像度インバージョンは冬季の JR-Station 観測データをよく再現していた。また、本研究によるロシア全域の CH₄ 放出量推定値は、中解像度および高解像度インバージョンともに、既存のインベントリーデータ (例えば EDGAR42FT, 2013^{*)}) による CH₄ 放出量見積もりが過小評価であることを示した。JR-Station 観測による大気中の CH₄ 濃度を再現するためには、西シベリア域の湿地とウラル、西シベリア域の化石燃料セクターからの CH₄ 放出量を上方修正する必要があることが明らかになった。

今後の気候変動にともなって北方湿原の CH₄ 放出量は大幅に増加し、永久凍土の融解によって加速されると考えられるが、その現状把握の信頼性は十分でなく、将来予測を行うためのモデルは確立されていない。CH₄ 生成放出・酸化吸収スキームを組み入れた陸域生態系モデル VISIT (Ito and Inatomi, 2012³⁷⁾) を用いて、北方湿原の CH₄ 放出分布をシミュレートした。VISIT には 2 種類の湿原 CH₄ 放出スキーム (Cao スキーム、Walter-Heimann スキーム) と 4 種類の乾燥土壌 CH₄ 酸化スキームが導入されている。モデル内で推定された水収支に追従する地下水面変動を考慮するようモデル改良が行われた。湿原の分布は Global Lake and Wetland Dataset により規定し、季節的な湛水領域の割合は衛星観測による平均的な変動を与えている。シミュレーションの空間分解能は緯度経度 0.5 度であり、1901～2016 年の CRU TS3.25 気象データを使用した (Ito, 2018)。

2000～2009 年の期間について、北方域 (北緯 60 度以北) の湿原による CH₄ 放出量は $10.9 \sim 11.4 \text{ TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ と推定された。これは GCP による複数手法 (大気観測 + 輸送モデルを用いたインバージョン、湿原モデルの相互比較、Saunois et al., 2017) 結果と整合的であった。主要な放出源は西シベリア低地とハドソン湾低地周辺に分布していたが、東シベリアの河川氾濫原、北米内陸部に点在する湿地も明瞭な放出源となっていた。季節的には、温度が 0°C となり生物活動が活発化する夏季にピークを示す明らかな変動が再現されたが、その位相と振幅は湿地 2 スキーム間でやや異なっていた。長期的にみると、Cao スキームでは年々変動幅が大きいが 2000 年以降はほぼ同水準だったのに対し、Walter-Heimann スキームは年々変動幅が小さく 1980 年以降徐々に増加傾向がみられた (図 4-4-22)。ふたつの結果で増加傾向を示す場所はほぼ共通しており、北米内陸部の湿地、アラスカ、西シベリア低地の北部であった。今回の計算では湿原の面積変動は考慮されていないため、このような傾向は降水量増加による地下水位の上昇または温度上昇による CH₄ 生成の活発化に起因すると考えられる。一方、ハドソン湾低地の一部では CH₄ 放出の減少傾向が示された。湿原からの CH₄ 放出は全陸域で $160 \text{ TgCH}_4 \text{ yr}^{-1}$ 前後と考えられており、今回の結果に

もとづく北方湿原は約7%相当の寄与を果たしていた。近年の温暖化傾向に対して、北方湿原からのCH₄放出増加について一貫した結果は得られなかったが、将来の温度上昇に対するティッピングエレメント的応答の可能性を考えると今後も注視すべき領域であり続けると考えられる。

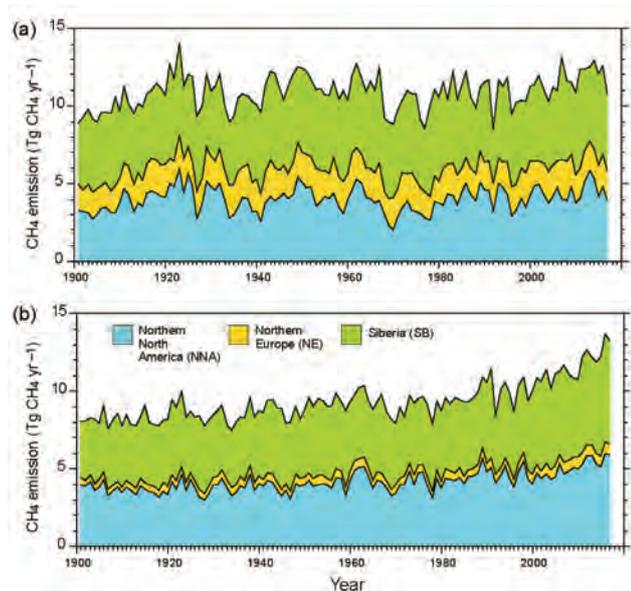


図4-4-22. 陸域生態系モデルVISITで推定された北方湿原CH₄放出の年々変動。(a) Caoスキーム、(b) Walter-Heimannスキームによる結果。色の違いは領域(北米北部、北欧、シベリア)を示す(Ito, 2018)。

西シベリア域におけるCH₄フラックスの直接観測と衛星データを用いた広域化

インバージョン法によって全球のCH₄放出量を定量化するためには、まず大気モデルに与える現実的なCH₄放出量分布の先験値が必要である。重要なCH₄放出源である西シベリア域湿地帯からのCH₄放出量を高精度化するために、湿地、湖沼、森林からのCH₄放出量の現地直接観測を行い、衛星データを用いた湿地地図を新たに作成してCH₄放出量推定の広域化を行った。

西シベリア域は平坦な地形が広がっているため、泥炭地以外の、水はけの悪い森林域からの間欠的なCH₄放出も重要である。そこで、湖沼に加えて、湿潤な森林、オビ川の氾濫原、さらに西シベリア南部においてもCH₄放出量観測を実施した(Mochenov et al., 2018; Churkina et al., 2018; Sabrekov et al., 2016a, 2016b, 2017; Terentieva et al., 2019)。また、湿地からのCH₄放出量の季節変化を調べるために、2016～2018年の暖候期(湿地がCH₄を放出している季節)に自動チャンバー観測システムを西シベリア域の2箇所に設置し、CH₄とCO₂放出量の時系列観測を行った(Krasnov et al., 2015; Davydov et al., 2018)。CH₄放出量は土壌温度に追従して大きくなったが、初夏よりも晩夏の方がCH₄放出量が多い。これは晩夏には土壌の深部まで昇温しているためと考えられる。西シベリア全域の湿地起源CH₄放出量を見積もるために、解像度30mのランドサット衛星画像を用いて、タイガ林領域および南部タ

イガ・森林・ステップ領域における高分解能湿地地図を作成した(Terentieva et al., 2016, 2017)。この詳細な湿地地図と西シベリア域での広域CH₄放出量観測結果を用いることによって、中栄養沼地からのCH₄放出量がこれまでの見積もりよりも5TgCH₄ yr⁻¹ほど大きいことが明らかになった。

4.4.5 温室効果気体のボトムアップ研究

楢山 哲哉・植山 雅仁・大野 浩・斉藤 和之・滝川 雅之
 岩田 拓記・岩花 剛・太田 岳史・岡村 幹太・小谷 亜由美
 中井 太郎・永井 信・原蘭 芳信

はじめに

アラスカとシベリアを中心に実施した温室効果気体収支観測、永久凍土調査、陸域モデル検証、陸域モデルによる広域的な温室効果気体収支の推計結果を報告する。

<高緯度陸域生態系におけるCH₄収支の長期観測と観測にもとづく広域収支の推計>

○背景と目的

高緯度の陸域生態系では、温暖化やそれともなう水循環の変化により、長期的に温室効果気体収支が変化してきていることが明らかとなっている。とりわけ、CO₂に比べて100年で32倍の温室効果を持つCH₄は、温暖化による微生物活動の増大や凍土劣化により高緯度生態系からの放出が増大することが懸念されている。一方で、高緯度生態系のCH₄収支を長期観測から明らかにした研究は少なく、そのためモデルによるCH₄収支の推計には多くの不確実性が残されている。本研究では、内陸アラスカの凍土に生育する湿性クロトウヒ林においてCH₄収支を長期観測し、環境変動に対する生態系CH₄収支の応答を明らかにした。また、多点のCH₄収支の長期観測データを用いてボトムアップモデル(VISIT, Ito and Inatomi, 2012³⁷⁾)を調整し、高緯度陸域生態系のCH₄収支の広域推計を行った。

○凍土林における長期CH₄収支の連続観測

内陸アラスカ・フェアバンクススの凍土上のクロトウヒ林において渦相関法による長期のCH₄交換量の連続測定(Iwata et al., 2015³⁸⁾)を実施した(図4-4-23)。長期観測の結果から、森林のCH₄放出量は融解深がもっとも深くなる8～9月に増大することがわかった。生育期積算のCH₄収支の年々変動は大きく、2011～2013年のように降水量が少なく水位が地下にある場合にCH₄放出量が少なくなるが、2016～2018年のように水位が高い年はCH₄放出量が多いことがわかった。凍土林のCH₄収支は水収支に強く影響を受けており、今後の湿潤化ともないCH₄放出量を増大させる可能性が示された。一方、凍土林のCH₄放出量は、湿潤年であってもツンドラや湿原のCH₄放出量に比べて小さいことがわかった。このことは、高緯度陸域生態系においても樹木が生育している場所においては、CH₄放出量が小さいことを意味しており、CH₄の広域推定をする際に

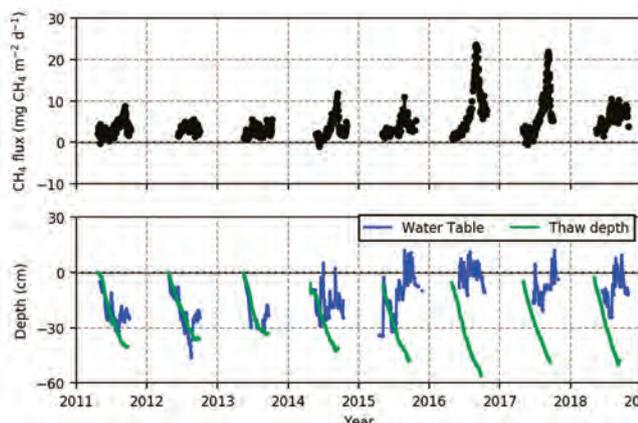


図 4-4-23. 内陸アラスカの凍土林における CH₄ 交換量 (a)、水位・融解深 (b)

泥炭地であっても森林・非森林を正確に区分しなければ CH₄ 放出量を過大評価する可能性があることを示している。

○陸域生態系モデルによる広域 CH₄ 収支の推計

プロセスベースの陸域生態系モデル (VISIT) に高緯度陸域生態系の CH₄ 収支を予測するために必要な永久凍土と水位変動のプロセスを組み込み、CH₄ 収支を計算した (図 4-4-24)。米国、カナダ、ロシアの 10 地点のツンドラ、2 地点の泥炭地、2 地点のサーモカルスト進行地、2 地点の凍土林に加えて北方湿原南限の北海道の泥炭地 1 地点のタワー観測データを用いてモデルのパラメーターを大域探索^{※10}によって決定した。観測データにより調整されたモデルは、生態系間の CH₄ 収支の季節変化や強度を概ね再現できることが確認された。

計算された CH₄ 収支の空間分布から、北極域には西シベリア低地とハドソン湾低地のふたつのホットスポットが存在することがわかった。

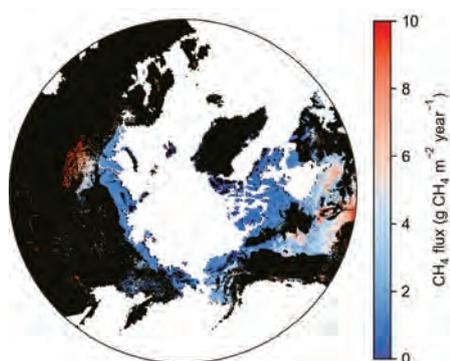


図 4-4-24. VISIT モデルによる 2000 ~ 2018 年の年間 CH₄ 収支の平均値

○まとめ

高緯度陸域生態系の CH₄ 放出量は水循環の変動に起因した水位変動が重要であることが長期観測から明らかになった。このことは、温暖化予測においてこの地域の水循環の応答を正確に評価することの重要性を示唆するものである。本研究では、生態系を静的なものとして取り扱ったが、サーモカルストや原野火災などにより生態系自体が温暖化により激変することが指摘されている。水循環の年々変動によって浸水域にも変動がある

ことが知られている。将来の CH₄ 収支を予測する際には、生態系が動的であることを理解しておくとともに、現状の観測で明らかになっている事実も 10 年程度の非常に短期間の断片をみていることに過ぎないことにも留意しておく必要がある。

<アラスカとスバルバル諸島における永久凍土調査>

○背景と目的

永久凍土の融解によって大量の温室効果気体が放出され、地球規模の気候変動を引き起こすことが危惧されている。永久凍土の消長にともない、どの程度の有機炭素の出入りがあり、その結果どの程度の環境変化 (気温の変動) が生じるのかを予測することが求められているが、そのために欠かせない永久凍土の組成についての情報が不足している。とりわけ、永久凍土の体積の大部分を占める地下水に含まれる有機炭素量を調べた研究例は、これまでほとんどなかった。そこで本研究では、アラスカとスバルバル諸島周辺を対象に、地下水に含まれる有機炭素量を調べた。

○研究目的・手法

高含水永久凍土層に含まれる有機炭素 (CH₄) の量やその成因・履歴等を明らかにするために、北極圏アラスカおよびスバルバル諸島周辺の永久凍土地帯で高含水永久凍土の広域試料採取を行い (図 4-4-25)、高含水永久凍土に含まれる有機炭素 (CH₄) の量や安定炭素同位体組成を分析した。

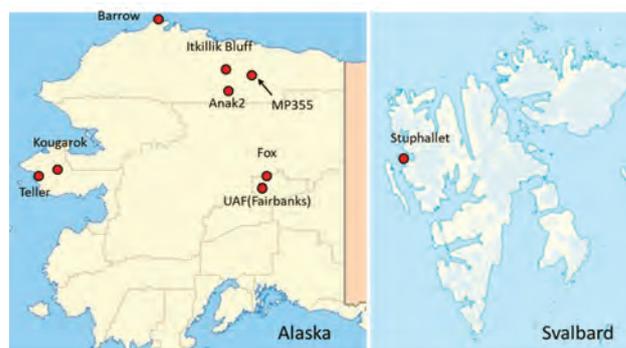


図 4-4-25. 永久凍土試料の採取地点

表 4-4-2. 各サイトにおける地下水の気体含有量・温室効果気体濃度（平均値）

	ガス含有量 (cc/100g)	CO ₂ (ppmv)	CH ₄ (ppmv)
Itkillik Bluff	3.9	2301	51
MP355	3.4	3817	14177
Fox	3.1	7526	14463
Barrow	3.4	2401	3736
Anak2	3.7	12793	4399
UAF	2.9	639	2352
Teller	4.7	593	1060
Kougarok	4.1	647	13212
Stuphallet	9.4	205	3204

○地下水および土壌の気体含有量・温室効果気体濃度

各サイトにおける地下水の気体含有量・温室効果気体濃度を表 4-4-2 に示す。スチューファレット (Stuphallet) を除いて、地下水 100g あたりの気体含有量は 3 ~ 4cc で、積雪の圧密氷化によってできる氷河・氷床氷の気体含有量 (約 10cc/100g) と比べて数分の 1 程度の値であった。この事実は、今回調査した地下水の主要な形成メカニズムが、霜や積雪の圧密氷化ではなく、春 (夏) 季にアイスウェッジの割れ目に侵入した天水の凍結によるものであることを示唆している。スチューファレットの地下水の気体含有量は例外的に多く、氷河・氷床氷の値に匹敵することから、この場所は例外的に、積雪や霜の圧密氷化等の別プロセスが氷体形成に強く関与していた可能性がある。地下水に含まれる気体の CH₄ 濃度は、サイト間で大きな違いが認められ、平均値は 51 ~ 14,463ppmv の広いレンジにわたっていた。CO₂ 濃度の平均値についても同様に、サイト間で大きな差異が認められた (205 ~ 12,793ppmv)。

○地下水中 CH₄ の生成経路

CH₄ 生成過程を探るために、地下水に含まれる CH₄ および CO₂ の炭素安定同位体組成の関係を調べた (図 4-4-26)。生物起源の CH₄ は、二酸化炭素還元 (CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O) と、有機酸発酵 (CH₃COOH → CH₄ + CO₂) のふたつの経路に大別される。一般的に、二酸化炭素還元経路で生成した CH₄ の δ¹³C と CO₂ の δ¹³C との差 (ε_c) は 55 ~ 90 ‰ 程度の値を示し、有機酸発酵経路の場合は ε_c が 30 ~ 55 ‰ 程度となることが知られている (Walter et al., 2008³⁹)。地下水に含まれる CH₄ は土壌 (活動層) における微生物活動由来の成分が保存されたものと考えられるので、氷コア中 CH₄ の δ¹³C と CO₂ の δ¹³C との関係は、アイスウェッジが成長していた当時の土壌において、フォックス (Fox) およびイトキリック (Itkillik) では二酸化炭素還元が、MP355、バロー、UAF、テラー (Teller)、クーガロク (Kougarok) においては有機酸発酵が、それぞれ優勢な CH₄ 生成経路であったことを示唆している (図 4-4-26)。前者は寒冷期の水、後者は温暖期の水と考えられるので、CH₄ の生成過程が気候変動にともない変化していた可能性がある (図 4-4-26)。

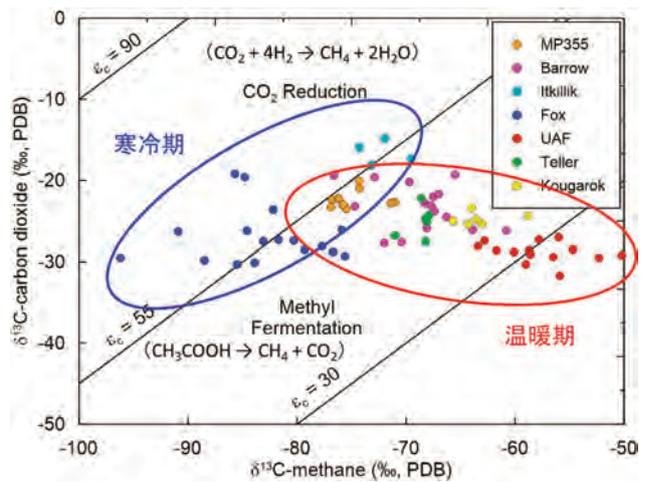


図 4-4-26. 永久凍土地下水 CH₄ の δ¹³C と CO₂ の δ¹³C との関係

<東シベリアにおける温室効果気体収支の観測>

○背景と目的

高緯度の陸域生態系では温室効果気体収支の観測データが乏しく、特に、東シベリアにおいて観測データが不足している。東シベリアはツンドラとタイガ (北方林) に覆われるが、それらは永久凍土上に成立しているため、近年の温暖化と水循環変化によって温室効果気体の収支が大きく変化する可能性がある。このような背景から、本研究では、東シベリアのカラマツ林を対象に、この地域の CH₄ 収支の観測データを世界ではじめて取得するとともに、CO₂ 収支の季節変化とその年々変動特性を長期観測データから明らかにすることを目的とした。

○東シベリアのカラマツ林における CH₄ 収支解析

永久凍土が広く分布するロシア・東シベリアのレナ川中流域のスパスカヤパッド研究林において、この地域の代表的な森林植生であるカラマツ林の群落スケール (数十 m ~ 数 km 四方の範囲) の CH₄ フラックスを定量的に評価した。特に、測定機器の検出精度に関わる誤差解析や、測定機器に依存したフラックスの算出や補正を施し、観測データの品質管理を検討して信頼性の高い CH₄ フラックスを得た。もっとも生物活動が活発である 6 月の解析を行った結果、スパスカヤパッド研究林の群落スケールでの CH₄ フラックスは、日中に放出、夜間に若干吸収という結果となり、日平均では放出 (5.1 ~ 17.2 nmol m⁻² s⁻¹) という結果を得た (Nakai et al., 2020)。

CH₄ フラックスが日変化する原因として、夜間 (大気が安定成層化している時間帯) に林床やスパスカヤパッド研究林の周囲に存在する湿地から放出された CH₄ が樹冠下に貯留され、日中 (大気が不安定となり鉛直混合が活発となる時間帯) にそれらが上空に輸送されること、あるいは、この地域の大気境界層^{*11}の日変化にともなって CH₄ 濃度が日中に低濃度となり、濃度が高い地表から濃度の低い上空に CH₄ が輸送されること、が考えられた。

スパスカヤパッド研究林の林床で過去に行われたチャンパー法^{*12}による CH₄ フラックスを報告した論文 (van Huissteden

et al., 2008⁴⁰⁾) によれば、林床への CH₄ 吸収と林床からの CH₄ 放出の双方が報告されている。これらは局所的な土壌水分条件を反映しており、空間代表性の点で疑問が残る。したがって、本プロジェクトによって空間代表性の高い群落スケールの CH₄ フラックスが定量できたことは、特筆すべきことである (図 4-4-27)。

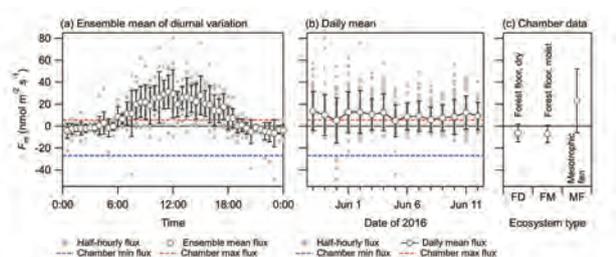


図 4-4-27. 東シベリアのカラマツ林における CH₄ フラックス。(a) カラマツ樹冠上の CH₄ フラックスの日変化。(b) 2016 年 5 月 29 日～6 月 12 日までの、カラマツ樹冠上の CH₄ フラックスの時間変化。(c) カラマツ林床面における CH₄ フラックス (van Huissteden et al., 2008⁴⁰⁾)。

○東シベリアのカラマツ林における CO₂ 収支解析

スパスカヤパッド研究林より約 300km 南東に位置するエルゲイ研究林のカラマツ林樹冠上で得られたフラックス観測データを用いて、この地域のカラマツ林の CO₂ 収支の長期的な変動特性を解析し、スパスカヤパッド研究林の結果と比較した。その結果、2010～2018 年の暖候期 (5～9 月) における正味の CO₂ 吸収量 (純生態系生産量: NEP)^{※13} の年々変動幅は、スパスカヤパッドで 30g C m⁻² 程度、エルゲイで 60g C m⁻² 程度であり、他の北方林における観測結果に比べて小さかった。NEP の月積算値の年々変動をみると、両研究林とも NEP が最大となる 6 月よりも 7 月や 8 月の年々変動が大きく、この時期の NEP の年々変動が、暖候期全体の NEP の年々変動を決めていた。

NEP が最大となる 6 月は土壌水分が多く、NEP から推定した総一次生産量 (GPP: Gross Primary Production)^{※14} と生態系呼吸量 (RE: Ecosystem Respiration)^{※15} に対する水文気象環境の影響が小さかった。このことによって、暖候期における NEP の年々変動は他の時期と比較して小さく抑えられた。一方、6 月とは対照的に、GPP と RE が最大となる 7 月以降は、すべての CO₂ フラックス (GPP、RE、NEP) の年々変動が大きかった。この傾向は、この時期の土壌水分量の年々変動が大きいスパスカヤパッドで (エルゲイよりも) 顕著であった。一方、絶対値の小さい 5 月と 9 月の GPP と RE には、6～8 月に匹敵する年々変動がみられた。

両研究林の CO₂ 吸収期間の開始 / 終了のタイミングと、凍土の季節融解やカラマツ林のフェノロジー^{※16} との対応関係を比較した。春季には林内消雪 (4 月下旬～5 月上旬) に続いて、凍土表層 (0～10cm) の融解 (5 月上旬)、カラマツの展葉および GPP の増加開始 (5 月上旬・中旬)、生態系全体の正味の CO₂ 吸収の開始 (5 月中旬) となった。スパスカヤパッドの 1998 年以降の記録によると、消雪とカラマツ展葉時期はそれぞれ 10 年

あたり約 6 日と約 9 日早くなり、4～5 月気温の上昇と対応していた。しかし、凍土表層の融解時期や CO₂ 吸収開始時期には有意な変化傾向はみられなかった。この原因として、スパスカヤパッドで 2005～2008 年に生じた湿潤化による土壌環境への影響が考えられた。秋季には正味で放出開始 (9 月上旬・中旬) の後、カラマツの落葉 (9 月上旬～下旬) と続くが、これらには長期的な変化傾向はみられなかった。フェノロジーの年々変動については、エルゲイの方がスパスカヤパッドよりも秋季の季節推移が遅く、9 月積算で NEP > 0 (生態系全体での正味の CO₂ 吸収) となる年があった。以上のように、春季と秋季の CO₂ 収支は NEP と吸収期間の長さを左右するため重要であるが、他の北方林で指摘されるような吸収期間の長期化は、東シベリアのカラマツ林では確認できなかった。

最後に、スパスカヤパッド研究林における活動層と群落植生構成の変化から、CO₂ フラックスの 2000 年代の年々変動を明らかにした。その結果、湿潤化の影響を受けたことによるカラマツの機能低下を下層植生が補い、CO₂ 吸収量が維持されたことが明らかになった (Kotani et al., 2019)。

<陸域モデル検証>

○背景と目的

永久凍土を含む北極陸域表面からの温室効果気体収支は、地表面の植生や温度・水文条件に大きく条件付けされる。温室効果気体収支の現状推定や将来予測を行うためにモデル化は必須となるが、その性能を評価・検証するための観測 (実測値データの収集や、データセットの構築) も重要である。アラスカ内陸部にある北方林環境の調査地である PFRR (UAF の地球物理学研究所が管理) において、本プロジェクト期間中の植生状況・フェノロジーや凍土環境を連続的に監視し、データセット化した。

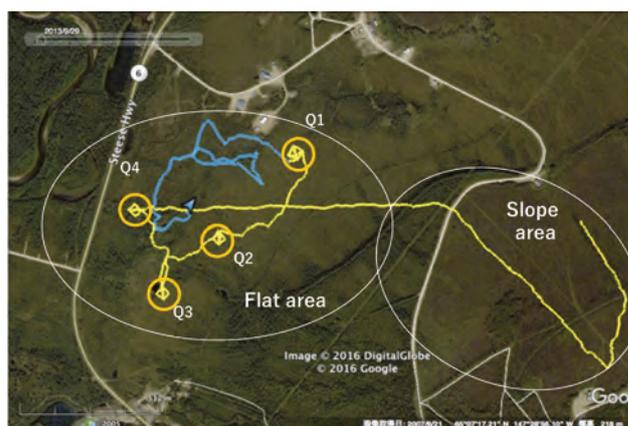


図 4-4-28. PFRR に展開した光ファイバー (温度センサー)。青が 2.7km のループ 1、黄色が 5.5km のループ 2。

○光ファイバー DTS を用いた 3 次元高解像度熱的状況把握

寒冷陸域において、温室効果気体 (CO₂ や CH₄) の生成・放出に深く関連する地中での微生物活動や地上での植生のフェノロジーは、地下環境 (特に、表層の季節的凍結融解層-活動層-) の伸張やそこでの温度・水状況) が大きく影

響する。光ファイバーを温度センサーとして活用し高解像度(50cmごと、30分おき)で温度分布を把握することのできるDistributed Temperature Sensing (DTS) システム(Dakin et al., 1985⁴¹⁾)を北方林環境のPFRRに設置し(図4-4-28)、地表面や地中温度の日内および季節的変動、大気状況(例えば、雲被覆状況)との関連、また積雪・融雪状況の時空間変動特性を陸面環境(植生被覆度や森林構成など)によって特徴付けた(Saito et al., 2018b、図4-4-28の青線)。また、ループ2(図4-4-28の黄線)では、トウヒ林(Q1:疎、Q2:密)、Q3:開地、Q4:針広混交林の4ヵ所において各辺30mの矩形領域を設定して、異なる陸面環境下での地表面および20m深の時空間変動を抽出するとともに、2017年度には永久凍土層の熱状況把握のために深層ボアホール(約4m深、4ヵ所)と、2019年度には活動層内の熱・水環境変動のより詳細な把握のために浅層ピット(約1.0m深、4ヵ所)を併置して行った(図4-4-29)。これらのデータを、底部平地と丘陵傾斜地に張った光ファイバーによる大気下部境界層とも連動する地表面温度測定データと合わせて、北方林における3次元熱的状況およびその変動把握のための温度・土壌水分データセットとして構築した。

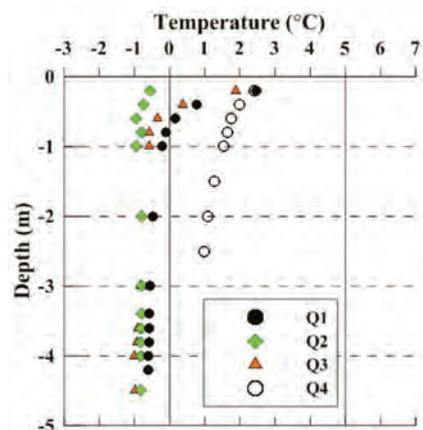


図4-4-29. 各矩形領域Q1～Q4における深層ボアホールの年平均地温プロファイル

○植生の生長期間の時空間分布の変動

植生の生長期間、すなわち、機能的な開葉と落葉の期日の時空間分布の変動は、生態系の光合成機能や蒸発散機能に影響をおよぼし、その結果、温室効果気体や水の収支が変化する。林冠が開いているクロトウヒ林(PFRR)において、タイムラプスカメラにより群落全体と林床植生の様子を毎日撮影し、他の観測サイトとあわせてデータ論文として公開した(図4-4-30、Nagai et al., 2018a^{※17)}。

これらの画像を用いて、林床植生の開葉や落葉の期日を日平均気温の変化より推定可能とする統計的なモデルを構築し、衛星観測された植生指数の解析により検出した開葉や落葉の期日の地上検証を行った。その結果、リモートセンシングによる植物季節観測に関する不確実性や生態学的な解釈についての理解が深まり、環北極域を対象とした開葉と落葉の期日の時空間分布の変動の評価が高精度化された(図4-4-31、Nagai et al., 2020)。

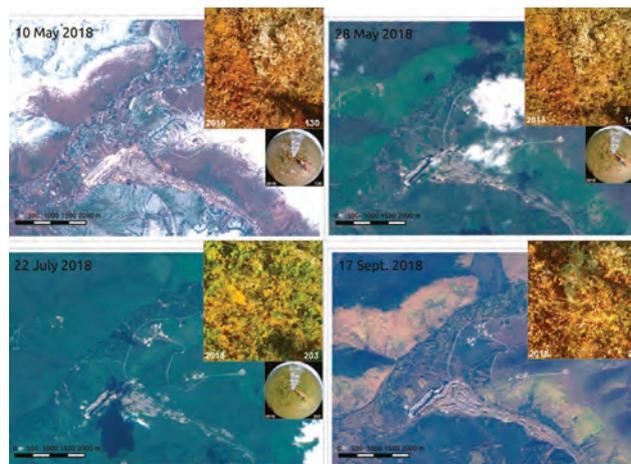


図4-4-30. 2018年5月10日(左上)、5月28日(右上)、7月22日(左下)、9月17日(右下)に、10mの空間分解能を持つ Sentinel-2 衛星により観測された PFRR 周辺の RGB 画像と、現地で撮影された植物季節画像。林床の開葉や紅葉などの植物季節を捉えていることがわかる。

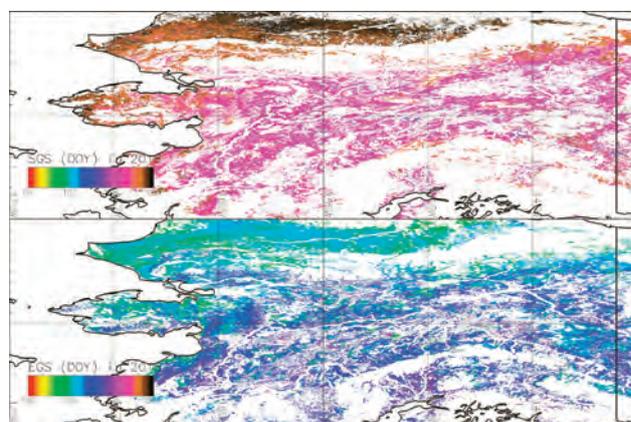


図4-4-31. 500mの空間分解能を持つ Terra と Aqua 衛星に搭載された MODIS センサーにより観測された植生指数 GRVI の解析により検出した、アラスカにおける 2018 年の機能的な開葉(上図)と落葉の期日の空間分布(下図)。

<アラスカ内陸における温室効果気体収支等の観測>

○背景と目的

PFRR のフラックス観測スーパーサイト(PFRR スーパーサイト)では、UAF の協力のもと、高さ 17m のフラックス観測タワーなどを用いて 2010 年以降気象観測、温室効果気体フラックス観測、生物季節観測などを継続的に実施している。本観測サイトで得られた観測データは FLUXNET および Ameriflux にも提供され、陸域モデルや気候変動観測衛星「しきさい」の検証などさまざまな用途に利用されている。この長期間の観測データをもとに、近年の温暖化と陸域生態系の間の応答などに関する変動特性の評価を試みた。

○分光反射率と CO₂ フラックス (NEE) の関係に関する解析

春の展葉や秋の落葉など、フェノロジーは陸域炭素循環や生物応答などの特徴を示す重要な情報である。一方で衛星データから観測される分光反射率データには、雲の影響や観測頻度が限られるなどの問題で、分光反射率の正確な季節変化のプロファイルを捉えることは難しい。このため、PFRR に設置した分光反射率の観測データを解析し、その季節変化の実態を捉える

とともに、渦相関観測による正味の CO₂ フラックス (純生態系交換量: NEE)^{※18} との関係解析した。

その結果、従来の衛星観測アルゴリズム (図 4-4-32 の赤丸) では、秋の植物の光合成終了時期 (NEE が吸収から放出に変わるタイミング、図 4-4-32 の緑丸) を実際よりも 1 ヶ月程度長く見積もってしまうことなどを示した (Kobayashi et al., 2018a)。

○温暖化・乾燥化と生態系呼吸量 (RE) の応答に関する解析

PFRR タワーで観測された夜間の CO₂ フラックスデータを用いて、夜間における土壌と植生の呼吸にともなう CO₂ 放出量 (RE) を推定した (Nagano et al., 2018)。従来の研究では、気温上昇にともなう RE も指数関数的に増加するとされてきた。しかし、アラスカ内陸部のクロトウヒ林では気温の上昇にともなう乾燥化の影響により、RE が大幅に減少することが示された。この結果は、特に乾燥化が顕著だった 2013 年 (図 4-4-33 の赤三角) に明瞭にみられ、気温上昇に対して RE が負のフィードバックとして作用することを示している。本研究は地球システムモデルにおける RE 計算の改善の必要性を示すものである。

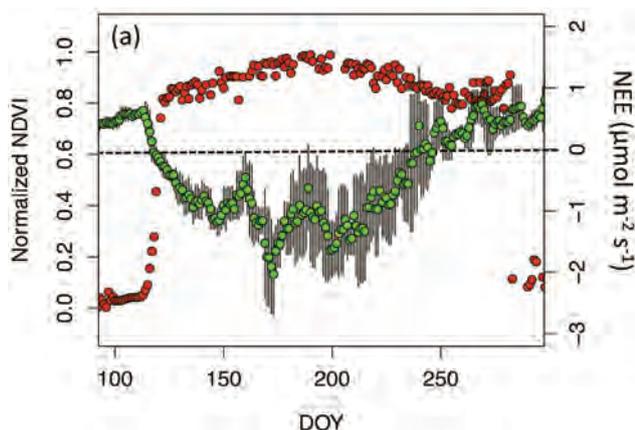


図 4-4-32. PFRR における NEE (緑丸) と衛星観測から推定された PFRR の近傍点における正規化植生指数 NDVI (赤丸) の季節変化 (Kobayashi et al., 2018a)。

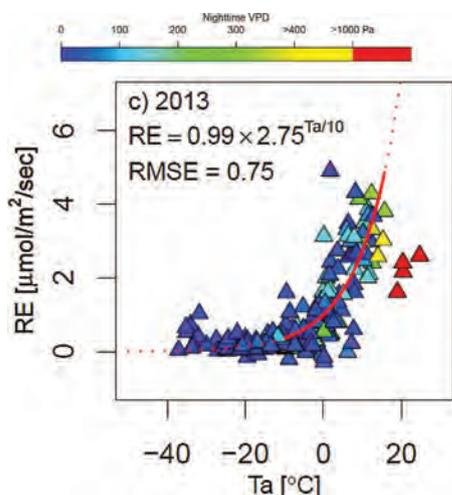


図 4-4-33. PFRR における夜間の生態系呼吸量 RE (縦軸) と気温 (横軸) の関係 (Nagano et al., 2018)。

注:

- ※1 大気中で観測される濃度を説明できる放出・吸収量を数値モデルにより求める方法。
- ※2 放出・吸収量を代表的な場所で観測し、その結果から広域の放出・吸収量を求める方法。
- ※3 大気中で氷晶が形成される際に、「核」として働く能力を持つエアロゾルのこと。一般的には、固体の微粒子であることが多い。氷晶核として働くエアロゾルが存在しない場合、雲の中での氷晶の形成は、温度が約 -36°C 以下にならないと活性化されない。
- ※4 氷河末端から流れ出す網状の流路を持つ水流により、氷河の前面に形成される扇状地状の堆積平野地形。植生がほとんどなく、氷河の浸食作用によって細粒化された微粒子を多く含んでいることから、北極圏から発生するダストの主な供給源になっているといわれている。
- ※5 煤粒子という場合には、一般に BC 以外のエアロゾル成分も内部混合した粒子全体を指している。
- ※6 ひとつの粒子中に複数のエアロゾル成分が共存している状態を内部混合という。別々の粒子として存在しながらも、同じ空気中共存している状態は外部混合という。
- ※7 エアロゾルなどを捕集しながら同時に、その場で測定する測定法。オンライン測定ともいう。実時間測定ではない測定手法としては、フィルター捕集後、実験室などで分析・定量する方法などがある。
- ※8 熱エネルギーや微量気体などの物質が流れる速さを、単位時間に単位面積を横切る流れとして表したものを。正しくはフラックス密度 (流束密度) だが、単にフラックス (流束) と呼ぶことが多い。
- ※9 EDGAR42FT., 2013. Global emissions EDGAR v4.2 FT2010, (Available at <http://edgar.jrc.ec.europa.eu-overview.php?v=42FT2010>).
- ※10 ある限られた (局所的な) 解に収束することを回避し、大域的な解の探索を行うことで、モデルパラメーターの最適値を導出する方法。
- ※11 地表面の凹凸により生じる摩擦、熱エネルギー (熱フラックス)、気圧傾度などにより空気の流れ方が影響を受ける大気層。日中は対流の影響が大きいため対流境界層 (あるいは混合層) と呼び、夜間は気温が上に向かうほど低くなるため安定境界層と呼ぶことがある。
- ※12 チャンバー (小さな箱) のなかの微量気体の濃度の変化量から、CH₄ などのガス交換速度を求める方法。チャンパー内に植物などの生物がない場合、底面からのガス放出量が推定できる。
- ※13 Net Ecosystem Production. 対象とする生態系が単位時間、単位面積あたりに正味に吸収する CO₂。
- ※14 Gross Primary Production. 対象とする生態系が単位時間、単位面積あたりに同化する CO₂。
- ※15 Ecosystem Respiration. 対象とする生態系が単位時間、単位面積あたりに放出する CO₂。
- ※16 展葉、黄葉、落葉といった植物群落の (主に葉の) 状態の季節変化。植物季節ともいう。
- ※17 Phenological Eyes Network (<http://www.pheno-eye.org/>)
- ※18 Net Ecosystem Exchange. 対象とする生態系と大気との間での、単位時間、単位面積あたりの CO₂ 交換量。NEE = -NEP。

引用文献:

- 1) AMAP, 2015a. AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. vii + 139 pp.
- 2) AMAP, 2015b. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. vii + 116 pp.
- 3) IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 4) Bond, T. C. et al., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118, 5380-5552. doi: 10.1002/jgrd.50171.
- 5) Bond, T. C. et al., 2006. Limitations in the enhancement of visible light absorption due to mixing state. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111. doi: 10.1029/2006JD007315.
- 6) Delene, D. J., Ogren, J. A., 2002. Variability of Aerosol Optical Properties at Four North American Surface Monitoring Sites. Journal of the Atmospheric Sciences, 59, 1135-1150. doi: 10.1175/1520-0469(2002)059<1135:VOAOPA>2.0.CO;2.
- 7) Sharma, S. et al., 2013. 16-year simulation of Arctic black carbon: Transport, source contribution, and sensitivity analysis on deposition. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118, 943-964. doi: 10.1029/2012JD017774.
- 8) Miyazaki, Y. et al., 2008. Performance of a newly designed continuous soot monitoring system (COSMOS). Journal of Environmental Monitoring, 10, 1195-1201. doi: 10.1039/B806957C.
- 9) Kondo, Y. et al., 2009. Stabilization of the Mass Absorption Cross

- Section of Black Carbon for Filter-Based Absorption Photometry by the use of a Heated Inlet. *Aerosol Science and Technology*, 43, 741-756. doi: 10.1080/02786820902889879.
- 10) Kondo, Y. et al., 2011. Consistency and Traceability of Black Carbon Measurements Made by Laser-Induced Incandescence, Thermal-Optical Transmittance, and Filter-Based Photo-Absorption Techniques. *Aerosol Science and Technology*, 45, 295-312. doi: 10.1080/02786826.2010.533215.
 - 11) Hirdman, D. et al., 2010. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 669-693. doi: 10.5194/acp-10-669-2010.
 - 12) Eleftheriadis, K. et al., 2009. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard from 1998–2007. *Geophysical Research Letters*, 36. doi: 10.1029/2008GL035741.
 - 13) Sharma, S. et al., 2004. Long-term trends of the black carbon concentrations in the Canadian Arctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109. doi: 10.1029/2003JD004331.
 - 14) Sharma, S. et al., 2006. Variations and sources of the equivalent black carbon in the high Arctic revealed by long-term observations at Alert and Barrow: 1989-2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111. doi: 10.1029/2005JD006581.
 - 15) Doherty, S. J. et al., 2010. Light-absorbing impurities in Arctic snow. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11647-11680. doi: 10.5194/acp-10-11647-2010.
 - 16) Schwarz, J. P. et al., 2012. Assessing Single Particle Soot Photometer and Integrating Sphere/Integrating Sandwich Spectrophotometer measurement techniques for quantifying black carbon concentration in snow. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 2581-2592. doi: 10.5194/amt-5-2581-2012.
 - 17) Kuchiki, K. et al., 2015. Elemental carbon, organic carbon, and dust concentrations in snow measured with thermal optical and gravimetric methods: Variations during the 2007–2013 winters at Sapporo, Japan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 868-882. doi: 10.1002/2014JD022144.
 - 18) Lee, Y. H., et al., 2013. Evaluation of preindustrial to present-day black carbon and its albedo forcing from Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 2607-2634. doi: 10.5194/acp-13-2607-2013.
 - 19) Eckhardt, S., et al., 2015. Current model capabilities for simulating black carbon and sulfate concentrations in the Arctic atmosphere: a multi-model evaluation using a comprehensive measurement data set. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 9413-9433. doi: 10.5194/acp-15-9413-2015.
 - 20) Oshima, N., Koike, M., 2013. Development of a parameterization of black carbon aging for use in general circulation models. *Geoscientific Model Development*, 6, 263-282. doi: 10.5194/gmd-6-263-2013.
 - 21) Curry, J. A., Ebert, E. E., 1992. Annual Cycle of Radiation Fluxes over the Arctic Ocean: Sensitivity to Cloud Optical Properties. *Journal of Climate*, 5, 1267-1280. doi: 10.1175/1520-0442(1992)005<1267:ACO RFO>2.0.CO;2.
 - 22) Graversen, R. G., Wang, M., 2009. Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo. *Climate Dynamics*, 33, 629-643. doi: 10.1007/s00382-009-0535-6.
 - 23) Wendisch, M. et al., 2019. The Arctic Cloud Puzzle: Using ALOUD/PASCAL Multiplatform Observations to Unravel the Role of Clouds and Aerosol Particles in Arctic Amplification. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, 841-871. doi: 10.1175/BAMS-D-18-0072.1.
 - 24) Coopman, Q. et al., 2016. Effects of long-range aerosol transport on the microphysical properties of low-level liquid clouds in the Arctic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 4661-4674. doi: 10.5194/acp-16-4661-2016.
 - 25) Garrett, T. J. et al., 2004. Effects of varying aerosol regimes on low-level Arctic stratus. *Geophysical Research Letters*, 31. doi: 10.1029/2004GL019928.
 - 26) Tietze, K. et al., 2011. Space-based evaluation of interactions between aerosols and low-level Arctic clouds during the Spring and Summer of 2008. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 3359-3373. doi: 10.5194/acp-11-3359-2011.
 - 27) Collins, M. et al., 2014. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility Pages 1029 to 1076, in: Intergovernmental Panel on Climate, *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1029-1136. ISBN: 9781107057999.
 - 28) Tans, P. P. et al., 1993. Oceanic ¹³C/¹²C observations: A new window on ocean CO₂ uptake. *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 353-368. doi: 10.1029/93GB00053.
 - 29) Keeling, R. F., Shertz, S. R., 1992. Seasonal and interannual variations in atmospheric oxygen and implications for the global carbon cycle. *Nature*, 358, 723-727. doi: 10.1038/358723a0.
 - 30) Morimoto, S. et al., 2001. Temporal variations of the atmospheric CO₂ concentration and carbon isotope ratio in Ny-Ålesund, Svalbard. *Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue*, 54, 71-79.
 - 31) Ishidoya, S. et al., 2012. Oceanic and terrestrial biospheric CO₂ uptake estimated from atmospheric potential oxygen observed at Ny-Ålesund, Svalbard, and Syowa, Antarctica. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 64, 18924. doi: 10.3402/tellusb.v64i0.18924.
 - 32) Zeng, et al., 2013. Linking carbon dioxide variability at Hateruma Station to East Asia emissions by Bayesian Inversion. *Lagrangian Modeling of the Atmosphere, Geophysical Monograph Series*, 163-172. doi:10.1029/2012GM001245.
 - 33) Niwa, Y. et al., 2017. A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO₂ inversion. *Geoscientific Model Development*, 10, 2201-2219. doi: 10.5194/gmd-10-2201-2017.
 - 34) Shakhova, N. et al., 2010. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 327, 1246. doi: 10.1126/science.1182221.
 - 35) Berchet, A. et al., 2016. Atmospheric constraints on the methane emissions from the East Siberian Shelf. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 4147-4157. doi: 10.5194/acp-16-4147-2016.
 - 36) Garcia, H. E., Keeling, R. F., 2001. On the global oxygen anomaly and air-sea flux. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106, 31155-31166. doi: 10.1029/1999JC000200.
 - 37) Ito, A., Inatomi, M., 2012. Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*. 2012. 9:759-73. doi: 10.5194/bg-9-759-2012.
 - 38) Iwata, H. et al., 2015. Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed using the eddy covariance technique. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215, 157-168. doi: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.252..
 - 39) Walter, K. M. et al., 2008. Methane production and bubble emissions from arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113. doi: 10.1029/2007JG000569.
 - 40) van Huissteden, J. et al., 2008. Summer soil CH₄ emission and uptake in taiga forest near Yakutsk, Eastern Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 2006-2012. doi: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.08.008.
 - 41) Dakin, J. P. et al., 1985. Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. *Electronics Letters*, 21, 569-570. doi: 10.1049/el:19850402.

4.5.1 全体概要

菊地 隆・木村 元

背景と目的、実施体制

北極海域は、予測を上回る急速な海水減少に示されるように、地球温暖化による環境変化がもっとも顕著に表れている地域のひとつとして認識されている。このような海水減少は、北極海の温暖化・淡水化・酸性化の進行と密接に関係しており、物質循環や海洋生態系にも影響がおよぶことがすでに観測事実からも明らかにされてきた。さらには海水減少とそれともなう北極海域での大気 - 海水 - 海洋相互作用の変化は、北極域のみならず中・低緯度を含めて全球規模の気候変動や水循環にも影響を与えている。このように急速に進行する北極海的环境変化について、その実態（現状と要因）を明らかにし、影響を評価することは、北極に直接関わる人のみならず、広く地球環境全体の問題として捉えられるようになっており、喫緊の課題といえる。

本テーマでは、上記のような背景から、「北極域における海洋環境変動の実態の理解と、その低次生態系や気候学的な影響の評価」を大目的として、研究活動を進めてきた。この目的達成のために、1) 海水減少ともなう北極海洋環境の変化と水循環・気候変動との関係の理解、2) 温暖化・酸性化によるプランクトンへの影響評価、3) 北極海淡水収支の季節・経年変動の理解、4) アラスカ沿岸における海水動態変動の理解、という目標を立てた4つの研究グループにわかれて活動し、それぞれの研究グループが連携しながら研究成果を発表してきた。

それぞれの研究目的を達成するための方策としては、A) 海洋地球研究船「みらい」や砕氷船を利用した国際連携における太平洋側北極海での現場観測、B) 海洋環境変化のカギとなる海域で通年観測データを取得するための係留系時系列観測、C) 海洋環境変化の影響を評価するための現場および室内実験、D) 現状の詳細分析や想定される将来環境に対する評価のための数値実験など、多様な手法を駆使して研究を進めてきた。

特に「みらい」については、本プロジェクトのなかで2016年と2017年に本テーマが中心となる航海を実施した(MR16-06、MR17-05C)。図4-5-1にそれぞれの観測年の航海軌跡を示す。海水が存在しない海域において、CTD/採水観測や試料採取、係留系回収設置作業などを行うことができた。また「みらい」で観測を行うことができない時期や海域(海水域)などにおいては、カナダ・米国・韓国などの砕氷船航海に参加して、現場観測データの取得や、分析や実験のための試料採取を行うことができた。このような研究活動を実施するためには国際共同・連携は必要不可欠である。これについては、PAGなど国

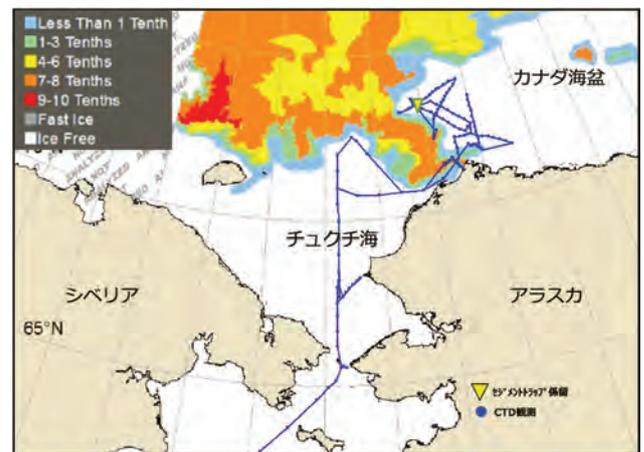
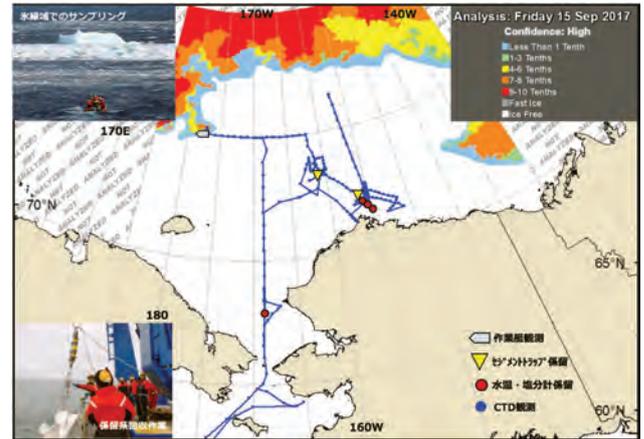


図4-5-1. 海洋地球研究船「みらい」による北極航海の航跡図。
(上) 2016年の航跡および2016年9月18日の海水氷集中度分布図。
(下) 2017年の航跡および2017年9月17日の海水氷集中度分布図。

際的な枠組みによる共同・連携研究を推進することで実施できた。上記の国に加えて、ノルウェー・ドイツ・ロシアなどもデータ共有・共同解析・実験を行うことができた。このような共同・連携研究により、他国の研究者を含めた国際的な共同研究成果を公表できたことは、本テーマの大きなポイントといえる。

またテーマ間連携からも多くの研究成果を発信することができた。特に、「みらい」での観測をとおしたテーマ1・3・6との共同・連携により、急速に進行する北極海的环境変化を海洋物理から生物地球化学にかけてカバーする本テーマの研究内容に、気象・大気化学・海洋生態系などの広がりを持たせることができた。

それぞれの研究成果については、4つの研究グループ別に次項以降で紹介する。本プロジェクトでは、単に研究成果を論文として公表するだけでなく、人文社会科学系と自然科学系の研究分野が連携を深めた成果の創出、そして社会への発信が強く求められていた。本テーマでも積極的にアウトリーチ活動を行い、社会への成果発信に努めてきた。またテーマ6やテーマ7と連携しながら、下記の活動を進め、従来の自然科学研究だけではない成果をあげたことをここに特記する。

北極政策に資する科学の抽出方法の確立

近年、国際的な北極政策を協議する場では、北極観測の統合と強化およびデータ共有をとおした社会への成果還元が求められている。本テーマでは、このような観点からテーマ7と連携



図 4-5-2. (左) 北極学習ツール (ボードゲーム『The Arctic』)。 (右) 2019年8月8日に日本科学未来館で行った体験会の様子。

して、北極海の環境変化に対する研究成果が、社会にどのように貢献しているのかを説明し、政策との関連で研究の価値付けを行う手法の開発に着手した。特に、SAONによる報告書(IDA STPI and SAON, 2017¹⁾)を参照し、そこで用いられている意思決定のメソッドロジーであるところの Value Tree Analysis (VTA) を日本の北極政策と北極観測に応用することで、日本の北極科学活動がどのような政策目的に関連しているのかを可視化することを試みた。2018年度には、VTAの専門家を米国の科学技術と政策の研究所から招聘してワークショップを開催することができた。

日本科学未来館と連携したアウトリーチ活動と北極学習ツール (ボードゲーム『The Arctic』) の製作

幅広い分野の北極研究から得られた成果を広く社会に発信すべく、日本科学未来館の協力を得て、2018年1月8日に、本テーマ、テーマ6、テーマ7が共同で展示およびトークセッション「どうなる?北極～海と生き物と私たち～」を実施した。これをきっかけとして、本プロジェクト全体のイベントとしてもトークセッションが企画されることにつながった。

このような日本科学未来館との連携をふまえて、自然科学分野だけでなく、北極域の文化や国際制度も視野に入れ、北極の「今」を知り、持続可能な北極の「将来」について考えるための学習ツール (ボードゲーム『The Arctic』) を開発・製作した。

この学習ツールは、参加者が海洋学者・文化人類学者・漁業者・開発業者・先住民・外交官などの北極のステークホルダーになり、海氷が減少していく北極を舞台にロールプレイングを行うボードゲームである。それぞれの立場で北極に起きる環境変化や人間生活への影響を考え、判断することで、海氷減少が進む北極の環境変化や文化、経済への影響について議論理解を進められるものとなっている。

2019年8月8日に日本科学未来館で開催された、お披露目を兼ねた体験会 (図 4-5-2) では、メディアを含む多くの参加者に学習ツールを体験してもらうことができた。ゲームを楽しみながら、北極のことを理解するよい機会になったとの感想を得ることができた。その後も、「全国豊かな海づくり大会」(2019年9月、秋田) や国立極地研究所・JAMSTEC などでの各種イベント等で体

験会を開いている。また、2019年10月11日にはアイスランド主催の国際会議 Arctic Circle においてブレイクアウトセッション「A NEW BOARDGAME FOR A CHANGING ARCTIC」を立ててこの取り組みを紹介するとともに、参加した研究者らにも学習ツールを体験してもらった。2020年1月には英語版も製作した。同月にノルウェーで開催される Arctic Frontiers 2020 など、今後の国際会議などでも紹介する予定である。

4.5.2 海氷減少にともなう北極海洋環境の変化と水循環・気候変動との関係の理解

西野 茂人・渡邊 英嗣

目的

1998年に「みらい」による北極海での観測が始まって20年以上経過した。その間に北極域で見られる風景は確実に変化している。なかでも気温上昇と海氷減少が変化の象徴である。ある夏に観測船に乗り込むために訪れた北極海沿岸の村では、子供たちが海水浴を楽しんでいた。北極海での海水浴など想像すらしていなかったが、暖かい日が増え、おそらく海水浴を楽しむ機会も増えたため、とおりの我々の目にも飛び込んできたのだろう。温暖化は子供たちにとって楽しい機会を増やしてくれるのかもしれない。しかし、凍った河川を道路として使用する期間が短縮されたり、永久凍土が融解して家屋の倒壊を招いたり、地域住民の生活に被害をおよぼしている現実もある。一方、海氷減少は、我々にとっては、砕氷能力を持たない船を利用した観測海域の拡大につながる。だが、いままで海氷の張り詰めた静かな海であった北極海が、海氷がなくなることで強風の影響を直に受けて荒れ狂い、観測できないこともある。嵐の下の北極海では、いままでにない変化が起きているのかもしれない。ここでは、本プロジェクトの研究により明らかにされつつある「変わりゆく北極域の姿」と、その環境や生態系におよぼす影響について、いくつかのトピックスを紹介する。

北極域の気温上昇と水循環の変化

北極域の河川では、秋に表面が凍って薄い氷板を形成（結氷）し、冬にはその河川氷が鉛直方向に厚く成長する。そして、春になると融解するという季節変化を繰り返している。結氷期間は河川氷上が冬道路として利用される一方、雪解け時にはアイスジャムによる洪水を引き起こすことがあり、地域住民の生活に被害をおよぼすことから、その変動をいち早く捉えることが求められている（Prowse et al., 2011²⁾）。しかしながら、極寒環境下での河川氷の観測はアクセスの難しさ等から主要河川に限られるため、これまでの研究では北極の広域での河川氷の状況を把握することが困難であった。

そこで、Park et al. (2016b) は、河川氷の計算を組み込んだ新たな陸面過程モデルにより、北極域の河川氷の変化を広範囲かつ定量的に評価した。その結果、北極河川の最大氷厚は1979～2009年までの過去31年間で8cm薄くなっていたことを示す計算結果が得られた（図4-5-3）。この原因について、河川氷厚の変動には河川氷上の積雪による断熱効果が気温より強く影響すること、さらにその影響は他の地域よりも積雪変化の大きなシベリアで明確に現れることがはじめて明らかになった。一方、河川の結氷期間については、過去31年間で9日間短縮する結果が得られ、その主要因子は積雪より気温が強く影響していることも感度実験から明らかになった。

これらの結果は、気温上昇に加えて積雪の断熱効果が加わることで北極域の河川氷はさらに薄くなっており、積雪の変化によって河川氷厚の長期的な変化と地域的な違いが生じること、一方で河川氷の「結氷期間」には積雪よりもむしろ気温が主要影響因子となること等、河川氷がそれぞれの影響因子に対して複雑な応答を示すことを表している。

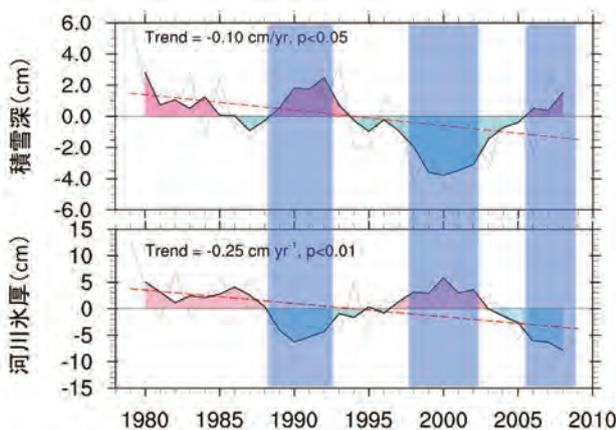


図4-5-3. 陸面過程モデルにより計算された冬季（1～3月）の平均積雪深（上）、および最大の河川氷厚（下）の経年変化。それぞれの時系列は1979～2009年の平均に対して各年の値の偏差で表している。河川氷厚の減少（増加）は、1990年前後と2000年前後の積雪の増加（減少）とよく対応しており、積雪が氷厚の経年変化に影響を与えたことを示唆している。

また、Park et al. (2017) は、気温上昇および河川流出量の増加などの変化が顕著である北極域の河川における水温の変化を計算するモデルを開発し、環北極の河川に適用して1979～2013年の間における河川水温の変化を評価した。気温上昇の影響を受け、全河川の水温が上昇傾向を示した。特に、西シベリアの河川においてその上昇が顕著であった。流量の増加は

熱容量を増加させ、水温の上昇を低下させる役割をしていたが、水温は気温の影響を強く受けていたことがモデルの感度実験によって明らかになった。水温上昇は北極海に流入する熱エネルギーの増加を意味し、海水減少への影響が考えられる。

北極域の大気水循環特性については、南極域と合わせてOshima and Yamazaki (2017) によりレビューがなされ、過去40年間の長期傾向が議論された。それによると、両極域へ運ばれる水蒸気輸送には明確な長期傾向はみられなかったが、一方で北極の水蒸気量は気温上昇にともなって増加傾向にあった。南極の水蒸気量はなだらかに減少する傾向にあり、夏の南極振動と秋のアムンゼン海低気圧が影響をおよぼしていることが示された。また両極では相対湿度に低下傾向がみられた。

北極海の海水減少と海洋環境の変化

近年の北極海の海水減少にともなって、海洋の温暖化（Shimada et al., 2006³⁾）や淡水化（Proshutinsky et al., 2009⁴⁾）、貧栄養化（Nishino et al., 2011⁵⁾）、酸性化（Yamamoto-Kawai et al., 2009⁶⁾）などが進行していることが明らかになってきた。しかし、そのような海洋環境の変化は、時空間的に一様に起こっているわけではなく、どこで変化が生じ、どのように伝わっていくのかといったことや、その変化の季節性、経年変動などについてはまだ十分にわかっていない。本プロジェクトでは、船舶観測、係留系観測、衛星観測、そして数値モデルの結果などを総合的に解析し、その理解を着実に推し進めた。

Tsukada et al. (2018) は、チュクチ海の1999～2015年までの夏季太陽放射加熱量について、衛星観測データ、「みらい」や係留系による現場観測データ、および再解析データを用いて調査した。その結果、チュクチ海の夏季太陽放射加熱量は年々変動が大きいものの、ベーリング海峡からチュクチ海に入る熱流入量の2倍近くに相当することがわかった（図4-5-4）。ベーリング海峡から流入してきた暖水がチュクチ海で夏季の太陽放射加熱によりさらに暖められることになる。また、この水塊変質がチュクチ海の北に広がるカナダ海盆への熱輸送に重要であることを示した。

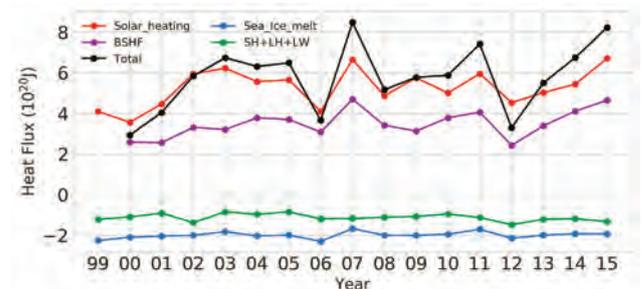


図4-5-4. チュクチ海における熱フラックスの1999～2015年までの時系列。赤が夏季太陽放射加熱量、紫がベーリング海峡からの熱流入量を表す。

ベーリング海峡からの流入水の異常な高温アノマリーが2016～2017年の冬にチュクチ海陸棚斜面の係留観測によって捉えられた（図4-5-5、Kimura et al., 2019a）。詳しく解析したところ、この高温アノマリーは、バロー海底谷に設置した係留系にもみられた。また、2016～2017年の冬はチュクチ海で南風が卓越し

ており、チュクチ海南部の水温も高かったため、この高温水がバロー海底谷をとってチュクチ海陸棚斜面に到達したものと考えられる。

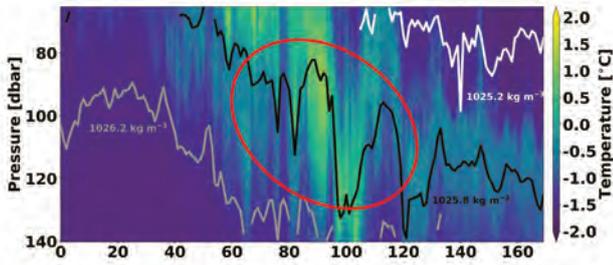


図 4-5-5. チュクチ海陸棚斜面に設置した係留系により得られた水温の 2016 年 9 月～2017 年 3 月の時系列。縦軸は水深を圧力 (dbar) で表している。図中の赤丸の部分が冬季にみられた異常な高温アノマリーを示す。

チュクチ海陸棚斜面からチュクチ海台周辺域にかけての冬季海水下の亜表層暖水輸送プロセスについては、Watanabe et al. (2017) が数値モデルを用いて解析を行った (図 4-5-6)。北極海全域を対象とした水平解像度 5km の海水 - 海洋結合モデル CCSR Ocean Component Model (COCO) で 2001～2014 年の年々変動実験を行い、複数の係留系から得られた水温変動を整合的に再現した。本研究によって、チュクチ海台周辺域における亜表層の昇温シグナルは、バロー海底谷からの熱流入、チュクチ海陸棚縁に沿った西向きジェット、海水融解水による成層強化の組み合わせによって大きく年々変動していることが示唆された。

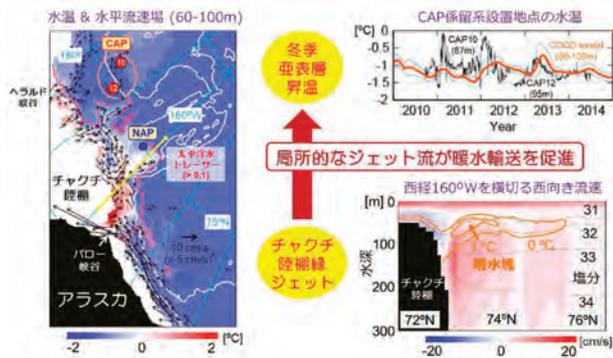


図 4-5-6. チュクチ陸棚縁ジェットと冬季亜表層昇温に関するモデル結果

また、北極海での海水消失により、海洋が直接風応力の影響を受けるようになり、海洋の混合が強化されることが考えられる (Rainville et al., 2011⁷⁾)。Kawaguchi et al. (2016a) は、海水が消失したカナダ海盆において、風のエネルギーがどのように海洋内部に伝えられるかを、「みらい」による 3 週間の定点観測で取得した気象・海洋観測データを用いて解析した。その結果、海水が消失した海域では、強風イベントに反応して表層で乱流混合が大きくなるのに加えて、風により励起された内部波が海洋の高気圧性の渦に捕捉されて渦の下部まで伝播し、そこで砕波することを観測からはじめて明らかにした (図 4-5-7)。海水がなくなった北極海において、大気から海洋へのエネルギー

のとおり道と、その砕波 (そしてこれにともなう水塊混合や熱・塩輸送) を明確に示したはじめての成果といえる。

海水分布の季節変化と海洋内部波の応答については、カナダ海盆ノースウィンド深海平原 (NAP: Northwind Abyssal Plain) に設置された係留系の水厚計と流速計のデータを用いて調べられた (Kawaguchi et al., 2019)。その結果、海洋内部波に起因する乱流混合は、海水に覆われた冬季は小さく、海水漂流速度が速くなる海水融解期 (初夏) と海水生成期 (晩秋) に大きくなることがわかった。すなわち、海水が動きやすくなることで、風のエネルギーが海水を通じて海洋に伝えられ、それによって励起された内部波が海洋の乱流混合を増大させていることが明らかになった。

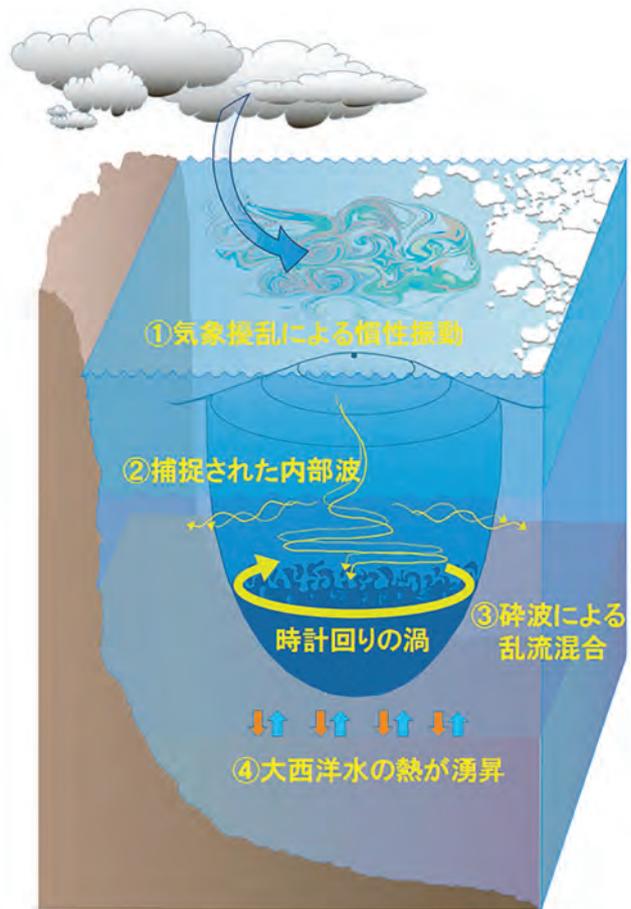


図 4-5-7. 渦に捕捉される内部波とその砕波過程についての模式図。太い黄色の矢印は渦の回転方向を、細い黄色線は波のエネルギーの伝播経路を示している。海水が後退することで風のエネルギーが海面から海洋に入りやすくなり、渦内部をとおり下層に伝播する。渦の基底部に到達した時点で、波は流れの不安定を起こして崩壊し、周囲の水をかき混ぜながら海の泡として消える (砕波)。

北極海の海水減少と物質循環の変化

○北極海の CO₂ 吸収量の定量化

これまで、北極海および周辺海域では船舶観測データが時空間的に不均質かつ乏しいことから、大気 - 海洋間 CO₂ 交換量の空間分布や季節・経年変化について定量化が十分になされていなかった。そこで、Yasunaka et al. (2016, 2018) は、自己組織化マップを用いた推定手法により、衛星観測などによりデー

タが得られている水温、クロロフィル *a* 濃度、海水密接度、塩分、大気 CO_2 濃度から、北緯 60 度以北の海域について 216 ヶ月分 (1997 年 1 月～2014 年 12 月の 18 年間) の大気 - 海洋間 CO_2 交換量のマッピングを行い、北極海およびその周辺海域において、いつどこでのくらの CO_2 が吸収されているのかを定量化した (図 4-5-8)。

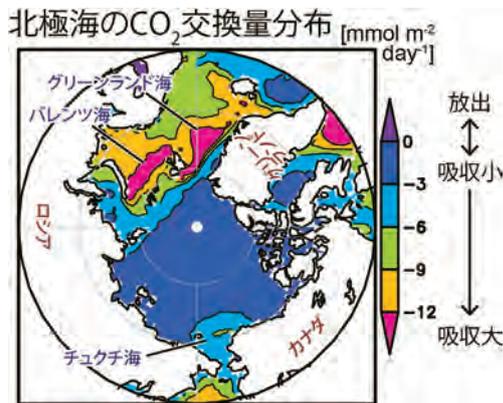


図 4-5-8. 北極海の CO_2 交換量。 CO_2 吸収量は、グリーンランド海、バレンツ海、チュクチ海で大きい。これらの海域は風が強く海水が少ないために、吸収が大きくなったと考えられる。

CO_2 交換量のマッピングの結果、北極海全体では 1 年あたり $180 \pm 130 \text{TgC}$ の CO_2 を吸収していると推定される。これは、海洋全体で毎年吸収していると推定されている CO_2 の約 10% に相当する。北極海の面積は全海洋の 3% であるにも関わらず、約 10% もの CO_2 を吸収しているということは、北極海が重要な吸収域であることを意味している。一方、北極海全体の CO_2 吸収量の長期変化傾向は、吸収量が増加している海域と減少している海域があるために、ほぼゼロになっていることもわかった。例えば、海水の減少が顕著なグリーンランド海やバレンツ海北部では CO_2 吸収量が増加している。これに対して、チュクチ海やバレンツ海南部では CO_2 吸収量が減少している。これは、水温上昇にともなう CO_2 吸収能の低下のためと考えられる。

CO_2 の吸収は海洋酸性化に直結する要因であるため、本研究の成果は、特に海洋酸性化の影響が深刻である北極海における海洋酸性化の実態把握につながるものである。

○北極海の窒素循環と海水減少に対する応答

北極海を含む海洋の基礎生産 (植物プランクトンの生産) において窒素は必須の元素であり、窒素循環は海洋生態系にとって重要な役割を担っている。窒素固定は窒素分子 (N_2) を還元してアンモニアを生成するプロセスで、海洋における窒素供給源のひとつであるが、窒素固定生物が生息できるのは窒素栄養塩が乏しい海域に限られるとこれまで考えられてきた。窒素固定生物としてよく知られているシアノバクテリアは温度依存性があり、1 年中温暖な熱帯・亜熱帯海域のみに生息する。このため、海洋での窒素固定の研究は主に熱帯・亜熱帯貧栄養海域で行われてきた (例えば、Moisaner et al., 2010⁸⁾)。

北極海は水温が低いものの、貧栄養となる海域が存在するた

め、窒素固定が重要な窒素源となっている可能性があることから、Shiozaki et al. (2018) は北極海の太平洋側に位置するチュクチ海からカナダ海盆を対象として窒素固定に関する調査を「みらい」を用いて行った。その結果、北極海では広く窒素固定が行われ、貧栄養水塊では重要な窒素供給源となっていることがわかった。カナダ海盆域では、近年の海水融解によって貧栄養化が進行しているが、そのような海域では今後、窒素固定が基礎生産の要となる可能性がある。また、窒素固定は貧栄養海域だけではなく、窒素栄養塩が十分にある海域でも観測された。さらに、北極海に生息する窒素固定生物はシアノバクテリアとは異なり、嫌気性細菌が主体となることがわかった。このことは、北極海の窒素固定が光に依存せず、中深層や冬季の極夜の時期でも行われていることを示唆している。

海水中では、また、アンモニアが微生物の活動を介して亜硝酸や硝酸へと変換される硝化反応が起きている。この硝化反応はアンモニアの濃度や光量、pH によって制御されることが知られているが (例えば、Beman et al., 2011⁹⁾)、近年の北極海の海水融解の進行や海洋酸性化がいかに硝化反応速度に影響をおよぼすのか、その実態はまだ明らかではない。

そこで、Shiozaki et al. (2019) は硝化反応が光量と pH に対してどのように応答しているのかを調べるため、チュクチ海およびカナダ海盆で「みらい」による観測を実施した。その結果、硝化反応は pH よりも光量の影響を受けることがわかった。硝化は光量がある閾値を超えると顕著に抑制され、その閾値を超える光量が北極海陸棚域や海盆域の水深約 80m 以浅で観測された。海水融解にともない海中への光の透過が促進されると硝化反応が抑制され、アンモニアが硝酸に変換されにくくなるので、海中ではアンモニア態窒素栄養塩の相対量が増加すると考えられる (図 4-5-9)。この変化は、食物連鎖の底辺を支える低次生態系には非常に有利に働き、上位の高次生物の生産にも大きな影響をおよぼす可能性がある。

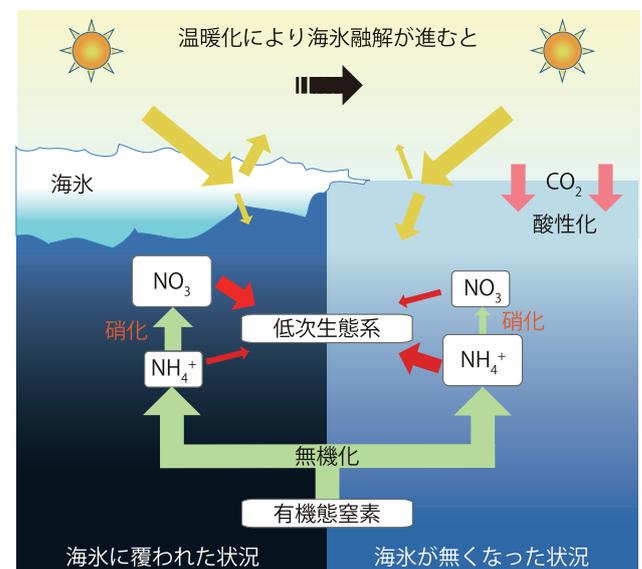


図 4-5-9. 海氷に覆われた場合と海氷がなくなった場合の無機態窒素の模式図

北極海の海氷減少と生態系の変化

○北極海太平洋側海域における生物学的ホットスポット

北極海のなかのチュクチ海南部は、世界でもっとも基礎生産力(植物プランクトンの生産力)が高い海域のひとつであり、生物学的ホットスポットとして知られている。しかし、この海域は冬季に海氷に覆われるため1年を通じて得られる観測データはなかった。

そこで、チュクチ海南部のホープ海底谷に世界ではじめて係留系を設置し、水温、塩分、溶存酸素、濁度、および動物・植物プランクトン量のデータを2年間にわたり取得した。さらに、係留系では取得できないパラメーターについては、「みらい」や「おしよる丸」による船舶観測で広域かつ高精度なデータを取得した。

係留系による時系列観測の結果、植物プランクトンは海氷融解期である春季に大增殖(ブルーム)がみられるだけでなく、秋季にもブルームが起きることがわかった(Nishino et al., 2016)。船舶観測の結果と合わせると、ホープ海底谷が有機物の貯蔵庫の役割を果たし、ここで有機物が分解されて生じる栄養塩が、秋季ブルームを引き起こしていることが明らかになった(図4-5-10)。また、ホープ海底谷での有機物の分解ではCO₂も生じるため、海底で海洋酸性化が進行することも突き止めた(Yamamoto-Kawai et al., 2016)。動物プランクトンの季節変化も係留系観測ではじめて明らかにされた(Kitamura et al., 2017)。動物プランクトン量は、春季ブルームの時期ではなく、秋季に最大になることが観測された。また、大型動物プランクトンは夏季の終わりから秋季にかけて、小型のものはそれ以外の時期に卓越することがわかった。大型動物プランクトンは海鳥や海生哺乳類の餌になるため、動物プランクトンの季節変化が海鳥の飛来や海生哺乳類の回遊とも関係すると考えられる。

海生哺乳類の捕獲は先住民の生活に欠かせないため、これら一連の研究は、海洋環境変動に関わる問題だけでなく社会的・経済的・政策的な側面にとっても重要であり、『我が国の北極政策』にも貢献するものである。



図4-5-10. チュクチ海ホープ海底谷での秋季ブルームの模式図。図中の○および⊗の記号は、それぞれ図の裏から表に向かう方向の流れ、および図の表から裏に向かう方向の流れを表す。ホープ海底谷では底層水がドーム状構造をしており、このため反時計回りの海洋循環がみられるとともに、海底近くで流れが集まってくると考えられる。この流れに乗って有機物を含むさまざまな粒子が流入・蓄積し、その有機物が分解されることにより植物プランクトンの増殖に必要な栄養塩(アンモニア等)が生成され、秋季のブルームを支えていると考えられる。

○海水消失域での秋季ブルーム

上述の秋季ブルームは下層からの栄養塩供給により引き起こされるため、近年の北極海の海水減少にともない、海水消失域での海洋混合の強化の結果(Kawaguchi et al., 2016a, 2019)、秋季ブルームの頻度や発生海域が増加すると考えられる(Ardyna et al., 2014¹⁰⁾)。しかし、我々の現場観測によっはじめてチュクチ海とカナダ海盆で海洋混合強化に対する秋季ブルームの応答が異なることが明らかになった(Fujiwara et al., 2018; Nishino et al., 2020)。

Fujiwara et al. (2018) は、2013年8~10月の「みらい」北極航海(MR13-06)で行われたチュクチ海北部の定点観測にもとづき、気象擾乱にともなう海洋生物地球化学的な応答について調査した。その結果、強風イベントにともなう海洋混合が、下層からの栄養塩供給と秋季ブルームとして珪藻類の生物量の増加をもたらすことを明らかにした(図4-5-11)。さらに、増加した珪藻類はただちにカイアシ類優占種に捕食されていることが実験的に明らかになり、越冬前のカイアシ類のエネルギー源となることを示唆した。近年増加傾向にある北極海の大気擾乱は、海洋生態系のエネルギー転送過程を変化させる可能性を持つことを示唆した。

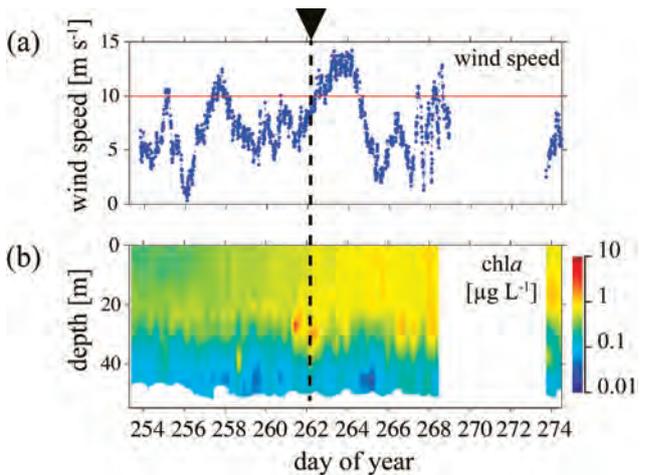


図4-5-11. チュクチ海での定点観測における(a)風速、および(b)クロロフィルa濃度の時間変化。横軸は2013年1月1日からの日数。縦軸は水深(m)。

一方、Nishino et al. (2020) は、2014年8~10月の「みらい」北極航海(MR14-05)で行われたカナダ海盆(NAP)の定点観測にもとづき、気象擾乱にともなう海洋生物地球化学的な応答について調査した。その結果、カナダ海盆では強風イベントにともない強い海洋混合が起きても、下層から栄養塩が供給されず、植物プランクトンの増加をもたらさないことがわかった。この原因として、カナダ海盆に蓄積される海水融解水や河川水が強い成層を形成することと、栄養塩躍層が深いことが考えられる。しかし、この強い成層により有機物粒子がそこに留まり、それが分解されることで発生する栄養塩が植物プランクトンの生産(秋季ブルーム)を支えていることを示唆した。また、暖水渦がチュクチ海陸棚域から運んでくる栄養塩も秋季ブルーム維持に重要であることを示した。

暖水渦と栄養塩フラックスおよび植物プランクトンの生産につ

いては Nishino et al. (2018) によってさらに詳しく調査された。2015 年 8 ~ 10 月の「みらい」北極航海 (MR15-03) において、アラスカ沖で低気圧性暖水渦を発見し、その詳細な観測を実施した。その結果、渦中央部では流速の鉛直シアで生じる乱流混合によって有光層に栄養塩が運ばれ、大型植物プランクトンの生産が維持されることがわかった (図 4-5-12)。一方、渦周縁では二重拡散混合にともなう栄養塩供給により、小型植物プランクトンが増加することが明らかになった。海水減少による渦の強化と温暖化にともなう二重拡散混合の活発化は植物プランクトンの量や種類を変化させる可能性がある。

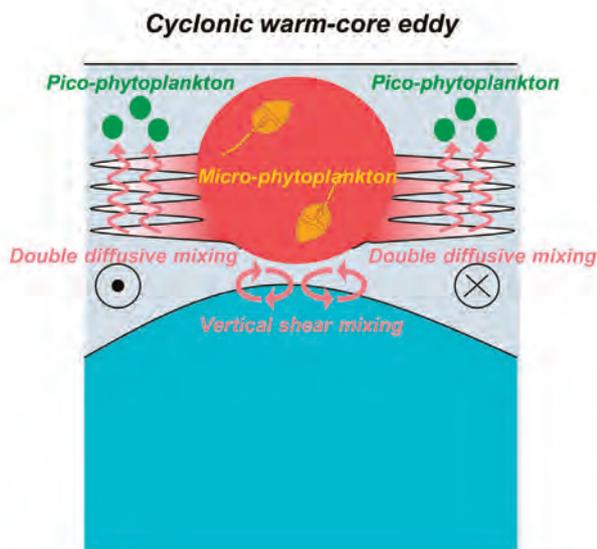


図 4-5-12. 2015 年 9 月にアラスカ沖で観測された低気圧性暖水渦の模式図

○海水分布とアイスアルジー

アイスアルジーは海水底部に付着する藻類であり、氷海域生態系の重要な基礎生産者である。Fukai et al. (2019) は、2017 年と 2018 年の夏季にセントローレンス島南方海域で採取した海底堆積物中のアイスアルジーを含む休眠期細胞群集の比較を行った。細胞密度は 2017 年に比べ 2018 年の方が 10 ~ 100 倍高かったが、これは、この海域で 2017 年に比べ 2018 年の方が海水後退が早かったためと考えられる。しかし、アイスアルジーに注目すると、2017 年には高い割合で出現したが、2018 年は非常に低密度であった。このことから、2017 年にはアイスアルジーが増殖するのに十分な時期まで海水が存在したが、2018 年には海水後退時期が早く、アイスアルジーが増殖できなかつたと考えられる。

上記のような観測事例はあるものの、北極海、特に北極海中央部 (海盆地) でのアイスアルジーに関する観測データはほとんどない。しかしながら、アイスアルジーの生産とその海水減少に対する応答を明らかにすることは、北極海全体の炭素循環や食物連鎖を理解し、気候や生態系の将来予測するための鍵となる。Watanabe et al. (2019) は、北極海のアイスアルジーの生産過程を組み込んだ複数のモデルを比較することにより、アイスアルジー生産の不確実性と制御因子について議論した (図 4-5-13)。その結果、アイスアルジー生産は陸棚域と海盆地で

大きな違いがあること、顕著な長期変動はみられないこと、安定した氷盤と海水底面への十分な光が必須であること、春季の栄養塩が制御因子になっていること、モデル間の違いは最大成長速度に起因していることなどを明らかにした。今後、モデルと比較できる現場観測データの蓄積が必要である。

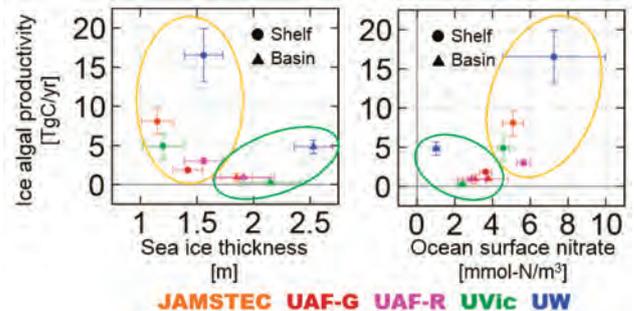


図 4-5-13. 複数のモデルによるアイスアルジーの年間基礎生産量。左は年間最大海水厚、右は海洋表層における年間最大硝酸塩濃度との関係を示す。オレンジが JAMSTEC、茶およびピンクが UAF、緑がビクトリア大学、青がワシントン大学の計算結果。黄色の範囲内の●は陸棚域、緑色の範囲内の▲は海盆地の平均値。エラーバーは年々変動の標準偏差。

まとめ

北極域の気温上昇と海水減少は、陸域や海洋の環境変化を引き起こし、そこに暮らす生物や人間に影響をおよぼしている。特に、アラスカ沿岸のチュクチ海は、先住民の暮らしを支える豊かな生態系が広がっているため、本プロジェクトではそこでの環境や生態系の変動について「みらい」などを用いて重点的に研究を進めてきた。その結果、多種多様な生物が集まるチュクチ海のホットスポットの形成・維持機構やそこでの海洋酸性化、CO₂ 吸収、窒素循環などについて、プレスリリースを含めた多くの成果をあげることができた。

今後も北極海の海水は増減を繰り返しながら、年を追うごとに北極海中央部に向かって減少していくであろう。海水温上昇にともなう南方の魚類が侵入し、将来的には北極海中央部でも漁業ができるようになるかもしれない。また、船舶の航行や資源開発の可能性も含んでいる。だが、そのような人類活動による北極海の環境汚染や生態系の破壊が懸念されている。今後我々は、いままで海水に阻まれデータの空白域となっていた北極海中央部にも焦点を当て、そこでの総合的な環境調査と生態系アセスメントを推進する必要がある。

4.5.3 温暖化・酸性化によるプランクトンへの影響評価

小野寺 丈尚太郎・杉江 恒二・渡邊 英嗣

温暖化・酸性化をはじめとするさまざまな環境ストレスが生態系の低次栄養段階におよぼす影響

北極海では、温暖化にともない夏季の海水が後退する期間が長期化し、海水のない面積が増大している。これにより、海に降り注ぐ光の量や、大気から海洋への CO₂ の溶解量の増大が起きている。近年の衛星観測によれば、海水の縮小にともなう光の利用可能性の増加が、植物プランクトンの生産量の増大に

寄与していることが報告されている (Arrigo and van Dijken, 2011¹¹⁾)。他方、カナダ海盆におけるモニタリングでは、昇温、低塩化および栄養塩濃度の低下が観測されており、超小型の植物プランクトン (直径 2μm 以下) の増加が観測されている (Li et al., 2009¹²⁾)。北極海の環境変化によって、すでに生態系の低次栄養段階生物に影響が出ていることは事実であるが、どの要因がどれほど生物に影響を与えているのかについてはまったくわかっていない。

そこで、現場におけるさまざまな観測に加え、異なる環境条件下での北極海のプランクトン群集の培養実験を行うことで、生態系に起きている変化に対する理解を深化させることを目的とした。また、北極海の低次生態系を表現する数値モデルの開発を行うとともに、社会科学との連携や研究活動の成果発信にも力を入れた。

北極海の環境変化が窒素循環におよぼす影響

植物プランクトンに利用可能な窒素は、アンモニアや硝酸・亜硝酸塩が主であり、ガス態の窒素 (N₂) はごく一部の細菌が利用できるのみである。また、アンモニアの多い環境では小型の植物プランクトンが、硝酸塩の多い環境では大型の植物プランクトンが多いことが経験的に知られている。植物プランクトンの大小は、高次栄養段階生物への栄養やエネルギーの伝搬効率ならびに生物粒子の鉛直方向の移動性に影響する、極めて重要な要因である。すなわち、海水に存在する窒素がアンモニアであるか硝酸塩であるかは、生態系動態を考えるうえで非常に重要である。

本研究で取り扱う窒素の循環とは、アンモニア → [酸化 (硝化菌)] → 硝酸 → [同化 (植物プランクトン)] → [枯死・分解 (細菌)] → アンモニア → … のサイクルを指す。生物に利用可能な窒素の濃度比を決めるうえで、アンモニアを硝酸に酸化する硝化菌の存在量と活性が重要な要因であるが、北極海の海洋環境変化が硝化菌におよぼす影響について調べられたことはなかった。

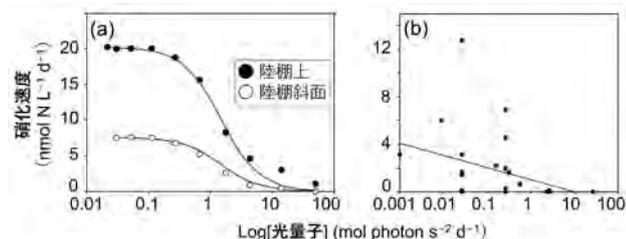


図 4-5-14. 光量子と硝化速度の関係性。(a) 光量子を操作した培養実験、(b) 調査海域の有光層内における光量子と硝化速度の実測値。光量子の上昇は、硝化を有為に低下させる。

2016 年と 2017 年の「みらい」北極航海 (MR16-06, MR17-05C) において、生物に利用可能な窒素動態について精査し、さらに、光強度や pH を変化させた培養実験を加えて行った。その結果、光強度の増加が硝化速度を著しく低下させることが明らかになった (図 4-5-14)。また、pH もわずかながら硝化速度を低下させる効果があった。これらの結果は、海水の後退によって海水中に差し込む光の量の増加および CO₂ 増加の

ふたつの要因によって硝化が抑制され、アンモニアが硝酸塩に対して増加する可能性を示唆する (Shiozaki et al., 2019)。海水が融解する面積や期間は今後も増加すると考えられるため、人為起源の環境変化が続く限り、窒素循環は攪乱され続けると考えられる。

北極海の環境変化が植物プランクトン動態におよぼす影響

大気中の CO₂ の増加により、海洋表層に溶け込む CO₂ の量が增大している。これにより、海水の pH は少しずつ酸性側に傾いてきている (海洋酸性化、Doney et al., 2009¹³⁾)。また、温室効果気体である CO₂ は、海水温の上昇にも寄与し、さらに、昇温による海水の融解は海水の塩分を低下させている。北極海に生息するすべての生物は、これらの環境変化のなかで生息しなければならず、どのような影響が現れるのかを解明することは喫緊の課題である。しかしながら、それぞれの環境変化が植物プランクトン群集動態におよぼす影響については調べられたことがなかった。

本研究では、2015 年と 2016 年の「みらい」北極航海 (MR15-03, MR16-06) において、チュクチ海北部の海水を用いた培養実験を行った。実験では、水温、CO₂ 濃度、塩分を、それぞれ 2 段階ずつ操作し、順列組み合わせで 8 とおりの実験設定で行った。その結果、2015 年の実験では昇温により小型の植物プランクトンが増える傾向、2016 年の実験では酸性化により小型の植物プランクトンが増える傾向を見出した。すなわち、両年とも、現在顕在化しており、さらに、将来その影響が加速すると想定される環境変化が、植物プランクトン群集のサイズ組成を小さい側にシフトさせる効果があることを、世界ではじめて定量化することに成功した (図 4-5-15, Sugie et al., 2020)。

上記の研究成果より、北極海において顕在化してきた、水温、CO₂ 濃度、塩分の環境変化は、植物プランクトン群集を小型化させる方向にシフトさせる可能性が高いといえる。植物プランクトンの小型化は、高次栄養段階生物 (例えば、北極ではアザラシやシロクマ) の環境収容力の低下につながる。さらに、小さな植物プランクトンは沈みにくく、分解されやすい。これは、海洋の CO₂ 吸収能力の低下につながり、温暖化や海洋酸性化に対する正のフィードバック効果、すなわち、北極海の海洋環境の悪化は負のループに陥ることが示唆される。想定される最悪のシナリオを避けるためにも、環境変化を最小限にとどめるように、人類は知恵を絞る必要がある。

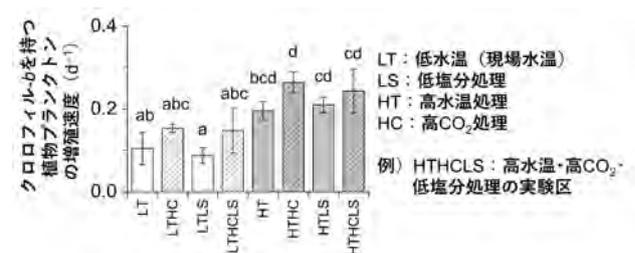


図 4-5-15. 水温、CO₂ 濃度、塩分を変化させたときの植物プランクトン (クロロフィル b を持つ緑藻類) の増殖速度。棒グラフのうえのアルファベットは Tukey-Kramer 法による平均値の検定結果。

北極海の亜表層における pH と CO₂ の通年観測

北極海は、海洋酸性化が特に進行している海域のひとつである (AMAP, 2013¹⁴⁾)。将来も見据えたプランクトンの培養実験研究と同時に、海洋酸性化に関する現在の動態を観測することも重要である。北極海の海洋酸性化の原因として、海洋表層では海水融解にともなうアルカリ度の減少と大気 CO₂ の吸収が寄与し、その下層においては有機物分解にともなう CO₂ の増加が影響している (Yamamoto-Kawai et al., 2009⁶⁾)。チュクチ海南部ホープ海底谷の生物活動が活発な「ホットスポット」では、炭酸塩飽和度と生物活動との関連が 2012～2014 年にかけて通年で調査され、炭酸カルシウムの未飽和な状況が、温暖化の進行とともにチュクチ海の底層を中心に一層広がっていくことが示唆されている (4.5.2 および 4.5.4 を参照、Yamamoto-Kawai et al., 2016)。

そのような炭酸カルシウムの未飽和な太平洋起源水は、チュクチ海を北へ流れ、一部はバロー海底谷を經由してカナダ海盆やボーフォート海沿岸へ、また一部はチュクチ海の陸棚縁を北西へと流れていく。そこで、本研究では、バロー海底谷の北方沖と、さらに北西側の下流エリアにおいて、ガラス電極式 pH センサーを海底固定型係留系に取り付け、2015 年秋から海洋酸性化に関する観測を続けてきた。また、近年開発が進められてきた薄膜式 CO₂ センサーを一部の係留系に導入し、pH センサーとともに通年係留観測を実施した。チュクチ海北縁の亜表層における pH の一時的な低下は、二酸化炭素分圧 (pCO₂) の一時的な増加に対応している場合が多かった (図 4-5-16)。

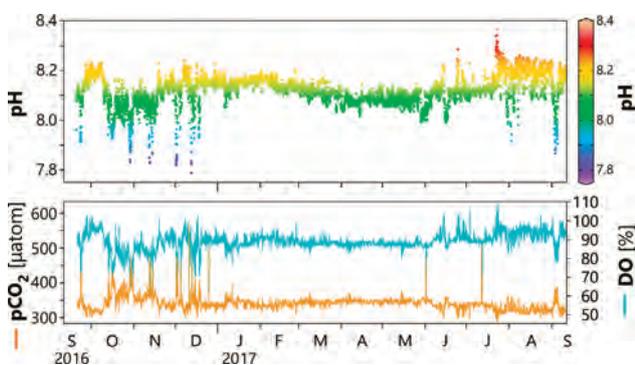


図 4-5-16. pH 観測の一例。チュクチ海北部ハンナ海底谷の深度約 65m で 2016 年 9 月～2017 年 9 月に観測された pH および溶解酸素および pCO₂ の時系列変動。

海洋酸性化が有殻翼足類の殻に与える影響を可視化

有殻翼足類は、サケなどの魚にとって有用な餌資源とされる。有殻翼足類が作る炭酸カルシウムの殻は薄く、またその結晶アラゴナイトが酸性環境に対して脆弱な特性を持つ。そのため、海洋酸性化が有殻翼足類の生存を脅かし、その影響が魚類やより高次の生態系まで波及することが懸念されてきた。有殻翼足類の殻の品質は、従来は主に顕微鏡観察にもとづき定性的に評価されてきた。JAMSTEC では、マイクロフォーカス X 線 CT (MXCT: Microfocus X-ray Computed Tomography) 観察法をプランクトン研究向けに導入し、改良を続けてきた。これにより、殻の形態を立体的に計測し数値化するとともに殻

の密度も定量的に分析できるようになった。本研究では、北極海で得られたプランクトンネットおよび pH センサーをともなうセジメントトラップで得られた有殻翼足類の殻について MXCT 法による観察を行った (図 4-5-17)。

2013 年および 2015 年の秋に北極海太平洋側の複数観測点において、有殻翼足類ミジンウキマイマイ数百個体の幼生がプランクトンネットで海洋表層付近から得られた。その殻密度は、生息域である海洋表層付近の炭酸塩飽和度と正の相関を示し、ミジンウキマイマイの幼生の殻密度は、現場の海水の炭酸塩飽和度を反映することを示唆された。

また、時系列セジメントトラップで得られた有殻翼足類の殻についても、pH が低下するタイミングで密度が低下し殻の破損がみられる個体も増えていた。しかし、そのような一時的に低下した pH 環境が、殻の品質だけでなく、有殻翼足類の生理や生存にどのように影響しているかについては、まだ十分な結果が得られておらず、今後の課題である。

海洋生態系研究における MXCT という新たな手法の開発をきっかけとして、JAMSTEC はノルウェー海洋研究所 (IMR: Institute of Marine Research) との共同研究を 2016 年 5 月に開始した。我々が観測してきた北極海太平洋側と IMR が観測している大西洋側において、海洋酸性化や温暖化などの環境ストレスに対する生態系の動態について、今後さらなる成果が期待される。

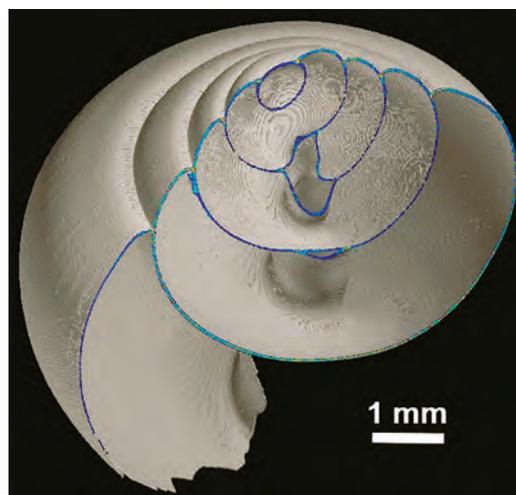


図 4-5-17. 有殻翼足類ミジンウキマイマイの MXCT 画像。殻断面の色は殻の密度の違いを表し、赤色ほど密度が高く青色が低い部分である。

大型動物プランクトンの生産と移流の様子を通年観測

チュクチ海南部ホープ海底谷で 2012 年 7 月～2014 年 7 月の 2 年間実施した動物プランクトン測定用マルチ周波数音響プロファイラーによる係留系観測のデータ解析から、海水に覆われる冬季を含む通年での動物プランクトンの動態の季節変化をはじめめて明らかにした (Kitamura et al., 2017)。動物プランクトンのバイオマスは、春季ブルームの時期ではなく、9～10 月頃にかけての秋に最大になることが観測された (図 4-5-18)。これは現場での生産よりも、ベーリング海からの移流が重要であ

ることを示唆している。また多周波数の音響データの解析結果から、大型動物プランクトン（オキアミやカイアシ類 *Neocalanus cristatus*）は夏季の終わりから秋季にかけて、小型のものはそれ以外の時期に卓越することが示唆された。これまで、ベーリング海からチュクチ海に移流された動物プランクトン（北極固有種に比べて大型）は越冬できないものと予想されてきた。本研究で示された、大型動物プランクトンの冬季の減少は、移流種がチュクチ海で越冬できないことを示唆している。動物プランクトンが増加する時期と、クロロフィルセンサーで観測された植物プランクトンのブルーム期には違いがあるので、春～初夏に生産された植物プランクトンの多くが底生生物に供給される従来型の漂流系-底生系カップリング (pelagic-benthic coupling) が、観測した時点ではまだ維持されていることが示唆された。しかし、温暖化の進行と海水減少とともに、プランクトンの生産期や種組成が変化していくことで、チュクチ海の生態系が漂流系-漂流系カップリング (pelagic-pelagic coupling) に変化していく可能性もある。今後も生態系の動態も含めた海洋観測は必要である。

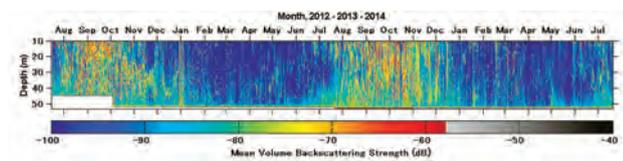


図 4-5-18. チュクチ海南部の水柱約 50m における 2012 年 7 月～2014 年 7 月にかけての音響散乱強度の鉛直分布変化 (Kitamura et al., 2017)。青色から赤色の変化が、バイオマスの増加を表している。

有機物粒子の輸送モデリング

本研究では、JAMSTEC がバロー峡谷からチュクチ海台周辺にかけて設置しているセジメントトラップ係留系 (NAP10 ~ 13・CAP12・NBC15 ~ 17・NHC15 ~ 17) の観測結果をふまえながら、生物由来粒子の時空間変動メカニズム解明を目指している。実施担当者の先行研究 (Watanabe et al., 2014¹⁵) では、太平洋側北極海で発生する海洋渦が生物由来粒子の時空間変動に重要な役割を担っていることを指摘しており、引き続きそのプロセスに着目した。カナダ海盆南部 (3,000m 等深線と北緯 75 度で囲われた海域として定義) において、相対渦度の絶対値が $0.05f$ (f はコリオリパラメーター) より大きくなるモデル格子の総体積量から中規模渦の存在量を簡易的に見積もると、先行研究で実施した季節変動実験の結果と同様に、各年とも夏から秋にかけて渦生成が活発化する様子が再現された (図 4-5-19 (a) (b))。バロー峡谷の北側に設置したセジメントトラップ (NBC15) では夏季に捕集器上部が目詰まりして測定不能になるほど大量の粒子が沈降していた様子が捉えられているが、年々変動実験の結果からも、同程度の有機物粒子の沈降が過去にも頻繁に生じており、その変動は渦生成量とある程度関係があることが示唆された (図 4-5-19 (c))。

このような水深の浅い陸棚域周辺では、海底堆積物の再懸濁が物質循環を考えるうえで無視できないことが指摘されている。そこでアイスアルジーなど極域特有のプロセスを含む低次

生態系モデル Arctic NEMURO に粒子態有機窒素 (PON: Particulate Organic Nitrogen) の再懸濁プロセスを導入した実験を行い、その感度を調べた。まずテストケースとして PON 添加量を当該格子で計算される水平流速の二乗に比例させることで、流れの強い陸棚縁で局所的に PON 濃度が増加する様子が表現された。ただし、海洋表層での生物生産に由来する PON と同じ沈降速度を与えた場合には、再懸濁粒子が海盆内部までは広がらないことがわかった。今後、再懸濁した PON に異なる沈降速度を与える実験を行う予定である。これらのプロセス自体はまだ観測的証拠が少なく、定量的評価が困難であるが、結果として生じる沈降粒子量の時空間変動をセジメントトラップデータと比較することで検証を進めていく予定である。

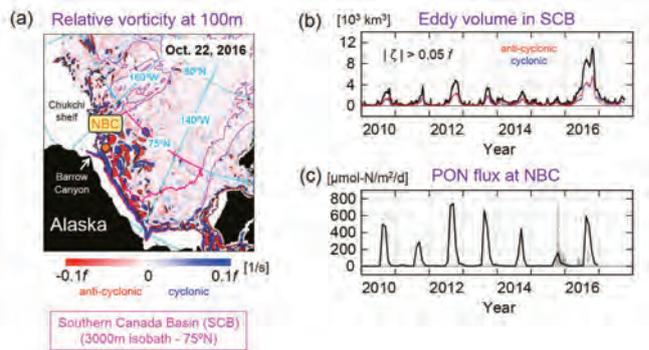


図 4-5-19. (a) 100m 深での相対渦度 [1/s]。 (b) カナダ海盆南部における中規模渦の総体積量 [10^3 km^3]。 (c) バロー峡谷の北側に位置する係留系設置地点 NBC での粒子態有機窒素 PON の沈降フラックス [$\mu\text{mol-N/m}^2/\text{d}$]。 (c) のバーはセジメントトラップで捉えられた観測値で、その他はいずれも北極海領域モデル 5km 格子版による年々変動実験の結果。

炭酸系モデリング

北極海は大気からの CO_2 吸収、海水融解水による希釈、陸棚海底に堆積した有機物の分解などともなっており海洋酸性化が急速に進行しており、環境ストレスによる生物への影響が危惧されている。すでに炭酸カルシウムのうちアラゴナイト未飽和の海域が広がりつつあるが、酸性化の時空間変動や要因の相対的寄与については未解明な部分も多い。これらのプロセスを定量的に評価するには数値モデリングが有用であるが、初期・境界条件に必要なデータが揃っていないなどの理由により、現実的に再現性のよいシミュレーション結果を得るには実験設定の継続的な見直しが必要である。このような背景をふまえて、本研究では、炭酸系を含む海水-海洋結合モデル Arctic NEMURO-C の開発および高精度化を実施した。

既存の Arctic NEMURO に Ocean Carbon-Cycle Model Intercomparison Project (OCMIP) で提唱されている炭酸系ルーチンを組み込み、 pCO_2 ・ pH ・炭酸カルシウム飽和度 (Ω) など炭酸系変数の計算を行った。アルカリ度と全炭酸の初期値は World Ocean Atlas 2005^{*1} の水温・塩分・溶存酸素から重回帰式を用いて推定した格子データを与え、水平 25km 格子の中解像度版で 1979 ~ 2013 年のさまざまな設定のもとで実験した結果を検証した。観測値ベースの自己組織化マップから推定された海面付近の pCO_2 や大気-海洋間 CO_2 フラックスのデータ (Yasunaka et al., 2016, 2018) と比較しながら、チュ

クチ陸棚域やカナダ海盆域で長期傾向も含めて再現性のよい設定を抽出した(図4-5-20)。このケースでは炭酸カルシウムのうちアラゴナイト未飽和の海域が最近拡大している特徴もよく捉えている。一方、カナダ海盆域の中深層では、国際共同観測プロジェクト Joint Ocean Ice Studies (JOIS) で得られた船舶観測データと比較して、アルカリ度や全炭酸に大きなバイアスがみられた。このバイアスの大きな要因は初期値によることが確認されたため、上述の格子データ作成に用いた重回帰式を主要な水塊別に見直すことにした。また実験期間を2018年まで延長することで、直近の船舶観測データも反映させながら引き続き精度向上に取り組んでいく予定である。

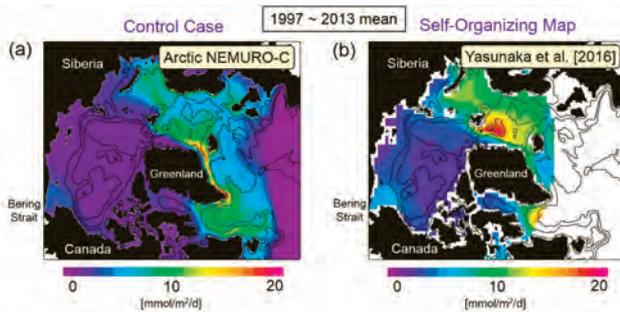


図4-5-20. (a) 北極海領域モデル25km格子版と(b) Yasunaka et al. (2016)の自己組織化マップからそれぞれ計算された大気-海洋間のCO₂フラックス[mmol/m²/d]。いずれも1997~2013年の平均値。

4.5.4 北極海淡水収支の季節・経年変動の理解

川合 美千代・溝端 浩平

目的

北極海の淡水収支とその変動は、温暖化による海水融解、陸起源淡水量の変化、海洋循環場の変化を反映した結果であると同時に、海洋貯熱量、海水形成・融解、海洋循環に影響をおよぼす原因でもある(例えば、Ding et al., 2016¹⁶)。また、淡水量の変化によって海洋の成層度が変化するため、栄養塩循環、生物生産、海洋酸性化といった生物化学的環境にも影響をおよぼすことも懸念されている(McLaughlin and Carmack, 2010¹⁷; Yamamoto-Kawai et al., 2009⁶)。本研究では、衛星および船舶観測、係留系観測を実施し、既存の観測データと合わせて解析することで、近年の淡水分布の変化と物理的・生物化学的な環境変化を総合的に理解することを目的とした。

衛星観測による海面塩分データの改良

淡水量の時空間分布の把握は主に離散的な現場観測データを用いてなされるため、海盆スケール・経年変動の議論にとどまっている。より詳細な時空間スケールにおける淡水量分布を調べる方法として、現在は衛星リモートセンシングによる塩分推定がある。本研究では、衛星「SAC-D」搭載のAquariusセンサーを用いた海面塩分推定について精度、誤差要因の特定を行い、統計的手法による改良を行った。まず、Aquariusによる海面塩分と「みらい」の表層連続モニタリングによる塩分との比較を

行ったところ、誤差は約1.2psuと大きかった。そこで、Data Interpolating Empirical Orthogonal Functions (DINEOF、Alvera-Azcárate et al., 2016¹⁸)を適用し、現場データとの整合性を極力持つようにAquariusによる海面塩分推定値を改良した。その結果、誤差を約0.7psuにまで低減することができた(図4-5-21)。

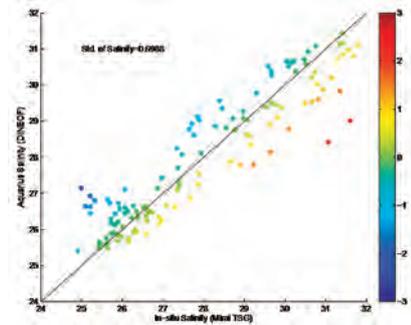


図4-5-21. 「みらい」の表層連続モニタリングによる塩分とAquariusによる海面塩分との比較

海洋表層塩分と貯熱量

2014年に実施されたカナダ砕氷船「Amundsen」による観測航海では、マッケンジー川近傍の海域において、9月後半の結氷期にも関わらず1°Cを超える温暖な海水が表層30mに観測された。大気-海洋間の熱収支で混合層内の貯熱量変動が決定される(Mizobata and Shimada, 2012¹⁹)と仮定すると、水循環変動観測衛星「しずく」搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR2)による海面水温と気候再解析データを用いて表層混合層内の貯熱量を算出することができる。その結果、2012年・2014年・2015年のマッケンジー川近傍において、比較的高い(100MJ以上)貯熱量が推定され、現場観測結果とも整合的であった(図4-5-22)。

本研究で改良したAquarius海面塩分マップによると、このとき、マッケンジー川近傍には低塩分水の広がりが見られており、この低塩分水が成層強度を増大させ、結果的に表層混合層内の貯熱量を増大させたと考えられる。低塩分水に端を発する貯熱量増加は、今後の結氷遅延にも寄与する可能性が示唆される。

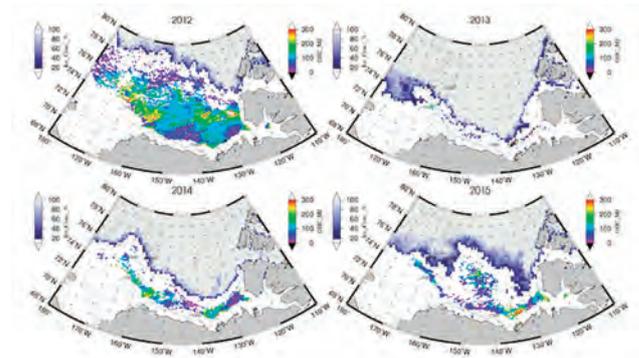


図4-5-22. 2012~2015年における表層混合層内の推定貯熱量

海洋循環の変動

淡水貯蔵量の変動を理解するためには、夏季だけではなく海水に覆われた冬季の海洋循環場を把握することが必須である。そこで、地球観測衛星「CryoSat-2 (CS-2)」搭載の干渉合成開口レーダー高度計による観測データを用いて、地衡流の流線関数を定義する海面力学高度(月平均)を導出した(Mizobata et al., 2016)。その結果、海水運動の加速・減速にともなって、カナダ海盆のポーフォート循環が順圧的に応答することがわかった(図4-5-23)。

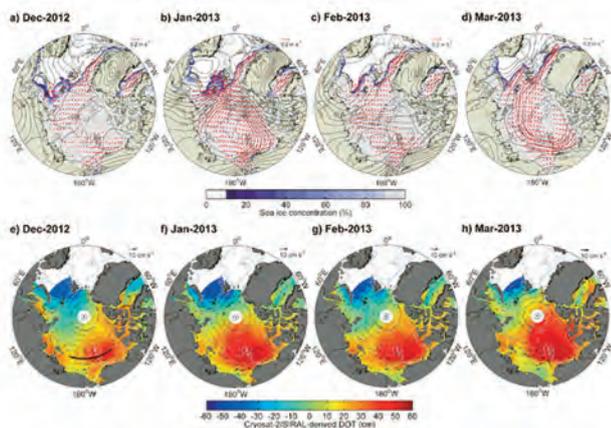


図4-5-23. 上段は海水氷集中度、海水速度ベクトル(赤矢印)、海面気圧、下段は本研究で得られた海面力学高度

さらに、「CS-2」と、同じく地球観測衛星である「Jason-2」、「Jason-3」、「Sentinel-3A」によるデータを統合することで、より広範囲かつ通年の海面力学高度分布を得た。その結果、カナダ海盆におけるポーフォート循環は、2015年以降強化されており、この変動の傾向は船舶観測による貯淡水量分布の変動と一致することがわかった。また、淡水の集積はポーフォート循環内部での密度面を下げる効果も考えられ、エクマン収束(Ekman convergence)による淡水の集積が循環のさらなる強化、もしくは維持へ貢献すると考えられる。また、2013年1月にはポーフォート循環が西方へ拡大しており、熱源である太平洋夏季水の輸送先がノースウインド海嶺よりも西方になることを示した。本研究により、観測が困難な季節海水域において、海面力学高度が貯淡水量変動の指標となること、また、貯熱量変動の理解においても有用な情報となることが示された。

カナダ海盆における貯淡水量の季節・経年変化とその内訳

淡水量変動の全体像を把握するためには、衛星による広域観測だけではなく、海洋内部の現場観測が不可欠である。カナダ海盆における通年係留観測ならびに秋季の船舶観測の結果、貯淡水量の季節変動幅は経年変動幅に比べて小さいこと、2008年までに淡水量が急速に増加し、2015年以降さらに増えたことがわかった(Proshutinsky et al., 2019)。全体的な密度面の深化をともなっていることから、ポーフォート循環強化による淡水の集積の影響が明らかである。さらに、海水の酸素同位体比とアルカリ度を用いて淡水の内訳を調べたところ、0～300m層全体では太平洋起源水と河川水・降水由来の淡水がともに増

加しており、また、西側で顕著な増加がみられた(図4-5-24)。このことは、衛星データ解析から明らかになったポーフォート循環強化とその中心の西方への移動と整合的である。一方、表層0～50mでは、2008年までに海水融解水が大きく増加したが、その後は減少傾向にある一方で、近年では河川水・降水の量が増加したことが明らかとなった(図4-5-25、Yamamoto-Kawai et al., 投稿準備中)。

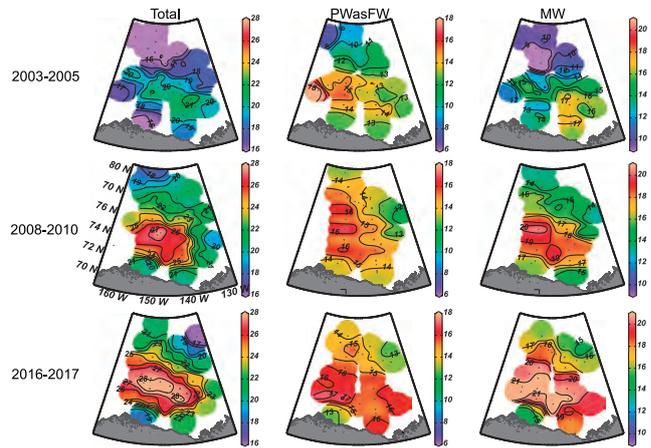


図4-5-24. カナダ海盆0～300m層の淡水の内訳とその変化(左:総量、中:太平洋水由来淡水、右:河川水・降水)

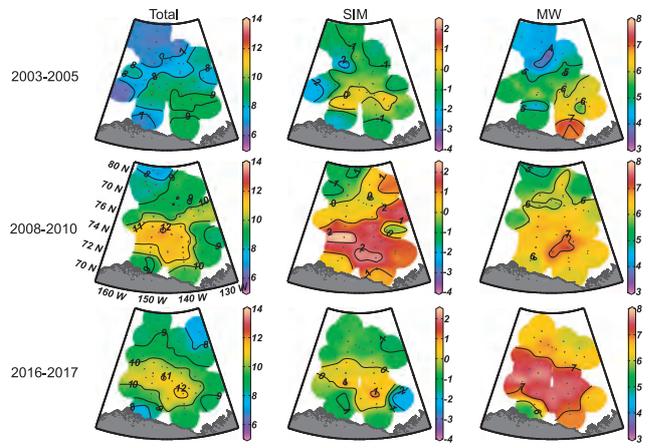


図4-5-25. カナダ海盆0～50m層の淡水の内訳とその変化(左:総量、中:海水融解水、右:河川水・降水)

生物生産・海洋酸性化への影響

係留観測のデータを用いて、冬季の海水形成による淡水除去(塩分増加)と鉛直混合について調べたところ、現在の2倍以上の海水形成がなければ、亜表層の栄養塩躍層にまで混合層が到達できず、表層への硝酸塩供給が起きないことが示された。しかし、夏季には表層で一次生産が行われていることから、硝酸塩以外の窒素減の利用が示唆される(Ji et al., 2019)。また、2003～2008年に秋季の亜表層クロロフィル極大が深化が続けたが(McLaughlin and Carmack, 2010¹⁷⁾、その後は一定の傾向はみられず、場所や年による変化が大きくなった(図4-5-26)。近年、ポーフォート循環強化による栄養塩躍層の深化だけ

ではなく、光や水温といったその他の要因が亜表層の生物生産に影響し始めていることが示唆される。

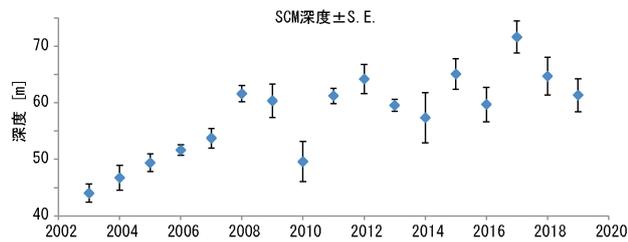


図 4-5-26. カナダ海盆における亜表層クロロフィル極大層深度の経年変化

また、2005～2008年に表層に海水融解水が増加した際には、海水減少によるガス交換活発化もあり、海洋酸性化が急速に進行したが(Yamamoto-Kawai et al., 2009⁶⁾)、2008年以降は海水融解水量の減少により酸性化がある程度緩和されていることがわかった(図 4-5-27、Zhang et al., 2020)。しかし、表層の炭酸カルシウム未飽和は現在まで継続しており、すでに翼足類の個体数の減少が観測されている(Nickoloff et al., 投稿準備中)。なお、河川水と海水融解水とは化学成分が異なるため、近年の河川水増加は2008年までの海水融解水増加に比べて酸性化への影響は小さいと考えられる。

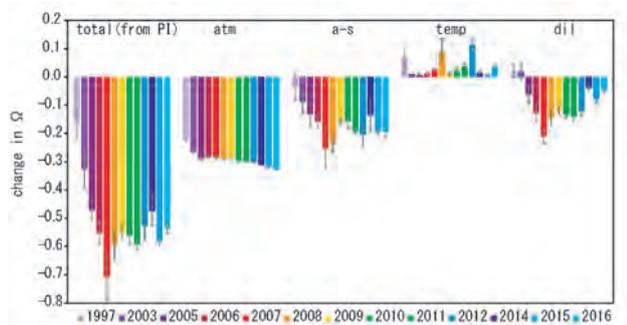


図 4-5-27. カナダ海盆表層におけるアラゴナイト飽和度の変化量と各要素の寄与量(atm: 大気中 CO₂ 濃度の増加、a-s: ガス交換、temp: 水温、dil: 淡水希釈)

まとめ

手法の改良や新たなデータセット構築、データの取得と解析により、北極海の淡水量変動の様子を詳細に把握することが可能となった。冬季北極海の海洋循環が、大気場 - 海水運動にともなって月平均ベースで刻々と変動することがわかったほか、海面力学高度から季節海水域における貯淡水量変動が推定可能であることが示された。また、改良した衛星観測による海面塩分と貯熱量分布との比較から、貯淡水量の増加が成層強度と貯熱量の増大に寄与することも示唆された。また、現場データからは、循環強化による淡水収束に加えて、2008年までは海水融解水、近年は河川水・降水が表層で増加したことがわかった。また、貯淡水量の増加にともなう生物化学的变化も、年代によって状況が異なっていることが示唆された。

4.5.5 アラスカ沿岸における海水動態変動の理解

深町 康・平野 大輔・伊藤 優人

東部チュクチ海の沿岸ポリニヤ出現域における海水厚の係留観測と衛星データによる薄氷厚推定アルゴリズムの検証

海水の厚さは、大気と海洋の間の熱や運動量の収支、海水と海洋の間の熱や塩分の収支を決める重要なパラメーターであるにも関わらず、その面積とは異なり、高精度・高頻度で幅広いレンジの厚さについて計測できる衛星センサーが存在しないのが現状である。そのため、海水厚の現場観測はその実態把握のみならず、衛星観測の検証のために不可欠なものである。北海道大学低温科学研究所では、UAFと共同で、2009年からチュクチ海東部の沿岸ポリニヤ出現域において、もっとも高精度・高頻度での計測が可能な超音波氷厚計(IPS)の係留観測を実施して、現場データを蓄積しており、その観測は現在も継続中である。

このデータを用いて、この海域における海水厚の特徴をいくつかの代表値で示したものが表 4-5-1 である(なお、この観測では多層式超音波ドップラー流向流速計(ADCP: acoustic Doppler current profiler)によって海水の漂流速度も計測しており、そのデータを用いて空間的なデータに変換したものを集計している)。この6年間の平均ドラフト(海水厚の海面下の部分)は1.10m(シーズンごとの値の範囲は0.90～1.37m)で、東側のポーフォート海で1992～2003年に同様の手法で計測された値(2.01m)より小さかった。北東風が卓越するとポリニヤが出現して海水厚が減少し、風の陸向き成分が大きくなると海水の氷脈化(ridging)や氷盤同士ののしあがり(rafting)が発生し海水厚が増加することが明らかとなり、これらのイベントの発生が海水厚変動を強く支配している。

表 4-5-1. 2009～2015年の海水ドラフトの統計値。10～99%で示しているのは小さなドラフトからソートした場合のパーセントイル値。

年	ドラフト(m)							
	平均値	標準偏差	10%値	20%値	50%値	90%値	99%値	最大値
2009-10	1.27	1.76	0.06	0.12	0.60	3.40	8.35	25.25
2010-11	1.33	2.13	0.06	0.13	0.54	3.75	10.52	26.78
2011-12	0.94	1.62	0.03	0.08	0.33	2.54	8.13	22.86
2012-13	1.37	2.01	0.05	0.10	0.59	3.94	9.41	23.82
2013-14	0.97	1.52	0.03	0.07	0.37	2.86	7.14	18.36
2014-15	0.90	1.70	0.02	0.04	0.18	2.64	8.55	22.83
2009-15	1.10	1.81	0.04	0.08	0.40	3.20	8.84	26.78

この観測で得られた現場データを用いて、地球観測衛星「Aqua」に搭載されていたマイクロ波放射計(AMSR-E)によるデータから推定した20cmまでの薄氷厚(Iwamoto et al., 2014²⁰⁾)の検証を、それぞれIPSとAMSR-Eによる海水厚データを用いて、熱収支解析することで求められる1日ごとの海水生産量を比較することで行った(図 4-5-28)。このふたつの海水厚にもとづく海水生産量はよく一致しており、マイクロ波

放射計データを用いた薄氷厚アルゴリズムの妥当性を示している (Fukamachi et al., 2017)。

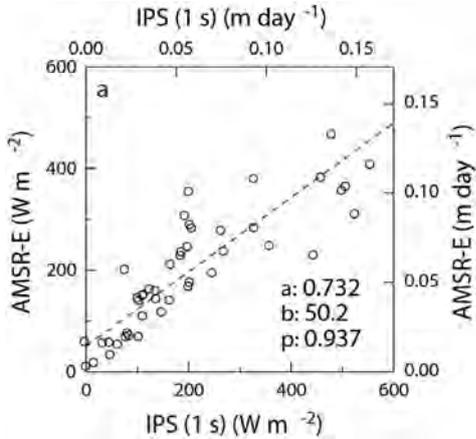


図 4-5-28. IPS で計測された海氷厚と薄氷厚推定アルゴリズムによって AMSR-E データから求めた海氷厚にもとづく 1 日ごとの海氷生産量の散布図 (Fukamachi et al., 2017)

東部チュクチ海の沿岸ポリニヤにおけるアラスカ沿岸冬季水の形成プロセス

バロー峡谷は、太平洋起源水がチュクチ陸棚からカナダ海盆へ流出し、大西洋起源水がカナダ海盆からチュクチ陸棚へ流入するゲートウェイとして重要で特徴的な海底地形である。冬季、バロー峡谷周辺海域で強い北東風が連吹すると、バロー沿岸域を中心として、海水発散による潜熱ポリニヤが形成 (海水生産を促進) されるとともに、海盆域からの高温の大西洋水の湧昇によって顕熱ポリニヤが形成 (海水生産を抑制) されるプロセスをともない、「潜熱・顕熱ポリニヤ双方の特徴を併せ持つ特殊な“ハイブリッド”ポリニヤ」(バロー沿岸ポリニヤ, Hirano et al., 2016) が形成される。係留観測データ・大気再解析データ・衛星観測データ (薄氷厚アルゴリズムにもとづく海氷生産量データ) および数値モデルによるトレーサー実験結果を融合し、特殊なバロー沿岸ポリニヤを含む、アラスカ沿岸・東部チュクチ海固有の冬季水 (アラスカ沿岸冬季水) の特性と形成プロセスを調べた (Hirano et al., 2018)。その結果、沿岸ポリニヤ域での海水生産、海盆域からの高温の大西洋水の湧昇、および陸棚上での混合過程、といったプロセスにより太平洋冬季水が変質することで、異なる 3 つの冬季水 (i) 大西洋水と太平洋冬季水の混合水、(ii) 大西洋水とポリニヤ水の混合水、(iii) 非常に高塩分のポリニヤ水、が形成される。アラスカ沿岸冬季水形成に対する大西洋水湧昇の影響はバロー沿岸ポリニヤでもっとも顕著であった。東部チュクチ海で形成される冬季水の大部分は、その後、チュクチスロープカレントやポーフォート循環によって西または北西方向へと輸送され、最終的にはチュクチボーダーランド・ノースウィンド海嶺・南部カナダ海盆の中深層へと流入し、下部塩分躍層の維持に寄与すると考えられる (図 4-5-29)。このように、太平洋側北極海にも関わらず、太平洋起源水と大西洋起源水双方の影響を強く受けてアラスカ沿岸冬季水が形成されることを明らかにした。

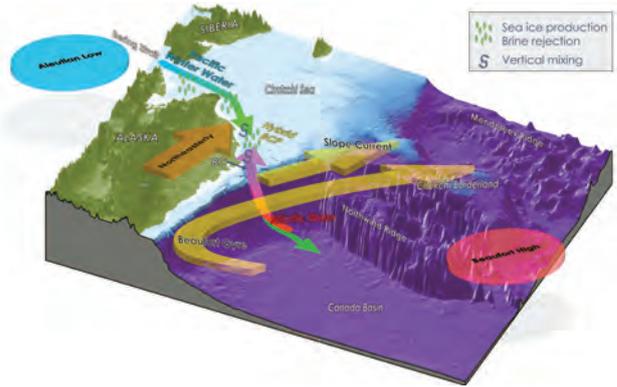


図 4-5-29. 東部チュクチ陸棚上におけるアラスカ沿岸冬季水の形成プロセスと北極海盆域への広がりを表す模式図 (Hirano et al., 2018)

ポリニヤにおける海中での海水生成と堆積物の巻き上げりの観測

北極海では鉄などの栄養を含む海底堆積物を多量に取り込んだ海水 (dirty ice と呼ばれる) が一般に報告されている。この海水は融解期に物質を海洋へと放出するために生物生産などに強く影響する。海水への堆積物の取り込みには海水生成にともなう過程の関与が指摘されている。そこで、チュクチ海の沿岸ポリニヤ域で得られた IPS、ADCP、水温・塩分計および濁度計からなる係留観測のデータと沿岸海水レーダー、気象データを組み合わせて解析し、海水の生成と物質の取り込み過程を調べた。

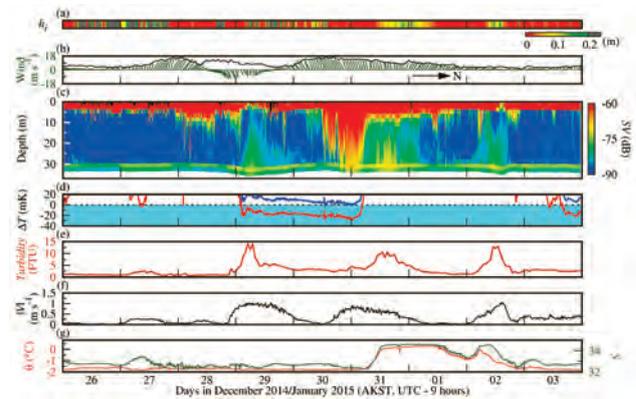


図 4-5-30. 2014 年 12 月 26 日～2015 年 1 月 3 日の係留および気象データの時系列。(a) IPS による海氷厚。灰色は厚さが 0.2m 以上の氷を示す。(b) バロー空港の気象データによる風速・風向のスティックダイアグラム (緑) と風速の絶対値 (黒)。(c) ADCP による体積後方散乱強度 (SV) の鉛直分布 (カラーマップ) と IPS による海氷のドラフトの測定値 (黒)。前者について、0～4m 深の値は海面/海氷底面での散乱により常に強い。(d) 深さ 34m における現場および海面の結氷温度に対する現場水温 (青) とポテンシャル水温 (赤) の差。水色の領域は過冷却の発生を示す。(e) 深さ 35m での濁度。(f) 深さ 31～33m での流速の絶対値。(g) 深さ 34m におけるポテンシャル水温 (赤) と塩分 (緑)。

海水レーダーと IPS のデータから、2014～2015 年の冬季に複数回のポリニヤの発生が認められた。その典型例として図 4-5-30 に 2014 年 12 月 26 日～2015 年 1 月 3 日までの各データを示す。12 月 28 日～1 月 3 日にかけて薄氷 (図 4-5-30 (a)) で特徴付けられるポリニヤが沖向き (西向き) 風 (図 4-5-30 (b)) にともない形成された。特に強風下となった 12 月 28～29 日、12 月 30 日～1 月 1 日 (図 4-5-30 (b)) には海面から深さ 10～25m にかけて ADCP の後方散乱強度 (SV) が増加した (図

4-5-30(c))。12月29～31日には深さ34mにおいてポテンシャル過冷却が観測されており(図4-5-30(d))、音波の散乱源はフラジルアイスと考えられる。すなわち、過冷却にともなう海中でのフラジルアイスの生成が示唆される。一方で12月29、30日や1月2日には海底に向かってSVが増加する強い後方散乱がADCPにより検知された(図4-5-30(c))。同時に深さ35mで計測された濁度が増加しており(図4-5-30(e))、音波の散乱源は堆積物粒子とみられる。これらは海底付近の流速(図4-5-30(f))が大きいときに観測されるため、海底から巻き上げられ、海面に向けて輸送されたものと考えられる。

12月30～31日にかけてフラジルアイスは30m以深でも検知された(図4-5-30(c))。このとき、ADCPの測定範囲内の堆積物の有無は明らかではないが(図4-5-30(c))、深さ35mにおける濁度の値は平常時より高く(~5FTU、図4-5-30(e))、そのような深さでのフラジルアイスと堆積物粒子との接触が予想される。また、12月31日～1月1日には堆積物粒子が海面付近まで輸送された状況がADCPの後方散乱強度データから示唆される(図4-5-30(c))。この間、高温・高塩の大西洋水の移流(図4-5-30(g))によって海中でのフラジルアイスの生成は抑えられる傾向にあったが、10m以浅においてはフラジルアイスとみられる音響シグナルが継続して観測された(図4-5-30(c))。フラジルアイスと堆積物粒子は同一の深さで同時に観測されており、両者の接触が示唆される。これらはフラジルアイスと堆積物粒子の接触を通じた海水による堆積物(物質)の取り込み過程(suspension freezingと呼ばれる)の発生を強く示唆する結果である(Ito et al., 2020)。

注:

※1 https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html

引用文献:

- 1) IDA Science and Technology Policy Institute and Sustaining Arctic Observing Networks. 2017. International Arctic Observations Assessment Framework. IDA Science and Technology Policy Institute, Washington, DC, U.S.A., and Sustaining Arctic Observing Networks, Oslo, Norway, 73 pp.
- 2) Prowse, T. et al., 2011. Effects of Changes in Arctic Lake and River Ice. *AMBIO*, 40, 63-74. doi: 10.1007/s13280-011-0217-6.
- 3) Shimada, K. et al., 2006. Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 33. doi: 10.1029/2005GL025624.
- 4) Proshutinsky, A. et al., 2009. Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114. doi: 10.1029/2008JC005104.
- 5) Nishino, S. et al., 2011. Enhancement/reduction of biological pump depends on ocean circulation in the sea-ice reduction regions of the Arctic Ocean. *Journal of Oceanography*, 67, 305-314. doi: 10.1007/s10872-011-0030-7.
- 6) Yamamoto-Kawai, M. et al., 2009. Aragonite Undersaturation in the Arctic Ocean: Effects of Ocean Acidification and Sea Ice Melt. *Science*, 326, 1098. doi: 10.1126/science.1174190.
- 7) Rainville, L. et al., 2011. Impact of wind-driven mixing in the Arctic Ocean. *Oceanography*, 24, 136-145. doi:10.5670/oceanog.2011.65.
- 8) Moisaner, P. H. et al., 2010. Unicellular Cyanobacterial Distributions Broaden the Oceanic N₂ Fixation Domain. *Science*, 327, 1512. doi: 10.1126/science.1185468.
- 9) Beman, J. M. et al., 2011. Global declines in oceanic nitrification rates as a consequence of ocean acidification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 208. doi: 10.1073/pnas.1011053108.
- 10) Ardyna, M. et al., 2014. Recent Arctic Ocean sea ice loss triggers novel fall phytoplankton blooms. *Geophysical Research Letters*, 41, 6207-6212. doi: 10.1002/2014GL061047.
- 11) Arrigo, K. R., van Dijken, G. L., 2011. Secular trends in Arctic Ocean net primary production. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116. doi: 10.1029/2011JC007151.
- 12) Li, W. K. W. et al., 2009. Smallest Algae Thrive As the Arctic Ocean Freshens. *Science*, 326, 539. doi: 10.1126/science.1179798.
- 13) Doney, S. C. et al., 2009. Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192. doi: 10.1146/annurev.marine.010908.163834.
- 14) AMAP, 2013. AMAP Assessment 2013: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. viii + 99 pp.
- 15) Watanabe, E. et al., 2014. Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump. *Nature Communications*, 5, 3950. doi: 10.1038/ncomms4950.
- 16) Ding, Y. et al., 2016. Seasonal heat and freshwater cycles in the Arctic Ocean in CMIP5 coupled models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 2043-2057. doi: 10.1002/2015JC011124.
- 17) McLaughlin, F. A., Carmack, E. C., 2010. Deepening of the nutricline and chlorophyll maximum in the Canada Basin interior, 2003-2009. *Geophysical Research Letters*, 37. doi: 10.1029/2010GL045459.
- 18) Alvera-Azcárate, A. et al., 2016. Analysis of SMOS sea surface salinity data using DINEOF. *Remote Sensing of Environment*, 180, 137-145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.044>.
- 19) Mizobata, K., Shimada, K., 2012. East-west asymmetry in surface mixed layer and ocean heat content in the Pacific sector of the Arctic Ocean derived from AMSR-E sea surface temperature. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77-80, 62-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.005>.
- 20) Iwamoto, K. et al., 2014. Improved mapping of sea ice production in the Arctic Ocean using AMSR-E thin ice thickness algorithm. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 3574-3594. doi: 10.1002/2013JC009749.

4.6

テーマ
5

北極気候変動予測研究

4.6.1 全体概要

羽角 博康

気候の温暖化にともなって北極域環境は急速に変化し、その影響が全地球的な気候変動にもおよんでいることが示されつつある。北極域環境が今後どのように変化するかを知るうえで、それを構成する大気・海洋・雪氷などさまざまな要素がどのように相互作用しているかを明らかにすることが必要である。また、北極域環境がどのようにして北極域外の気候と関係しているかを知ることは、数ヵ月から数年先の気候変動の予測につながると考えられている。さらに、数十年以上にわたる長期気候変動の予測においても、グリーンランド氷床の融解による水位上昇など、北極域環境の変化を正しく評価する必要がある。本テーマでは、北極域に関連した気候変動の予測可能性評価を目的にした。そのなかでも大きくわけて、(A) 気候予測可能性の科学的基盤の確立、および(B) 中長期気候変動予測の手法確立を達成目標として研究に取り組んできた。

北極域の気候変動の影響は、我が国を含む北半球中緯度地域をはじめとして、地球上の全域におよぶ。北極域の気候を特徴付ける雪氷などに関わる過程は気候の状態に対して長時間のメモリーとして働きうるため、それが北極域外に影響する過程を理解することは全地球規模におよぶ気候変動に関して予測の高精度化や期間延長につながることを期待される。また、北極域は気候温暖化のなかでもっとも大きく変化している地域として知られているが、そのなかでも雪氷の変化は温暖化の加速や全地球規模気候の不可逆的变化に大きく関わりうる。達成目標(A)では、(A-1) 北極域の気候を大気・海洋・雪氷・陸面という各圏の相互作用(多圏相互作用)という観点から捉えたうえでその成り立ちや変動要因を解き明かす研究、および(A-2) 北極域の気候が北極域外の気候におよぼす影響、あるいは逆に北極域外の気候現象が北極域の気候におよぼす影響(遠隔影響)を解き明かす研究を実施してきた。(A-1)においては特に、海水変動が引き起こす北極域成層圏の応答や陸域過程をととした気候メモリーが気候変動およびその予測可能性にとって重要な役割を果たすことを示した。また、(A-2)においては特に、熱帯や南半球といった北極域からかけ離れた地域の気候が北極域の気候に影響する過程を解明し、それにもとづく気候変動の予測可能性の存在、あるいは逆に予測可能性の制限要因の存在を示した。なお、実際の気候現象においては、北極域における多圏相互作用が北極域と北極域外の間の遠隔影響過程の発端になるなど、両者が絡み合った結果が重要である場合が少なくない。したがって、これらの研究の大部分は相互に不可分

なものとして重なりをもって実施された。

気候研究には気候モデルと呼ばれる数値シミュレーション手法が広く活用されているが、従来の気候モデルには共通して北極域に大きな不確実性が存在している。達成目標(B)では、気候モデルにおける北極域プロセスの精緻化をととして北極域環境における多圏相互作用の実態を解明するとともに、気候モデルによるシミュレーション結果やさまざまな気候データセットの解析をととして北極域環境と全球気候の間の遠隔影響メカニズムを明らかにするための研究を実施してきた。また、気候予測にとって本質的に重要である気候モデルに観測データを同化する手法の開発、北極域を特に高解像度化した気候モデルの開発、気候モデルへの氷床過程の組み込みなどをととして、北極域気候の季節から数十年にわたる予測とその全地球規模気候への影響に関する研究を実施してきた。気候変動を考える場合には、人為起源の大気中CO₂濃度増加にともなう全地球的な気候温暖化と、それによらない自然な気候変動の部分を区別する必要がある。10年程度未満の時間スケールにおける気候変動においては気候温暖化よりも自然な気候変動の影響が大きく現れる一方、数十年を超える時間スケールにおける気候変動には全地球規模の気候温暖化傾向の影響が大きく現れる。そのため、本達成目標では、季節から数年程度の気候変動予測を主なターゲットとした(B-1) 中期気候変動予測と、数十年程度以上にわたる気候変動予測を主なターゲットとした(B-2) 長期気候変動予測のふたつの実施項目を設定した。ただし、連続する時間スケールのなかで両者が必ずしも厳密に区別されるものではないのはもちろんのこと、自然な気候変動の様相が気候温暖化傾向の影響を受けて変調するといった現象も生じている。その意味において、これらふたつの実施項目では重なりを持って研究・開発を実施してきた。

以下、本テーマで得られた主要な成果について報告するが、達成目標としている科学的基盤の確立や予測手法の確立は、我々に馴染みのある天気予報におけるそれらと同じく日進月歩に発展するものであり、本プロジェクト期間内で最終的な回答が得られるものでは決してないことをあらかじめ断っておく。本テーマで得られた成果はこれらの達成目標の実現に確実に寄与するものであるが、多様化しつつ精緻化が求められる社会的ニーズに対応するためには、これら成果をふまえたさらなる研究深化が求められる。

4.6.2 多圏相互作用過程

浮田 甚郎・佐藤 友徳・中村 哲・山崎 孝治
安成 哲平・山田 朋人・Enkhbat Erdenebat

はじめに

北極域気候システムを構成する大気・海洋・雪氷・陸域の多圏間に働く相互作用に焦点をあて、遠く離れた気候に対する遠隔影響のメカニズムを解き明かすことで、気候予測可能性について理解を進めることを目標とした。特に、近年北極で顕著

に起きている雪氷圏の変化にともなう北半球中緯度の気候・気象への影響について、北極大気の成層圏と対流圏の相互作用および北極域と熱帯間の南北方向の相互作用の重要性が示された。また、ユーラシア大陸中・高緯度の夏季における熱波の頻度が遠隔地域のひとつ前の冬季における積雪量に影響されること、北極海水の減少が中緯度地域の冬季における寒波をもたらす過程において陸域の蓄熱が効くことなど、北極域気候とその予測可能性における陸域の関与の重要性が示された。

成層圏 - 対流圏間の相互作用

GRENE 北極で実施した一連の研究により、北極の海水減少が東アジアを含むユーラシア大陸で低温偏差に影響するメカニズムとして、準定常ロスビー波の伝播による上空のシベリアトラフの強化、プラネタリー波の成層圏への伝播、成層圏極渦の弱化和対流圏への下方影響の要素からなる成層圏 - 対流圏間の相互作用過程が重要であるとの結果を得た (Nakamura et al., 2015¹⁾, 2016c)。

本研究ではこの成層圏 - 対流圏相互作用のより詳細な時空間特性を調べた結果 (Hoshi et al., 2017)、冬の前半にかけてバレンツ・カラ海域の海水減少にともなって成層圏下部で過熱フラックスが増加することで成層圏極渦の弱화가起きること (図 4-6-1)、また中央シベリアや東シベリアの両地域において、過熱フラックスが増加し気候値のパターンを強めることを明らかにした。さらに東西非一様成分 (波) として中央シベリア域では南北風偏差、東シベリア域では温度偏差が寄与していることがわかった (図 4-6-2)。

成層圏の極渦は、成層圏突然昇温 (SSW: Sudden Stratospheric Warming) として大きく変動することがよく知られている (Schoeberl, 1978²⁾)。我々のこれまでの主張は、北極域の海水変動にともなうプラネタリー波の強化により極渦が弱化するというプロセスであるが、極渦は SSW の影響を強く受けており、統計的にシグナルが正しく抽出されていない可能性があった。そこで、SSW を含む成層圏の極渦が弱くなるイベントに対して、海水が多いときと少ないときにわけて比較した (Hoshi et al., 2019)。その結果、Hoshi et al. (2017) で同定した時空間パターンが、海水が少ないときに顕著であることを明らかにした (図 4-6-3)。この結果は、SSW など極渦に大きな変動があるにも関わらず上で述べた海水変動にともなう影響がシグナルとして存在することを意味しており、近年の海水インパクトの一連の研究結果のなかで重要な位置を占める。

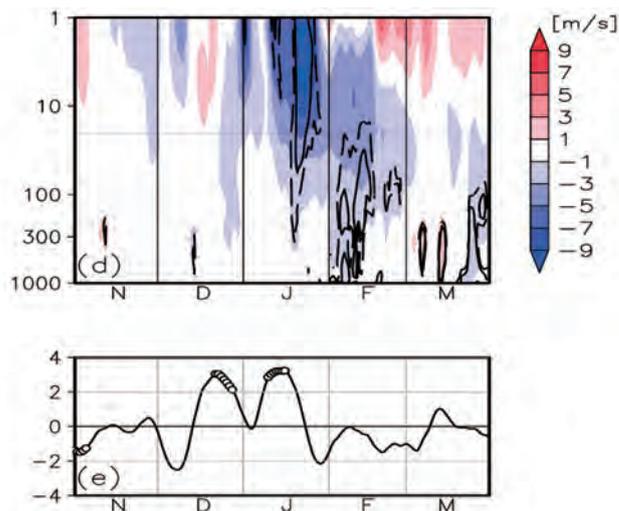


図 4-6-1. バレンツ・カラ海氷インデックスに帰属した、60° N における東西平均東西風の時間-高度断面図 (上図)、50 ~ 80° N で平均した 100hPa での過熱フラックス (下図、Km/s)

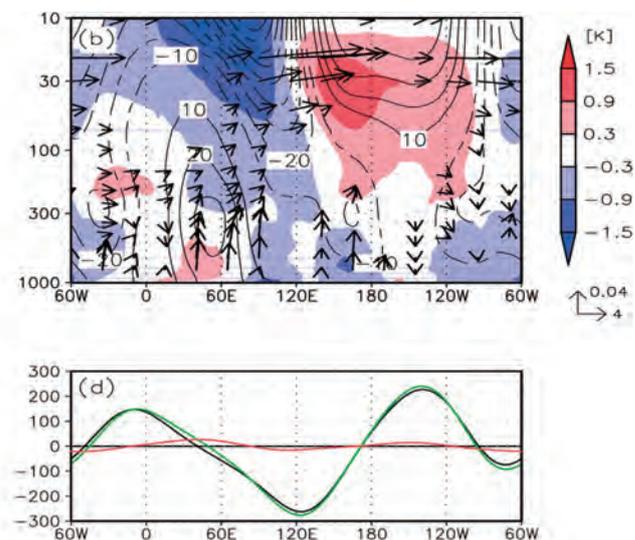


図 4-6-2. バレンツ・カラ海氷インデックスに帰属した、60° N のジオポテンシャル高度 (線)、気温 (色)、Wave-Activity Flux (WAF, 矢印) の経度 - 高度断面図 (上図)。60° N、100hPa におけるジオポテンシャル高度の東西非一様成分 (下図)。黒線は気候値、赤線はバレンツ・カラ海氷インデックス (-1σ) に帰属した成分、緑線はそれらの和。

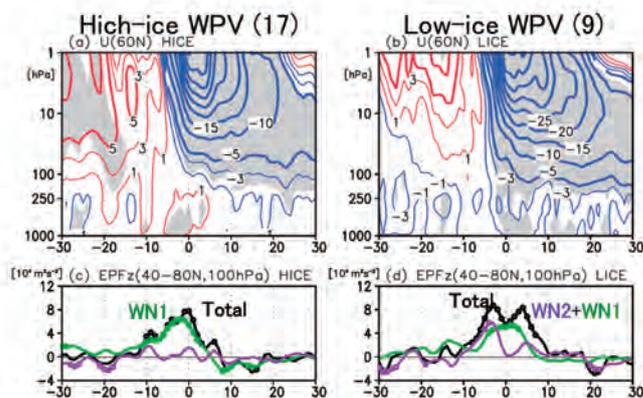


図 4-6-3. 上図：多氷時 (左図) と少氷時 (右図) でコンポジットした SSW を含む極渦が弱いイベントにおける、60° N での東西平均東西風の時間 - 高度断面図 (極渦が弱くなったタイミングが Day 0)。下図：そのときの 40 ~ 80° N で平均した 100hPa での E - P フラックスの鉛直成分の時間進行。黒線はトータル、緑線は波数 1 の成分、紫線は波数 2 の成分を示す。

北極 - 熱帯間の相互作用：オゾンと極渦変動

成層圏極渦の弱化和対流圏への下方影響は、子午面循環の重要性、すなわち北極 - 熱帯間の相互作用を示唆する。例えば、海水減少の影響として成層圏を経由する熱帯から極域への Brewer-Dobson 循環の強まりは北極域では非断熱加熱による北極大気の温暖化に寄与する (Nakamura et al., 2015¹⁾)。このことは、逆に熱帯から極域への遠隔応答の可能性を示唆している (例えば、Matsumura and Kosaka, 2019)。一般に熱帯から極域への遠隔応答を考える際にはエルニーニョ・南方振動 (ENSO: El Niño-Southern Oscillation) の影響が疑われるが、海水が成層圏極渦へ影響を与えることを考慮すると、Holton-Tan の関係 (Holton and Tan, 1980²⁾) として知られている成層圏準2年周期振動 (QBO: Quasi-Biennial Oscillation, Anstey and Shepherd, 2014³⁾) の位相と極渦の関係が重要であると考えられる。そこで、QBO の東風フェーズと西風フェーズにわけて海水と大気循環場との関係を調べた。その結果、QBO が東風フェーズのときに、プラネタリー波の成層圏への伝播が強まり、成層圏極渦の弱化和対流圏への下方影響につながり、ユーラシア大陸で低温偏差が出やすいという関係を見つけた (図 4-6-4、Hoshi et al., 投稿準備中)。

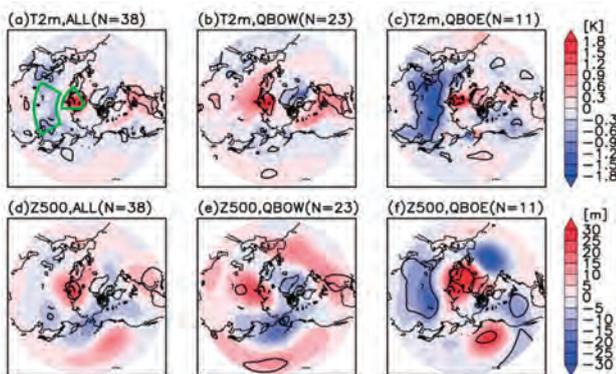


図 4-6-4. 12月のバレンツ・カラ海水インデックス (-1σ) に帰属した DJF 平均した 2m 気温偏差 (上段) と 500hPa におけるジオポテンシャル高度偏差。左列はすべて (38 冬) のサンプルを用いて計算。中央と右列はそれぞれ QBO が西風位相と東風位相のサンプルのみを用いて計算。黒線は 95% で有意な領域を示す (t 検定)。

熱帯 - 極域間の子午面でみられる Brewer-Dobson 循環は力学的に駆動されるが、オゾンなどの物質輸送にも深く関わっている。そこで、オゾンの動態を陽に反映させ海水の大気への影響がどう変わるかをシミュレーションした結果、オゾンを陽に表現することで、海水の大気への影響がより明瞭になることがわかった (Romanowsky et al., 2019)。この結果は、北極の変動の中・低緯度への影響評価にはハイトップな化学輸送モデルによるシミュレーションが必要であることを示唆しており、今後の北極研究にとって重要な知見である。

季節進行

図 4-6-1 が示すように、海水による大気への影響は晩秋に始まり、冬の後半において負の NAO/AO (North Atlantic Oscillation、

北大西洋振動 /Arctic Oscillation、北極振動) で特徴付けられる。本研究では、この季節・季節内進行について主に海外機関との連携による共同研究によってその詳細を調べた。例えば、Cresemann et al. (2017) ではクラスター解析を用いて、バレンツ・カラ海の海水が多い年に比べて少ない年では、冬の前半にスカンジナビア・パターンと呼ばれる循環場、後半では NAO/AO が負のパターンをとる割合が増えることを明らかにした。

また Tyrlis et al. (2019) では、大気のプロッキング現象に注目して再解析データを解析した結果、バレンツ海上空からウラル地方にかけてのプロッキング現象と海水の減少の間で有意な関係がみられることを明らかにした。また季節内進行として、このプロッキングの発現は初冬に起きやすいことを示し、上述のスカンジナビア・パターンとも関係していることを明らかにした。

マルチモデル比較実験

北極の海水変動が中緯度の低温偏差に寄与するかどうかは現在活発に議論されている。再解析データを用いた多くの研究では北極の海水変動と中緯度の低温偏差の間に有意な関係があることが報告されている。一方、数値実験の結果に関してはばらつきが大きく、再現性も含めて確証は得られていない。この状況を反映して、複数のモデルを用いた海水インパクト実験の比較が試みられている。我々のチームが最初に参加したマルチモデル比較実験からは、海水の影響はバックグラウンド・ノイズに比べて小さいという結果を得た。しかしながら実験手法を精査したところ、使用する海水データによる依存性、実験設定の問題などが指摘されており、海水のインパクトを検証するためにはさらなる実験が必要であろう (Ogawa et al., 2018; Nakamura et al., submitted; Smith et al., 2019)。

大気 - 陸面相互作用を介した中・高緯度における熱波の強化

北極の急激な温暖化が、中・高緯度の夏の異常気象の発生と関係していることが指摘されている (Coumou et al., 2018⁵⁾)。ユーラシア大陸の中・高緯度地域において、夏季降水量や地上気温の年々変動の偏差場や傾向に東西方向に走る波状パターン (図 4-6-5) がみられることが多くの研究で指摘されている。これらは、亜熱帯ジェットや亜寒帯ジェット上を準定常ロスビー波が伝播し、それが各年の夏の天候を決める要因であることを示唆している。さらに、数十年規模の夏の気温変化にも類似した波状パターンが現れることがいくつかの研究で指摘されており (Horton et al., 2015⁶⁾; Erdenebat and Sato, 2016)、準定常波は一定の期間のなかで特定の位相を持ちやすい傾向にあることを暗示している。大気の内変動がこのような特定の位相を繰り返すとは考えにくいと、陸面や海面等の強制が関連して波列の地理的な位置固定が生じている可能性がある。Sato and Nakamura (2019) では、AGCM による大規模アンサンブル実験のデータを解析することで、ユーラシア大陸上における過去の地上気温の偏差場に対する陸面過程の寄与を調べた。使用したデータは、気候変動リスク情報創生プログラムによる d4PDF (Mizuta et al., 2017⁷⁾) である。ここでは 1951 ~ 2010 年の 60 年分の過去実験 (100 メンバー) の月平均値を使

用した。夏季(6~8月)平均したユーラシア大陸周辺の地上気温分布(サンプル数6,000=60年×100メンバー)に対する主成分解析を行い、卓越する気温偏差パターンとその形成過程を解析した。

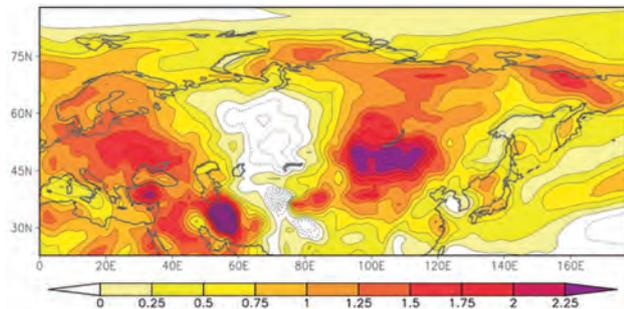


図4-6-5. 2000年代と1980年代の地上気温の差(6~8月)

ユーラシア大陸における過去の夏の気温変動の第1主成分として「地球温暖化に起因する気温変化」が、第2、3主成分として「自然変動に起因する気温変化」が抽出された。前者は、1990年頃を境にユーラシア大陸全域で昇温し、後者は観測された近年の傾向と類似した気温分布、すなわち高温域と低温域が東西方向に交互に連なる波列状のパターンを示した。第1主成分のスコア時系列は100メンバーが似た挙動を示すことから、海水温変動や外部強制にともなう地上気温の応答と考えることができる。一方、第2、3主成分のスコアはメンバー間で一貫性がみられないことから、大気陸面結合系の内部変動によるものと解釈することができる。

第2、3主成分のスコアで回帰した5月の土壤水分(図4-6-6)は、ロシア西部で湿潤偏差である。また、冬季の積雪水分量(図4-6-6)は同地域で正偏差を示していることから、春の積雪水量偏差や融雪後の土壤水分偏差が、準定常波の位相固定に影響していると考えられる。これらの結果をふまえると、近年、特定の地域において熱波が増加している背景として、ロシア西部の積雪水量の増加が関係している可能性が示唆される。この地域では実際に1990年代以降、積雪深の増加が指摘されており(Bulygina et al., 2009⁸⁾)、この解釈と整合する。

以上の結果から、冬の積雪偏差が融雪期の土壤水分偏差として持続し、それが季節を超えて夏の気温偏差へと影響を与えている。さらに、土壤水分偏差に対する夏の地上気温の影響は局地的なものに限らず、ユーラシア大陸北部の広い範囲へと伝搬する可能性がある。これらをふまえると、雪氷圏を内在する北極域の環境変化や、それに起因する大気-陸面相互作用の仕組みを詳細に理解することで、北半球中・高緯度の季節予報を改善できる可能性がある。さらに、全球気候モデルによる気候予測において、熱波などの極端気象の将来予測を行う際には、ここで述べた海洋-大気-陸面相互作用を適切に再現できるようなモデルを用いることが必須であるといえる。

陸面過程に着目した森林火災の予測可能性

上述した広域かつ長期間持続する熱波は、土壤の乾燥傾向

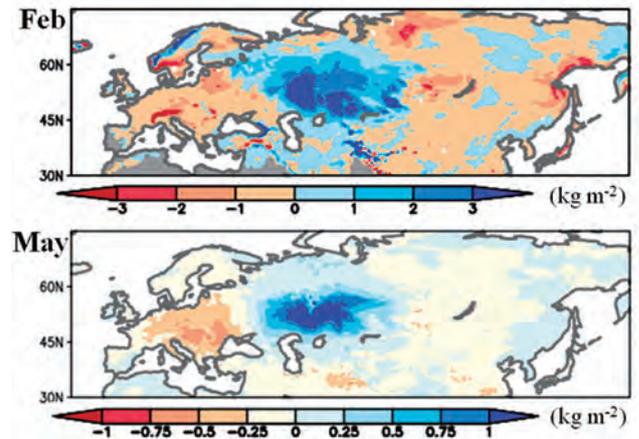


図4-6-6. 東西方向の波列状の気温パターンに関連した(上図)2月の積雪水量と(下図)5月の土壤水分の特徴

を強め、大規模な森林火災を誘発することがある。シベリア周辺を起源とする森林火災由来の大気汚染物質は、大気中を長距離輸送し、しばしば日本まで到達することが知られている。Yasunari et al. (2018a) では、シベリアでこのような大規模な森林火災が発生する際の環境場について解析を行った。図4-6-7(a)の衛星画像をみると、2014年7月25日の事例では、シベリア域のサハ共和国で森林火災が発生し、その煙が日本にまで輸送されている様子が確認できる。米国航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)が作成した全球再解析データMERRA-2から算出したPM2.5濃度の日平均値は、広範囲で日本の環境基準(日平均値 $35 \mu\text{g m}^{-3}$)を超えている(図4-6-7(b))。森林火災由来の煙の長距離輸送が同様に確認された2003年5月と2008年4月の事例をあわせて解析すると、これらの事例の環境場には次のような共通する特徴があることがわかった。森林火災が発生したこれらの年では、冬季から土壤表層が乾燥しており、融雪が早い。さらに、地上気温が平年より高く、夏まで土壤の乾燥化が継続していた。つまり、高温により融雪が早期化することと、土壤水の蒸発が促進されることで、土壤水分の少ない乾燥した状態が数ヶ月にわたって維持され、森林火災の発生しやすい環境を作っていると考えられる。

森林火災による煙の輸送経路については、総観場の影響が大きい。2014年7月の事例では、ロシア・アムール州の周辺に位置する負の高度偏差(トラフ)に対応して、反時計回りの循環がみられ、シベリアから北海道周辺にまで煙が輸送されやすい状況が形成されていた(図4-6-8)。このように、中央シベリアで発生する森林火災では、少雪や乾燥土壤など発生前の環境場に前兆がみられるのに対して、煙の輸送経路については、日々変化する総観場が関係している。つまり、火災が発生した時期に応じた代表的な輸送経路の推定は平均流を考慮することである程度の推定は可能なものの、実際の経路は日々の総観場に強く依存するといえる。

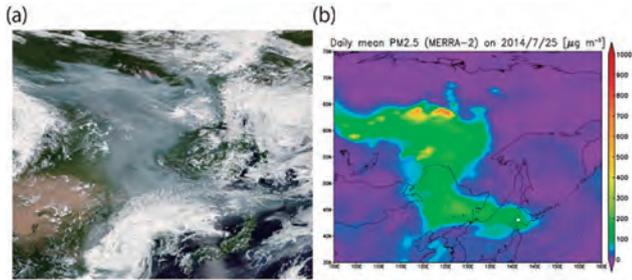


図 4-6-7. (a) Aqua 衛星によって捉えられた 2014 年 7 月 25 日の森林火災および煙 (NASA's Worldview website (https://worldview.earthdata.nasa.gov/) より)。 (b) MERRA-2 から算出された同日の日平均地上 PM2.5 濃度 ($\mu\text{g m}^{-3}$)。

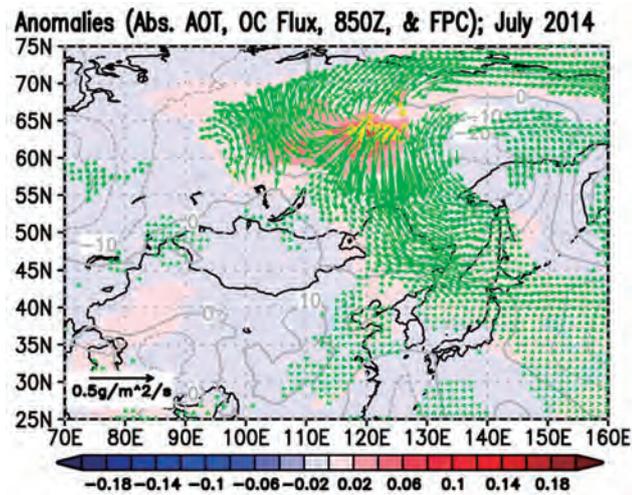


図 4-6-8. 2014 年 7 月における吸収性エアロゾル光学的厚さの年偏差 (カラー) および鉛直積算した有機物量の輸送量の年偏差 (矢印: $\text{g/m}^2/\text{s}$)。灰色等値線は 850hPa の高度場偏差 (m) を表す。

北極海の海水減少と中緯度の地域的寒冷化の関係における陸面過程の役割

北極海の海水減少は北極近辺のローカルな大気応答だけでなく、波動伝播を介して冬季の AO を負位相へと導く傾向をもたらすことがわかってきた (Nakamura et al., 2015¹⁾)。AO の負位相は極から中緯度への寒気流出を強めるとともに、極への大気熱輸送を強めることで極域の温暖化を加速する。一方で、海水減少が気候に与える影響については、気候モデルで再現される大気応答の不確か性が大きく、その頑強性が問題となっている。実際の海水変動と冬季大気場との関係として強く現れる AO 的な偏差パターンはそれ自体が極域増幅を強める正のフィードバックを持っていること、および北半球の地理特性を考えると、極域の昇温が海洋に、中緯度の冷却が大陸に蓄積され、気候メモリーとして長期的な傾向に影響している可能性が考えられる。そこで、Nakamura et al. (2019) では、この陸面による気候メモリー効果を検証し、極域増幅における役割を評価した。大気大循環モデル AGCM for the Earth Simulator (AFES) を用いた多氷ラン (1979 ~ 1983 年平均の海水を使用) および少氷ラン (2005 ~ 2009 年平均の海水を使用) の 100 年積分に加えて、各実験の 7 月 1 日時点の境界条件を差し替えた実験を行った。これらを相互比較することにより、海水減少に対する全応答 (Tot) を、海水減少に対する即時応答 (Sea Ice)、

および初期化される夏以前の応答が蓄積されたメモリー効果 (Mem) に分解した。

従来から指摘されてきたように、Tot は負の AO 的パターンとなる (図 4-6-9)。Sea Ice および Mem は、どちらも負の AO 的パターンとなり、Tot に対するそれぞれの寄与はおおよそ 6 割と 4 割程度と見積もられた。地表面付近の気温偏差 (図 4-6-9) は、Sea Ice では北極海の高温と東アジア域の低温偏差、いわゆる「Warm Arctic and Cold Eurasia (WACE)」パターンを呈する。Mem では北ユーラシア全域で低温偏差となっていることから、陸面に蓄積された低温偏差がメモリーとなって大気循環を駆動し、AO 的偏差パターンを作っていることが示唆された。陸上では、地温偏差や積雪偏差がメモリーの役割を担い、冬の気候応答を強めていると考えることができる。これらの結果から、気候モデルにおいて積雪や土壌プロセスなどの陸面過程を精緻化することで、北極海水減少と関連した中緯度の地域的な寒冷化を適確に再現できるようになることが期待される。中・高緯度地域の気候変動には内部変動の寄与が相対的に大きいことが知られている。ここで述べた成果は、これらの地域の気候予測において、正のフィードバック機構を持つ大気 - 陸面相互作用系の内部変動の寄与を適確に表現することが重要であることを指摘している。

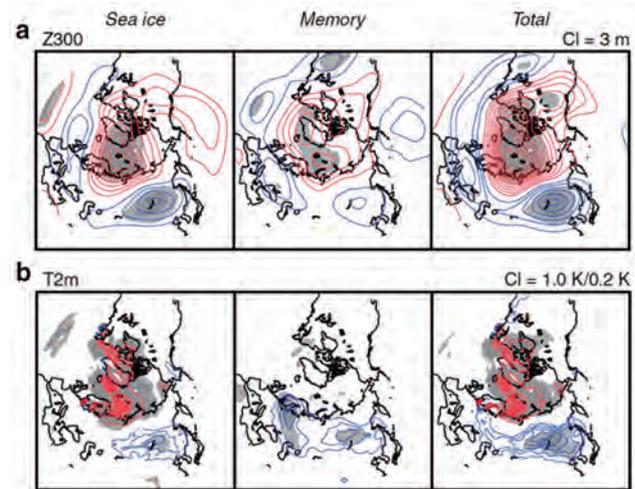


図 4-6-9. 海水減少に対する冬季 (12 ~ 2 月) の (a) 300hPa 面高度偏差および (b) 2m 気温の応答。左から順に即時応答 (Sea Ice)、メモリー効果 (Mem)、全応答 (Tot)。

4.6.3 遠隔影響過程

中村 尚・小坂 優・森 正人・田口 文明・西井 和晃・関澤 徳温

北極海の海水変動と中緯度域への遠隔影響

海水の急速な縮小をとともなう北極域の加速度的な温暖化とは対照的に、冬季ユーラシア大陸中央部から東アジア中緯度域では近年異常寒波や厳冬が頻発し、北極域とは逆に寒冷化が進んでいる。シベリア沖のバレンツ・カラ海で海水が減少するとユーラシア中緯度域で気温が下がるという観測データにもとづ

く相関関係から、地球温暖化による海氷域の縮小が異常寒波や厳冬の一因であることが示唆された。この仮説検証のため、AGCM による大規模アンサンブル実験が世界で数多く実施されてきた (Screen et al., 2018⁹⁾)。多くの実験では上記仮説を支持する結果が得られた一方、有意な関係を検出できなかったいくつかの研究は、近年の寒冷化は海氷減少に対する大気応答 (すなわち、地球温暖化の影響) ではなく、大気の内変動により偶然厳冬が続いているだけで結論付けた。こうして海水変動からの中緯度大気への影響の有無が世界的な論争となっている。また、海氷減少の影響を支持する研究でも、その定量的な評価はなされていない。

そこで我々は、海氷からの影響を定量化し、実験間で結果が異なる要因の究明のため、7つの異なる AGCM による現在気候再現実験の大規模アンサンブル実験データを解析した (Mori et al., 2019a, 2019b)。計 219 メンバーはいずれも 1979 ~ 2014 年に観測された海面水温 (SST)・海水密度度、ならびに温室効果気体などの外部強制により AGCM を駆動したものである。各 AGCM 実験で得られた地表気温 (SAT) 偏差のアンサンブル平均と冬季 (12 ~ 2月) に実際に観測された SAT 年間偏差との間に特異値分解解析を施し、両変動に共通する成分として外部変動の主要成分 (外部変動モード) を抽出した。これにより、観測データと AGCM 実験データ各々に含まれる外部変動モードの定量的比較がはじめて可能となり、大気モデルの再現性を定量的に評価できるようになった。

上記解析から、もっとも主要な SAT 外部変動モードとして WACE パターンが観測データとモデル双方で得られた。WACE パターンは地表のシベリア高気圧の変動をともなう (図 4-6-10 (a) (b) の H)。同高気圧の強化により、シベリア北東部で涵養された寒気がより強く南下し、中緯度域に低温偏差が形成される (図 4-6-10 (a) (b) の青色)。WACE パターンの年々変動はバレンツ・カラ海の海水密度度偏差と密接に連動する。海水が減る (増える) ときには、SAT が北極域で上昇 (低下) し、ユーラシア中緯度域で低下 (上昇) する明瞭な傾向が見出された。よって、バレンツ・カラ海の海水変動が WACE パターンを強制すると解釈できる。なお、AGCM アンサンブル平均にもとづく図 4-6-10 は、外部変動モードとしての WACE を表すが、アンサンブルメンバー間のばらつきの変動からも WACE パターンが得られる。これは海水変動とは無関係に形成される内部変動成分を表す。つまり、実際に観測される WACE の年々変動は内部・外部両変動成分から構成されるのである。

そこで、SAT 変動全分散への WACE の内部・外部両変動成分からの寄与を観測とモデルで比較したところ、どの AGCM も例外なく WACE による寄与を過小評価することが明らかとなった。これは図 4-6-10 (b) で WACE の振幅が特に中緯度域で観測より小さいことに反映される。また、分散の過小評価には外部変動成分のうち海氷に駆動される成分が寄与することも明らかとなった。これは観測に比べて AGCM では S/N 比が小さいことを意味し、実験間で海水減少の影響評価がばらつき潜在的な要因と考えられる。なぜなら、実験設定や解析手法、アンサンブルサイズを注意深く選ばない限り、海水減少が駆動する

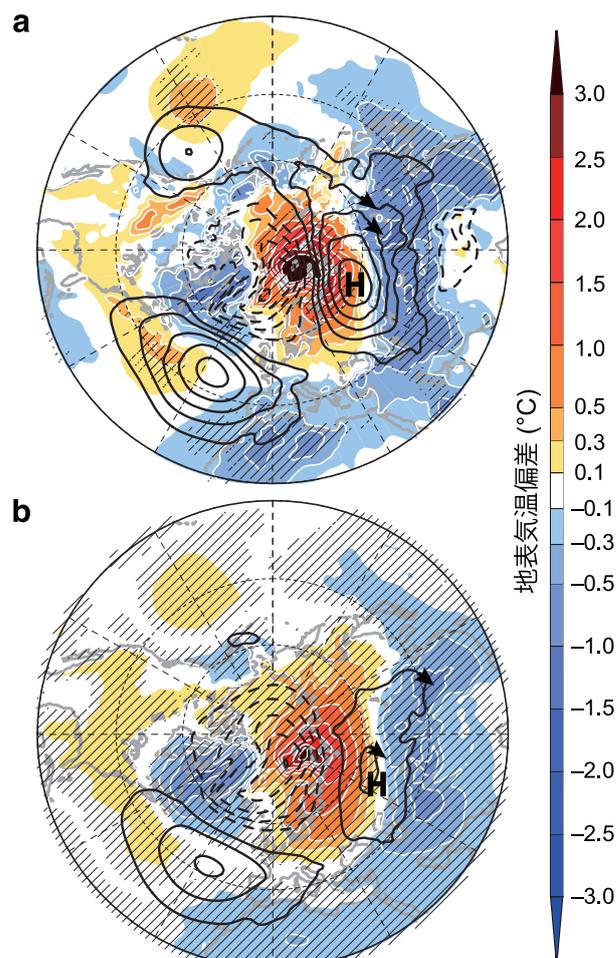


図 4-6-10. 特異値分解解析によって同定された、WACE パターンにともなう地表気温偏差 (色) と海面気圧偏差 (等圧線: 0.5hPa 間隔、破線は負値)。(a) 観測、(b) 大気モデル。ハッチは 95% 水準で統計的に有意な気温偏差を表す。

AGCM の WACE 応答 (シグナル) が他の影響 (ノイズ) により隠蔽されやすいからである。

また、最近 20 年間に観測されたユーラシア大陸中央部の寒冷化の約 44% (95% の信頼度で 32 ~ 51%) が、バレンツ・カラ海の海水減少に駆動された WACE パターンで説明されることを本研究がはじめて定量的に示した。一方、AGCM のアンサンブル平均場はこの寒冷化シグナルを再現できず、同様の解析を行った先行研究と合致した結果となった。これこそが「近年の寒冷化は海水減少の影響ではない」という主張の主要な論拠になっていたが、AGCM が海水減少の影響を過小評価するという本研究の結果をふまえて再評価が迫られている。実際、このモデル応答の振幅過少バイアスを補正したうえで変化傾向を求め直したところ、観測された変化傾向とよく似た応答が検出できた。この結果は海水減少が寒冷化の重要な一因であることを裏付けると同時に、海水減少への応答の AGCM での過小評価が研究間で海水影響の評価が異なる根本要因であることを強く示唆している。

熱帯太平洋の変動が北極域にもたらす遠隔気候影響

1990年代末から2010年代はじめにかけての全球平均したSAT上昇の停滞、いわゆる「ハイエイタス」に対し、熱帯太平洋に内在する長期変動「太平洋十年規模変動(PDV)」が重要な役割を果たしたことがわかってきたが、その寄与の定量的評価には大きな不確実性がある。我々はCMIP5に参加した21の気候モデルにおいて、熱帯太平洋SST変動にともなう①全球平均SATの経年変動よりも十年規模が強いこと、②この全球平均SAT変動の感度には十年規模で特に大きなモデル間不確実性があること、③この十年規模感度のモデル間の不確実性が特に高緯度域で顕著なことを示した(Wang et al., 2017)。このことは、PDVに対する極域の気温応答感度が、全球気温上昇や極域温暖化のアトリビューションにとって重要なことを示唆する。

このPDVに対する極域応答のモデル間多様性の原因を明らかにし不確実性を低減するには、まず熱帯太平洋変動が極域気温変動をもたらすメカニズムを解明する必要がある。そこで特に北極域に着目し、米国地球流体力学研究所の気候モデルCM2.1を用いてこのメカニズムを調べた。産業革命前固定実験(piControl)に加え、この実験結果を用いたペースメーカー実験も行なった。すなわち、モデルの熱帯太平洋のSSTを、piControl実験500年分のものへと緩和した。よって、両実験間で熱帯太平洋SST変動はほぼ一致する。

両実験とも、熱帯太平洋SSTの上昇にともなって北極域でSATが上昇する。この北極応答は経年・十年規模変動ともに季節性が強く、晩冬～初春に明瞭な極大を示す。熱帯東太平洋(15°S～15°N, 180～90°W)のSSTの1°C上昇あたりの北極域(60°N以北)でのSAT偏差は、先行研究と整合的に、周期10年以下の経年変動よりも十年規模変動で強い(ペースメーカー実験では約70%増加)。

次に、この時間スケール依存性に着目し、極域応答のエネルギー収支解析を行った。経年変動では両実験に共通して、熱帯太平洋のSST上昇に対する大気中の湿潤静的エネルギー極向き輸送の増大が極域昇温の駆動源である一方、海面熱交換や放射はこれを緩和するよう働き、海洋熱輸送の寄与は小さい。十年規模変動では対照的に、湿潤静的エネルギー輸送の寄与は副次的に過ぎない一方、上向きに転じた海面熱フラックス偏差が昇温の主要な駆動源になる。これは複数年持続する熱帯太平洋SST上昇への応答として、北極域で大気から海洋へ熱が受け渡され続けた結果、海水が減少して冬季に海洋からの熱放出が増えて大気を加熱するためと解釈できる。

このメカニズムに加え、piControl実験では北大西洋からの海洋熱輸送も北極域の気温の十年規模変動に重要な寄与を果たすこともわかった。大西洋には数十年規模変動が内在し、近年の研究はこれが海盆をまたいでPDVを励起する可能性が示唆されている(Cai et al., 2019¹⁰⁾)。この大西洋数十年規模変動は極域熱輸送にも影響するため、PDVに対する統計に混入したものと推察される。

さらに、バレンツ・カラ海周辺域で1990年代後半以降に観測された顕著な冬季温暖化および海水減少を調べるため、観測された全球SSTと海水密度を境界条件としたAFESによ

るAGCM過去再現実験(A-GOGA実験)と、大気海洋結合モデルCoupled Atmosphere-Ocean GCM for the Earth Simulator(CFES)において熱帯域のみ観測のSSTで束縛し、北極域を含む中・高緯度はモデル中で自由な大気-海洋-海水結合を許したペースメーカー実験(C-TOGA実験)を行った。熱帯での強制への応答を捉えるC-TOGA実験のアンサンブル平均場には、1997～2013年の期間で12～2月平均のバレンツ・カラ海周辺の昇温と海水減少傾向がよく再現された。加えて、観測されるWACEパターンに対応する対流圏上層の波列的な循環場偏差とユーラシア大陸上の寒冷化傾向もよく再現した。一方、減少する海水を境界条件に含むA-GOGA実験では、地表の昇温傾向は再現されたものの上層の循環場偏差とユーラシア寒冷化はやはり再現されなかった。以上の結果は、冬季における北極バレンツ・カラ海周辺の近年の昇温は、前述のように熱帯から北極への大気の遠隔影響に誘起され、局所的な大気-海洋-海水フィードバックで増幅された(Tyrlis et al., 2019)ことを示唆している。

北極域の対流圏-成層圏結合変動

北極海の海水変動が対流圏の循環変動を引き起こし(Mori et al., 2019a, 2019b)、それがプラネタリー波の上方伝播の変調を介して北極上空の成層圏極渦を変動させる可能性や、その極渦変動が環状モードと呼ばれる対流圏の卓越循環変動を引き起こす可能性が指摘されている(Nakamura et al., 2016c)。これら成層圏変動は持続性が高いため、海水変動への大気応答を織り込んでの季節予測の意義は高いものの、予測モデルで成層圏-対流圏結合変動を適切に表現することが求められる。

我々は、ECMWFの季節予測モデルの事後予測実験データにもとづき、冬季北極上空の成層圏極渦が極端に強化する事例(SVE: Strong Vortex Event)と弱化する事例(WVE: Weak Vortex Event)を抽出し、各々を持続期間により分類したうえで、循環偏差の合成図解析を行った(Orsolini et al., 2018)。後者は基本的に成層圏突然昇温に対応する。持続期間20日間以上のWVEとSVEは、各々正と負の位相の持続的な環状モード変動を対流圏に励起する傾向にあった。同様に、持続期間9日間以下の成層圏WVEとSVEも形成直後は対流圏に環状モードを励起するものの、その持続期間は短い。こうしたSVE(WVE)の持続期間の差異は、対流圏から成層圏へのプラネタリー波伝播の異常減衰(増幅)の持続期間に依存し、それは対流圏の準停滞性循環偏差の地理的位相や発生場所、そして持続期間に依存する。SVEでは、北米上での低気圧性偏差にともなって上方伝播するプラネタリー波が減衰する。持続期間が短い事例では、その後、北欧上空で高気圧性偏差が発達してプラネタリー波を増幅するよう働くため、プラネタリー波減衰が持続しない。一方、WVEでは北西太平洋上の低気圧性偏差にともなってプラネタリー波が増幅する。持続期間が短い事例では、この偏差が持続しないため、プラネタリー波の異常増幅も持続しない。こうした上部対流圏循環偏差からのプラネタリー波の増幅・減衰への影響は、偏差場と気候平均のプラネタリー波との干渉を通じて現れる。すなわち、気候平均の気圧の谷に近い北

西太平洋上の高気圧(低気圧)性偏差は、プラネタリー波全体を増幅(増減)する働きを持つ。一方、気候平均の気圧の峰に近い北緯上での高気圧(低気圧)性偏差は、プラネタリー波全体を増幅(減衰)する働きを持つ。以上の特徴は大気再解析データからも確認できる。このことは、この季節予測モデルが成層圏・対流圏力学結合を適切に表現できることを示している。

冬季東アジアモンスーンの変動と熱帯からの影響

冬季東アジアモンスーンを変動させる「西太平洋(WP: Western Pacific)」パターンは、北西太平洋上の対流圏中・上層に南北双極子状の気圧偏差をともなう遠隔影響パターンである。北に高気圧性偏差、南に低気圧性偏差をともなう位相では、地表のシベリア高気圧を強め、西日本を中心に寒波をもたらすと同時に、オホーツク海の海水変動にも大きな影響を与える(山崎, 2000¹¹⁾)。その一方で、オホーツク海の海水変動がWPパターンを強制する可能性も示唆されているが(Matthewman and Magnusdottir, 2011¹²⁾)、同パターンの維持・強制過程には未解明の点が多々残されている。

我々は月平均偏差場に現れるWPパターンの形成力学を調査し、同パターンは一旦形成されると、気候平均場の持つ気温傾度ともなう有効位置エネルギーを効率的に取り込むことで、散逸過程に抗して自らを維持できることを明らかにした(Tanaka et al., 2016b)。冬季には寒冷なシベリア大陸上と比較的暖かい北太平洋との間で東西気温差が生じる。WPパターンはこの気温差を解消するよう西向き熱輸送(すなわち、暖かい東風偏差と冷たい西風偏差)を対流圏下層に引き起こす(図4-6-11)。これにより、海陸気温差ともなう気候平均場の有効位置エネルギーを偏差ともなうエネルギーに効率的に変換しうることを見出したのである。これは南北の平均気温差を解消すべく極向き熱輸送を行う温帯低気圧の発達過程と類似している。実際、温帯低気圧ともなう気圧偏差の位相が高さとともに西に傾くと同様、WPパターンの気圧偏差の位相は高さとともに南に傾く。別の維持過程として、気候平均の亜熱帯ジェットからの運動エネルギー変換や、移動性高・低気圧からのフィードバック強制も特定されたものの、これらは有効位置エネルギー変換に比べると副次的である。一方、寒波吹き出し強化ともない、北太平洋から大気への顕熱と潜熱放出が増大する。これはWPパターンの持つ有効位置エネルギーを減少させるが、これを上述の過程が上回るため同パターンが維持される。つまり、WPパターンは一旦形成されれば背景場から効果的にエネルギーを変換し自らを効率的に維持できる「力学モード」であり、純粋な内部変動としては勿論、さまざまな外力によっても励起可能なのである。

持続的なWPパターンはENSOの遠隔影響として冬季に現れると考えられてきた(Horel and Wallace, 1981¹³⁾)。しかし、全球大気再解析データJRA-55にもとづく解析から、真冬の1～2月には北西太平洋へのENSOの影響が比較的弱く、夏季オーストラリアモンスーン(AUSM)の経年変動からの遠隔影響がWPパターンの形成に重要なことが明らかとなった(Sekizawa et al., 2018)。AUSMが平年より強い年には冬季東アジアモン

スーンを強化する位相のWPパターンに特徴的な南北双極子状の気圧偏差が現れやすい(図4-6-11)。南側の低気圧偏差にともなう日本付近の下層の北西風偏差はシベリアからの季節風強化に対応し、西日本や朝鮮半島に有意な低温偏差をもたらす一方、東風偏差が卓越するオホーツク海周辺では有意な高温偏差がみられる。よって、AUSMの経年変動からの遠隔影響として力学モードの性質を有するWPパターンが励起されると解釈できる。AUSMの強化は海洋大陸上空で南半球から赤道を越える局所的なハドレー循環を強める。それにとまなう極東上空での下降流の強化は北西太平洋上空に低気圧性偏差を形成するとともに、その北方にはロスビー波応答として高気圧性偏差も形成し、WPパターンの循環偏差を励起することもわかった。

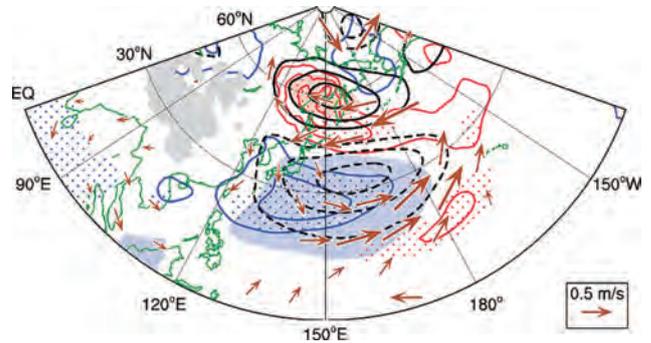


図4-6-11. AUSM降水量偏差に帰属した1～2月平均の500hPa高度偏差(黒実線: 正偏差、黒破線: 負偏差、5mごと)、850hPa気温偏差(赤線: 高温偏差、青線: 低温偏差、0.2°Cごと)、850hPa風偏差(矢印)。信頼水準95%以上で有意な高度気温偏差をそれぞれ陰影とドットで示す。解析期間は1958～2019年。

さらに、ENSOなど熱帯域のSST変動と相関しない1～2月平均の積雲対流活動はオーストラリア北部にて最大で、AUSMが自立的に変動することも見出した(Sekizawa et al., 2018)。AUSMの強化により、降水域に吹き込む東部熱帯インド洋上の西風が強まると、海面からの蒸発の増加が降水をさらに増大させようとする「風と蒸発のフィードバック」が働く。蒸発の増加にも関わらずSST低下がほとんどないのは、強化された西風が海洋のエクマン沈降(Ekman downwelling)を強め、亜表層を昇温させるとともに、この暖水偏差の一部が表層混合の強化により混合層内に取り込まれるからである。こうして風と蒸発のフィードバックが持続して降水増加を支える一方、降水増加によるオーストラリア北部での土壌水分増大も降水偏差の持続に寄与する。こうしたAUSMの自立的変動は、AUSM降水量の予測精度の低さを指摘した研究(Hendon et al., 2012¹⁴⁾)と整合的である。顕著で持続的なSST偏差をともなうENSOとは異なり、自立的なAUSM経年変動の季節的な予測は難しく、WPパターンにとまなう冬季東アジアモンスーン変動の季節予測可能性に制限を加えるものと考えられる。

4.6.4 中期気候変動予測

羽角 博康・木村 詞明・久保川 陽昌鎮・石井 正好・相澤 拓郎

はじめに

海水被覆の状態(面積、厚さ、氷縁位置など)は北極域の気候変動をもっとも顕著に表す指標のひとつである。海水の存在や変動は大気および海洋からの熱的影響のさまざまな側面を反映して決まるが、一方で海水の存在は大気および海洋の状態に大きな影響をおよぼす。したがって、海水被覆の状態は単に気候変動指標にとどまるのではなく、気候変動を能動的に形作る重要な要素である。さらに、海水の変動に端を発する大気・海洋の変動は、北極域外の気象や気候にも大きく影響することが明らかにされている。そのため、北極域の気候変動を理解し予測するためには、海水変動を理解し予測することが第1に重要である。そうした観点から、本実施項目においては、海水をひとつの焦点として、海水そのものの予測に向けた研究、海水変動に影響をおよぼす大気海洋過程の研究、および気候温暖化における海水の応答および役割に関する研究を実施してきた。以下、それぞれに関する成果の概要を述べる。

人工衛星による観測データを用いた北極海水の変動メカニズムの解析と海水厚推定への挑戦

北極海水の現状を理解し将来を予測するためには、海水変動過程の把握が不可欠である。人工衛星によるリモートセンシングは北極海全域スケールでの海水動態をモニタリングできるほぼ唯一の手法である。それにより、海水の分布については1970年代以降定常的に観測できるようになった。しかし、海水の厚さの観測手法は開発途上であり、高精度なモニタリングは実現できていない。この海水厚データの不足が、海水変動過程の定量的な把握を困難にしている。本研究では、北極海における海水変動の実態、特に厚さ変動の過程を明らかにすることと、その知見をもとにして独自の厚さデータセットを作成することを目的としている。その達成に向けて、海水の動きの長期変化の把握、海水の動きがもたらす厚さ変化の検出、海水の動きをもとにした海水中期予測の改良、多年氷分布データセットの作成、海水の履歴情報の導出と海水厚推定という観点で研究を実施した。以下にそれぞれの成果の概要を述べる。

海水の動きは風速によって変化し、風速との関係は海域や時間によって異なる。また、最近数十年は風速に対する海水漂流速度の比率(風力係数)が大きくなってきていることが指摘されている(Kwok et al., 2013¹⁵⁾)。2018年までの海水漂流速度データをもとに北極海全域での風速と海水漂流速度の関係を詳細に解析したところ、2010年頃までみられた風力係数の増加傾向が、近年みられなくなっている(海水が動きやすくなる傾向が止まっている)ことなどが明らかになった(Maeda et al., submitted)。さらに、後述の多年氷分布データセットを加えた解析により、多年氷の密接度と風力回数に相関関係がみられることがわかった。

海水の収束は氷盤同士の乗り上がりをもたらす、海水厚を増

加させる。そこで、2014年を対象にアラスカ沖ボーフォート海にJAMSTECが設置した超音波水厚計による海水厚の観測値と、海水漂流速度データセットから計算した海水の移流、収束・発散から予測される海水厚とを比較した。それにより、海水厚の変化を海水の動きによる力学的な変化と生成・融解による熱力学的な変化に分離することに成功し、力学的な過程が海水厚の変化に大きな役割を果たしていることを明らかにした。

GRENE北極の際から実施していた北極海水分布の中期予測を継続して行った。夏季の海水分布については冬季から春季にかけての海水の動きと夏季の海水分布との関係(Kimura et al., 2013⁶⁾)をもとにして、初期の海水厚を見直すなどの改良を進め、予測結果を毎年5・6・7月にウェブサイトとADSの「VISHOP」で公開した。また、夏季の海水の後退の早さと秋季の海水拡大時期に関係があることを明らかにし(Shiau et al., submitted)、その関係をもとに秋季海水分布の予測を行い、結果を公開した。

マイクロ波放射計データから計算した毎日の海水漂流速度を用いて9月の最小時の海水の動きを翌夏まで追跡することで、2003年以降の毎日の多年氷分布データセットを作成した。そのデータをもとに、2018年9月のアムンゼン湾口が厚い氷で塞がれた事例について解析を行い、観測された厚い氷が多年氷の流入によるものであったことを示した(Kimura et al., submitted)。

海水域上に粒子を10km間隔に配置し、日々の海水漂流速度をもとに日を遡って海水がない場所(生成場所)に達するまで軌跡を追跡した。それにより、それぞれの海水の生成日、生成場所、経路、収束・発散の積算値、熱収支の積算値などの導出が可能になった(図4-6-12)。さらに、これらのパラメーターと現場観測による海水厚変化との関係から、海水厚を推定するための解析を進めている。

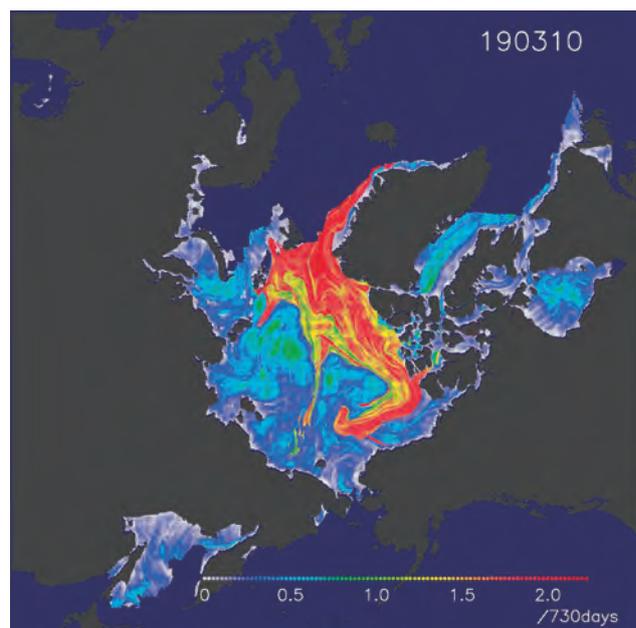


図4-6-12. 海水生成以降の海水収束の積算値(2019年3月10日の例)

上記の解析により、海水の動きの変化が海水の厚さを変化させる効果の大きさが明らかになった。また、それをもとにした海水厚推定ができる見込みが立った。これらの成果は、今後数値モデルの改良につなげることを目指している。モデル初期値や結果の検証に海水厚を用いるだけでなく、海水厚の力学的な増加過程の表現を改良することにより、高精度なモデルの構築を進めていく。

北極低気圧にともなう海水の急激な変化

2012年の北極海の海水面積は、観測史上もっとも減少した。海水がもっとも少ない9月と比較すると、2000年代にはおよそ600万km²あった面積が、2012年には400万km²以下しかない。この年の海水面積の減少は8月の中旬から始まっており、北極海に10日以上居座った北極低気圧が関係していると考えられている。Zhang et al. (2013)¹⁷⁾は海洋-海水結合モデルを使用して、この低気圧にともなう海水融解メカニズムを調べた。彼らは、北極低気圧の強い風にともない、深度15m近傍の暖かい水がかき混ぜられ、厚さにして約10cmの海水融解が生じたと説明した。現状、このメカニズムによる説明が広く信じられている。海水の厚さというのは、観測データがないため確認することができない北極海研究最大の問題ではある。しかし、10cm程度の薄い海水しかなかったのだろうか。別のメカニズムの影響はないのだろうか。本研究では、我々のグループで新たに開発した大気-海洋結合モデルと北極海の現地観測データを使用して、2012年の北極海の海水減少に対する北極低気圧の役割を再度検討し直した。

使用した数値モデル NICOCO は、大気部分 NICAM (Sato et al., 2014¹⁸⁾) と海洋部分 COCO (Hasumi, 2006¹⁹⁾) からなる。大気モデルと海洋モデルの水平解像度はそれぞれ56km、1度格子とした。大気モデルの初期値はNCEPの2012年8月3日を使用した。海洋モデルの初期値は、スピンアップした海洋データに、JRA-55による大気境界条件を適用しながら1958年~2012年8月3日まで積分したデータを用いた。これをコントロール実験とする。海洋モデルの水温が現実と比べ冷たいというバイアスがあるため、コントロール実験とは異なるふたつの海洋の初期値を用意した。ボーフォート海の深度10m以下(10m実験)および深度32m以下(32m実験)で観測データに対して水温と塩分を近づける処理をしながら8月3日まで1ヵ月程度積分したデータを作成した。これらの大気と海洋の初期値を用いてNICOCOを駆動し、12日間の積分を行った。また、観測データとしてIce-Tethered Profiler^{※1}を使用した。このデータは海水に取り付けた測器が深度およそ5mから800m付近まで上下する間に水温や塩分などを観測する。ボーフォート海近郊のデータを使用した。

コントロール実験と32m実験の間では海水厚や海洋から海水に向かって供給される熱フラックスに大きな差はないが、10m実験ではこれらに比べ大きな海水融解が生じており、その原因は海洋から供給される熱であった(図4-6-13)。水深10m近傍が現実同様に温かい場合には、海洋からの熱が海水融解に大きく影響することがわかる。この10m実験では北極低気圧の

通過後に約7cmの海水融解が生じており、先行研究と同程度であった。

上述したボーフォート海観測データは、シミュレーション対象とした北極低気圧の通過中や通過後については存在しないが、その前月に別の北極低気圧が通過した前後のものは存在する(通過中の7月13~20日にかけては欠損)。このデータを用いて北極低気圧通過前後の海面下における水温と結氷点を調べたところ、通過前には海面下の水温が結氷点よりも有意に高かったのに対し、通過後には海面下の水温がほぼ結氷点になっていた。この北極低気圧の通過中には海水面積が大きく減少しており、これは海面下の熱が海水の融解に使われたためと考えられる。それ以後、シミュレーション対象とした北極低気圧が接近するまでの間は、海面下の水温は再び結氷点よりも高く維持されている。もし、シミュレーション対象である北極低気圧の通過の際にも同様に海面下の熱が海水融解に使われたと仮定すると、融解量は厚さ約28cmに相当し、これはシミュレーション結果における海洋からの熱供給による融解よりもはるかに大きい。

低気圧通過などにより海に擾乱が与えられると海面から下方に向かって混合が生じ、その結果として海面下の熱が海面に運ばれる。数値モデルにおいては、海水が存在する場合にその直下の海面付近が結氷点に保たれるという制約をとまっている場合が多く、その場合には海面にごく近い深度(例えば10m深以下)に蓄えられる熱を十分に表現できない。ここでシミュレーション対象とした北極低気圧への海水応答に関しても、この理由によって融解が過小評価されている可能性が大きい。短期間の急激な海水変化を予測するうえで、海面にごく近い亜表層海洋の状態と変動プロセスに関する再現性向上は今後取り組むべき重要な課題である。

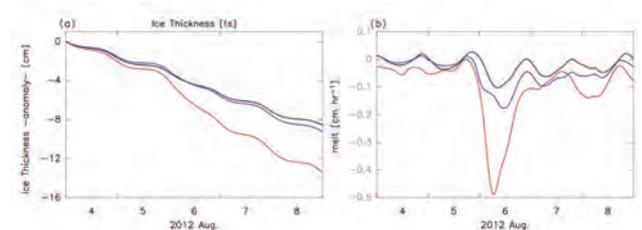


図4-6-13. (a) 海水厚と(b) 海洋から氷海に向かって供給される熱フラックスの時系列。黒線：コントロール実験、紫線：32m実験、赤線：10m実験。

気候温暖化実験にみられる季節から10年規模の海水変動

気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM2)は、中長期気候変動予測に資する次世代の全球気候モデルとして開発された。MRI-ESM2は、第6次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP6)に参加しており、より精緻な中長期気候変動予測を行うために、第5次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)に参加した前の全球気候モデル(MRI-CGCM3)から数多くの改良が施されている。気候変動予測の信頼性を高めるためには、過去の気候変動を精度高く表現できる気候モデルが必要不可欠である。北極域の気候変動は特徴的で、20世紀後半以降において全球平均と比較して2倍以上の速さで温暖化していることがよく知られているが、さまざまな観測データから20世紀

前半においても顕著な温暖化があったと推測されている。しかしCMIP5では、20世紀前半の温暖化は十分に再現されていないため、その気候変動の要因を評価することが難しかった。MRI-ESM2を用いて産業革命後の歴史実験を行い、歴史的な気温変化について北極域に着目して調べた(Aizawa et al., 投稿準備中)。MRI-ESM2では、北極域の歴史的な気温変動の再現性がMRI-CGCM3と比較してかなり向上した。よって、MRI-ESM2は気候変動要因をより詳細に分析可能なモデルであるといえる。

気候変動の要因を調べるため、MRI-ESM2を用いてさまざまな実験を行った。実験はさまざまな強制力を種類別に与えて過去の気候変化を再現したもので、すべての強制力を与えた歴史実験 historical に対し、人為起源の温室効果気体のみを与えた hist-GHG、人為起源エアロゾルのみを与えた hist-aer、自然起源強制(太陽活動と火山噴火)のみの hist-nat 実験である。historical は5メンバー、その他は3メンバーである。特に20世紀の北極域の気温変動と海氷変動に焦点をあてて分析を行った。本実験により20世紀前半における北極域温暖化に対しては、温室効果気体濃度の一貫した上昇に加えて、太陽活動の上昇および火山活動の沈静化が大きく寄与していたことが確認された。また海水は気温に対する感度が非常に高いため、20世紀前半は海水が通常より少なかったと推察される。衛星観測のない1979年以前の海水のデータは不確実性が大きいですが、最近の再構築データセットによると20世紀半ばの9月の海水面積は前後の期間と比較して小さい。すなわち、20世紀前半の北極域温暖化にともない海水面積は減少したと考えられる。本実験は気温変化の要因だけでなく、歴史的な海氷変動の要因も分析できる。図4-6-14は観測、historical、hist-GHG、hist-aer、hist-natの19世紀末～21世紀はじめを3期間にわたった海水面積の傾向を示している。観測は1885～1940年の間、明瞭な負の傾向を示し、historicalにおいても弱い負の傾向を示す。要因別にみると hist-GHG、hist-nat のどちらも負の傾向を示していることがわかる。19世紀末～20世紀半ばにかけて海水面積は、産業革命後の緩やかな地球温暖化に対応して減少し、一貫した温室効果気体濃度の上昇に加えて、自然起源強制も大きく貢献していることが明らかになった。また海水への自然起源強制の長期的な影響がこの期間にのみ出現することは興味深い。

次に中期的に海水に対して影響をおよぼす気候変動要因を調査した。産業革命前標準実験の結果を用いて夏季平均(7～9月)の気圧場に対して主成分分析を行い、AOと1種の双極偏差変動(ADA1)を抽出した。ADA1はポーフォート海に高気圧、バレンツ海に低気圧の変動パターンである。そのふたつの指数の大きさの組み合わせから、9月の海水面積の傾向をある程度予測できる可能性が示唆された(図4-6-15)。

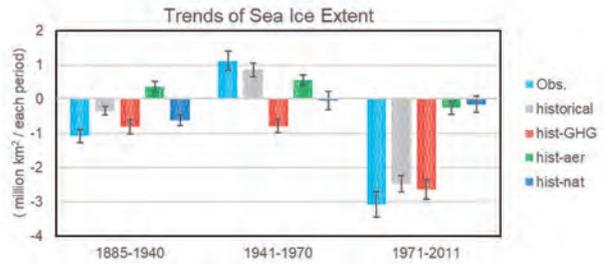


図4-6-14. 観測と各実験の3期間に対する海水面積の傾向と95%信頼区間

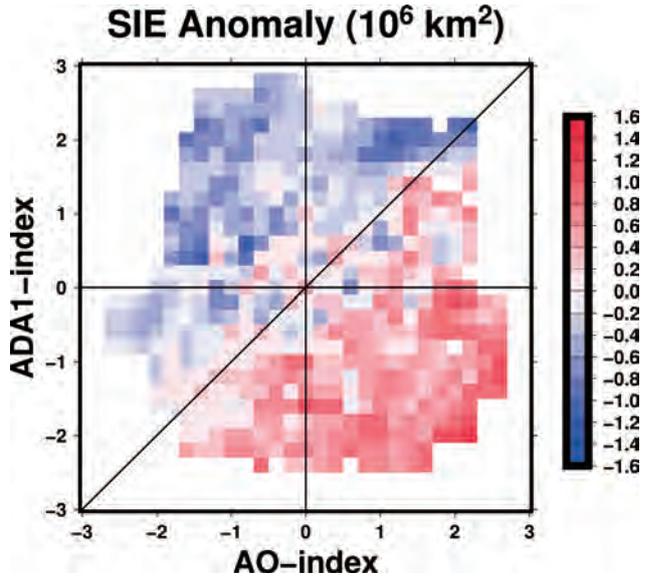


図4-6-15. 標準偏差で正規化されたAO指数、ADA1指数と9月の海水面積偏差の関係

4.6.5 長期気候変動予測

小室 芳樹・小野 純・阿部 学・齋藤 冬樹

はじめに

気候変動予測のなかでもより長期的なものは、初期の状態に比べ外部強制等に対する気候系の応答が相対的に重要になる。そのため、長期気候変動予測の精度向上には、単に初期値化にもとづく予測可能性を議論するだけにとどまらず、背後にある物理過程を理解し数値モデルの改善に資する知見につなげることが欠かせない。このような観点から本実施項目では、海水・雲と降水・氷床という3つのそれぞれに重要な過程に焦点を絞り研究を行った。以下、その概要を述べる。

北極海における海水面積の予測可能性—季節から経年スケールの海氷予測に重要なメカニズム—

観測にもとづいた再解析データ(気温、東西風、南北風、水温、塩分、海水密接度)によって初期値化した気候モデルMIROC5(Watanabe et al., 2010²⁰)を用いて、季節から経年スケールで変動する北極海における海水面積の予測可能性を評価し、予測スキルのソースとなる物理過程について調べた(Ono

et al., 2018)。冬季の海氷面積は11ヵ月前から予測可能であり、気候モデルによる1月開始の事後予測は観測された12月の海氷面積の経年変化をよく捉えている(図4-6-16(a))。これは先行する3月に北大西洋を起源とする亜表層水がバレンツ海に流入し、冬の鉛直混合にともなって海面に現れるという物理過程(reemergence)が寄与していることが示唆された(図4-6-16(b))。また、夏季の海氷面積は2~5ヵ月前から予測可能であり、北極海の太平洋セクターにおける海氷状態の熱的慣性(persistence)によると示唆された。

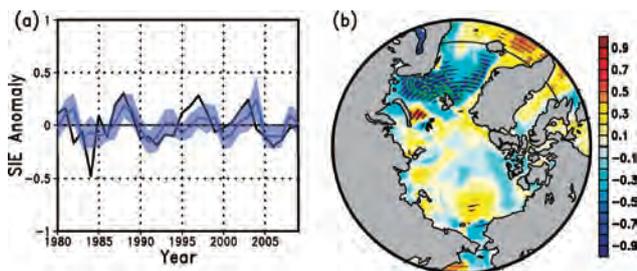


図4-6-16. (a) 1980~2009年までの12月の北極海の海氷面積偏差 (10^6 km^2 、黒線:観測、青線:気候モデルによる1月開始の事後予測、青陰影:アンサンブルブレッド)の時系列。(b) 12月の海氷面積偏差にともなう先行する3月の海洋熱量偏差の空間分布(色:相関係数、緑線:回帰係数)。

海氷大激減のメカニズムと予測可能性

季節から経年スケールの北極環境の予測可能性に関する国際プロジェクト APPOSITE の一環として、気候モデル MIROC5.2 (Tatebe et al., 2018²¹⁾) を用いて、内部変動にともなう海氷大激減のメカニズムと予測可能性を調べた (Ono et al., 2019a)。2000年の条件で固定した長期積分(コントロール実験)の結果から、北極海の海氷面積は急激に減少(200年間で3回)し、その大きさは現実で起こっている2007年に匹敵することが示された(図4-6-17(a))。この原因のひとつは夏の北極海上に形成される海面気圧偏差のダイポール構造にともなう風であるが、より重要なのは海水を冲向きに動かすような風系が形成されていることである。このような夏の大気循環偏差に加えて、春の海水厚負偏差と大西洋・太平洋からの熱輸送偏差にともなう北極海内部の温暖な状態(図4-6-17(d))が海氷大激減のプレコンディショニングとして作用していることが示唆された。また、アンサンブル予測実験から、このような9月の海氷大激減イベントは7月から予測可能であるが、4月からは海面気圧と氷縁に沿う海水の誤差が大きいため予測できないことが示された(図4-6-17(b)(c))。一方、本研究では、海面気圧偏差のダイポール構造がどのようなメカニズムで形成されるのかについては明らかにできなかった。今後は、気候モデルおよび海水-海洋結合モデルによる実験・解析をおとして、北極域外部の各種変動および海水厚が海水を含む北極環境変動の予測可能性に与える影響を調べ、中長期気候変動の予測精度向上につながる新たな知見が必要である。

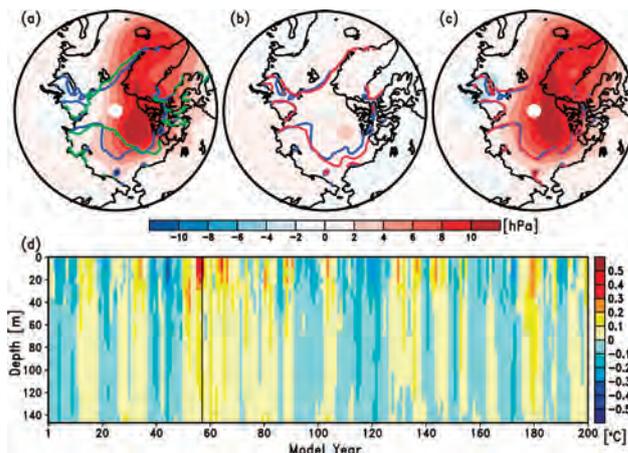


図4-6-17. (a) コントロール実験、(b) 4月開始の予測実験、(c) 7月開始の予測実験から得られた、夏(6~8月平均)の海面気圧偏差の空間分布(hPa)。曲線は9月の氷縁位置(青線:コントロール実験、赤線:4月および7月開始の予測実験、緑線:2007年の観測)を示す。(d) 北極海内部で平均された水温の鉛直分布の時系列(°C、200年間)。

CMIP5 マルチ気候モデルにおけるユーラシア北部の夏季降水量経年変動の主要変動パターン

ユーラシア北部では、降水量に関連する水循環の経年変動特性が地球温暖化やその影響によって変調している可能性が指摘されている (Fujinami et al., 2016²²⁾; Hiyama et al., 2016)。将来の気候変動予測に用いられるモデル群における、このような経年変動特性の変調や長期傾向の再現性は、北極域周辺の環境変化や局地的な極端現象の予測にとって重要である。しかし、気候/地球システムモデルにおける、ユーラシア北部の水循環の経年変動に関する再現性の評価やメカニズムの理解は不十分である。そこで、経年変動メカニズムの理解向上を目的として、気候/地球システムモデルにおけるユーラシア北部の夏季降水量の経年変動の空間パターンの再現性やモデル間の変動メカニズムの差異を調べ、モデルの不確実性を評価した。

CMIP5 の15個の気候/地球システムモデルによる、SSTや海氷の観測値を与えた過去の気候変動再現実験データを解析した。観測値として Global Precipitation Climatology Project (GPCP) の降水量データを用いた。解析期間は1979~2008年の30年間である。各モデルについて、シベリア域を中心としたユーラシア北部における夏季平均降水量データに EOF 解析^{*2}を適用し、経年変動の主要モードの時空間特性を抽出した。各モデルの上位3つの EOF モードの空間パターンに、GPCP における上位4つの EOF パターンを加えた EOF パターンに対してクラスター分析を適用し、空間パターンの類似性を基準にグループ化を行った。結果として、GPCP の4つの EOF パターンがそれぞれに含まれる4つのグループ(Cluster A、B、C、D)に分類されたので、それぞれの特性をまとめた。

Cluster Aに含まれる EOF パターンの特徴は東シベリアの正のシグナルである。ここには GPCP の EOF3 が含まれている。関係する大気循環場の特徴を調べた結果、このグループはシベリア域の東西ダイポールの循環場変動と関連しており、Fujinami et al. (2016)²²⁾ の EOF2 と類似する特徴を示した。Cluster Bに含まれる EOF パターンの特徴はシベリア域全体で

広く正のシグナルを持つことである。ここには GPCP の EOF1 が含まれている。ただし、このグループに含まれるモデルの EOF パターンは5つと少ないことから、多くのモデルが観測されるもっとも主要な変動特性を十分に再現できていないことを示している。Cluster C に含まれる EOF パターンの特徴は、シベリア中央部から西部に正のシグナルである。このグループの多くの EOF パターンには、シベリア中央部付近の低気圧性循環が関係していた。また、このグループの EOF パターンや大気循環の特徴は、Fujinami et al. (2016)²²⁾ の EOF1 に類似している。このグループに含まれている GPCP の EOF2 パターンとモデルの EOF パターンとの類似性は特に高く、空間パターンに限ればモデルの再現性がよい。Cluster D に含まれるモデルの EOF パターンの多くが各モデルの EOF1 である。それに対し、GPCP は EOF4 が含まれている (図 4-6-18)。これは多くのモデルが、観測値の EOF4 に類似するパターンをもっとも主要な変動の空間パターンとして持ち、現実とは異なる特徴を有していることを示している。ただし、この要因はわからなかった。

以上の結果をまとめると、15 個の気候 / 地球システムモデルから得られるユーラシア北部の降水量の経年変動の主要モードの空間パターンは、観測値から得られる経年変動の主要モードの空間パターンに類似している。しかし、多くのモデルが観測値の EOF1 の空間パターンを再現できておらず、共通して、観測値の EOF4 と類似する空間パターンをもっとも主要な変動の空間パターンとして持っていることが明らかになった。

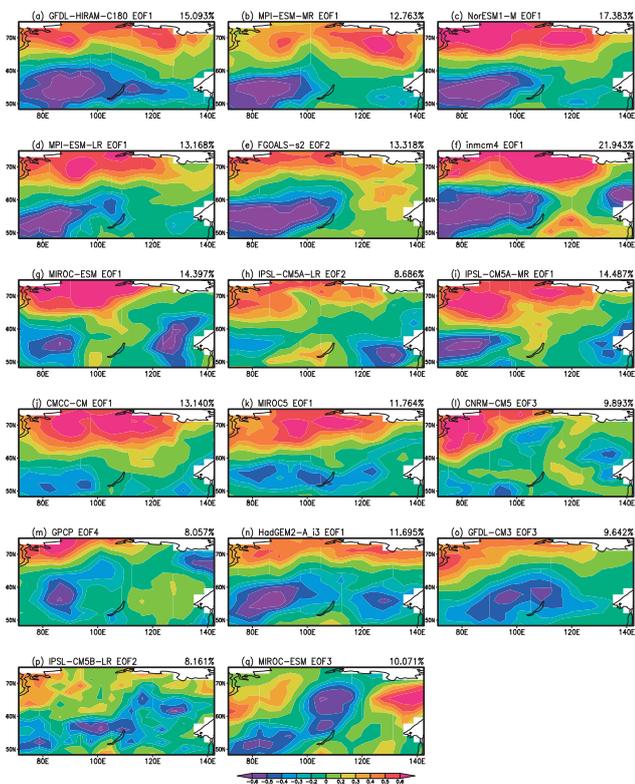


図 4-6-18. Cluster D にグループ化された EOF の空間パターン。各モデルの図の右肩に寄与率を示す。

気候モデル・氷床モデルを用いたグリーンランド氷床の温暖化応答の不確実性評価の試み

将来の長期にわたる海水準上昇には氷床変動による寄与の考慮が重要であると考えられている。CMIP6 の一環で、特に氷床に焦点をあてた Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6 (ISMIP6) では、IPCC-AR5 の際に行われた氷床モデル比較プロジェクト SeaRISE (Bindschadler et al., 2013)²³⁾ などや ice2sea (Gillet-Chaulet et al., 2012)²⁴⁾ などから発展し、複数の観点で相互比較を行うことが計画され、実行されてきた。グリーンランド氷床に関するものとしては、氷床の現在の状態の再現が温暖化実験に与える影響を明らかにする initMIP-Greenland (Goelzer et al., 2018) が ISMIP6 の一環で行われ、結果がまとめられた。

ISMIP6 のうち、Greenland 氷床に関するプロジェクトはこのほかに、表面質量収支モデルの相互比較 (SMBMIP) や、気候モデル結果を入力する ISMIP6 stand-alone、さらには、気候 - 氷床結合モデルによる ISMIP6 coupled などがそれぞれ計画・実行されており、いくつかは現在結果がまとめられているところである。本稿ではこのうち initMIP-Greenland の結果を報告する。

氷床モデルによる数十年から 100 年程度のグリーンランド氷床の温暖化応答計算の不確実性を決める要素は何かいくつかの研究で指摘されてきた。そのうちのひとつが、初期条件、すなわち現在の氷床再現の影響である (Nowicki et al., 2013)²⁵⁾; Saito et al., 2016a など)。しかし、多種多様な氷床モデルを用い、なおかつきちんと実験設定が制御されている場合での比較はなされていなかった。例えば Nowicki et al. (2013)²⁵⁾ では温暖化応答のシナリオが将来の気温変化で与えられ、実際の氷床モデルの入力である表面質量収支変動への変換には任意性があった。Saito et al. (2016a) の比較実験は単一のモデルを用いた結果であった。

initMIP-Greenland で与えられたシナリオ (氷床モデルへの入力) は表面質量収支変動で統一された。また、17 グループの 35 氷床モデルが参加し、現在の氷床モデルから考えられるほぼ最大の多様性があると考えられる。日本からは SICOPOLIS (北海道大学、Greve, 2019 など) と IcIES (東京大学大気海洋研究所・JAMSTEC、Saito et al., 2016a) がそれぞれ参加した。

3 つの実験がそれぞれのモデルで実行された。モデルごとに行う現在再現実験 (init) と、それに initMIP-Greenland で提供されたシナリオをそれぞれのモデルの現在の質量収支に加えた実験 (asmb)、および、質量収支を保った実験 (ctrl) である。比較結果のうち、現在氷床再現の誤差 (RMS) と再現された 100 年後の asmb と ctrl の氷床体積の差 (海水準換算) を図 4-6-19 に示した。この結果や、モデル構築の種別を含めて議論した結果、特に短期 (100 年程度) の氷床応答計算には現在氷床の再現が重要であることが確認された。

また、Nowicki et al. (2013)²⁵⁾ や Saito et al. (2016a) など指摘されているとおり、初期条件に加えて、シナリオ自体の不確実性もグリーンランド氷床の応答を決める重要な要素である。現在まとめられている関連プロジェクト SMBMIP や、

ISMIP6 のほかの実験によって、グリーンランド氷床応答の不確かさが包括的に明らかにされることが期待される。

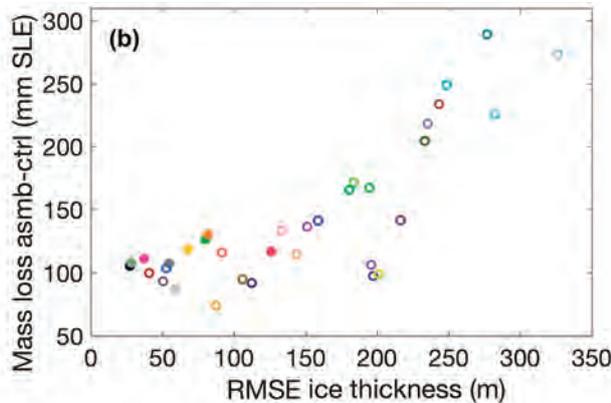


図 4-6-19. initMIP-Greenland による実験結果比較 (Goelzer et al., 2018)。現在氷床の誤差を横軸に温暖化による体積変動を示す。ひとつの点が個々のモデルを表す。

注:

- ※1 Ice-Tethered Profiler, <https://www.whoi.edu/website/itp/overview>
- ※2 EOFはEmpirical Orthogonal Functionsの略で、時系列データ(ここでは複数年の夏季平均降水量分布)から主要な変動成分を抽出する解析手法のこと。

引用文献:

- 1) Nakamura, T. et al., 2015. A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 3209-3227. doi: 10.1002/2014JD022848.
- 2) Schoeberl, M. R., 1978. Stratospheric warmings: Observations and theory. *Reviews of Geophysics*, 16, 521-538. doi: 10.1029/RG016i004p00521.
- 3) Holton, J. R., Tan, H.-C., 1980. The Influence of the Equatorial Quasi-Biennial Oscillation on the Global Circulation at 50 mb. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37, 2200-2208. doi: 10.1175/1520-0469(1980)037<2200:TIOTEQ>2.0.CO;2.
- 4) Anstey, J. A., Shepherd, T. G., 2014. High-latitude influence of the quasi-biennial oscillation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140, 1-21. doi: 10.1002/qj.2132.
- 5) Coumou, D. et al., 2018. The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. *Nature Communications*, 9, 2959. doi: 10.1038/s41467-018-05256-8.
- 6) Horton, D. E. et al., 2015. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. *Nature*, 522, 465. doi: 10.1038/nature14550.
- 7) Mizuta, R. et al., 2017. Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 1383-1398. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0099.1.
- 8) Bulygina, O. N. et al., 2009. Changes in snow cover over Northern Eurasia in the last few decades. *Environmental Research Letters*, 4, 045026. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045026.
- 9) Screen, J. A. et al., 2018. Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models. *Nature Geoscience*, 11, 155-163. doi: 10.1038/s41561-018-0059-y.
- 10) Cai, W. et al., 2019. Pantropical climate interactions. *Science*, 363, eaav4236. doi: 10.1126/science.aav4236.
- 11) 山崎 孝治, 2000. オホーツク海の海水面積と冬の気循環との相互作用. *雪氷*, 62, 345-354. doi: 10.5331/seppyo.62.345.
- 12) Matthewman, N. J., Magnusdottir, G., 2011. Observed Interaction between Pacific Sea Ice and the Western Pacific Pattern on

Intraseasonal Time Scales. *Journal of Climate*, 24, 5031-5042. doi: 10.1175/2011JCLI4216.1.

- 13) Horel, J. D., Wallace, J. M., 1981. Planetary-Scale Atmospheric Phenomena Associated with the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 109, 813-829. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0813:PSAPA W>2.0.CO;2.
- 14) Hendon, H. H. et al., 2012. The Role of Air-Sea Interaction for Prediction of Australian Summer Monsoon Rainfall. *Journal of Climate*, 25, 1278-1290. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00125.1.
- 15) Kwok, R. et al., 2013. Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 2408-2425. doi: 10.1002/jgrc.20191.
- 16) Kimura, N. et al., 2013. Influence of winter sea-ice motion on summer ice cover in the Arctic. *Polar Research*, 32, <https://doi.org/10.3402/polar.v32i0.20193>.
- 17) Zhang, J. et al., 2013. The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat. *Geophysical Research Letters*, 40, 720-726. doi: 10.1002/grl.50190.
- 18) Satoh, M. et al., 2014. The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi: 10.1186/s40645-014-0018-1.
- 19) Hasumi, H., 2006. CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0. CCSR Report No. 25, 103pp.
- 20) Watanabe, M. et al., 2010. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, 23, 6312-6335. doi: 10.1175/2010JCLI3679.1.
- 21) Tatebe, H. et al., 2018. Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean. *Scientific Reports*, 8, 14479. doi: 10.1038/s41598-018-32768-6.
- 22) Fujinami, H. et al., 2016. Trend and interannual variation in summer precipitation in eastern Siberia in recent decades. *International Journal of Climatology*, 36, 355-368. doi: 10.1002/joc.4352.
- 23) Bindshadler, R. A. et al., 2013. Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea level (the SeaRISE project). *Journal of Glaciology*, 59, 195-224. doi: 10.3189/2013JoG12J125.
- 24) Gillet-Chaulet, F. et al., 2012. Greenland ice sheet contribution to sea-level rise from a new-generation ice-sheet model. *The Cryosphere*, 6, 1561-1576. doi: 10.5194/tc-6-1561-2012.
- 25) Nowicki, S. et al., 2013. Insights into spatial sensitivities of ice mass response to environmental change from the SeaRISE ice sheet modeling project II: Greenland. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118, 1025-1044. doi: 10.1002/jgrf.20076.

4.7

テーマ
6北極生態系の生物多様性と
環境変動への応答研究

4.7.1 全体概要

平諱 享・内田 雅己

本テーマの背景と目的

北極域は、温暖化による温度上昇がほかの地域と比較して著しく高いと予測されており、実際の北極海の海水減少は予測以上の速度で進行している (Stroeve et al., 2007¹⁾)。

北極海域では、生息する生物のシフトや食性の変化が懸念されているが、そのメカニズムには不明な点が多く、今後の海洋生物資源の持続的利用と生物多様性の保全のため、北極周辺各国のみでなく国際的に取り組むべき喫緊の課題となっている。また、低緯度域を起源とする汚染物質が北極の海洋生物に取り込まれている可能性も報告されており、食物網をととしてより高次の生物に濃縮することが懸念されている (Wania and Mackay, 1996²⁾)。

また、北極圏植物相・動物相保存作業部会 (CAFF: Conservation of Arctic Flora and Fauna) の 2013 年の報告書 (CAFF, 2013³⁾) にあるように、北極に生息する生物相の全容解明には、まだほど遠い状況にあり、生態系の構造や機能、生態系サービスなどについても不明な点が多く残されている。さらに、温暖化や人間活動の変化が北極の生物多様性にとって大きな脅威となってきた。北極の生物多様性を保全するためには、現状の生物多様性に関する調査やモニタリングを実施して科学的情報を収集し、それらの情報から生物多様性に対する理解を深め、現在および将来起こりうる脅威が生物多様性に与える影響を見極めて対策を講じることが非常に重要となっている (Barry and Price, 2015⁴⁾)。

こうした背景から、本テーマでは環境変動と人為的インパクトに対する北極海生態系の反応メカニズムの評価、ならびに、主に陸域・湖沼を対象にした生物多様性の変化の評価・理解を目的とした。

実施内容

本テーマでは、上記の目的達成のためにふたつの研究課題をおいた。以下、研究課題ごとに、より詳細な背景、目標、実施項目、成果概要等について述べる。

<研究課題1: 環境変動と人為的インパクトに対する北極海生態系の反応メカニズムの評価>

○背景と目標

これまで、寒冷、海水といった極域海洋独特の環境によって保たれてきた北極海とその縁辺海は、温暖化と海水減少などの

劇的な変化に曝されている。それらの環境の変化は、生息する生物の生産や食物連鎖に影響を与え、生物相のシフトや多様性の変化が引き起こされると考えられている (例えば、Grebmeier et al., 2006⁵⁾; Doney et al., 2012⁶⁾)。現在、人類が利用している海洋生物 (例えば、食用としている魚類など) の多くは亜寒帯海域に生息しているが、温暖化や海水減少はそれらの生物をより北側へシフトさせる、あるいは、減少させる可能性もあるため、北極海とその縁辺海における生物資源の持続的利用と生物多様性の保全は、AC 作業部会の重要な課題であり、北極周辺各国のみならず日本を含め国際的に喫緊の課題である。さらに、北極海とその縁辺海は油田開発や漁業に加え、最近の北極航路開発によって、いままで以上に人間活動に曝される機会が増加し、それら人為的行為は北極海に存在しなかった物質の持ち込みや生物の侵入にもつながる。しかしながら、北極海と亜寒帯海域のインターフェースにおける生物のシフトや人為的インパクトの影響には未解明な点が多く、生物資源の持続的利用と生物多様性の保全のための施策を講じることを困難にしている。

そこで、研究課題1では、現在人間活動が活発な亜寒帯海域と隣接する北極海域において、海水減少や水温上昇といった環境の変動、および漁業や海洋汚染、北極航路開発などの人為的インパクトに対する北極海生態系の反応メカニズム、特に生物生産の応答を明らかにすることにより、近い将来の生物資源の持続的利用と保護に関する提案を行うことを最終目標とした。また、複合的な衛星データプロダクトを利用して、海洋生態系の脆弱性を評価する手法を開発し、環境変化に対する影響を評価することも目標とした。

○対象海域と実施項目

本研究課題の対象海域は、南チュクチ海、北ベーリング海およびアナディール湾 (ロシア領海) である。これらの海域は極めて生産力が高い陸棚域であり、アナディール湾から流れる水塊がその生産力を支えていると考えられている。しかしながら、その栄養塩供給機構や生産された有機物の輸送、さらにその有機物を利用する生物との関係や時間変化については未知な点が多い。また、海洋生態系の脆弱性についての知見は皆無である。これらの評価と理解のため、国内外の研究船や練習船を用いた船舶観測・実験に加え、係留系や衛星観測も利用し、以下の項目について研究・活動を実施した。

[1-1] 栄養物質供給機構とその変動

[1-2] 基礎生産と有機物フラックス・二酸化炭素との関係

[1-3] 環境・有機物フラックスの変動が消費者の分布・生態に与える影響

[1-4] 汚染物質の生態系への影響

[1-5] 衛星による北極圏環境と海洋生態系変動の評価

[1-6] MPA、北極生物資源管理に関する情報提供

○成果概要

本研究課題の遂行に必要な海洋地球研究船「みらい」(2016・2017・2019年)、練習船「おしよろ丸」(2017・2018年)、ロシア研究船「Multanovskiy」(2018年)、米国砕氷船「Healy」

(2016年)、アラスカ大学砕氷船「Sikuliaq」(2017年)および韓国砕氷船「Araon」(2016年)による航海は、すべて予定どおり実施または参加し、海洋観測・海洋生態系調査を実施した。

実施項目 [1-1] から [1-4] の研究は、主に上記の新規観測データと過去の観測データを用いて進められた。[1-1] では、栄養塩動態解析の基本となる水塊解析の高度化、海水中の栄養物質の動態などが明らかとなり、ロシア研究船観測では、高い生産の維持に寄与するアナディール水の詳細を捉えることのできる貴重なデータを取得した。[1-2] では2系の係留系を2年間にわたりベーリング海峡に設置し、海底有機物の巻き上げが観測され、その下流となるチュクチ海への有機物の輸送が示唆された。[1-3] に関しては、植物プランクトンから魚類や海鳥といった高次生物まで、環境変化に対する移動や北方シフトが明らかとなった。特に2018年には海水の激減やベーリング海海底の低温水(cold pool)が縮小したことによる大きな変化が観測された。[1-4] では、一部の海底堆積物の石油汚染(マイクロプラスチックを示唆)や海鳥による揮発性汚染物質濃縮を示唆する結果が得られた。一方、実施項目 [1-5] の研究は主に衛星データを利用して進められ、河川からの熱輸送量増加、水産生物の生息域の変化が明らかとなった。また、脆弱性の評価も行われ、今後の国際的な関連部会において海洋生態系保護区や航路回避海域等の提言を行う際の根拠を提示することが可能となった。

これら一連の研究は、UAFのArctic Shelf Growth, Advection, Respiration and Deposition (ASGARD) プロジェクトやNOAAのDistributed Biological Observatory (DBO)の協力のもとで実施されているが、アナディール湾の海洋観測や汚染物質など、米国のプロジェクトで取得していないデータも本プロジェクトで得ている。一方、本プロジェクトの研究の一部はDBOやPacific Marine Arctic Regional Synthesis (PacMARS)など米国のデータを利用して実施した。今後も共同研究がさらに発展することと期待される。

さらに、実施項目 [1-1] から [1-5] の研究により得られた知見は、同 [1-6] の生物資源管理に利用された。特に中央北極海無規制公海漁業防止協定の制定や中央北極海の水産に関するレポートを作成する際、North Pacific Marine Science Organization (PICES)、Ecosystem Studies of Sub-Arctic and Arctic Seas (ESSAS)、Integrated Marine Biosphere Research (IMBeR)を通じてさまざまな形で寄与することができた。また、テーマ4および7との連携研究である「水産資源変動の経済学的影響評価」では、[1-5]の成果が水産資源の将来予測に活用された。成果の詳細は各研究の報告を参照されたい。

<研究課題2：北極生態系の生物多様性研究>

○背景と目標

CAFFが2013年に出版した北極域における生物多様性の現状に関する報告書(CAFF, 2013³⁾)によると、大型の哺乳類や鳥類などは目視で観測・観察が可能のため、種レベルでの多様性の情報はほぼ網羅されている状況であるが、目視では観察できないような土壌中に生息する微生物などでは、種レベルでいまだ同定できていないものが多く、生物相の全容解明にはほど

遠い状況にある。したがって、生態系の構造や機能、さらには食料、薬品、光合成による酸素の供給など人類の利益となる生態系サービスについても現状を把握できていない。北極域では急激な温暖化が進行しており、ツーリズムや北極航路の利用など人間活動が北極の生物多様性にとって大きな脅威となってきたことが問題となり始めている(Meier et al., 2014⁷⁾)。

北極の生物多様性を保全するためには、生物多様性の現状把握やモニタリング等によって科学的情報を収集し、生物多様性の理解を深め、現在および将来起こりうる脅威を考慮することが非常に重要となる。

そこで、研究課題2では、大型哺乳類であるトナカイ、CAFFにおいて積極的に調査されている海鳥、CAFFでは考慮されていないが海洋生態系では高次捕食者でありその生態が未解明なニシオンデンザメ、陸上の植物と微生物、そして湖を対象とした生物多様性に関する情報を収集し、生物多様性の現状把握、生態系機能の解明および先住民や船舶など人間活動が生物に与える影響を解明するとともに、一部の研究課題では政策決定者向けの保全策を提供することを目標とした。

○調査地と実施項目

[2-1] シベリア北極域における移動性鳥獣の生態調査

[2-2] ベーリング海北部で繁殖する海鳥の生態調査

[2-3] ニシオンデンザメの生態調査

[2-4] 北極圏陸域における生態系機能 - 生物多様性の関係の実態把握

[2-5] 湖沼生態系の構造・環境把握

CAFFで指摘されている重要項目を調査することに加え、植物病原菌、菌類の生物多様性、生態系における生物多様性の維持機構とそれがもたらす機能の規定要因、さらに日本から北極航路を利用する際に必ず通過するベーリング海峡を利用している海鳥の行動解明等を実施した。調査地はロシアのサハ共和国、アラスカのセントローレンス島、カナダ東部の北極域と広範囲にわたった。

○成果概要

サハ共和国では、野生ツンドラトナカイ、ジャコウウシ等を対象に行動の調査手法開発、行動調査、それにもとづく保全施策の検討・提言を寒冷圏生物問題研究所(IBPC: Institute for Biological Problems of Cryolithozone)との共同研究として実施した。野生トナカイについては、衛星発信機を改良し、これまで行動を追跡できなかった冬季のデータの取得に成功した。冬季は猟期のため、保護区域の設定をサハ共和国政府に提言し、順応的管理が行われるようになった。ジャコウウシについては、捕獲方法を確立し、個体数の把握や発信機の装着による行動把握につながった。この成果により、非北極国で初のCAFFのジャコウウシ専門家グループのメンバーとなった^{*1}。

ベーリング海における海鳥の行動調査は、UAFとの共同研究体制で実施し、夏の繁殖時期における詳細な行動および通年の移動軌跡のデータ取得に成功した。本プロジェクト実施期

間中に CAFF の専門家グループである Circumpolar seabird Expert Group (CBird) のメンバーになり、CBird でカバーされていなかったベーリング海の海鳥の研究成果を直接インプットすることに成功した。また、セントローレンス島住民へも研究成果の報告を実施し、海鳥の保全について考えてもらう機会を作った。さらに海鳥の行動範囲と航路との関係についても調査し、海鳥保全のために必要な船舶航行制限海域について、現在の制限海域を広げる必要があることを示した。

ニシオンデンザメの研究は、カナダのウィンザー大学との共同研究体制で実施した。本種は体長6mにもなり、寿命は200年以上と推定されている。本種はカラスガレイ延縄漁の際に多量に混獲されることが大きな問題となっている。そこでバフィン島周辺海域で本種を延縄漁で捕獲し、その後の行動をバイオロギングの手法を用いて調査した。調査時は先住民を雇用し、研究に直接関わってもらった。本種は放流直後沈降していったが、その後泳ぎ始め、5～10時間後にはほぼ正常な行動が確認できた。漁で混獲された際には、水中で針付近の仕掛けを切断するなど負荷をかけない方法を用いることが本種の保全につながることをカナダ水産海洋省 (DFO: Fisheries and Oceans Canada) に提供予定である。また、日本国民にも本種のことを知ってもらうため、一般書を執筆、出版した (渡辺, 2019)。

植物および微生物の研究は、カナダのラバル大学、ケベック大学との共同研究体制で実施した。未解明な部分の多い微生物 (真菌類) については、カナダ高緯度北極の氷島の水底から採取した試料および氷河上とその後退域から採取した試料から計4種の新種を発見した。氷河後退域で発見した新種は、国内外の多くのメディアで取り上げられた。

植物病原菌は植物や生態系に影響する可能性があるが、北極域では実態がほとんどわかっていない。そこで、ヤナギなどに寄生する *Rhytisma* 属菌の生理・生態的特性を解明した。さらに炭素循環に与える影響についても調査したところ、感染率の増加が炭素循環に与える影響は無視できないレベルに達することを明らかにした。本成果は国際誌に投稿するとともに専門書としても出版した。

生態系機能-生物多様性に関する研究では、カナダ・ハドソン湾東海岸に位置するツンドラと森林のエコトーンで調査を実施し、低木種間の正の相互作用によって低木種の分布が拡大し、その拡大がさらに低木種のツンドラへの侵入を促進するフィードバック効果があることを明らかにした。また、エコトーンでは植生と土壤微生物相との間に関係性のあることがはじめて明らかになった。これらの成果は ISAR-6 や CEN 主催のシンポジウムで発表するとともに、最終報告書をカナダの先住民機関に提出する予定である。

ラバル大学との共同研究体制でカナダ最北部のワードハント湖の研究を実施した。この湖は通年湖水に覆われていたが、最近湖水の厚さが減少し、ついには夏季融解する年も観測され始めた。湖水融解が湖の環境や生態系に与える影響を通年で観測するため、本プロジェクト期間中に係留系を設置し、湖沼環境およびクロロフィル濃度を測定した。その結果、湖水の融解により、水温が大きく変動することやクロロフィル濃度が夏と秋に上

昇することがはじめて明らかとなった。本成果は極域科学シンポジウムで発表するとともに、国内で一般向けの講演で紹介した。

まとめ

研究課題1では、北ベーリング海陸棚域の高い生産力を維持するプロセスや、環境変化に対する海洋生物の応答 (移動、シフト) について、過去の報告以上に詳しく理解することができた。また、汚染物質の影響も評価することができた。今後の変化に対する予測を行うには、各プロセスについてより一層の理解を要するが、いずれの成果も科学的に重要であると同時に、将来の北極海生態系保全と水産資源管理に関する意思決定の際に必要な知見となったと考えられる。

研究課題2では、さまざまな生物種を対象にした調査・研究により新たな知見が得られた。分野によっては CAFF 専門家グループのメンバー入りを果たし、AC への貢献の一端を担うことができた。また、保全施策への提言の実施や先住民や日本国民への研究成果の情報提供を行うことにも注力できた。本プロジェクトで得られた成果は、現在の北極生物多様性の実態把握や生態系機能の解明が主であるが、温暖化により環境が変化し続けている北極では、今後も生物多様性の変化、連動する生態系の構造・機能の変化をより正確に把握し、メカニズムを解明することが生物多様性や生態系の保全に必要である。

4.7.2 実施項目 [1-1] 栄養物質供給機構とその変動

上野 洋路・大木 淳之・西岡 純・山下 洋平

背景と目的

ベーリング海北部とチュクチ海は、世界でもっとも生産の高い海洋生態系のひとつであることが知られている (例えば、Grebmeier et al., 2006⁵⁾)。しかし、栄養物質を豊富に含むアナディール水の栄養塩動態など、当該海域の栄養塩供給機構の理解は不十分であった。そこで本研究では、「おしよる丸」、「みらい」、ロシア船によって得られた海洋観測データを中心に解析を行い、ベーリング海北部からチュクチ海における栄養物質等の輸送メカニズムおよびその変動を理解することを目的に研究を行った。

溶存有機物

2013年の「おしよる丸」航海で取得した蛍光性溶存有機物のデータを利用し、南部チュクチ海に分布する溶存有機物の存在量およびその化学的性質を調べた。チュクチ海では、陸起源、堆積物由来、海氷由来、自生性とさまざまな起源を持つ溶存有機物が分布していることが予想されるが、夏季の南部チュクチ海表層においては、その場での溶存有機物の生成や分解の影響は小さく、さまざまな起源水塊中における溶存有機物の保守的混合が重要であることが明らかとなった (図4-7-1、Tanaka et al., 2016a)。溶存有機物の挙動が保存的であることが示されたため、同「おしよる丸」航海で現場型センサーにより観測さ

れた蛍光性溶存有機物を用いて、新たな水塊解析法の開発に着手した。その結果、古典的な水温および塩分の水塊解析に蛍光性溶存有機物を加えることにより、ベーリング海陸棚域および南部チュクチ海の水塊解析を精密化することができ、特に高栄養塩濃度で特徴的なアナディール水(AW)・高密度水(DSW)の分布評価および形成メカニズム解明に有用であることを示した(Yamashita et al, 2019)。

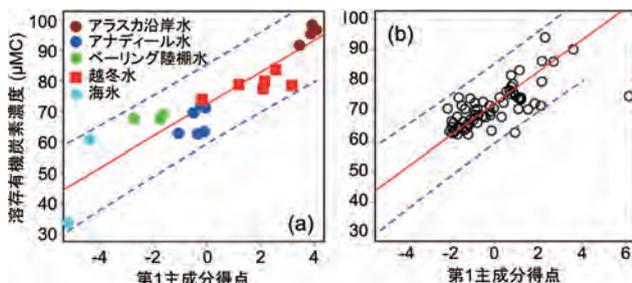


図 4-7-1. 南部チュクチ海表層における溶存有機炭素濃度と第 1 主成分得点 (高得点は陸起源、低得点は海洋起源を示す) との関係。(a) 水塊混合の端成分と考えられる水塊、(b) その他の水塊。赤実線と青点線は、それぞれ (a) 図から求めた溶存有機炭素濃度と第 1 主成分得点の間の回帰直線と 95% 予測区間を示す。

必須微量元素

夏季チュクチ海南部において採取した海水と表層海水それぞれに含まれる必須微量元素である鉄、マンガン、カドミウムの分析を実施し、これらの栄養物質が主に粒子態で海水に取り込まれ陸棚から沖合に移送されていることを示した。また、北極多年氷の海水コアの構造解析と化学分析を実施し、これらの必須元素が海水に取り込まれるプロセスを明らかにした (Evans and Nishioka, 2018)。また、海水が輸送する栄養物質を評価するために、北極海で得られたアイスコアを用いて化学分析を実施し、海水中の微量金属および栄養塩の蓄積・排出メカニズムを明らかにした (Evans and Nishioka, 2019)。

有機ヨウ素ガス

チュクチ海陸棚域に堆積した有機物から、有機ヨウ素ガスが発生することが明らかになった (Ooki et al., 2016)。近年、海洋から大気への有機ヨウ素ガス放出では、ジヨードメタン (CH_2I_2) とクロロヨードメタン (CH_2ClI) の放出の寄与が大きいと考えられている。特に、チュクチ海は CH_2ClI の放出が活発な海域であることがわかった。また、北極海における基礎生産と有機物分解が地球表層のヨウ素と臭素の循環に影響を与えている可能性がある。「おしよ丸」航海では、堆積物コア試料を採取して、堆積物表面から 1cm ごとに間隙水の採取を行った。堆積物表面 1cm までの酸化的な層において、有機ヨウ素ガスのうちヨードエタン ($\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$) が特異的に濃縮されていることを発見した。海底面に堆積したばかりの珪藻類が微生物により分解されるときに $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$ が生成されることが暗所培養により確かめられた。

アナディール水・熱輸送

2018 年度に実施したロシア船観測の結果、夏季アナディール湾における水塊構造を捉えることに成功した。湾西部の表層にはアナディール川による淡水の影響が見られた。湾の表層 20m

以深から海底には、低温 (4°C 付近) ・比較的高塩分 (33 付近) で特徴付けられる AW が東西 200km 以上にわたって分布していた。湾中央部で AW が表層に現れているエリアでは高いクロロフィル蛍光値が観測されており、衛星データから得られる生物生産の高いエリアと一致していた。また密度 26.2 ~ 26.3 θ 面の水塊が陸棚斜面からアナディール湾底層に跨って存在し、この水塊がベーリング海海盆域の栄養塩を引き込んでいた様子をつかむことに成功した。これらの結果、AW に含まれる栄養塩動態を解析する基礎情報が得られた。

また、チュクチ海における熱収支解析を実施、チュクチ海の熱収支に対する太陽放射加熱とベーリング海峡移流熱の相対的寄与を定量的に示し、チュクチ海における太陽放射加熱が太平洋から北極海海盆域への熱輸送を増幅していることを明らかにした (Tsukada et al., 2018)。

4.7.3 実施項目 [1-2] 基礎生産と有機物フラックス・二酸化炭素との関係

阿部 泰人・三瓶 真・野村 大樹
西野 茂人・杉江 恒二・藤原 周

背景と目的

ベーリング海・チュクチ海の陸棚域では劇的な海水減少が報告されており、それにとまう水塊特性の変化は生物群集組成や炭素循環の北方シフトをもたらしている (Grebmeier et al., 2015⁸⁾)。また、この海域は、世界的に基礎生産の盛んな海域でもあり、海水融解にとまう大規模な植物プランクトンのブルームは表層で多量の有機物を生成し、それは水中の動物プランクトンにほぼ消費されることなく沈降し、海底に堆積する (Grebmeier et al., 1988⁹⁾)。一方で、このふたつの海をつなぐベーリング海峡は、海峡部がわずか 80km と極めて狭いため、そこを通過する流れは 100cm s^{-1} にも達する強流スポットである (Danielson et al., 2014¹⁰⁾)。この流れは海面から水深 50m の海底までほぼ鉛直様な順圧構造を呈しているため、海底に堆積した有機物の巻き上げを引き起こしている可能性がある。さらにその結果として、基礎生産の比較的高い海峡南部 (ベーリング海) から基礎生産の低い北部 (チュクチ海) への有機炭素輸送を担っていると考えられる。そこで、本研究では、ベーリング海およびチュクチ海に設置した係留機器 (図 4-7-2) で採

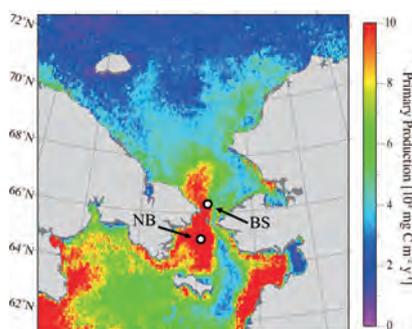


図 4-7-2. ベーリング海およびチュクチ海の係留観測点 (それぞれ St.NB および St.BS)。背景色は人工衛星で見積もられた 2003 ~ 2015 年の年間基礎生産の中央値を示す (Sampei et al., 投稿準備中)。

取したデータや試料を用い、1) ベーリング海峡における強い流れによって起きる海底有機物の巻き上げと基礎生産の関係を明らかにすること、2) ベーリング海峡における表層から海底へと沈降する有機物フラックスおよび有機物粒子の海峡を跨いだ南北間の水平輸送量を定量評価することを目的とした。

ベーリング海峡付近での強い流れによって起きる海底有機物の巻き上げと基礎生産の関係

ベーリング海峡北部に設置した係留系に海洋観測機器（海底直上3mに設置）を装着し、多層流向・流速観測、蛍光強度・濁度計によりクロロフィルa濃度 (mg m^{-3}) および濁度 (FTU) を連続的に測定した（図4-7-3）。海水に覆われていない2016年秋季（図4-7-3a、-120から-30日）では、海底付近でクロロフィルa濃度の増減イベントが4度確認された（図4-7-3bの緑線）。これらは、海底の濁度の増減とタイミングが合致しており（図4-7-3cの茶線）、その影響は海面付近にまで到達する場合もあった（図4-7-3d）。これらの現象は、 50cm s^{-1} 以上の強い海底付近の流れのイベントと対応していたため（図4-7-3eの実線）、流れによる海底からの巻き上げであると考えられる。さらにこの流れは、海上風によって駆動されていた（図4-7-3eの破線）。この流れによる海底堆積物の巻き上げは、水温（図4-7-3bの青線）が結氷温度となる冬季（-30から+90日）や、それが緩和され、植物プランクトンのブルーム（図4-7-3bの緑線）が発生する春季（+90から+180日）においても確認された。しかし、冬季は秋季と同程度の濁度・流速・風速イベントであるにもかかわらず、応答するクロロフィルa濃度が1桁小さかった。これは、海氷に閉ざされた暗環境下で、海底に堆積した植物プランクトンの分解が進むことを示唆する。

ベーリング海峡付近における沈降有機物粒子フラックスの時空間変動および有機物の水平輸送

ベーリング海およびチュクチ海の係留系（図4-7-2）に装着したセジメントトラップ（海底直上15mに設置）で採取された沈降粒子試料の粒子状有機炭素 (POC) 量、乾燥重量 (DW) を測定した。そして、POCフラックスおよびPOC/DW比を計算した。POCフラックスはSt. BS ($800 \sim 5600 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)の方がSt. NBに対して2桁ほど高くなった（9～11月）。一方、POC/DW比は、St. BS (<1～3%)の方がSt. NBに対して1～2桁ほど低くなった。特に、St. BSにおいてPOCフラックスが最大になる11月に顕著で、St. BSではSt. NBと比較して約40倍の差が見られた。有機物以外のものを多く含んだ粒子群（つまり海底泥由来粒子）の寄与の違いにより、POC/DW比が大きく異なったためと考えられる。また、St. BSにおいて高いPOCフラックスが観察されたのは、「ベーリング海峡付近での強い流れによって起きる海底有機物の巻き上げと基礎生産の関係」で示したようにPOCをわずかに含んだ海底泥が海底直上15m以浅に鉛直輸送されたことが原因と考えられる。さらには、St. BSで高いPOCフラックスをもたらした有機物粒子は、南東部チュクチ海に輸送されて、海底生物のホットスポット形成・維持に貢献した可能性が示唆された。

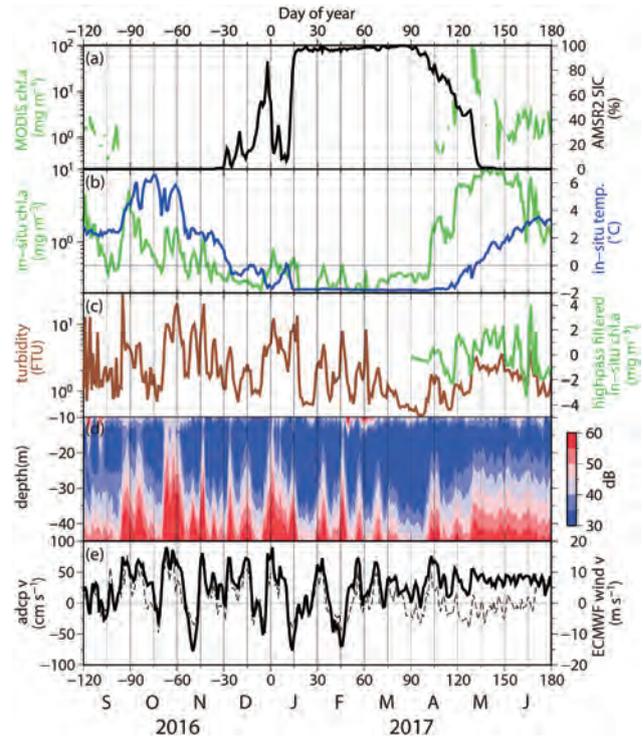


図4-7-3. (a) 人工衛星による係留観測点 St. BS の海氷密度 (黒線)、海面のクロロフィルa濃度 (緑線)、(b) 海底直上3mのクロロフィルa濃度 (緑線)、水温 (青線)、(c) 海底付近の濁度 (茶線)、高周波成分のみを抽出したクロロフィルa濃度 (緑線)、(d) 後方散乱強度の鉛直プロファイル、(e) 海底の北向き流速 (実線) および係留観測点での気象再解析海上風の北向き成分 (破線) の時系列 (Abe et al., 2019)

4.7.4 実施項目 [1-3] 環境・有機物フラックスの変動が消費者の分布・生態に与える影響

山口 篤・阿部 義之・松野 孝平・山村 織生・綿貫 豊
仲岡 雅裕・西澤 文吾・和賀 久朋

背景と目的

ベーリング海・チュクチ海の陸棚域では大半の海域の水深が50m以浅と浅いため、水柱内（漂流区：pelagic）で消費されなかった有機物フラックスは直接、底生生物（ベントス：benthos）の餌となるという、「漂流系 - 底生系カップリング (pelagic-benthic coupling)」という概念が報告されている (Grebmeier et al., 1988⁹⁾)。当海域では2017～2018年冬季の海氷面積が、1978年の観測開始以来最低面積を観測したことが報告されている (Cornwall, 2019¹¹⁾)。また2018年夏季には北部ベーリング海にて魚食性海鳥の大量死や、プランクトン食性海鳥の産卵が失敗したことが報告されている (Duffy-Anderson et al., 2019¹²⁾)。これらは海洋環境や有機物フラックスの変動が、生態系の頂点に位置する海鳥に与えた影響と考えられているが、その詳細なメカニズムについては不明な点が多い。本研究では消費者として、動物プランクトン、魚類、海鳥および底生生物を設け、各項目に関して海洋環境や有機物フラックスがどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的として行った。

動物プランクトン

ベーリング海陸棚域において商業的に重要な、十脚類幼生の水中内における水平分布と経年変化を明らかにした (Landeira et al., 2017, 2018)。ズワイガニ幼生の甲長には、南部ベーリング海からチュクチ海にかけて緯度と正の関係 (高緯度ほど大型な関係) が観察された (図 4-7-4)。一方、商業的に重要で、より大型なおオズワイガニの分布北限は、従来ベーリング海中部の北緯 62 度とされていたが、チュクチ海南部の北緯 68 度にも分布が確認された。これは大型なおオズワイガニの幼生は、より長い浮遊幼生期 (3 ~ 5 ヶ月) を持つことの反映と考えられた。結氷環境が大きく変化している北部ベーリング海において、チュクチ海に輸送されるおオズワイガニ幼生は、今後より増えることが予想され、北極海海洋生態系への影響が懸念される。

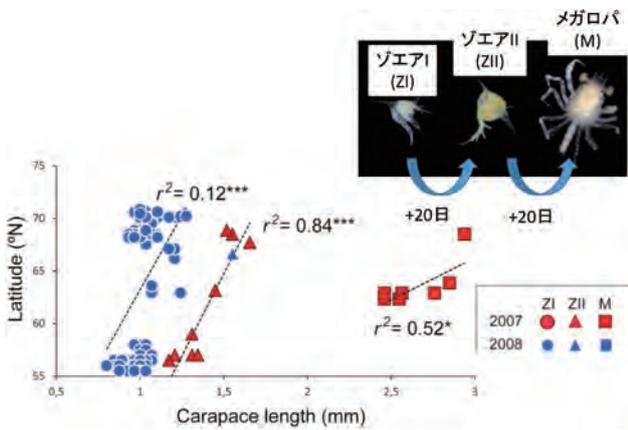


図 4-7-4. 東部ベーリング海陸棚域におけるズワイガニ幼生甲長の緯度変化。いずれの发育段階も高緯度ほど大型であった (Landeira et al., 2017)。

魚類

夏季のベーリング海峡からセントローレンス島周辺に至る海域において、2017 年と 2018 年の仔魚群集は、過去の結果 (2008、2009、2013 年) と大きく異なり、これらの年のみから成るグループを形成していた (図 4-7-5)。過去に優占していたガジ類とホッキョクダラはほとんど出現せず、代わってアカガレイ属やツノガレイが卓越していた。このように近年の調査海域は仔魚相が過去と大きく異なることが明らかになった。両年の仔魚は今後着底・加入していくことから、海水の減少と開氷の早期化の影響が今後当該生態系の上位栄養段階まで伝搬していく可能性が指摘される。

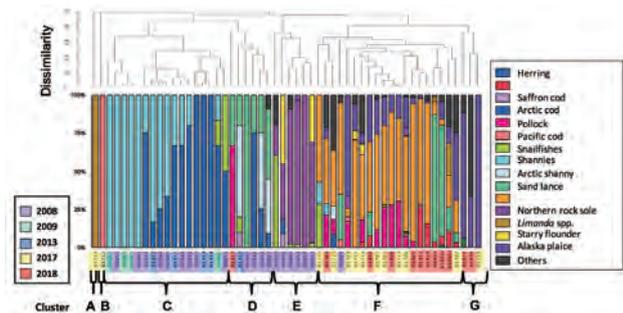


図 4-7-5. 2008 ~ 2018 年の 5 年間に「おしよる丸」がベーリング海峡からセントローレンス島周辺に至る海域において夏季に採集した仔魚群集クラスター結果 (上) と種組成 (下)

海鳥

夏季のベーリング海・チュクチ海の家鳥相に優占するハシボソミズナギドリについて、春～秋季に行われた各種航海において、分布調査とオキアミ類のネット採集を行い、高次捕食者 (海鳥) と餌生物 (オキアミ類) の分布関係を明らかにした (Nishizawa et al., 2017)。ハシボソミズナギドリは春～夏季には主にベーリング海に分布し、秋季には、より北のチュクチ海に移動していた (図 4-7-6)。チュクチ海におけるオキアミ類は、夏季には小型個体が多かったが、秋季には大型個体が優占していた。このように、ハシボソミズナギドリの分布の季節変化は、餌である大型のオキアミ類分布の季節変化によって説明されることが明らかになった。

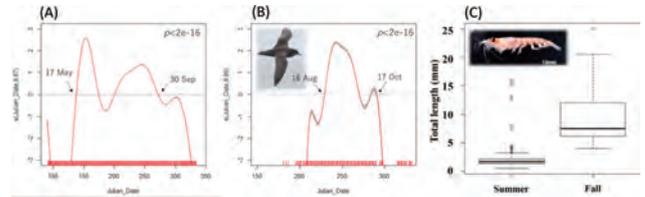


図 4-7-6. ベーリング海 (A) とチュクチ海 (B) におけるハシボソミズナギドリの相対的分布密度偏差の季節変化、チュクチ海に分布するオキアミ類体サイズの季節変化 (C) (Nishizawa et al., 2017)

底生生物 (ベントス)

2000 ~ 2013 年における衛星データにもとづき、太平洋側北極海における植物プランクトンサイズ組成を明らかにし、底生生物生物量 (ベントスバイオマス) の地理・経年変化に与える影響を評価した (Waga et al., 2019)。経年的に植物プランクトンサイズ組成は、セントローレンス島南部 (SLIP) では小型化していたが、チュクチ海南東部 (SECS) では大型化していた (図 4-7-7)。一方、同所および経年的に、ベントスバイオマスは SLIP で減少し、SECS で増加しており、植物プランクトンサイズ組成の時空間変動が、ベントスバイオマスに大きな影響をおよぼすことが明らかになった。

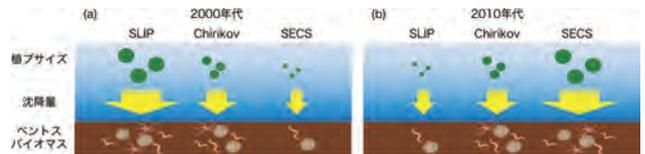


図 4-7-7. セントローレンス島南部 (SLIP)、チリコフ海盆 (Chirikov)、チュクチ海南東部 (SECS) における、(a) 2000 年代と (b) 2010 年代の植物プランクトンサイズ組成と植物プランクトン沈降量、ベントスバイオマスの関係に関する模式図 (Waga et al., 2019)

4.7.5 実施項目 [1-4] 汚染物質の生態系への影響

高田 秀重・綿貫 豊・仲岡 雅裕・西澤 文吾

背景と目的

中緯度地域において農業・火力発電などに加え日常生活から環境中に排出された汚染物質のうち揮発性の高いものは、大気輸送され、極域では冷却され海洋に取り込まれるため、極域海洋生態系での汚染が懸念される (Wania and Mackay, 1996²⁾)。その実態を把握するため、北極域における海底堆積物表層中の人為起源分子指標 (Molecular Marker) とマイクロプラスチック、および北部ベーリング海にあるセントローレンス島で繁殖する海鳥の尾腺ワックス中の残留性有機汚染物質の分析を行った。

海底堆積物表層中の汚染物質

2016 年度「みらい」北極航海 (MR16-06) において、ベーリング海峡からチュクチ海南部の海底水深 45 ~ 75m からスミキン採泥機で得た表層の泥を冷凍で持ち帰り、凍結乾燥後、有機溶媒で加圧流体抽出し、シリカゲルカラムで精製後、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS) あるいはガスクロマトグラフ電子捕獲型検出器 (GC-ECD) で同定・定量した。マイクロプラスチックは堆積物を過酸化水素処理後、ヨウ化ナトリウム飽和水溶液で密度分離後、フーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) で同定した (Matsuguma et al., 2017¹³⁾)。調査海域の LABs、PCBs といった人為起源指標濃度は都市部沿岸や沖合に比べ比較的濃度であり、下水の寄与も無視できる程度だった。しかしながら、PAHs や Hapanes などは沖合の海水中の値の下限に近く、何らかの石油汚染の影響が検知され (図 4-7-8)、またマイクロプラスチックの検出も示唆された (図 4-7-9)。

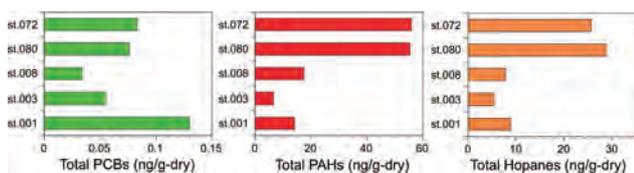


図 4-7-8. 各調査点の表層泥の汚染物質濃度

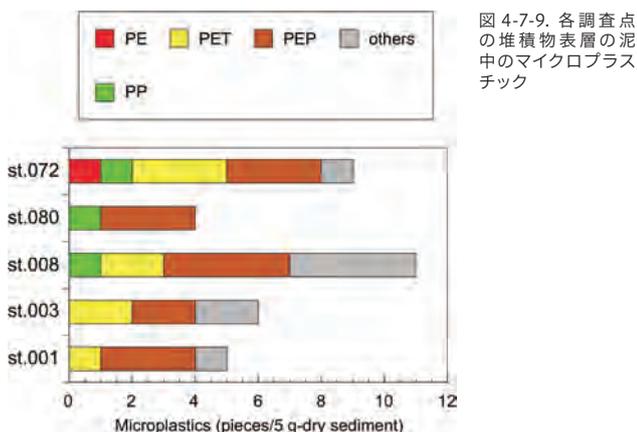


図 4-7-9. 各調査点の堆積物表層の泥中のマイクロプラスチック

海鳥尾腺ワックス中の汚染物質

北部ベーリング海にあるセントローレンス島において、2017 年夏に捕獲したコムミスズメ、エトロフウミスズメ、ウミガラス、ハシブトウミガラスの尾腺ワックス中濃度は、北太平洋のほかの島の海鳥と比べると、揮発性の低い Σ PCBs と Σ DDTs は、もっとも低いハワイの海鳥と同程度に低かったが、揮発性の高い Σ HCHs は比較的高かった。高次捕食者の体組織中の濃度からも、中緯度から北極海への大気輸送が示唆された。

4.7.6 実施項目 [1-5] 衛星による北極圏環境と海洋生態系変動の評価

平田 貴文・堀 雅裕・Irene Alabia・増田 良帆
Jorge Garcia Molinos・村上 浩・高橋 幸弘

背景と目的

北極海は、日本から見ると遠隔地である。また、ほかの海洋と同様に、複数の国家による管理を受ける地域でもある。結果として、環境生態学において、データの取得そのものが困難であり、北極圏における当該分野の発展を乏しく妨げている。本研究では、地球観測衛星を利用した海洋観測を行うことで上記問題を克服し、北極海域における環境生態学的データの取得を通じて、複数国家が関連する海域における海洋生態系の変動の現状把握を目的とする。

衛星観測による北極圏海洋環境変動

衛星搭載光学センサーおよびマイクロ波センサーの観測データから抽出された 1997 年以降のクロロフィル *a* 濃度、海水密接度プロダクトを用いて北極海域の長期変動特性を調査したところ、年平均した海面露出 (非海水域) 面積および年積算したクロロフィル *a* 濃度がすべての海域において増加傾向を示し、特にグリーンランド海、バレンツ海、カラ海、チュクチ海において統計的に有意な正相関を示した。この結果は先行研究 (Arrigo and van Dijken, 2011¹⁴⁾) とも整合的で、海水面積の減少が北極海の生物生産増加の一因であることが示唆された。次に、2017 年 12 月に打ち上げられた日本の気候変動観測衛星「しきさい」搭載の多波長光学放射計 (SGLI: Second generation Global Imager) の観測データを用い、北極海へ流入する主要 6 河川の表面温度推定を行った。雲域による欠損を補うため、9 日間の移動平均を行うことで、日単位での河川水温のモニタリングが主要河道沿いの 7 割の河川域にて可能であることを示した。また、SGLI による河川水温と地上観測にもとづく河川流量とから北極海へ流入する熱流量を評価した。その結果、2018 年のエニセイ川の熱流量 (最大値) は、先行研究 (Lammers et al., 2007¹⁵⁾) で見積もられた 1992 年 (16 年前) の倍以上に増加し、出現時期も半月程度早期化していることが明らかとなり、近年の北極海水減少の一因として、河川からの熱流量の増加が大きく寄与していることが示唆された。

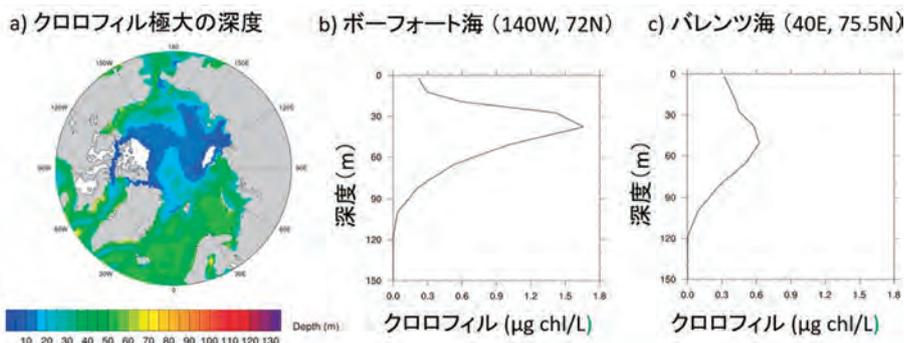


図 4-7-10. 川の熱流量(最大値)は、先行研究(Lammers et al., 2007⁵⁾)で見積もられた1992年(16年前)の倍以上に増加し、出現時期も半月程度早期化していることが明らかとなり、近年の北極海水減少の一因として、河川からの熱流量の増加が大きく寄与していることが示唆された

北極海の海洋生態系変動

ベーリング海のスケトウダラを対象として、衛星観測される環境データを利用して生息域(ハビタット)モデルを作成し、気候変動にともなうハビタットの空間変化速度を見積もった。このモデルを拡張し、21魚類および海洋無脊椎動物に対して、気候が顕著に変遷した期間前後のハビタット分布変化を調査した(Alabia et al., 2018)。その結果、ハビタット分布の変化は気候変動そのものに加えて、種ごとの気候変動への感度によって制御されていることがわかった。IPCC-AR5気候変動シナリオを使用して、これらの解析を将来予測に拡張した。亜寒帯種においては、その生息範囲の北側境界は現在よりさらに北へ拡張し、また北極種は生息範囲の南側境界が北へ移動することが示唆された。その結果、21世紀末までに、ベーリング海やチュクチ海の大陸棚に沿った現在の生物多様性が再構成されることが示唆された。さらに、水産有用種について、ハビタットモデルを個体数モデルへと拡張し、将来における資源量に対する気候変動の生態学的影響を評価した。特に、コガネガレイやレックスカレイ個体数は、海域によって増加も減少もすると予測された。

衛星観測にもとづく北極海洋生態系の環境変動に対する脆弱性

海洋生態系の脆弱性を、環境変動への暴露、感度、および潜在的回復力の3要素からなるものとし、自然環境変動のみを考慮した潜在的脆弱性指標(PVI: Potential Vulnerability Index)の開発を行った。環境変動要素としてプラネタリー・バウンダリー(planetary boundary)^{※2}を構成する地球システム過程を考慮し、それぞれの過程を代表する衛星データを用いて解析を行った。その結果、プラネタリー・バウンダリー過程の第1主成分として表現される海洋生態系の環境ストレスへの暴露度は、全球的に見ても北極海で特に大きいことが示された。北極海内部では、低緯度側また高緯度側で顕著な暴露を示した。また、環境ストレスへの生態系の応答の強さとして表現される環境感度は、北極海内部においても海域により異なり、すなわち、チュクチ海において特に強く、カラ海やバフィン湾で小さいことが示された。生物多様性(質)と基礎生産力(量)にもとづいた潜在的回復力は、顕著な緯度勾配を示し、北極システム内の熱環境との関連が示唆された。これらを統合したPVIによれば、海水縁辺で脆弱性が高くなる傾向も示唆された。

衛星による海洋観測は海面表層を対象としており、海洋の深部の情報を得ない。そこで衛星データ解析(特に生態系解析)の信頼性を高めることを目的として、海洋生態系モデル(植物

プランクトンのクロロフィル、炭素バイオマス比が可変であるモデル)のチューニングを北極海を対象として行った。結果、従来モデルでは再現が難しかった北極海亜表層クロロフィル極大の再現に成功した(図4-7-10)。クロロフィル極大が形成される深度は、栄養塩躍層の深度とほぼ一致していた。また、40m以深にクロロフィル極大が存在するのは海水のない海域だけであり、海水が存在する海域ではクロロフィル極大は海表面付近に形成されることが示された。

4.7.7 実施項目 [1-6] MPA、北極生物資源管理に関する情報提供

平澤 享・Irene Alabia・平田 貴文・Jorge Garcia Molinos
渡邊 英嗣・三瓶 真・山村 織生・牧野 光球

背景と目的

本プロジェクトでは、得られた知見にもとづき、ステークホルダーにとって有効かつ重要な情報を提供することも目的としている。本テーマでは、近い将来の生物資源の持続的利用と保護に関する提案を行うことを最終目標とし、以下の活動や連携研究を実施した。

中央北極海無規制公海漁業防止協定等に関する情報提供

本プロジェクトが始まった頃より、中央北極海無規制公海漁業防止協定を含む北極におけるさまざまな法整備に向けて、海洋学・水産学の知見を求められる機会が多くなった。2015年12月18～19日に神戸大学で開催された国際シンポジウム「北極国際法秩序の展望」に参加し、北極漁業に関する国際法と自然科学とのギャップ、ACが中心となった国際法制定とACオブザーバーの貢献の重要性について議論と意見交換を行った(神戸大学^{※3})。2016年3月30～31日には、韓国極地研究所(KOPRI: Korea Polar Research Institute)で開催された国際シンポジウム「Roundtable on Central Arctic Ocean (CAO) ecosystem and fisheries issues」に参加し、北海道大学の「おしよ丸」等で得られた海洋生態系に関する成果について、人文社会科学系(主に国際法関係)の研究者に情報提供を行った。さらに、2016年7月28～29日の神戸大学の国際シンポジウム「北極海法秩序の将来設計」(山村, 2018)や2016年12月16～18日の北極域研究共同推進拠点「International Marine

Science Coordinating Organization for the Central Arctic Ocean, Working Session」においても北極域の魚類生態や海洋環境に関する報告を行った。

同上協定作成に関しても水産庁や文部科学省に対して協力をを行った。2016年9月の4th Fish Stocks in the Central Arctic Ocean (FiSCAO) に提出する資料作成の際は、過去の調査内容やそこで漁獲された魚類に関する情報を水産庁に提供した。また、2018年8月には、協定の日本語版(外務省, 2019¹⁶⁾) の内容に関する外務省・文部科学省からの質問に回答を行った。

FiSCAOへ提出されるべく作成された報告書『Synthesis of Knowledge on Fisheries Science in the Central Arctic Ocean and Adjacent Waters』についても、ICES/PICES/PAME Working Group on WGICAをとおして原稿作成に協力した。

また、ベルモントフォーラム RACArcticとも連携し、水産関連のステークホルダーとの連携関係を強化するとともに、ステークホルダー向けの総説作成にも加わった。

水産資源変動の経済学的影響評価(テーマ4-6-7連携)

実施項目[1-5]「衛星による北極圏環境と海洋生態系変動の評価」の結果が出始めた2017年2月より、漁獲を行っている国(ここでは米国)や輸入国である日本に水産資源変動がどのような経済的影響を与えるかを評価できないか、テーマ7と連携して検討を始めた。その後、本連携にテーマ4が加わり、テーマ4で作成した数値モデルデータ(海洋環境データ)を本テーマで作成した水産資源のハビタットモデルに入力し、その変動をテーマ7の経済モデルで評価することで、ベーリング海・チュクチ海の魚類資源変動が海域周辺国、日本、およびアジア各国におよぼす経済的影響を評価することになった。また、これに関連する背景やコンセプトは成田・平譯(2020)にまとめられた。

本テーマのハビタットモデル(Alabia et al., 2018)はすでに作られ、モデルデータを入力した将来予測が行われた。一方、経済評価に必要な米国の実データの入手は困難を極め、公開されているデータのみを用いた経済評価のみを実施した。

また、この連携内容を伝える活動として、2018年1月8日に日本科学未来館において、一般人を対象としたイベントを行った。さらに、本連携およびアウトリーチ活動の一環として、テーマ4、7および日本科学未来館と共同で、北極圏の海洋・生態系と人間活動の関わりを題材として、研究の科学的な重要性および成果を発信できるような高校生以上向けのボードゲームの製作を行った。

4.7.8 実施項目[2-1] シベリア北極域における移動性鳥獣の生態調査

立澤 史郎

北極先住民の生活をさまざまな形で支える鳥獣類の季節移動や土地利用の実態、その変動を明らかにするための調査・研

究をロシアのサハ共和国において行った。対象種は、先住民がよく利用する野生ツンドラトナカイ、ジャコウウシ、ホッキョクギツネ、コクガンとし、調査手法の開発、行動圏・移動軌跡の把握、それらにもとづく保全施策の検討・提言をIBPCとの共同研究として行った。

野生ツンドラトナカイ

2015年度から2018年度まで、毎年夏季(7~8月)にロシア・サハ共和国のオレニョク地域で生体捕獲を行い、衛星発信機付き首輪を装着して放逐し、行動を観測した。

捕獲においては、地元エベンキ族の伝統的技術と捕獲場所や動物行動に関する伝統的知識を活用して36頭に衛星発信機を装着した。衛星発信機はモスクワにあるES-PAS社と共同開発し、約30個は本手法の有効性を認めた共和国政府等の予算で購入した。これまでシベリア北極域では、低温湿潤環境のため冬季を越えて継続的に位置情報を得ることは困難だったが、2016年以降発信機の改良により通年の行動観測に成功した。この結果、本地域では1980年代(Safronov et al., 1999¹⁷⁾)と比較し、越冬地も越冬地もそれぞれ500km近く南に移動していることを明らかにした。そのため、冬季の伝統的狩猟地に野生トナカイが来なくなるばかりか、家畜トナカイとの餌の競合や雌トナカイの連れ去りが起こるなど、野生トナカイの土地利用変化による問題が生じている。新越冬地では通常とは異なる不規則な移動が頻繁に起こる行動が認められ、その多くは露天掘り鉱山等大規模開発地で生じていた。本成果をもとに本種の保全を目的とした保護区設定を同共和国政府に提言した結果、「マルハラ野生トナカイ保護区」が実現した。以降、保護区では先住民によるモニタリングと衛星観測を用いた順応的管理が行われている。2017年からはレナ個体群とタイミル個体群についても観測を行った結果、いずれも行動圏を南方へシフトさせ、越冬期には3個体群が合流していることが確認された(図4-7-11)。本成果は、IPCC-AR6のCross-Chapter Paper(Polar Regions, Lead Author: Prof. Mustonen, T.)で温暖化が先住民生活におよぼす影響の象徴的事例として紹介予定である。

ジャコウウシ、ホッキョクギツネ

北極圏の先住民にとって利用価値の高い毛皮獣である両種について、レナ川デルタで冬季の生体捕獲手法の開発と発信機装着の試行を行った。ジャコウウシは大型スノーモービル2台で並走しながら特定個体を群れから引き離して麻酔銃で撃つ「並走法」を開発した。この方法は他地域の再導入個体群のモニタリング手法としても採用され、個体数情報の整理等が進んだ。本成果はCAFFのThe Circumpolar Biodiversity Monitoring Programで評価され(Cuyler et al., 2019¹⁸⁾)、非北極国で初のジャコウウシ専門家グループメンバーとなった^{※1}。

ホッキョクギツネの生体捕獲については、巣穴近くにブッシュや構築物を準備して追い込む方法を開発・試行した。

ホッキョクグマ

シベリア北極域での本種の生息状況はいまだ不明であるため、2018年3～4月にティクシ周辺で予備調査を実施した後、2019年3～5月にコリマ川デルタのクリストヴァヤ村とメドヴェジイ諸島で痕跡調査と聞き取り調査を行った。その結果、メドヴェジイ諸島だけで少なくとも9頭の越冬・出産が確認され、有数の高密度生息域であることが判明した。

コクガン

北極域に広域分布し北方先住民に広く利用されるコクガンは、冬には多くが南方に移動する。本種の個体数は世界的に減少傾向にあり(Wetland International, 2012¹⁹⁾)、日本では国指定天然記念物(1971年)および環境省レッドリスト絶滅危惧Ⅱ類(1998年)に指定されている。本プロジェクトでは、世界最大の繁殖地と目されるサハ共和国のレナ川デルタと北海道の野付湾と函館湾の双方で季節移動状況把握のための標識および発信機装着を実施した。さらに国際的な共同研究・保全体制の整備・構築を行った。

安全な生体捕獲手法が確立されていないため、汀線帯で休息する行動特性を利用して水中に小型足くくり罠を多数設置する手法を開発し(Sawa et al., 2019a)、2016～2019年度に約20羽の生体捕獲・標識装着に成功した。15羽にはタグ型発信機を装着し、移動実態の一端を明らかにした(Sawa et al., 2019b)。



図4-7-11. 東シベリアにおける野生トナカイの移動状況。3集団(赤丸、夏季)が冬季に南部で合流していることがわかった。

4.7.9 実施項目 [2-2] ベーリング海北部で繁殖する海鳥の生態調査

高橋 晃周

ベーリング海北部では、北極域の温暖化にともなって大きな物理的・生物的な環境の変化が見られている。ベーリング海北部の中心に位置するセントローレンス島では約200万羽の海鳥が繁殖しており、この地域で最大の繁殖地となっている。CAFFではCBirdという専門家グループが周北極における海鳥類の調査を実施している。しかし、この島の海鳥の採餌・繁殖生態については、魚食性のウミガラス類(ハシブトウミガラス・ウミガラス)とミツユビカモメについては1980年代後半以降、プ

ランクトン食性のウミスズメ類(エトロフウミスズメ・コウミスズメ)については2004年以降、調査がなされていない。北極域において、海鳥の採餌・繁殖生態の変化は海洋生態系全体の長期的な変化の指標として有効であると考えられている。そこで、今回セントローレンス島で繁殖する上記5種の海鳥の採餌・繁殖生態を調査し、過去の研究結果との比較を行うことで、近年の環境変化がベーリング海北部の海洋生態系に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2016～2019年まで、セントローレンス島北岸のサヴォンガ近くの海鳥繁殖地で、UAFのチームと共同で野外調査を行った。5種の海鳥について、繁殖巣数や雛の巣立ち率などの繁殖成績のモニタリングを行った。ウミガラス類については、親が雛に与えるために嘴にくわえて繁殖地に持ち帰った魚種を観察し、同定した。また繁殖期間中の採餌移動経路を調べるためにGPS記録計を4種(体サイズが小さくGPS記録計を装着できなかったコウミスズメを除く)に装着した。さらに、繁殖終了後の渡り移動経路を調べるために、照度記録から位置を推定するジオロケーターを5種に装着した。

調査を行った4年間で、ベーリング海北部の海水状況は大きく異なり、2018年と2019年には冬～春にかけての海水が記録的に少なく、2018年には過去最小の海水張り出し面積となった(Stabeno and Bell, 2019²⁰⁾)。

海鳥、特にプランクトン食性の2種の繁殖成績は海水変動に呼応して大きく変動し、2016～2017年には50%近かった雛の巣立ち率が2018～2019年にはほぼ0%となった。この2種はいずれも大型の動物プランクトン(オキアミ・大型カイアシ類)を主要な餌としているが、海水が記録的に少ない年には小型カイアシ類が増加する状況となったことから(Duffy-Anderson et al., 2019¹²⁾)、繁殖成績に大きな影響を受けたと考えられる。また魚食性の3種の繁殖成績も、2018～2019年に巣立ち雛数が低下する傾向が見られ、特にハシブトウミガラスについては、2018年には成鳥が大量死し繁殖を試みる個体が極端に少ない様子が観察された(図4-7-12)。大量死の原因は未解明であるが、餌不足による栄養ストレスの上昇、鳥インフルエンザ等の病気の影響などを現在も検討中である。



図4-7-12. ハシブトウミガラスの繁殖状況の年間の違い

本調査期間中にウミガラス類が雛に持ち帰った魚は、ギンポ類などの底魚が優占していた。これはホッキョクグラが優占していたとする1980年代の調査結果(Piatt et al., 1988²¹⁾)と大きく異なっており、ベーリング海北部の温暖化によって、寒冷性のホッキョクグラの分布が北へ後退していることを反映していると考えられた。一方、GPS記録計の結果から、4種の海鳥はセントローレンス島北部の浅い陸棚域を中心に、最大50km程度沖合まで採餌に出ていることが明らかになった(図4-7-13)。鳥の行動範囲をセントローレンス島周辺に国際海事機関(IMO: International Maritime Organization)が設定している「船舶航行を避けるべき海域(Area To Be Avoided)」(Huntington et al., 2019²²⁾)と比較したところ、海鳥の移動経路の多くがこの海域の外側まで広がっていることがわかった(図4-7-13)。鳥で繁殖する海鳥の保全のためには、船舶航行を避けるべき海域を拡張する必要があることが示唆された。

また、回収されたジオロケータの解析結果から、いずれの海鳥も島で繁殖を終えたあと、ベーリング海南部や太平洋北部にまで大きく移動して越冬していることがわかった。特にハシブトウミガラスはオホーツク海や日本海にまで移動してきており、北極圏から大きく離れたこれらの海域での環境変化等も個体数変動に影響を与えている可能性が示唆された。以上の成果は本プロジェクト期間中にCBirdのメンバーとなり、CBirdを通じてCAFFに報告した。

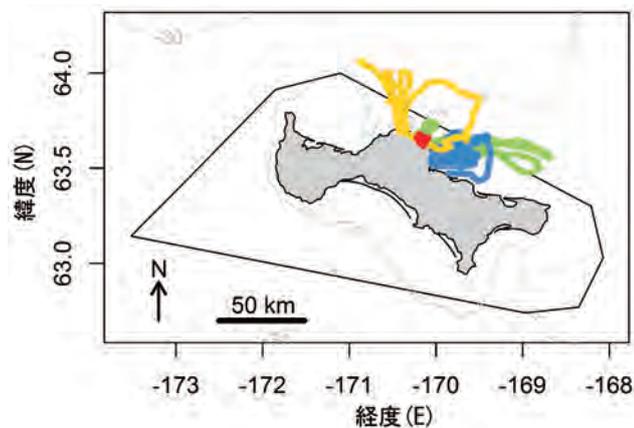


図4-7-13. セントローレンス島周辺に設定された船舶航行を避けるべき海域(黒線)とGPS記録計から得られた海鳥の移動経路の重複(黄: エトロフウミスズメ、赤: ミツユビカモメ、青: ハシブトウミガラス、緑: ウミガラス)

4.7.10 実施項目 [2-3] ニシオンデンザメの生態調査

渡辺 佑基

ニシオンデンザメは北大西洋の高緯度海域に生息する大型のサメで、体長は最大で6mにもなる。さまざまな魚だけでなく、アザラシなどの海生哺乳類をも捕食することが知られ、高次捕食者として北極海の生態系で重要な役割を果たしている。ニシオンデンザメは、カラスガレイの延縄漁で大量に混獲されてしまうことが大きな問題になっている。ニシオンデンザメの混獲は、重要な水産資源であるカラスガレイの漁の効率低下につながる

だけでなく、ニシオンデンザメの個体数減少にもつながる。本研究から得られたニシオンデンザメの知見は、カナダ側の共同研究者(ウィンザー大学 Nigel Hussey 博士)をとおしてDFOに提供し、混獲の影響を緩和する方法の策定に役立てる。

2015年9月と2016年9月に、パフィン島(カナダ北極域)の中央部東岸に位置するスコットインレット(Scott Inlet)と呼ばれる入り江において、ニシオンデンザメの生態調査を実施した。さらに2018年8月には、パフィン島の北端に位置するトレンブレサウンド(Tremblay Sound)海域にて、同じくニシオンデンザメの生態調査を行った。漁船(2015、2016年)あるいは小型ゴムボート(2018年)を使って延縄を仕掛け、サメを捕獲した。外部形態を測定し、血液を採取した後、サメの体に行動記録計を取り付けて放流した。放流から2~4日後、タイマーで切り離されて海面に浮かび上がった記録計を、電波を頼りに回収した。2015年に5個体、2016年に4個体、2018年に2個体、計11個体のニシオンデンザメから遊泳行動データを得ることができた。

深度のデータを分析すると、どの個体も放流直後には沈んでいき、しばらく時間が経過した後、200~600m程度の深度帯を上下に泳ぎ始めることがわかった。また遊泳速度のデータを見ると、放流直後にもっとも遊泳速度が速く、その後下がっていったやがて一定の値に落ち着いていた。さらに、加速度のデータにもとづいてサメの尾びれの振りの頻度を計算すると、これも放流直後にもっとも高く、次第に下がっていったやがて一定の値に落ち着いていた。これらの結果から、延縄で捕獲されたニシオンデンザメはストレスを受けており、放流直後は異常な行動を示すことがわかった。しかし、どの個体も5~10時間程度で正常と思われる行動に戻っていた。過去の文献では、カマストガリザメが10時間程度、レモンザメが24時間程度でストレスから回復することが報告されている(Sundström and Gruber, 2002²³⁾; Whitney et al., 2016²⁴⁾)。それらの値と比べると、ニシオンデンザメは比較的短時間のうちにストレスから回復することが示唆された。

同様の結果は、ニシオンデンザメの血液の分析からも得られた。ストレスの指標である乳酸の濃度は平均4.8mmol/l、血糖の濃度は平均5.3mmol/lであった。これらの値は、文献に報告されているほかのサメ類(アオザメ、マオナガ、ヒラシモクザメ等)の値よりも著しく低い(Marshall et al., 2012²⁵⁾)。ニシオンデンザメは動きが緩慢で、針にかかっても激しく暴れることがないので、ほかのサメ類に比べて捕獲の影響が少ないことが示唆された。

北大西洋の高緯度海域で幅広く行われているカラスガレイの延縄漁において、大量のニシオンデンザメが混獲され、個体数への影響が懸念されている。ニシオンデンザメは極端に成長が遅く、性成熟に150年かかると推定されており、一旦個体数が減少すると容易には回復しないと考えられる。本研究により、延縄漁で捕獲され、放流されるニシオンデンザメのストレスレベルはほかのサメ類と比べて低いことが明らかになった。カラスガレイの延縄漁で混獲され、放流されるニシオンデンザメの多くも、やがては通常の行動に戻っていると考えられる。ただし、本研究は漁業者による延縄漁を完全に再現したものではなく、サメを丁寧に扱った。実際の漁業の現場では、多くの場合、針にかかったサメは仕掛けごと巻き上げ機械で空中に持ち上げら

れる。すると自らの体の重みでサメが自動的に針から外れるが、その際に顎に大きな傷を負ってしまう。サメのダメージを軽減するために、延縄にかかったサメを空中に持ち上げるのではなく、水中で仕掛けを切り、針をくわえた状態で放流する方法を本研究では提案し、本種の保全に役立てたい。

4.7.11 実施項目 [2-4] 北極圏陸域における生態系機能 - 生物多様性の関係の実態把握

増本 翔太・辻 雅晴・星野 保・東條 元昭・内田 雅己

北極陸域における真菌類などの微生物の多様性はいまだ全容解明にはほど遠い状況にある (CAFF, 2013³⁾)。微生物多様性解明のためには、さまざまな場所から試料を採取し、微生物を分離・同定する必要がある。そこで、本研究ではカナダ北極域において、真菌類の調査を実施した。

カナダ・エルズミア島はグリーンランドの西に位置し、カナダで3番目に大きい島である。エルズミア島では地衣共生菌類400種 (Kristinsson et al., 2010²⁶⁾)、コケ25種 (Osono et al., 2012²⁷⁾) が報告されているが、真菌の多様性に関する情報は断片的である。本研究では、エルズミア島北部の氷島の融解水中の真菌叢と、エルズミア島の北部近くに位置する氷河上および後退域の堆積物の真菌相を調査した。

北緯82度50分、西経73度40分に位置するディスラエリフィヨルド (Disraeli Fjord) の氷島上で融解していた水底から微生物マットを5点採取した。DNA シークエンシングが可能な76菌株を分析した結果、接合菌類1属、子のう菌類11属および担子菌類10属に分類された。出現頻度は *Vishniacozyma* 属 (38%)、*Preussia* 属 (16%)、*Cladosporium* 属 (11%)、*Mrakia* 属 (ca. 11%) であり、そのなかから新種の酵母菌 *Gelidatrema psychrophila* (Tsuji et al., 2018a) と *Mrakia arctica* (Tsuji et al., 2018b) 2種を発見した。一方、エルズミア島のウォーカー氷河後退域から採取した9点の土壌からは、DNA シークエンシングできた275菌株から *Mrakia hoshinonisi* (Tsuji et al., 2019a) および *Vishniacozyma ellesmerensis* (Tsuji et al., 2019b) の2種の新種を発見、報告した (図4-7-14)。

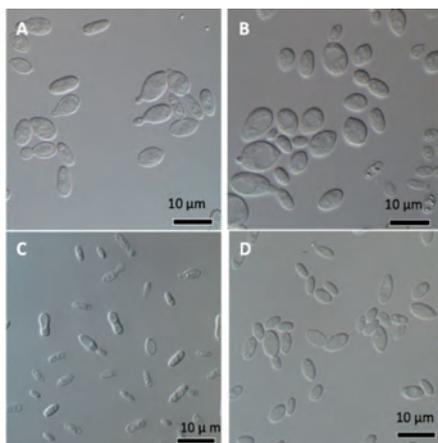


図4-7-14. カナダ北極域で発見した新種の真菌類。(A) *Mrakia arctica*。(B) *Gelidatrema psychrophila*。(C) *Vishniacozyma ellesmerensis*。(D) *Mrakia hoshinonisi*。(Tsuji et al., 2018ab, 2019ab)

生態系は、複雑な相互作用を持ちながら存在する生物と無生物によって形作られている。そのため、生態系における生物の多様性および群集構造は、系全体の生物活動の質・量を規定する。例えば、北極域における地域別の維管束植物の種数と生態系一次生産量の関係では、種数の増加にともなって一次生産量が増加することが示されている (Ims and Ehrlich, 2013²⁸⁾)。このことは、環境変動にともなう生物多様性や群集構造の変化が生態系の機能的側面にも影響することを示唆する。北極生態系の生物群集構造の特徴点としては、少ない構成種と単純な群集組成があげられる。そのため、特定の生物種の個体数変動や群集組成の変化が、生態系の機能面に反映されやすい。上記の理由から、生物多様性が北極生態系にどのような機能的効果を持つのかを明らかにすることが、今後の気候変動とそれにとまなう生態系変動を理解するうえで重要となる。

森林化や低木種の分布拡大は、北極域の温暖化に対する植生動態としてはもっとも一貫した方向性を持つ変化である。しかしながら、その変化には気温上昇といったグローバルなプロセスだけでなく、土壌環境や生物間相互作用のようなローカルなプロセスも影響する。そしてローカルな影響は、ときにグローバルな影響よりも強く働く (Scheffer et al., 2012²⁹⁾)。

本研究では、カナダ・ハドソン湾東海岸に位置するツンドラと森林のエコトーンで調査を行い、低木種の間にはツンドラにおいてのみ正の相互作用が機能していることを明らかにした (図4-7-15、Kitagawa et al., 2019)。この結果から、低木種間の正の相互作用によって低木種の分布が拡大し、その拡大がさらに低木種のツンドラへの侵入を促進するフィードバック効果が低木種の分布拡大を推し進めていることが示唆された。

維管束植物の多様性が土壌中の炭素・窒素含有量に貢献していることがカナダ北極域の研究から示されている (図4-7-16、Mori et al., 2017)。生物多様性と生態系機能に関する研究は、リージョナルスケールでの研究とローカルスケールでの研究がある。前者の研究では、温度などの比較的大きなスケールで変化する環境要因や地史的な背景によって、両者の関係性が議論される。後者の研究では、土壌の栄養塩や種間相互作用といった小さなスケールで働く群集集合規則をもって議論される。

北極域でもリージョナルスケールの多様性と生態系機能に関する研究は行われてきた。今回の我々の研究結果は、ローカルスケールでの多様性 - 生態系機能の関係を北極域で観察したはじめての例である。この結果は、今後の気候変動が生物多様性に与える影響がローカルスケールでも生態系機能に波及していくことを示唆している。

温暖化にともなう生物間相互作用の変化と、その変化が生態系機能に与える影響の研究は数多くある。そのなかでも、一次生産者である植物とその寄生者の相互作用の変化は、病害の発生率や強度に影響することで生態系の一次生産量を低下させる。特に単純な構造を持ち北極生態系では、特定の寄生者が生態系全体に大きな影響をおよぼしうる。本研究では、周北極に広く分布するヤナギの寄生者 (*Rhytisma* 属菌) が、宿主の一次生産とその後炭素動態に与える影響を詳細に評価した (Masumoto et al., 2018b)。その結果、寄生者が生態系純生産量だけでなく、植物

から土壌への炭素流入にも大きな影響をおよぼしていることが明らかになった(図4-7-17)。また、この寄生者による病害が温暖化にともなう降水量変化に応答する可能性が高いこと(Masumoto

et al., 2018a)は、本病害が今後の気候変動にともない生態系の炭素循環に大きな影響をおよぼしうることを示唆している。

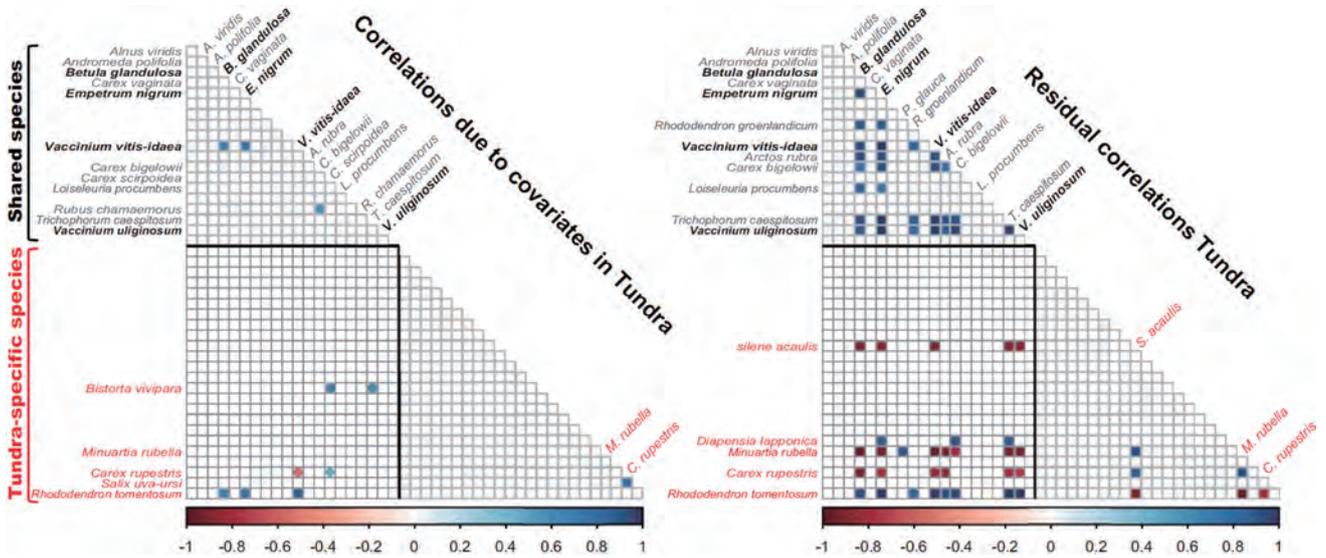


図4-7-15. ツンドラと森林での植物種の共存率。環境要因の影響を含んだ際の共存率(左)と含まない際の共存率(右)。青色は正の相関の強さを、赤色は負の相関の強さを示す。ツンドラと森林の共通種はツンドラでの共存率が高い(Kitagawa et al., 2019)。

図4-7-16. 氷河後退域での維管束植物の多様性(種数)から土壌炭素量(A)と窒素量(B)へのパス解析図(Mori et al., 2017)

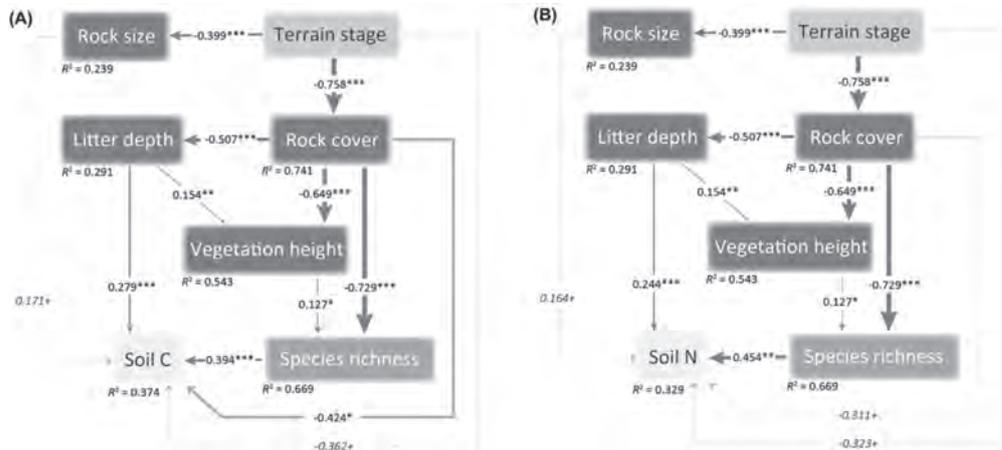
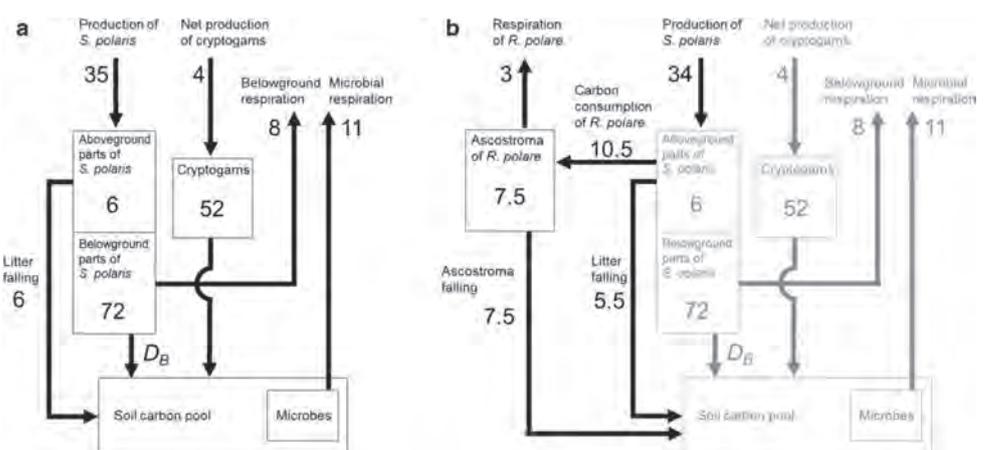


図4-7-17. 健全な生態系(a)と病害が発生した生態系(b)の炭素循環のコンパートメントモデル(Masumoto et al., 2018b)



4.7.12 実施項目 [2-5] 湖沼生態系の構造・環境把握

田邊 優貴子・内田 雅己

アラスカのツンドラ域にある数百の湖の20年にわたる衛星画像を解析した結果、冬に全面凍結する湖の数が大幅に減少したことを示した(Surdu et al., 2014³⁰⁾)。湖水消失によるフェノロジーの変化は気候温暖化の敏感な指標であり(Duguay et al., 2006³¹⁾)、氷に覆われた北極の湖は地球規模の気候変動の証拠として特定されている(Williamson et al., 2009³²⁾)ものの、アクセスの悪さなどの理由によりその実態解明は遅れている。特に、氷に覆われた高緯度北極の湖の環境(温度、酸素、水中光)および一次生産性の季節変動はほとんど理解されていないのが現状である。

本研究では、高緯度北極の湖の季節的および年々の環境変動を把握するために、エルズミア島の北海岸の6km沖、クッティニルパーク(Quttinirpaaq)国立公園(QUNP)内にあるワードハント島のワードハント湖(WHI、図4-7-18)を調査地とした。最大水深は9.7m、表面積は0.37km²である。ワードハント湖はほぼ毎夏に水柱プロファイリング調査を実施しており、年ごとの湖の変動に関する情報を把握している。近年では、通年湖水で覆われていたこの湖が、夏季に融解する減少が観測されている(Paquette et al., 2015³³⁾)。一方、ほかの季節の情報を得ることはできていなかった。そこで、通年観測可能な係留系の設置を実施した。もし観測期間中に通年湖水で覆われているときおよび夏季に湖水が融解したときの湖の環境について通年で観測できれば、湖水融解が湖沼環境や一次生産に与える影響を1年をとって観測できる可能性がある。

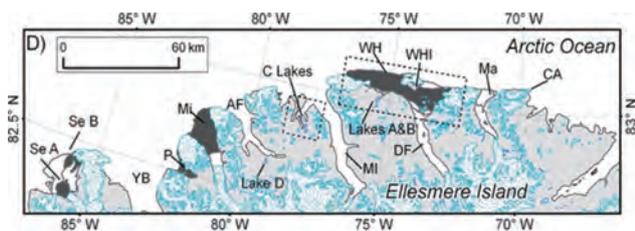


図4-7-18. 調査地であるカナダ最北の湖、ワードハント湖(WHI)

2016年に日本とカナダとの共同チームでワードハント湖を訪れ、係留系を設置できた(図4-7-19)。2017年、係留系のメンテナンスはカナダの共同研究者のみで行い、2018年に再訪して2016～2018年の湖沼環境データの取得に成功した。ワードハント湖の水塊は熱を蓄積し、2016年7月末に6.5°Cまで上昇した。湖水は強風により動き始め、2016年8月15日に完全に消失した。その際、風により水塊は混合され、温度は0°C近くに低下した。これは、夏季湖水が覆われ続けている年と大きく異なる温度環境だった。一方酸素濃度は、湖水が消失するまではほぼ100%のままで安定していたが、湖水消失後の酸素濃度は約90%に保たれていた。秋季になり、再び湖水に覆われると酸素濃度は急速に低下し、12月に湖底で無酸素状態となった。水温は1°C程度まで上昇した後、その温度を維持した。夏季に

湖水が融解しない年では夏季に水温は上昇し、その後緩やかに低下し3～4°Cで安定する傾向が認められ、湖水が融解した場合とでは年間を通じて温度の季節変化や水温が異なることが明らかとなった。

2016～2017年にはクロロフィルaの濃度上昇が2回記録されていた。1回目は2016年8月下旬に、2回目は2017年夏季だった。2016年秋の濃度上昇には、湖水の融解にともなう水塊の垂直方向の混合と高い光の利用可能性により生じた可能性がある。一方、2017年夏季については、光合成有効放射(PAR)の減少した際に生じたが、理由は不明である。いずれにしても湖水融解の有無が温度環境や植物プランクトン現存量の指標となるクロロフィルの変動の重要な要因である可能性が明らかとなった。

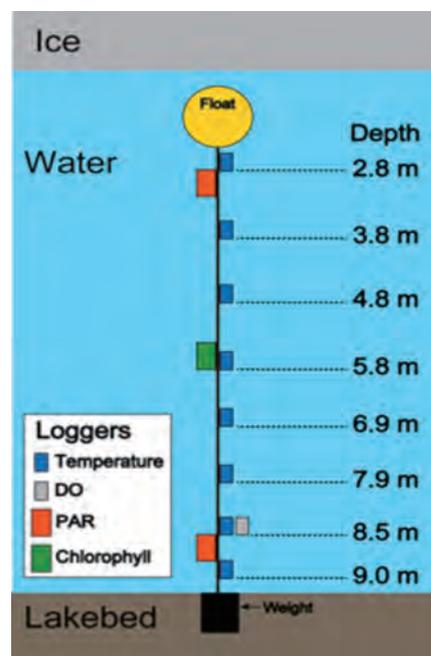


図4-7-19. ワードハント湖に設置した係留系のデザイン。最深部は9.7m。温度(Temperature)、光合成有効放射(PAR)、溶解酸素(DO)、クロロフィル(Chlorophyll)。

注：

- ※1 CAFF, 2019. The CBMP Muskox Expert Network. <https://www.caff.is/terrestrial/terrestrial-expert-networks/muskox>
- ※2 持続可能な人間活動を行うための、地球システム過程/要素（気候変動、海洋酸性化、成層圏オゾンの破壊、窒素とリンの循環、グローバルな淡水利用、土地利用変化、生物多様性の損失、大気エアロゾルの負荷、化学物質による汚染）の変動許容限界（バウンダリー）。
- ※3 神戸大学, 2015. International Symposium on Emerging Arctic Legal Orders in Science, Environment and the Ocean. <http://www.research.kobe-u.ac.jp/gsics-prcc/sympo/20151218.html>.

引用文献：

- 1) Stroeve, J. et al., 2007. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophysical Research Letters*, 34. doi: 10.1029/2007GL029703.
- 2) Wania, F., MacKay, D., 1996. Peer Reviewed: Tracking the Distribution of Persistent Organic Pollutants. *Environmental Science & Technology*, 30, 390A-396A. doi: 10.1021/es962399q.
- 3) CAFF, 2013. Arctic Biodiversity Assessment. Status and trends in Arctic biodiversity. *Conservation of Arctic Flora and Fauna*, Akureyri.
- 4) Barry, T., Price, C., 2015. Arctic biodiversity: from science to policy. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 5, 283-287. doi: 10.1007/s13412-015-0267-3.
- 5) Grebmeier, J. M. et al., 2006. A Major Ecosystem Shift in the Northern Bering Sea. *Science*, 311, 1461. doi: 10.1126/science.1121365.
- 6) Doney, S. C. et al., 2012. Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4, 11-37. doi: 10.1146/annurev-marine-041911-111611.
- 7) Meier, W. N. et al., 2014. Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity. *Reviews of Geophysics*, 52, 185-217. doi: 10.1002/2013RG000431.
- 8) Grebmeier, J. M. et al., 2015. Ecosystem characteristics and processes facilitating persistent macrobenthic biomass hotspots and associated benthivory in the Pacific Arctic. *Progress in Oceanography*, 136, 92-114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2015.05.006>.
- 9) Grebmeier, J. M. et al., 1988. Pelagic-benthic coupling on the shelf of the northern Bering and Chukchi Seas. I. Food supply source and benthic bio-mass. *Marine Ecology Progress Series*, 48, 57-67. doi: 10.3354/meps048057.
- 10) Danielson, S. L. et al., 2014. Coupled wind-forced controls of the Bering-Chukchi shelf circulation and the Bering Strait throughflow: Ekman transport, continental shelf waves, and variations of the Pacific-Arctic sea surface height gradient. *Progress in Oceanography*, 125, 40-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2014.04.006>.
- 11) Cornwall, W., 2019. Vanishing Bering Sea ice poses climate puzzle. *Science*, 364, 616. doi: 10.1126/science.364.6441.616.
- 12) Duffy-Anderson, J. T. et al., 2019. Responses of the Northern Bering Sea and Southeastern Bering Sea Pelagic Ecosystems Following Record-Breaking Low Winter Sea Ice. *Geophysical Research Letters*, 46, 9833-9842. doi: 10.1029/2019GL083396.
- 13) Matsuguma, Y. et al., 2017. Microplastics in Sediment Cores from Asia and Africa as Indicators of Temporal Trends in Plastic Pollution. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 73, 230-239. doi: 10.1007/s00244-017-0414-9.
- 14) Arrigo, K. R., van Dijken, G. L., 2011. Secular trends in Arctic Ocean net primary production. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116. doi: 10.1029/2011JC007151.
- 15) Lammers, R. B. et al., 2007. Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112. doi: 10.1029/2006JG000370.
- 16) 外務省, 2019. 中央北極海無規制公海漁業防止協定. https://www.mofa.go.jp/mofaj/ila/et/page23_002885.html. 最終閲覧 2019年10月21日.
- 17) Safronov, V. M. et al., 1999. Reindeer of Yakutia. *Ecology, morphology and use*. Nauka, Novosibirsk. 222pp. (in Russian).
- 18) Cuyler, C. et al., 2019. Muskox status, recent variation, and uncertain future. *Ambio*. doi: 10.1007/s13280-019-01205-x.
- 19) Wetlands International, 2012. Waterbird Population Estimates, Fifth Edition. Summary Report. Wetlands International, Wageningen, The Netherlands.
- 20) Stabeno, P. J., Bell, S. W., 2019. Extreme Conditions in the Bering Sea (2017-2018): Record-Breaking Low Sea-Ice Extent. *Geophysical Research Letters*, 46, 8952-8959. doi: 10.1029/2019GL083816.
- 21) Piatt, J. F. et al., 1988. Populations, productivity, and feeding habits of seabirds on St. Lawrence Island, Alaska: Final report, Anchorage, AK.
- 22) Huntington, H. P. et al., 2019. The role of areas to be avoided in the governance of shipping in the greater Bering Strait region. *Marine Policy*, 103564. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103564>.
- 23) Sundström, L. F., Gruber, S. H., 2002. Effects of capture and transmitter attachments on the swimming speed of large juvenile lemon sharks in the wild. *Journal of Fish Biology*, 61, 834-838. doi: 10.1111/j.1095-8649.2002.tb00914.x.
- 24) Whitney, N. M. et al., 2016. A novel method for determining post-release mortality, behavior, and recovery period using acceleration data loggers. *Fisheries Research*, 183, 210-221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.06.003>.
- 25) Marshall, H. et al., 2012. Hematological indicators of stress in longline-captured sharks. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 162, 121-129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2012.02.008>.
- 26) Kristinsson, H. et al., 2010. Pan-Arctic checklist of lichens and lichenicolous fungi. CAFF Technical Report No. 20, CAFF International Secretariat, Akureyri, Iceland.
- 27) Osono, T. et al., 2012. Abundance and diversity of fungi in relation to chemical changes in arctic moss profiles. *Polar Science*, 6, 121-131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2011.12.001>.
- 28) Ims, R. A., Ehrlich, D., 2013. Chapter 12 Terrestrial Ecosystems. in *Arctic Biodiversity Assessment. Status and trends in Arctic biodiversity. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF)*, Akureyri, Iceland.
- 29) Scheffer, M. et al., 2012. Thresholds for boreal biome transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 21384. doi: 10.1073/pnas.1219844110.
- 30) Surdu, C. M. et al., 2014. Response of ice cover on shallow lakes of the North Slope of Alaska to contemporary climate conditions (1950-2011): radar remote-sensing and numerical modeling data analysis. *The Cryosphere*, 8, 167-180. doi: 10.5194/tc-8-167-2014.
- 31) Duguay, C. R. et al., 2006. Recent trends in Canadian lake ice cover. *Hydrological Processes*, 20, 781-801. doi: 10.1002/hyp.6131.
- 32) Williamson, C. E. et al., 2009. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54, 2273-2282. doi: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273.
- 33) Paquette, M. et al., 2015. Rapid disappearance of perennial ice on Canada's most northern lake. *Geophysical Research Letters*, 42, 1433-1440. doi: 10.1002/2014GL062960.

りわけ北極域に大きく作用している気候変動や、経済開発を含む社会変動が住民の生活に大きな影響をおよぼしている。このような人間と自然環境の相互作用を分析しようとする観点である。このような観点からの研究は、フィールド調査を必須とするが、本テーマでは、ロシアのサハ共和国、グリーンランド、アラスカにおいて、自然科学のテーマとも連携する形で、フィールド調査を行ってきた。

第3の観点は、自然環境や住民の生活環境を守るための国際的なルールができてきているかを検討するという観点である。言い換えれば、北極域においてどのようなルールを作るべきかを考察することである。北極域の平和的な利用、自然環境の保全、住民社会・文化の保護のためには、北極域における安全保障の枠組みや法秩序の整備が不可欠となる。この観点に関しては、特に北極域の国際関係や国際法に関わる研究を進めた。

特にこの第3の観点に関わることであるが、本テーマは、「AC等北極関連学会への専門家の派遣」メニューと連携して、ACの作業部会に関する意見交換会を毎年度1回ずつ開催してきた。この会議では、AC作業部会等に参加している本プロジェクトの実施担当者を中心に、それぞれの作業部会等でどのようなことが議論されており、日本に対してどのようなことが期待されているかについて意見交換を行った。この意見交換会には、文部科学省、外務省をはじめとする官庁にも出席を呼びかけ、参加してもらった。さらに、2018年度からは、内閣府総合政策海洋推進事務局を中心に「北極に関する政府と研究者との懇談会」が開かれるようになり、その場でも政府関係者との間で意見交換ができるようになった。

こうした意見交換もふまえて、本テーマでは、2020年3月までに「政策決定者向け報告書」を作成することになっている。これは、『我が国の北極政策』のなかで方向付けがなされたことについて、本プロジェクトの研究をふまえてどのようなことができるかをまとめるものであり、『我が国の北極政策』で述べられた方向性が現時点においても適切かを検証し、どのような知見を付け加えることができるかを示すものである。

以上に説明した3つの観点は、実際には相互に密接に結び付いたものであり、これらを縦断するような形で数多くの国際シンポジウムやセミナーなどを開催してきた。以下の4.8.2、4.8.3、4.8.4では、それぞれこの3つの観点に対応する研究の成果をまとめている。

全体の研究成果の刊行

本テーマの成果は、まとまった形としては、田畑 伸一郎・後藤 正憲編著『北極の人間と社会：持続的発展の可能性』として2020年2月に北海道大学出版会から出版した。同書の構成と執筆者は次のとおりである。

序章：持続的発展を目指して(田畑 伸一郎・後藤 正憲)

第1部：経済開発

第1章：北極海航路(大塚 夏彦)

第2章：石油とガス(田畑 伸一郎・本村 眞澄)

第3章：漁業(成田 大樹・平澤 享)

第2部：環境と人間

第4章：凍土と文化(後藤 正憲・中田 篤・飯島 慈裕)

第5章：変化と適応(藤岡 悠一郎・高倉 浩樹・田中 利和・Stepan Grigoriev)

第6章：先住民とモニタリング(近藤 祉秋)

第3部：ガバナンス

第7章：国際関係(大西 富士夫)

第8章：北極評議会(稲垣 治・幡谷 咲子)

第9章：国際法に基づく秩序づくり(柴田 明徳)

第10章：開発と先住民族(高橋 美野梨)

あとがき(田畑 伸一郎)

4.8.2 北極海航路の利用と資源開発

大塚 夏彦・田畑 伸一郎

本研究の背景

北極域の急速な環境変化ならびにこれに関わる人間社会への影響において、非北極圏国をも巻き込んだ経済的なインパクトを与え始めたのが北極海航路である。ロシア沿岸を通じて大西洋と太平洋をつなぐ北極海航路(Northern Sea Route)は、欧州北部と東アジア間の海上輸送距離を、既往のスエズ運河回りに比して約40%短縮することができるとともに、ソマリア沖やマラッカ海峡近海に出没する海賊の心配がない特徴がある(図4-8-2)。旧ソビエト連邦(ソ連)時代は外国には閉鎖された航路であったが、1987年、ゴルバチョフ書記長のムルマンスクにおける演説で、国際航路として開放されることが宣言された。しかし、耐氷船^{※1}が旧ソ連の原子力砕氷船支援のもとで航行することが義務付けられるとともに、高額な砕氷船支援朝や、不透明で面倒な航行許可手続きが求められることなどから、当時は国際海運市場の関心を得ることはなかった。

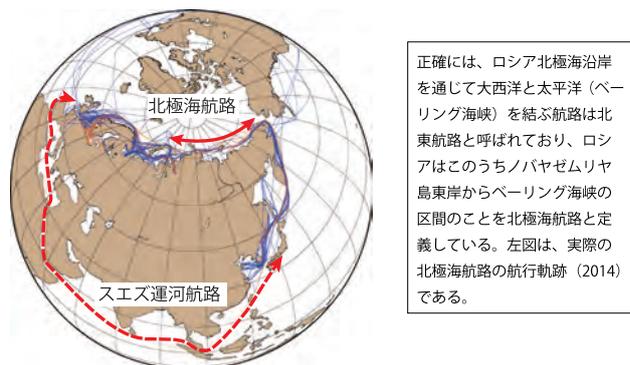


図4-8-2. 北極海航路

その後21世紀に入り、北極海における顕著な海水減少に加え、船舶燃料や輸送費用の高騰が起り、海運市場は燃料・輸送コスト削減への期待から、北極海航路に注目し始める。そして2010年に実施された北極海航路による試験的な国際輸送の成功(Arctic Bulk AG, 2010¹⁾; SCF Sovcomflot, 2012²⁾)を契機に、北極海航路を利用した欧州・アジア間の海上輸送が行われるようになった。2011年に始まったGRENE北極は、

北極海航路が商業利用され始めるという実社会の動きと並行して、航路利用拡大の背景、同時進行するロシアによる航行管理制度の改定の影響、減少を続ける海水環境、商業利用のフィージビリティを同時進行で分析した。しかし、海水減少による航行環境緩和はどこまで進むか、海運市場の反応と北極海航路需要は本物か、航路の需要動向を握るロシア沿岸域の天然資源開発は本当に進むのかなど、多くの不確定要因が存在し、北極海航路のフィージビリティは多くの不確かな仮定のもとで論じられるにとどまった。

しかし本プロジェクト期間を経ることによって、燃料価格や海運市場、ロシアの国内事情や北極海沿岸での天然資源開発、原子力砕氷船の建造の進行など、多くの環境が以前よりは落ち着きを見せるようになった。同時に、北極海航路の商業利用の可能性、航行安全性や安定性、海水減退の進行による今後の動向は、産業界だけでなく各国の北極政策においても関心事項となっている。

本プロジェクトは、こうした環境のもとで、実際の航行実態を衛星で取得した AIS^{**2} 情報を使って把握し、輸送実態を明らかにするとともに、海水状況に対する航行難易度を分析し、北極海航路の航行モデルを提示した。さらに、このモデルを用いて実際の航行シナリオを種々の貨物タイプについて検討し、輸送コストの特徴と利用可能性を示した。

北極海航路による貨物輸送の動向分析

2010 年に行われた試験的輸送の成功を契機に、翌年より北極海航路を通じた欧州およびロシア沿岸と東アジア間の資源貨物の輸送が始まり、2013 年には 71 航路 136 万 t まで増大し、鉄鉱石、ガスコンデンセート、ナフサ、LNG などが日本・中国・韓国に、ジェット燃料などが欧州に輸送された。しかし 2014 年、燃料価格の下落、アジアの資源需要低迷、海運市場低迷に加え、ロシアに対する米国・欧州の経済制裁発動に対するロシアの反応を忌避して、北極海航路を横断する国際輸送は急減した。その後もこの低迷は継続しているものの、貨物量は徐々に回復する傾向にある。一方、北極海航路の総貨物量は 2000 年以降継続的に増大し、2018 年は歴代最高の 2,000 万 t に達した (図 4-8-3)。この背景には、ロシア北極海沿岸からの原油輸送と、ヤマル LNG からの LNG 輸送の開始がある。

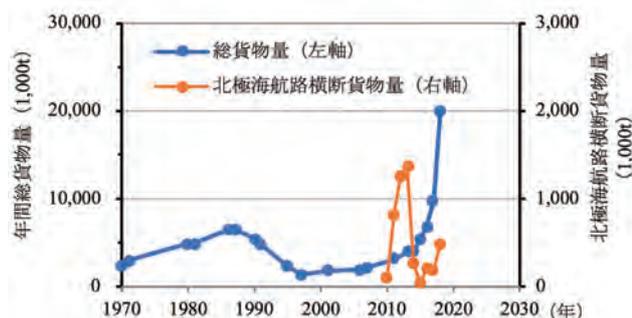


図 4-8-3. 北極海航路貨物量の変遷

図 4-8-4、図 4-8-5 は 2015 ~ 2017 年夏季における北極海航路航行船舶の船種およびアイスクラス^{**3} を月別に平均したものである。カラ海・ベチョラ海の海域から通年輸送されている原油や一部の貨物を除くと、貨物輸送期間は 6 ~ 11 月、船舶数が最多となるのは海水面積が最小となる 9 月となっている。船種ではバルク・一般貨物船がもっとも多く、ついでタンカーが占め、その他は特殊貨物船、タグボート、浚渫船など多様な作業船が航行している。アイスクラスでは、PC7 (多年氷が一部混在する薄い一年氷の中を夏季または秋季に航行する船)・PC6 (多年氷が一部混在する中程度の厚さの一年氷のなかを夏季または秋季に航行する船)^{**4} の船級を持つ船が約半分を占める一方、7 ~ 10 月にはこれよりも低い船級となる 1B ~ 1D の船および一般船も多数航行している。これには、ロシアの航行規則が 2014 年に改訂され、海水勢力が緩和すると PC7 よりも低位のアイスクラスの船にも航行許可が与えられるようになったことと、実際に海水勢力が減退していることが背景となっている。

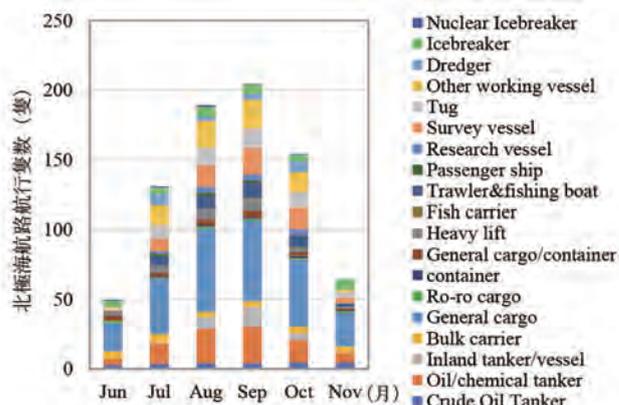


図 4-8-4. 北極海航路航行船舶の船種 (2014 ~ 2017 年の月別平均)

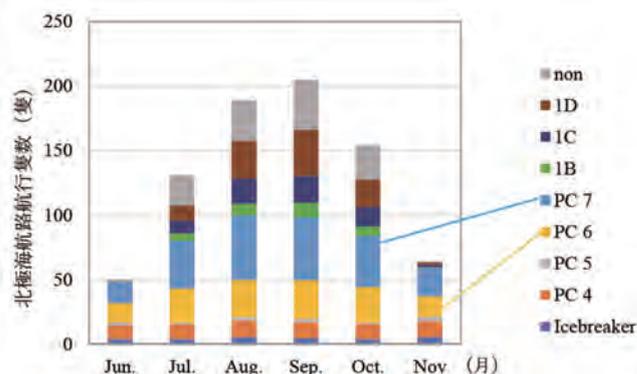


図 4-8-5. 北極海航路航行船舶のアイスクラス (2014 ~ 2017 年の月別平均)

2010 ~ 2017 年の間に、北極海航路途中のロシア沿岸港に寄らずに東西に横断航行した貨物の日本・中国・韓国における取り扱い量をまとめた結果が図 4-8-6 である (大塚, 2018c)。2013 年までは中国・韓国向け輸送が主体、2015 年以降は中国・欧州間の貨物が主体となっている。日本には 2012 ~ 2013 年にそれぞれ 1 回ずつ、ノルウェーより LNG の試験輸送が行われた。また、アイスランド産冷凍鯨肉の輸送が 3 回行われた。2017 ~

2018年には中国のコスコ SHIPPING 社によって、欧州から家畜飼料が北海道(苫小牧港・釧路港)に輸送された。また2019年10月には、フィンランドから木材を詰めた40ftコンテナ20個が苫小牧港に運ばれた。一方韓国では、2014年以降に北極海航路を横断する輸送はない。

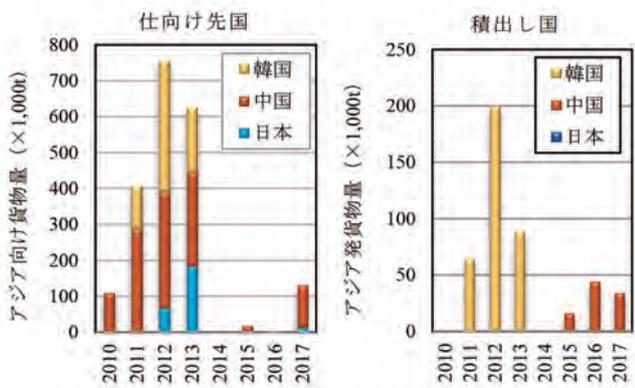


図4-8-6. 日本・中国・韓国を発着した北極海航路横断貨物

氷海航行の実態把握と航行可能性の分析

どの程度の海氷条件のもと、どの程度の速度で航行できるか、氷況と実際の航行可能速度を得ることで、北極海航路を使った海上輸送シナリオとそのコストの分析が可能になる。このため、衛星で取得した AIS 情報に含まれる実際の航行速度と、船が航行した位置・日付における氷況を分析した(図4-8-7)。夏季で、海域が無氷状態になっている場合、船は砕氷船の支援を受けずに単独航行しており、航行速度は10~16knに達する。ただし海氷状況が十分に緩和的でない海域や、季節的に中位以上の海氷状況が予想される場合は、ロシアの原子力砕氷船の支援のもとで航行されている。その速度は、海氷状況が厳しくない場合には12kn程度に達している。一方、砕氷船支援下でも厳しい海氷状況のために、航行速度が1kn以下となった事例が2014年7月の東シベリア海で発生したことを確認した。

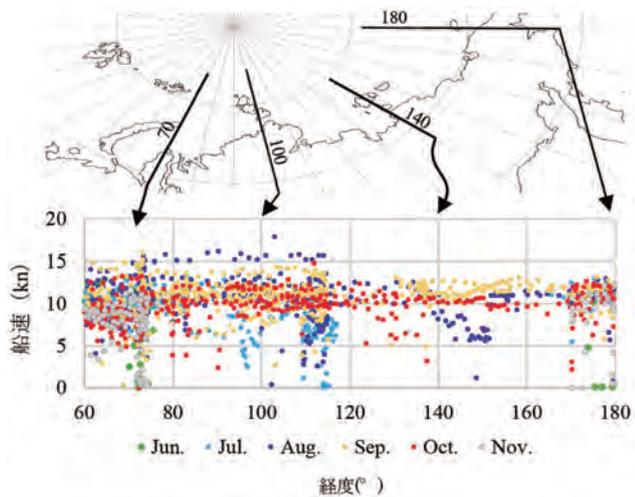


図4-8-7. 北極海航路の航行速度例(2015年に衛星で取得したAIS情報による)

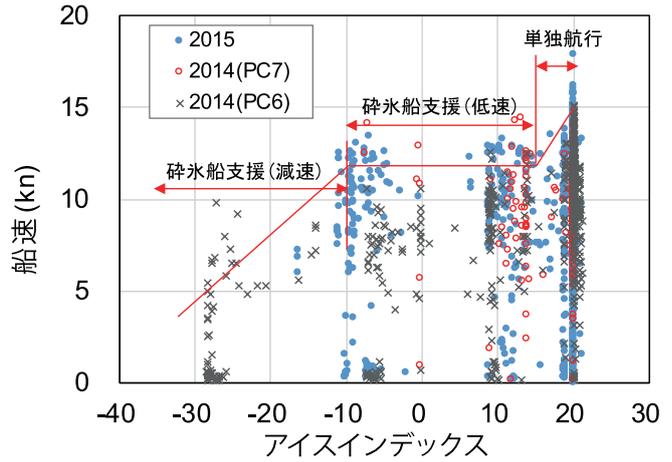


図4-8-8. 船速とアイスインデックス

次に、Yamaguchi (1995)³⁾ が導入したアイスインデックス^{※5}を用いて、船速との関係を検討した。アイスインデックス算定には、北大西洋と北極域を対象とする海洋・海氷結合モデルTOPAZ4が提供する海水の再解析データ(海水密度と海水厚)を用いた(Sakov, et al., 2012⁴⁾)。解析対象は5,000DWT以上の貨物船で、2014年の航行船舶のうちアイスクラスPC7相当5隻とPC6相当7隻、2015年はアイスクラスPC7相当40隻である。結果を図4-8-8に示す(大塚他, 2018)。本調査事例より、船の運航はアイスインデックスが15程度より小さくなるあたりから砕氷船支援での運航となっている。また砕氷船支援下での航行速度の上限は、アイスインデックスが-10程度までは10~12kn、かつPC6の船の場合は、アイスインデックスが-10以下の氷況でも航行しているものの、航行速度は低下している。いま砕氷船支援を要する状況として、密接度は小さいが氷が厚い場合(密接度20%、氷厚120cm)と、氷は薄い但し密接度が高い場合(密接度50%、氷厚50cm)を想定すると、アイスインデックスはいずれも15程度となる。また海水密度が100%とすれば、アイスインデックスが-10となるのは概ね海水厚が70cm以上(PC7)または120cm以上(PC6)の場合である。以上より、アイスインデックスが20から低下するにつれて、単独航行できる領域、砕氷船支援で10~12knにて航行可能な領域、砕氷船支援でも減速する領域に応じ、航行可能速度を評価できる可能性があることを示した(図4-8-8中の赤破線)。

北極海航路航行のための海氷状況の整理

北極海航路海域における氷況の年平均値がわかれば、概ね航行可能な速度を推定できることから、北極海航路ルートにおけるTOPAZ4による2011~2015年の5年間の日平均海水密度および海水厚の年平均値を算出した(Otsuka et al., 2019a)。ここに、日差を平滑化するため各年の5日間移動平均値を5年間平均して整理した。図4-8-9はそのうち、左から順に海水密度の5日間平均値の最大値、5年間平均値、および標準偏差を示す。縦軸は1月1日からの経過日、横軸は経度である。海水は、東経100度付近のビルキツキー海峡付近および東経150度付近のノヴォシビルスク諸島東側海域で、夏季でも多く残る傾向がある。また水域と海水面の境界および前記の海域で偏

差が大きくなる傾向がある。平均値では、北極海航路は 210 ~ 280 日の期間に密度 20% 以下、240 ~ 275 日の期間に無氷となる。

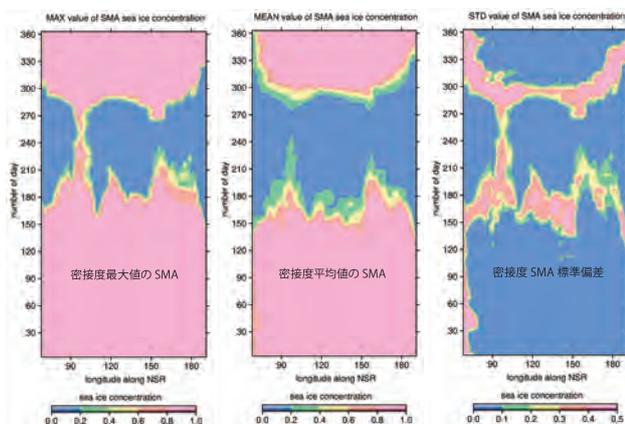


図 4-8-9. 北極海航路上の海水氷密度の 5 日間移動平均 (2011 ~ 2015 年)

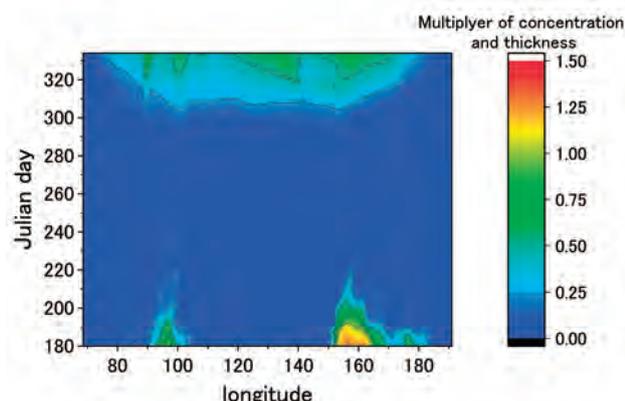


図 4-8-10. 北極海航路上の海水氷体積の 5 日間移動平均 (2011 ~ 2015 年)

図 4-8-10 は 180 ~ 330 日 (6 ~ 11 月) の期間における単位面積あたりの海水氷体積 (海水氷密度と海水厚の積) である。同図より、210 日頃の東経 150 度付近海域は東経 100 度付近海域よりも早く海水氷密度が減退するが、より多くの量の海水が残る傾向があり、航行には注意を要することがわかる。なお、TOPAZ4 による海水氷再解析データと、JAXA の水循環変動観測衛星「しずく」搭載の高性能マイクロ波放射計 (AMSR2) による観測値の比較は、Otsuka et al. (2019a) および Nakanowatari et al. (2016) ^{※6} にて実施した。

北極海航路による貨物輸送のコスト分析

北極海航路が事業として成り立つには、輸送に要するコストが競合するスエズ運河航路に比して競争力があること、海運ビジネスにおける一般的な要求条件を満たすこと、荷主または船社に便益がうまれること、などが求められる。一般に、ドライバルクや液体バルクの海上輸送コストにおいては燃料費が卓越し、輸送コストの 30 ~ 50% 程度を占める場合が多い。北極海航路によって距離短縮が可能となる輸送では、燃料消費量の削減、輸送時間の短縮による各種操船費用などの削減が期待できる。

その一方、耐氷船の償却費は一般船よりも高くなり、氷況に応じてロシアの原子力砕氷船による航行支援を受ける費用や水先案内の費用、保険料のプレミア分などの追加コストも発生する。さらには、航路水深の制限および貨物量の規模が限定されるために、大型船投入によるコスト削減ができないという不利もある。北極海航路の輸送コスト競争力は、こうした便益とコスト増要因の相殺具合で決定される。

そこで、2014 ~ 2015 年の氷況の 15 日間平均に対するアイスインデックスから航行速度ならびに砕氷船支援を受ける海域を求め、ドライバルカー、タンカー、自動車運搬船、LNG タンカー、コンテナ船の航行シナリオを検討した。さらに、それぞれのシナリオによる輸送コスト (6 ~ 11 月の期間の半月別) を競合する航路による輸送例と比較検討した (図 4-8-11、Otsuka et al., 2016)。

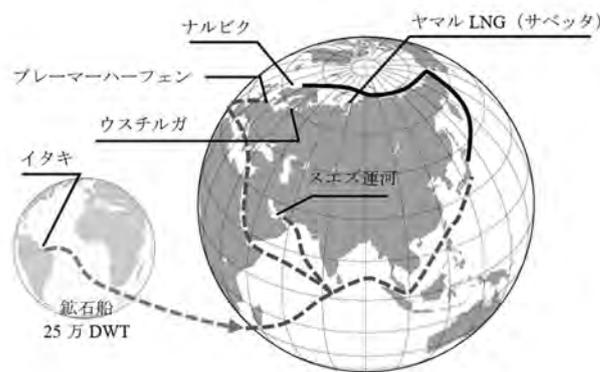


図 4-8-11. 輸送コスト比較シナリオ

ドライバルク輸送では鉄鉱石を取り上げ、7 万 t 鉄鉱石船でナルビク (ノルウェー) から北極海航路を通じて日本へ輸送するシナリオと、イタキ (ブラジル) から 25 万 t 鉄鉱石船で喜望峯経由で日本へ輸送するシナリオを比較した。液体バルクでは、ガスコンデンセートを 10 万 t タンカーでウスチルガ (ロシア) から日本へ、北極海航路またはスエズ運河航路で日本へ運ぶシナリオを比較した。その結果、6 ~ 11 月の平均輸送コストにおいては、どちらのシナリオでも燃料・油費および貨物船の運転経費の削減が可能となり、北極海航路が有利となった。

完成自動車輸送は、日本からブレーマーハーフェン (ドイツ) への輸送を、北極海航路では 3,800 台積み耐氷船、スエズ運河航路では 6,500 台積み船を想定して比較した。その結果、北極海航路による輸送時間の短縮によって、燃料費削減だけでなく高額な船体償却費の削減が効果的となり、北極海航路の輸送コストが優位になりうる結果となった。

LNG 輸送では、ロシア・ヤマル半島から専用の砕氷 LNG 船で日本に単独輸送するシナリオと、同型船でカタールから日本に輸送する場合を比較した。その結果、ヤマルからの輸送コストは、カタールからよりも高額となるものの、コスト差は当時の LNG スポット輸入価格の 2.7 ~ 4.0% であり、輸送コストの差が製品価格に大きな影響を与えるほどではないと評価された。

以上の貨物タイプの輸送シナリオにおいては、海水氷勢力の減退により、砕氷船費の削減、航行難易度の減少効果により、北

極海航路の優位性が拡大する。また、上記検討では砕氷船支援朝料をロシア規程の上限額で評価しているものの、ループル安によって、従前に対しかなりのディスカウントになっている点に注意が必要である。なお、砕氷船支援朝料が同型船に対するスエズ運河通航料と同程度であれば、北極海航路のコスト優位性が期待できる。

一方コンテナについては、北極海航路を通年で航行することはまだ現実的でないため、7隻の4,000個積み耐氷船で夏季は北極海航路、冬はスエズ運河を利用してウィークリーサービスを実施するシナリオを提案した。本シナリオでは、1ループ(1往復)49日で欧州側3港湾、アジア側3港湾に寄港し、北極海航路区間で海氷状況によって生じる航行日数の変動を、一般海域の航行速度で調整して定時運航を実現する。この北極海航路・スエズ運河航路併用シナリオの輸送コストは、8,000個積みコンテナ船でスエズ運河航路を通年運航する場合と同等となった。しかし最近始まった2万個積み大型船によるスエズ運河輸送には、コストではかなわない。また、ロシアの砕氷船サービスが頻繁に航行するコンテナ船の要求に応えるかどうかは不明である。ただし片道40日程度を要する現行のスエズ運河航路に対し、北極海航路シナリオの速達性は、大きな優位点となる可能性を示した(Furuichi and Otsuka, 2016)。また、夏季の航行可能期間が拡大するほど、通年運航コストは低減が図られる。

北極海航路の将来展望

ロシアは2018年、北極海航路貨物量を2024年には現在の4倍となる8,000万tまで拡大する大統領令を明らかにした。その内訳のうち、通年輸送が始まったカラ海からの原油およびヤマル半島からのLNGがフル稼働することによって、約半分の貨物量が実現可能となる。さらに、ヤマル半島のオビ湾対岸における第2のLNGプロジェクト(Arctic LNG2)の稼働が実現すれば、これら原油・LNGだけで6,000万t規模に達する。この見通しは十分ありうる規模と考えられる。一方、冬季の貨物輸送を支えるロシアの原子力砕氷船の更新は、1隻目だけは就航が近付いているものの、それ以降の見通しは不明確である。これが遅れるようだと、北極海航路の成長には懸念材料となる。

北極海航路を横断する一般貨物の国際輸送においては、中国のコス SHIPPING 社がアイスクラスを持つ自社の多目的バルク船団(1万9,000~3万8,000DWT)を投入し、欧州~東アジア間の横断輸送を開始し、2014~2018年の5年間で11回の横断航海を実施するとともに、事業拡大を指向して活動している。同社がこれまでに輸送した貨物は、風力発電風車機材、パルプ、金属、家畜飼料、コンテナなど多様である。ただし一般貨物の横断輸送は、航行可能時期において、欧州・アジア間の不定期貨物の需要と耐氷船手配がうまく合致した場合に限って実施されている段階である。このように北極海航路の一般貨物利用は予断を許さない状況であるが、成功事例の蓄積によって、小規模ではあるが現実的な航路となる可能性がある。

石油・ガス開発とロシア経済への影響

2000年代には、気候変動・地球温暖化の影響と油価の高騰

により、北極海やその沿岸地域における石油・ガス開発がそれまでとは比べものにならないほど進展した。北極海航路利用の活性化は、生産された石油・ガスとその生産設備の運搬を促進した。

本テーマでは、特にロシアの北極域における石油・ガス開発の現状と将来予測について研究を進めた(田畑・本村, 2020)。そのなかでも北極海とヤマル半島が分析の中心となり、これまでのMotomura(2018)などの研究をさらに進めることになった。ヤマル LNG 事業については、2017年12月に生産と輸出が開始され、これが北極域の経済開発と北極海航路の活用の歴史において画期となった。上述のように、北極海航路の貨物輸送量は、2017年以降、飛躍的に増大した。石油・ガス開発の将来予測に関しては、ヤマル半島やその周辺海域に大きな潜在力があることから、少なくとも2030年代までは、ロシアの北極域はロシアにおける石油・ガス生産の中心地域であり続けるという結論を示した。ただし、長期的には、欧米による経済制裁のなかで北極海や大水深における石油・ガス開発技術の対ロシア供与が禁止されたことの影響が出てくる可能性にも言及した。

表 4-8-1. ロシアの連邦財政に対する北極域の寄与額(2017年)

	仮設的純寄与額		移転		仮設的純寄与額	
	PGC		TR		PNC-PGC-TR	
	100万 ルーブル	比重	100万 ルーブル	比重	100万 ルーブル	比重
ロシア全体	13,257,725	100.0	1,771,676	100.0	11,486,049	100.0
北極域	2,330,768	17.6	169,129	9.5	2,161,640	18.8
ムルマンスク州	21,403	0.2	7,319	0.4	14,084	0.1
カレリア共和国	7,112	0.1	14,266	0.8	-7,154	-0.1
アルハンゲリンスク州	18,720	0.1	18,060	1.0	660	0.0
ネネツ自治管区	98,479	0.7	1,537	0.1	96,942	0.8
コミ共和国	142,469	1.1	6,807	0.4	135,662	1.2
ヤマロ・ネネツ自治管区	1,598,429	12.1	3,639	0.2	1,594,790	13.9
クラスノヤルスク地方	347,355	2.6	34,560	2.0	312,795	2.7
サハ共和国	96,888	0.7	65,785	3.7	31,103	0.3
チュコト自治管区	-85	0.0	17,156	1.0	-17,241	-0.2
ハンティ・マンシ自治管区	2,608,975	19.7	11,323	0.6	2,597,652	22.6
サハリン州	134,862	1.0	4,833	0.3	130,030	1.1
モスクワ市	2,204,466	16.6	47,012	2.7	2,157,454	18.8

(出所) ロシア統計局、連邦出納局のウェブサイトから筆者作成。

このようなロシア北極域における石油・ガス開発のロシア経済に対する影響に関しては、ロシアの地域における財政資金循環に関する研究を行った。各地域における連邦税収から、各地域が連邦財政の支出として受け取る移転(補助金)を控除した額を各地域の連邦財政に対する純寄与額と定義し、その推計を行った。このような推計はロシアでも行われてこなかったことから、この研究成果はロシア語に翻訳され、ロシアの地域研究の主要雑誌のひとつに掲載された(Tabata, 2019)。推計結果は、ロシアの連邦財政が石油・ガス生産地域によって支えられていること、その生産地域のほとんどが北極域あるいは準北極域に位置しているため、北極域が連邦財政に大きく貢献していることを示している(表 4-8-1)。このように北極域全体としては連邦財政に対してドナー(donor)の立場にあるが、北極域のふたつの地域は連邦から受け取る補助金の方が連邦に支払う税金よりも多いレシピエント(recipient)になっていることも示した。

通信ケーブル

本テーマでは、北極海航路に関する研究と並行して、その海底にケーブルを敷設し、東アジアと欧州を結ぶ通信の可能性についても研究を進めた(Saunavaara, 2018)。北極海は、海

底ケーブルのない最後の海洋であるとみなされてきたが、現在、状況は変化している。アジアと欧州の間の通信量は、今後世界の通信量のなかでもっとも増加することが予測されており、北極海はそのためのショートカットを提供し、レイテンシーも短くなることが期待されている。とりわけ、フィンランド北部地域と北海道の行政府と産業界がこの北極海の海底ケーブルに関心を寄せている。

この通信の問題を中心的テーマのひとつとして、2018年6月に札幌で「AEC Top of the World Arctic Broadband Summit」が開催されたことも特筆される。これは、北極経済評議会（AEC: Arctic Economic Council）がアジアではじめて開いた会議であり、北海道庁、北海道大学、北海道経済同友会が共催した。

4.8.3 環境と人間の相互作用

後藤 正憲

北極域における人間と環境の相互作用のあり方を明らかにすることによって、持続的発展の可能性を探ることは、本テーマの掲げる重要な課題のひとつである。この課題に取り組むためには、人文社会科学の研究者と自然科学の研究者が協力して作業することが不可欠である。人文社会科学の研究者は人間のあり方にアプローチすることを得意とするが、それを取り巻く環境変化のメカニズムに疎い。逆に自然科学の研究者は、自然環境におけるさまざまな現象の動態を研究対象とするが、それが地域社会においてどのような意味合いを持つのかといったことについては、自らの守備範囲としていない。両者が共同で取り組むことによって、はじめて総合的な判断が可能となる。

しかしながら、そもそも人間と環境を二項対立的に捉える見方には限界がある。北極域を含め、ローカルな文脈で、人々の日常的な生活実践のなかで育まれる知識では、人間と自然環境はともにひとつの全体をなし、明確に切り離されるものではない。両者の配分は関係的で、見るものの視点によって変わらうる（Descola, 2014⁵⁾）。したがって、両者の関係を対立的に捉え、一方が他方に影響をおよぼすと捉える見方自体が、すでにひとつの知識体系に捉われていることになる。本プロジェクトが北極域で暮らす人々の生活に関するものである以上、人文社会科学と自然科学のみならず、科学の知と実践の知をつなぐ努力がなされなくてはならない。

こうした課題は、本プロジェクトの研究者がフィールド調査を行うなかで、たびたび直面することになった。本テーマでは、東シベリア、内陸アラスカ、グリーンランドにわかれて、それぞれ調査を行った。その結果、地域の状況はそれぞれの場合によって異なるものの、共通する側面が浮かび上がってきた。

東シベリア：環境の変化と社会の変化

もっとも大規模な調査が行われたのは、東シベリアである。東北大学を拠点とする研究者グループが、サハ共和国の中央ヤ

クーチアで調査を行った。現地における永久凍土融解の状況とその地域住民の生活への影響について、文化人類学、地理学、歴史学、地質学、環境生態学の研究者が共同で調査にあたった。

主要な調査地となったチュラブチャ郡は、レナ川右岸の平野に位置し、サハの言葉でアラスと呼ばれるサーモカルスト地形が広がっている。アラスは円形または楕円形をした窪地で、底の平らな部分は草に覆われ、多くは中央に池や湖をたたえている。最終氷期が終わり、地中のアイスウェッジが解け出すことで地盤が沈下してできたもので、チュラブチャ郡のあるレナ川右岸の平野には、大小さまざまなアラスが無数に存在している（図4-8-12）。1万年近くもの長い歳月をかけてできたアラスの基底部の土壌には塩分が多く含まれており、塩分に強い草しか育たないが、牧畜の盛んな地元では、その草が牛や馬の飼料として大いに利用されている（Crate et al., 2017）。



図4-8-12. 中央ヤクーチアのアラス

しかしその一方で、近年新たなサーモカルスト現象が広がっており、ソ連崩壊後はさらにその傾向が加速している。研究グループの自然科学研究者は、遠隔探査システムを使って湖水面積の増減を調べたり、地表の活動層の深さを実地計測したりすることによって、サーモカルストの発達具合を地域別に数値データ化した。その分析結果から、中央ヤクーチアにおける近年のサーモカルストの発達は、人為的な森林破壊に起因するものであり、特に2000年頃から気候と永久凍土の状態が変化することで、さらにそれが加速していることがわかった（Ulrich et al., 2017）。長い歳月をかけて発達したアラスと異なり、若いサーモカルストでは土地が湿潤化するとともに、隆起と浸食による荒廃が進んで牧草の生育も悪くなる。このため、近年のサーモカルストの発達は、牧畜産業にとって大きな脅威となっている。

一方、本テーマの別の研究者は、自然科学の研究者やヤクーツクの研究者とともに、環境経済学の視点から森林火災の影響についての研究を進めている。サハは、森林面積がロシアで最大の地域であり、森林火災の件数も比較的多い。実はこの森林火災も、近年のサーモカルスト発達の原因のひとつとなっている。火災件数は近年減少しているが、焼失面積は逆に大幅に増加している。共同研究では、ソ連崩壊後に立て直しを迫られている森林火災の管理制度の検討を行うとともに、森林火災が住民にもたらす損失や、大気汚染とグローバルな気候変動におよぼす

影響について分析している。

ここで考慮に入れておくべきは、過去30年ほどの間にサハで経験されたことは、気候と環境の変化だけでなく、社会構造の大きな変化でもあったということである。夏が短く、冬の寒さが非常に厳しい亜寒帯気候の土地は、作物の栽培に向いていないことから、人々は従来から牛馬の牧畜を主な生業としてきた。ソ連時代の国営農場では、比較的生産性の高い牛の牧畜に力が入れられていた。しかしながら、ソ連崩壊後の25年間で、牛の飼育頭数は約半分にまで減少した(図4-8-13)。解体した国営農場の財産を分配された個人農家にとって、牛の飼育に欠かせない夏場の乾草づくりに十分な土地と労働力を確保できなくなったためである。ソ連時代には国家の統制によって、労働力・資金・機材を動員して、遠隔の土地でも乾草を作ることができた。しかしソ連崩壊後は、国の後ろ盾を持たない個人農家にその動員力はなく、またガソリンの値上がりで輸送コストが大幅に上昇したために、遠隔の土地はのきなみ放棄された。必然的に乾草の絶対量は下がり、牛の頭数を減らしたり、完全に手放したりする農家が後を絶たなくなった(後藤, 2018)。

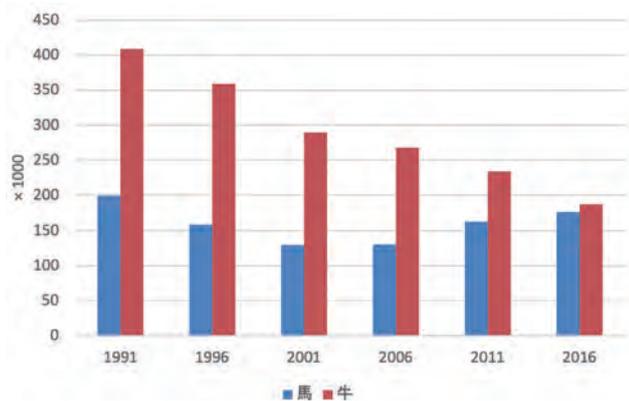


図4-8-13. サハにおける家畜頭数の推移 Source: 連邦統計局サハ(ヤクーチア)共和国地方機関サイト (<https://sakha.gks.ru/folder/53269>)

それに対して、馬の頭数はソ連崩壊後に一時減少したものの、2000年代に入ると持ち直し、その後20年間でほぼソ連時代と同数にまで回復している(図4-8-13)。牛と異なり、馬は冬でも雪をかき分けて地表に生える草を食べることができるため、野外に放したまま飼育される。厳冬期には馬にも補助的に乾草を与えることが必要だが、冬をととして牛に与える乾草の分量に比べると、馬にははるかに少ない分量で済む。冬でも野外で放牧するため、畜舎などの設備投資も必要ない。こうしたことから、新たに農業経営を始めるサハの家族にとって、馬の飼育は合理的な選択肢となっている。

しかしながら、馬の飼育は粗放的であるがゆえに、天候に左右されやすいという一面がある。冬の降雪量が多いと、馬が雪をかき分けて草を食べることが困難になる。また、逆に降雪が少なくても、秋に急激に気温が下がると地表面の水分が凍って氷の層を作り、馬が雪の下の草を食べるのを遮ってしまう。秋から冬にかけての天候不順を受けて、馬が十分な量の草を食べることができなかった年は、馬の出産率が大きく落ち込む。馬飼育では牛の

飼育と比べて、必要とされる労力や出費が少ない反面、自然環境の影響を受けて収入が不安定になる要素が大きいといえる。

この事例から明らかなように、社会構造の変化は自然環境の変化と密接に関わっている。ソ連崩壊後の農業改革で国営農場が解体された結果、村から遠く離れた牧草地の多くが利用されずに放置された。未利用のまま放置された土地は、年月とともに隆起と浸食を重ね、若いサーモカルストが発達しやすい条件を作り出している(Saito et al., 2018a)。それと同時に、現代の農業事情に即して比重の高まっている馬の飼育は、天候不順など自然環境の影響を容易に受ける傾向にある。社会変化の人的要因と、環境変化の自然的要因は、互いに複雑に絡み合っており、両者の関係は単純な因果関係に還元することができない。人間と環境は、互いに変化をうみ出す原因になりうると同時に、変化によってうみ出される結果にもなりうる。

在来知と科学知

フィールド調査を行うなかで、人々の間で灌漑についての特有の知識が、何世代にもわたって受け継がれていることがわかった。現地の人々は土地の起伏を熟知しており、雪解け水の流れに応じて人工の湖や溜池を作る技術を培ってきた。しかし、今後乾燥から湿潤へと気候が変化していくにつれて、こうした技術も変化していく可能性がある(藤岡他, 2020)。

気候の変化とそれともなう環境の変化を、現地住民はどのように認識しているのだろうか? このことについて調べるために、住民の間でアンケート調査を実施した。それによると、環境の変化に関する経験としてあげられるなかで、もっとも大きい割合を占めているのが、天候不順による馬飼育への影響、雪解け水の浸食による谷の増加、牧草地の浸水などである。その他、住民のなかには降水量が増えたという者と、干ばつの頻

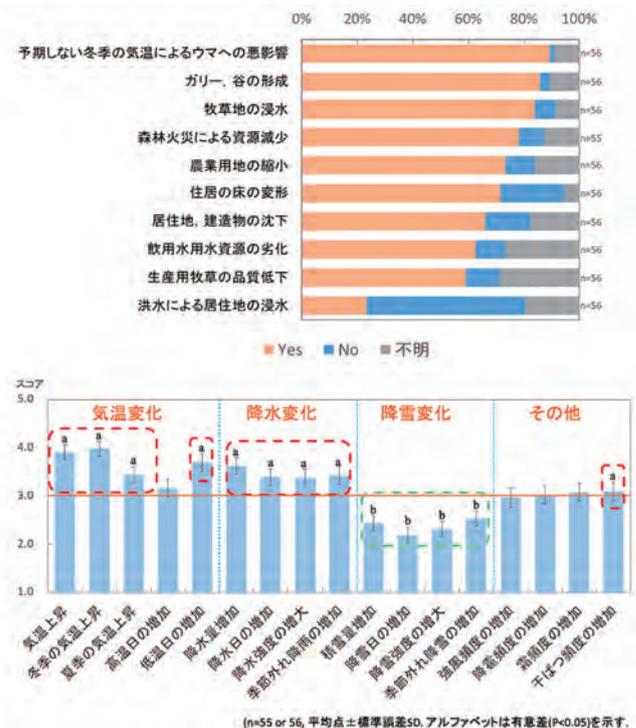


図4-8-14. 気候変化に関するアンケート結果の分析(藤岡他, 2020)

度が増えたという者のように、互いに相反する見方が混在していることが、アンケートの結果からわかった(図4-8-14)。このように、環境変化の捉え方は人によって大きく異なるが、いずれにしても雨の降り方や永久凍土の融解といった現象が人々の間で大きな関心を占めていることが指摘できる。さらにその関心は、降水量の増減だけでなく、飲み水が悪化しないかといった水質の問題に向けられている。調査する研究者は環境変化のある一定の側面だけに着目しがちだが、現地の住民は日々の生活を取り巻くさまざまな変化に直面しており、実際的な問題がどこにあるかを強く感じ取っている。

この場合のように、現地住民の見方と、研究者や政策決定者の見方が食い違うことは、往々にして起こりうる。今後北極域の社会に関わる活動を行っていくうえで、両者のずれをできるだけ少なくすることが重要である。本テーマでは、その一環として環境教育教材を作るなかで、科学的見地にもとづく知識と、地域住民の培ってきた在来知を統合する試みを行った。国際連合教育科学文化機関(UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)の提唱する環境教育は、各自が環境に対してポジティブに働きかけ、その資源を適切に利用する行動パターンを養育することを目的としている(UNESCO, 1978⁶⁾)。本テーマの研究者の編集による教材はロシア語で出版され、現地住民を含めサハの人々に配布される。さらに、その編集を進める過程で得られた成果をまとめたパネルは、ロシアと日本の複数の場所で、順次公開展示される。これらの試みは、私たち人間と環境の絡み合う関係を、多くの人に知ってもらうきっかけとなることが期待される。

内陸アラスカ

気候の変化は内陸アラスカ的环境にも変化をもたらしている。東シベリアと違って内陸アラスカでは、温暖化による永久凍土の融解が湿地の減少をもたらし、乾燥化による森林火災が増加している(Kofinas et al., 2010⁷⁾)。さらにこうした変化が、この土地で暮らす先住民の暮らしにも影響をおよぼしている。例えば、2010年代からサケの仲間であるマスノスケ(King Salmon)の記録的な不漁が続いていることが、本テーマの研究者が調査する内陸アラスカで確認されている(近藤, 2019a)。先住民のクスコクィム川上流域アサバスカンの人々によると、マスノスケが川を上れないのは、乾燥化で川の水位が下がっているためであるとともに、ビーバーの数が増えてそれが作るダムが魚の遡上を妨げているためだという。この地域に生息するビーバーの数が増えていることは、昔ほど毛皮の需要がなくなったことに加えて、2008年のリーマンショック後の不況で購買者の毛皮離れが進んだことによると考えられる。つまり、マスノスケの不漁は社会変化の要因と環境変化の要因が相まってうみ出されていることになるが、先住民の視点は、このことを的確に捉えている。

それに対して、北米の漁業管理学者はまったく違う見解を示している。ビーバーが作るダムは川の流れを堰き止め、ミネラルなど水の中の栄養素を川底に堆積しやすくする。結果的にそこ

で食物連鎖が機能して、マスノスケの稚魚が育ちやすい環境を作り出しているという。実は、このような見方がされるようになったのは比較的最近になってからのことで、20世紀はじめに行われていた河川改良計画では、川をふさいで水の流れを悪くする倒木やビーバーのダムは、根こそぎ撤去されていた。現在では、かつて行われていた河川改良計画や、毛皮を目的とした無秩序なビーバーの捕獲が、かえってサケなどの魚が育つ環境を損ねてしまったという見解が定着している。



図4-8-15. ビーバーのダムに隙間を開ける内陸アラスカ先住民(近藤, 2020)

ビーバーのダムに関する評価という点では、アラスカの先住民の見解と漁業管理学者の見解は、互いに相反するように見える。先住民たちは、ビーバーのダムがサケの遡上を妨げているとして、それを見つかるたびに真ん中を壊して、魚が通れるほどの隙間を開けるという作業を行っている(図4-8-15)。しかしながら、かつて行われていたような河川改良計画と違って、ダムを根こそぎ撤去するのではなく、ただ真ん中に隙間を開ける程度のことである。壊された部分は1週間もたてば、ビーバーが元通りに修復してしまう。このように、ビーバーのダムを修復可能な程度だけ取り除いて、魚の通り道を作るという先住民の実践は、近年の漁業管理学者の見解と矛盾するものではない。むしろそれは、人間がサケなどの生物資源から享受する「生態系のサービス」に対比される「生態系へのサービス」と位置付けられる。

内陸アラスカでは20世紀末頃から金採掘プロジェクトが計画されている。新たに見つかった鉱脈で採掘を行うための環境アセスメントが発表された。現在、本格的な金の採掘に向けて、さまざまな手続きが進められている。地域には他に勤め口が乏しく、普段から収入に事欠く先住民にとって、プロジェクトの始動は歓迎すべきできごとである。しかしそれと同時に、採掘によって自然環境が汚染されたり、人の出入りが激しくなったりすることで、周囲の動植物に影響がおよぶことが、大いに憂慮されている。そのようななかで、先住民自身の手による環境モニタリングの制度化を求める声が高まっている(近藤, 2020)。先住民の在来知を生かした環境の管理が制度化されれば、先住民の雇用をうみ出すことにもなるし、再生可能な資源利用への道が開ける。先住民主体の環境モニタリングの成否は、北極域の持続可能な開発のあり方を占ううえで、鍵となる事例を示している。

グリーンランド

内陸アラスカの事例が示すように、人間と環境の相互作用について考えるうえでは、野生動物と人間の関係について取り上げなくてはならない。本テーマでは、グリーンランドにおける海洋哺乳類、特にクジラと人間の関係性にも焦点をあてて取り組んだ。そこには、実はEUにおける捕鯨をめぐる言説の形成と政策決定のあり方が大きく関与している。

捕鯨をめぐる問題について、EUを舞台としてうみ出されるさまざまな言説を調査・分析した結果、言説をうみ出す者の視点によって、動物の生に対する姿勢に大きな違いがあることがわかった(高橋, 2019a)。もっとも大きな違いは、捕鯨を環境問題とみなすか、海洋生物資源の捕獲とみなすかという点にある。たとえば、欧州委員会内の環境総局で海洋の生物多様性の保全を担当するシニアエキスパートは、環境保全を推進する重要な要素として、クジラの保全をあげている。2008年6月には、EU環境政策の総意として、統合史上はじめてとなるクジラ保護の姿勢が打ち出された。EUの環境政策では、環境の保全をグローバルに展開していくためのツールのひとつとして、クジラ資源の保全が用いられたことになる。

とはいえ、EUでは一律に捕鯨が規制の対象となったわけではない。2008年の共通の立場においても、現状維持を志向する限りにおいて、先住民が生存のために行う捕鯨を尊重する旨が明記されていた。しかしながら、ここでの先住民生存捕鯨とは非商業的なものに限られ、厳密に算定された捕獲枠を守るこ

とが義務付けられている。それに対して、グリーンランド人のハンターたちは、現地の実情をよく知らない科学者らによって、自分たちの捕るクジラの捕獲枠が算定されることに異議を唱えている。従来グリーンランドで暮らすイヌイットの人たちは、日常的な生活実践として捕鯨を行ってきた。イヌイットの世界観では、人間と自然環境は密接に結び付いたものとして捉えられる。クジラは自然環境と同等視されるのではなく、人間と環境の総体のなかに捉えられるものであり、人間がクジラを捕ることはその総体のなかに組み込まれている。このことからわかるように、人間と環境を一元的に捉える在来知の体系と、環境を人間から切り離して対象に置く科学的な知識の体系は異質のものであり、互いに相容れるものではない。科学知にもとづいたクジラの捕獲枠算定は、両者の違いが如実に表れる場となっている。

異なる知識の体系間に横たわるギャップを克服するには、在来知と科学的知識の対立的な関係を相対化することが求められる。グリーンランドの政策決定過程においては、特別な諮問委員会が設置されるなど、両者を調整する試みがなされているが、いまのところ目覚ましい効果はあがっていない(図4-8-16)。ネイティブのハンターたちによる抗議は、科学的な知識にもとづいて独断的に環境を管理しようとする勢力に押されて、黙殺される傾向にある。政治的影響力による力関係が、知識体系の非対称的な関係のうえに色濃く反映されているというのが現状のようである。

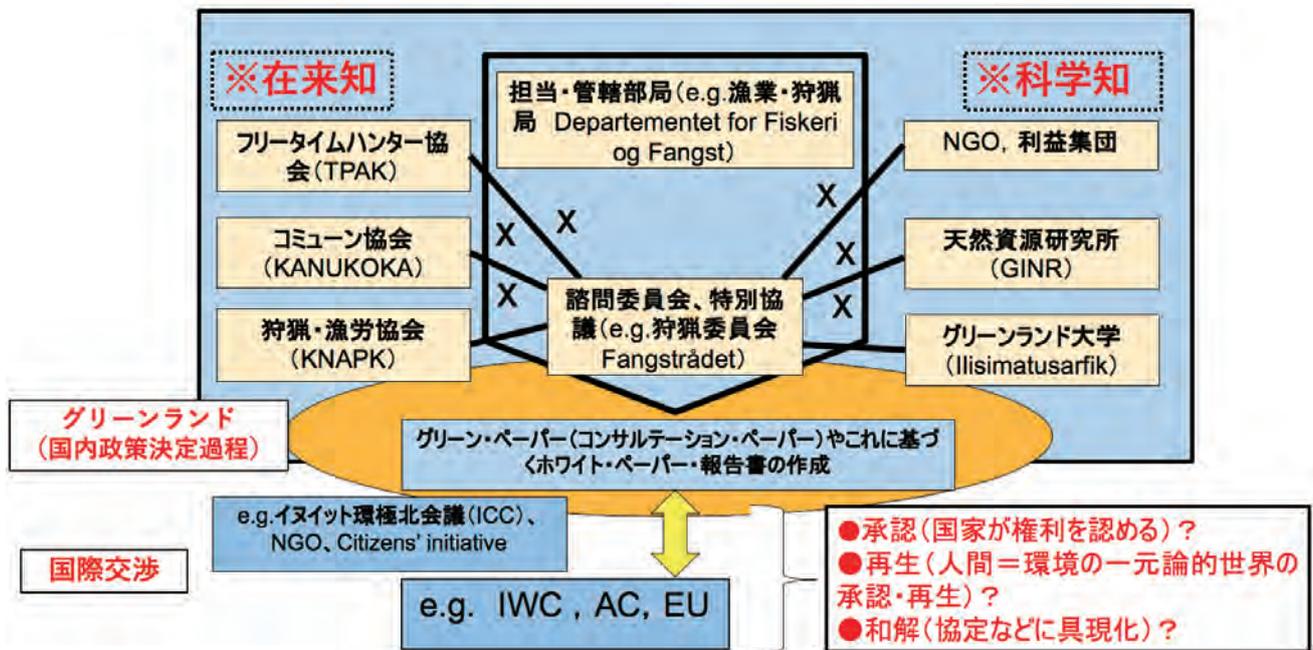


図 4-8-16. グリーンランドの政策決定過程にみる科学知と在来知の関わり

持続可能性への挑戦

東シベリア、内陸アラスカ、グリーンランドの事例が示すように、人間と環境は複雑に織り交ざっているために、どちらか片方がもう片方に影響を与えるといった一方通行の関係で片付けることはできない。人間と環境の関係は、一方が他方の原因を作り出すと同時に、その結果ともなりうる。地球温暖化や気候変動にともなう問題は、人間の作り出す社会的要素と、環境を作り出す自然的要素が、互いに絡み合い、織り合わさってできている。こうした問題に取り組むためには、人文社会科学と自然科学の研究者の間で、協力が重要なことはいうまでもない。だが、それにも増して求められるのが、科学的な手続きを経てみ出される知識と、先住民や地域住民の持つ在来知の、有機的な結合である。上記に示したように、環境教育教材の作成や捕鯨の捕獲率算定、環境モニタリングの制度化といった事象は、そうした結合のテストケースとなる。

いまのところ、いずれの事例においても成功しているとはいえない。科学知と在来知の結合が掛け声としては提唱されても、最終的には科学知にもとづく事業のなかで、在来知が置き去りにされてしまうケースがほとんどである。科学知と在来知では、知識の内容だけでなく、評価の基準や表現手段、社会的影響力などの点で、互いに大きく異なっている。そうした違いを乗り越え、両者が有機的に結び付くことは、容易なことではない。しかし、それを克服するまで、北極域研究における持続可能性への挑戦は終わらない。

4.8.4 北極ガバナンス

高橋 美野梨

何らかの組織や社会の構成員が、合意形成や意思決定に主体的に関与していこうとするガバナンスを、国家主導のガバメントとは異なる性格を持つものとして理解するためには、国家だけではなく、先住民をはじめとする現地住民、非政府組織、さらには多国籍企業をも含めた多様な行為主体の関係をつぶさに捉え、その関係の質を同定していかなければならない。そのうえで、主体間の利害を超えて、いかにして北極が抱えるさまざまな問題を共有し、解決策を見出していくことができるか、日本が果たしていく役割とは何かを考え、共有し、行動に移していくことが肝要である。

もっとも、北極海に地理的に接しない日本は、北極をめぐるガバナンス研究はもちろん、それに関わる多様な研究を推進していくうえで、本来的に「当事者性」が弱い立場にある。しかし、北極の諸課題の国際的側面を見出し、それへの対応策を具体的に検討するのが、本テーマの実施項目のひとつ「北極ガバナンス」の実施担当者の役割であった。

日本における北極ガバナンス研究の起点は、日本がACにオブザーバー申請をした2009年以降に見出すことができる(稲垣・柴田, 2018)。この限りでは、日本の北極ガバナンス研究は緒に就いたばかりである。しかし本プロジェクトによる

研究推進によって、その水準はドラスティックに向上している。大づかみに、そのエッセンスを抽出すれば、以下のようにまとめることができよう。

北極国際法政策研究

第1に、神戸大学大学院国際協力研究科(GSICS)内の極域協力研究センター(PCRC)が牽引した北極国際法政策研究があげられる。その代表は柴田だが、稲垣、本田、幡谷などの若手や多くの海外からの研究員によって、本研究は牽引された。

PCRCは、2015年の設置以降、本プロジェクトと連携しながら、世界に開かれた北極国際法政策研究の推進拠点として機能してきた。そこでは、これまで自然科学研究および文化人類学を中心とした人文科学研究が中心であった日本の北極研究に、社会科学研究を正式に組み込んだところに特徴があった。極域の国際法政策研究を専門にする研究機関は、日本はもとよりアジアでも例がない。研究のスタンスとして特筆されるべきは、従来の国際法が前提とする陸・海・空・主権・国家管轄権などの区別を乗り越えて、よりプラグマティックに、そして目的指向的に北極を研究していこうとする点にあった。これは、北極が地球全体の変化を最初に確認できる場であり、その気温が、全世界の平均と比べて2倍以上の速さで上昇している地域であることに鑑みて、最適な研究アプローチであろう。PCRCの研究者もこの立場を共有し、世界の北極法政策研究を牽引する存在になってきた。空間的一体性を持った場として北極を捉え、これを前提に北極国際法学の確立を目指すところに、PCRCを含む今日の北極国際法政策研究の最前線がある。

より具体的には、北極を包括的に捉えるべく「法秩序」や「制度」をキーワードにしなが、以下5つの課題が設定されてきた。①ACを中心とする北極国際法秩序形成の場たる組織の実態把握、②北極国際法秩序の中心的課題であり続けている北極の持続可能な発展と環境保護、③北極科学と北極国際法秩序形成との相互関係、④北極国際法秩序形成における先住民の役割、⑤国連海洋法条約をベースとしながら北極海洋に特有の規範的・制度的展開、である。そこでは、北極の一体性の確保を目指す国際的規範や組織の潜在性とそのあり方を学術的に検証することが目指された。それは、これまでの世界の北極国際法学分野が、海洋法や海事法を中心に据えて、個別に発展してきたことで、専門の細分化が進み過ぎたことへのリアクションでもあった。

こうしたアプローチのもとで行われた研究のひとつに、ACの枠組みのもとで、2017年5月に署名され、翌年5月に発効した北極国際科学協力促進協定の分析があげられる(柴田, 2018a)。本協定は、地理的には北極全体を一体的にカバーし、機能的には北極に関するすべての科学活動を対象にして、国際的な科学協力の促進を目的に成立したものであった。同類の枠組みが南極では1959年に成立していたことに鑑みれば、北極の「後進性」が理解されるわけだが、要点となるのはこの枠組みにおける「国際協力」が、ACの意思決定権を有する8カ国(カナダ、デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、ロシア、スウェーデン、米国)だけでなく、これまでも科学研

究の分野で学術の水準向上に貢献してきた非北極諸国および研究機関や研究者にもおよんでいることであった。ここに本プロジェクトのみならず北極に関わるすべての研究者が、国際共同研究に従事する限りにおいて、協定がもたらす便益を、みな同等に享受することが可能になったのである。こうした領域横断的な枠組みをいかに解釈し、実効性ある枠組みとして機能させていくかを考えるとき、蝸壺的なアプローチではなく、上記で示したホリスティックな視座からのアプローチを採ってこそ、その実相を把握し、また評価していくことができるのである。本枠組みの成立過程の分析は、ACを正当な国際法形成フォーラムとして位置付けることができるかの試金石だというのが、国際法学者の柴田の主張である。この点に、北極法政策研究をめぐる我々の「次」の課題のひとつがあるといえる。

なお、北極法政策研究グループにおいて、本プロジェクト期間中継続して実施されたこととして付言したいのは、2015年から毎年神戸大学で開催している北極国際シンポジウムである^{※7}。2018年12月にPCRCと本プロジェクトとの共催で開催された第4回国際シンポジウム「International Law for Sustainability in Arctic Resource Development」では、気候変動の影響に晒され環境的に極めて脆弱で、かつ、先住民を含む約400万人の住民の社会経済基盤と密着した特別な地域としての北極域における鉱物資源開発を題材に、SDGsの基本理念である持続可能性と経済・環境・社会面の統合をキーワードにしながら、ルールにもとづく北極鉱物資源開発のガバナンスのあり方について、社会科学、人文科学、自然科学、産業界、先住民といった多角的視点から検討した。

これら国際シンポジウムの成果は、日本語および英語で書籍として公刊された。2018年に刊行された『北極国際法秩序の展望：科学・環境・海洋』（東信堂）は、北極に関する国際法政策の課題をほぼ網羅的に論じた、我が国初となる日本語書籍であった。また、2019年に出版された英書は、2018年に発効した前出の北極国際科学協力促進協定や、同年に署名された中央北極海無規制公海漁業防止協定など、日本にとっても関心が高い新たな国際取り極めに、日本などの非北極国がどう取り組んできたかを分析するなど、学術的にも最先端の内容を含んだものになった（Shibata et al., 2019b）。そして、上述の第4回国際シンポジウムの研究成果は、極域研究では最高峰のジャーナルであるケンブリッジ大学出版会のPolar Record誌に特別号が生まれ、2019年度末までには10本の論文・コメンタリーとして公表される予定となっている。

北極国際関係

北極ガバナンス研究の第2の取り組みは、主に地球温暖化にともなう地政学的环境の変化が、1990年代に形成された北極国際関係に、どのような変化をおよぼしてきたのかについて、その相関を明らかにしようとするものである。また、現在進行しているグローバル国際政治と北極国際政治とのリンケージについても考察を行った。これによって以下の3点が明らかとなった。なお、この点をリードしたのは、大西をはじめとする国際関係論者であった。

まず、1990年代の国際関係を振り返れば、冷戦終結にともない劇的に国際環境が変化するなかで、北極域に領土を有する8カ国が、北極域における環境保護、持続可能な開発といった分野で新しい共通利益および共有価値を見出し、国際協力が形成された時期として同定することができた。こうした国際協力は、1991年の北極環境保護戦略（AEPS: Arctic Environmental Protection Strategy）の設立を経て、1996年のACの設立として具体化した。これらの共通利益および共有価値に支えられた北極8カ国の協力関係は、「ゾーン・オブ・ピース」というソ連のゴルバチョフ書記長の言葉で代表されるように、紛争のない平和で安定したものとなった。

こうした「平和で安定した北極」は、地球温暖化という環境変化に直面するなかで、少しずつ構造変化を見せるようになった。

まず指摘される自然環境の変化としては、地球温暖化の影響により、北極海の夏季海水面積が2007年に417万km²、2012年に341万km²となり、それぞれ観測上の最小面積を更新したことがあげられる。そして重要なことは、海水の縮小が、単に自然環境の変化をもたらすだけでなく、北極海の海底資源のポテンシャル（世界全体未発見資源のうち石油13%、天然ガス30%が北極域にあると推定されている）や、北極海航路の啓開の可能性といった北極域の地政学的环境を変えるものであったことである。北極における国際環境の変化に直面した北極諸国は、北極関連の諸政策を相次いで見直し、国益を再定義するに至った。国益の見直しが進むなかで、主権的権利に絡む問題（2008年イルリサット宣言）、海洋の安全に関わる問題（2011年北極海航空海上捜索救助協力協定、2013年北極海洋油濁汚染準備・対応に関する協力協定、2015年北極沿岸警備隊フォーラム設立）、科学観測の国際的連携（2017年北極国際科学協力促進協定、2016年・2018年北極科学大臣会合）、非北極諸国の進出（1998～2017年ACオブザーバー承認、2013年アイスランドと中国の自由貿易協定等）、中央北極海における潜在的な漁業資源の管理問題（2015年中央北極海無規制公海漁業防止に関する宣言、2018年中央北極海無規制公海漁業防止協定）といったさまざまな領域においても共通利益および共有価値が外交を通じて構築されるようになり、より安定した国際関係が展開されようとしている。

しかし、近年、グローバル国際政治における米国・ロシア・中国の間の多領域にわたる戦略的な競合関係が北極国際関係の安定に影を落とすつつある。ロシアは、軍の近代化の一環として北極における陸空海の各軍種の軍備強化を進め、より統合的に軍を指揮するための北部統合戦略コマンドを2014年12月から始動させている。中国は、2013年にACのオブザーバー資格を得るとともに、2015年中華人民共和国国家安全法では「ポーラーリージョン」（南極および北極）を中国の活動と関連設備の防衛を行う領域に指定した。また、2017年には北極海を一帶一路イニシアティブに組み込んだほか、2018年には北極白書を公表して北極政策を体系化した。総じて、中国は政治経済的な影響力を北極へと拡大しつつある。米国は、2019年に国防省が新北極戦略を策定し、北極におけるロシアおよび中国

の影響力の拡大に対抗していく姿勢を明確にした。

トライアドな関係から北極国際関係を考える

北極ガバナンス研究の第3の取り組みとして、北極の安全保障環境を国家間の二者関係のみに収束させず、より実態に即したマルチレイヤーから実証的に明らかにすべく、下位国家主体を含む三者以上の関係が明示的に表れる米軍基地を事例に検討した Takahashi (2019g) をあげることができる。同書は、日本の北極政策を構成する要素のひとつ「安全保障」への学術的貢献を念頭に、北極域の安全保障環境の変化が人間社会にどのような影響を与えているのか、同時にローカルな声(国家)安全保障のレベルで、どのように発現し、機能した(している)のかを、理論的・実証的に明らかにした英語の学術図書であり、Springer Polar Sciences シリーズの1巻として、シュプリンガー社から2019年に刊行された。同書では、在グリーンランド米軍基地を主な事例として扱い、グリーンランド(地方政治主体) - デンマーク(中央政府)間の接受国政治と同時に、設置国である米国、北極域での軍事活動を活発化させるロシアを変数として組み込み、基地をめぐる歴史と争点をマルチアーカイブによる多角的アプローチから検討している。そこでは、基地をめぐる中央政府と地方政治主体との取引、すなわち中央政府の脆弱性を構成する要素(基地の代替性、緊要性、特殊性)と、それを統御せしめる基地の取引形態(統合、制度化、分散)、そしてその状況をふまえて(中央と地方の)非対称な力関係を反転させようとする地方政治主体との利害の実相を、理論的・実証的に明らかにすることが目指された。地方政治主体が何らかの意図をもって国際関係に関与しようとする動きは、これまでも「パラディプロマシー」などの用語で説明されてきた。しかし、地方がどれだけ「主体的」に、自己の行動を律し、具体的な行動に表すことができるかを評定することは難しかった。それは、これまでの地方政治主体の影響力が、国内で処理される事案でのみ扱われる傾向があり、国際関係の領域で、例えば国内構成員が、国際交渉に代表者として影響を与えるところまで考察の対象がおよんでいなかったからである。同書は、安全保障環境における地方の主体性に着目し、その影響力の多寡を操作化した点で、北極域の安全保障研究としてだけでなく、グローバルな安全保障環境を地方のレベルから跡付けていく際の指針を提供するものであった。

非生物資源開発をめぐるガバナンスを帰納的に理解する

北極ガバナンス研究の第4の取り組みは、北極域における非生物資源開発と、しばしば在来知などと呼ばれる先住民族の知識や世界観に即した開発の持続可能性とが、いかにして有機的に結び付きつつ機能していくことができるのかを、グリーンランドを事例に考えようとするものである(高橋, 2020)。これまで開発と先住民族との関わりは、歓迎されざる外部社会からの一方的なインパクト、環境レイシズム、ニュークリア・レイシズムなどと表現されてきた。確かに、これらの表現に内包される中心と周辺、支配と被支配といった二分法は、事象の1側面を的確に捉えている。しかし、先住民族の生き方を、極端に牧歌的に、

かつ従属的に位置付け、先住民族の自立性を自動的に被支配的な立場に回収してしまう、開発と先住民族とをめぐり確証バイアスという側面も持ち合わせていた。近年では、開発企業と地元との協働が、地元政府の開発戦略の前提を形作っているときさえいえ、その是非はともかく、先住民族が必ずしも開発を一方的に押し付けられる被害者ではないことが明らかになっている。高橋(2019a)で検討したのは、開発の持続可能性とグリーンランド・イヌイット(先住民族)とが有機的に結び付きつつ機能するための、グリーンランド在来の知識の総体=ネイティブ・グリーンランディック・ルールに即した運営のあり方であった。ここでいう「在来の知識総体」とは、イヌイットの世界観とも呼ばれるような、人間と自然/人間と人間以外が、双方向的に影響を与え合う関係にもとづく認識総体を指している。

要点は、グリーンランドに居住する者の多くが、彼・彼女ら自身の日常のなかで自立的に展開してきた、自然や資源を共存者の視点から観察する姿勢を、生物資源のみならず、非生物資源(開発)においても徹底させ、それを内部化(indigenization)させていくことで、機会創出を促していこうとする動きにあった。つまり、現地の社会や住民の存在を前提に非生物資源開発の持続可能性を考えていくためには、何よりも非生物資源を、総体としての自然や環境のなかに存在するあらゆる「資源」のひとつとして理解し、「資源」を獲得し、処理し、消費し、廃棄することが有機的に結び付き先住民族の互酬的世界観と矛盾しない形で取り込めるかどうかにある、ということであった。これは、先住民族の「生」それ自体に関わる問題として、先住民族自身が非生物資源の獲得・処理・使用・廃棄のプロセスを、自分たち(在来)の文脈に即して、主体的にハンドリングしていくことができるか、という風にいかに換えることができるかもしれない。

では、いかなる具体的な施策がありうるか。ガバナンスの視角から当該問題を扱っていくうえでポイントとなるのは、開発行為を総合的に評定する、シンクタンク的な位置付けとしての資源委員会が、政治とは独立した立場で制度化されるかどうかということ、仮に制度化されたとして、インプット正当性の質を決める要素となる、委員会を構成するメンバーの出自や所属機関はどのように決められるか、の(少なくとも)2点あるように思われる。それは、政策エリートだけでなく、年間をとおして環境と向き合い、観察し、その動態を全体論的、直感的に理解してきた在来知にもとづく先住民族(のハンターたち)の環境への深い理解が、非生物資源から得られる富の最大化を図る必要条件になると考えられるからである。

国際関係論とアンソロポシオン

北極ガバナンス研究の項を締めるにあたり、Takahashi (2019d; 2019f)の成果にもとづきつつ、これまでの社会科学研究の「前提」をいま一度振り返り、その課題を明示することで、小括に代えたいと思う。その前提とは、人間と自然との間に線を引き、自然を他者化することで、生成し、成長してきた、少なからぬ社会科学の学としての前提を指している。特に、北極ガバナンス研究の中核的な存在である国際関係論においては、このことが顕著に見られていた。すなわち、Thomas Hobbes

や John Locke に代表されるように、学問としての国際関係論がよって立つ思考の前提には、自然が、それだけで完全に自足的かつ持続可能な状態と考える回路がなく、自然（環境）は人間との関係から切り離して対象化する、つまり人の手によって管理されてはじめて、その「原始性」が払拭されるものという仮定があった。だから、国際関係論は自然を、自己の問題として昇華する機能を持ち合わせておらず、それは他者化する客体に過ぎないか、捨象される対象であり続けた。

しかし、アンソロポシオン (Anthropocene)^{※8}、プラネタリー・バウンダリー (planetary boundary)^{※9}、プラネット・ポリティクス (planet politics)^{※10} などに代表される、人間活動が地球それ自体の将来を強力に規定していることが指摘される昨今、このような思考回路は十分に成立しなくなった（付言すれば、不平等な世のなかの仕組みが存在するのに、あらゆる「人間」に「罪」を背負わせるかのようなニュアンスをとまなうアンソロポシオンを批判的に受け止める研究者も存在する。例えば、米国の環境史家である Moore (2016)⁹⁾ は、行き過ぎた資本主義こそがすべての原因であるとして、「キャピタルシオン (Capitalocene)」^{※11} を主張している。だから自然なるものを独立変数としてのみ処理するのではなく、従属変数として設定していくマインドが求められているわけだが、とはいえ、そもそも国際関係論に、そして国際関係論者（研究者）に、現実世界の、かなり核心的なマテリアルターンを受けとめる素地があるのだろうか。自然に原初的な性格を与えることで「人間」としての自らの立場を正当化してきた「私たち」は、自然を含む事物に対して、極めて画一的な態度を示してきた長い歴史があるからである。アンソロポシオンなる時代のなかで、私たちに求められているのは、既存のマインドセットのなかで事物を処理するのではなく、人間だけからなる世界もなければ、閉じた聖域としての純粋な自然も存在しないことを理解し、人間と自然とを個別の変数として処理するのではなく、相互乗り入れ可能な要素として取り込むことである、というのが特に Takahashi (2019d) での主張であった。

こうした問題に1番縁遠いと思われる北極ガバナンスに関心を示す研究者こそ、すべての事物に通底する人間と自然の相関を意識しながら、自然を他者化すること/しないこと、両者の連関に着目することの意義を意識し、思考を展開していく必要があるといえる。

注：

- ※1 氷を割ることのできる強固な船首と氷力に耐える頑強な船体および大きな推進力を有し、他の船の支援や氷海中での作業を行う船である。耐氷船は、砕氷船の助けを借りて氷のある水域を航行する能力のある船のことである。これらの船はアイスクラス船とも呼ばれる。
- ※2 衝突予防と人命安全のために、SOLAS条約によって定められる対象船舶は、搭載が義務付けられている装置である。AISが発する電波は衛星でも受信することができ、船の位置や速度などを、衛星を通じて知ることができる。
- ※3 氷海域を航行する船舶の安全、船員の安全、ならびに海洋環境保護を図るために、船舶の構造や設備が一定の規格を満たしている耐氷船・砕氷船に対し、船級協会が与える等級のこと。
- ※4 国連のIMOが極海域を航行する船舶に対して定めた規則であるPolar Codeに準じて、国際船級協会連合（船舶の検査機関である船級協会の集まり）が極海域を航行する船舶への要求事項を定めた共通規格（アイスクラス）。
- ※5 カナダが北極海沿岸海域における結氷期の船舶航行管理のために開発したZone Date Systemにおいて使用されるパラメータであるIce Numeralを改良したもの。
- ※6 Nakanowatari, T. et al., 2016. Medium-range forecast skill of sea ice extent in the Arctic Ocean from TOPAZ4, The Seventh Symposium on Polar Science.
- ※7 各年の北極国際シンポジウムについては、PCRCのホームページ (www.research.kobe-u.ac.jp/gsics-pcric/ja/index.html) より確認可能。
- ※8 現在形成されつつある地層が人類という生物種の活動による地球環境の変化によって完新世とは異なる地層となりつつあり、人類の活動の痕跡が地層に永続的に残ることが予測されるという地質学的な事実を根拠に、私たちが生きている現在を指す地質年代として2000年に大気化学者のポール・クルツツェンと生物学者のユージン・ストーマーによって提唱された概念（大村 敬一「宇宙をかき乱す世界の肥やし：カナダ・イヌイトの先住民運動から考えるアンソロポシオン状況での人類の未来（1）」、『現代思想』2017年12月号、p.181より引用）。
- ※9 持続可能な人間活動を行うための、地球システム過程/要素（気候変動、海洋酸性化、成層圏オゾンの破壊、窒素とリンの循環、グローバルな淡水利用、土地利用変化、生物多様性の損失、大気エアロゾルの負荷、化学物質による汚染）の変動許容限界（バウンダリー）。
- ※10 「専らヒトに焦点を当てる既存の政治学系の議論（中略）とは異なり、「自然とヒト」をあくまで切り離さずに一つの枠組みとして捉え、かつ両者の生存/絶滅の問題に取り組む」ことを構想する新たな政治学の動き（前田 幸男「気候変動問題から見る「惑星政治」の生成：「人新世」時代に対応するための理論的諸前提の問い直し」、『境界研究』第8号、2018年、p.91より引用）。
- ※11 基本的に「人類の活動の痕跡が地層に永続的に残ることが予測されるという地質学的な事実」という人新世の説明を共有するが、その根本原因をヒトではなく、資本主義という仕組みの暴走にあるとする見方。

引用文献：

- 1) Arctic Bulk AG, 2010. NSR2010. http://www.arcticbulk.com/page/242/NSR_2010, 最終閲覧2018年1月。
- 2) SCF Sovcomflot, 2012. SCF Group Strategy Review, ARCTIC SHIPPING PERSPECTIVES. <http://2012.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present2012/Ambrosov.pdf>, 最終閲覧2018年1月。
- 3) Yamaguchi, H., 1995. Experimental Voyage through Northern Sea Route. The Proceedings of INSROP Symposium Tokyo '95, SHIP AND OCEAN FOUNDATION.
- 4) Sakov, P. et al., 2012. TOPAZ4: an ocean-sea ice data assimilation system for the North Atlantic and Arctic. Ocean Science, 8, 633-656. doi: 10.5194/os-8-633-2012.
- 5) Descola, P., 2014. Beyond Nature and Culture. The University of Chicago Press, Chicago and London. ISBN 978-0-226-21236-4.
- 6) UNESCO, 1978. Intergovernmental Conference on Environmental Education organized by Unesco in co-operation with UNEP, Tbilisi (USSR), 14-26 October 1977. Final Report, Paris.
- 7) Kofinas, G. P. et al., 2010. Resilience of Athabaskan subsistence systems to interior Alaska's changing climate. Canadian Journal of Forest Research, 40, 1347-1359. doi: 10.1139/X10-108.
- 8) Moore, J. W., 2016. Anthropocene or Capitalocene? Nature, History, and the Crisis of Capitalism. Oakland: PM Press, 222pp. ISBN 978-1629631486.

北極域データ
アーカイブシステム

4.9.1 全体概要

矢吹 裕伯

背景と目的

公的研究資金によって実施された研究の成果（論文、生成された研究データ等）は産業界をはじめとする社会一般から容易にアクセスおよび利用ができるようにし、知の創出に新たな道を開くとともに、効果的に科学技術研究を推進することでイノベーションの創出につなげるという「オープンサイエンス」の概念が世界的に急速な広がりを見せている。また、2013年の主要国首脳会議（G8）、経済協力開発機構（OECD: Organization for Economic Co-operation and Development）、グローバルリサーチカウンシル（GRC: Global Research Council）等は、公的研究資金によって実施された研究に関する論文等の原則公開、得られたデータの可能な範囲での公開を求めている。北極域研究でも、環境変化の実態把握だけでなく、それがもたらすさまざまな変動メカニズムや将来予測といった科学的知見のオープンアクセス化が求められている。大気・陸域・海洋・人間社会という、異なる時空間スケールの変動を持つ、複雑な北極域の環境変動システムを明らかにするためには、学際的な研究を通じて得られた多種多様な観測データ、シミュレーションデータ、衛星データ、さらには研究成果などの北極域の「ビッグデータ」を用いて新たな知を創出し、社会へ適切に公開していくことが必要である。

このような背景のもと、本プロジェクトでは得られた北極域研究に関する極めて学術的価値の高いデータを長期にわたり保管し、利用しやすい形で提供することをもっとも重要な目的のひとつとし、GRENE 北極で国立極地研究所国際北極環境研究センターにおけるデータ基盤として整備した「北極域データアーカイブシステム（ADS）」をプロジェクトのデータ登録・公開プラットフォームと位置付けた。この位置付けにもとづき、本テーマは分野横断的なデータを統合的に解析するツールの開発を行いながら、プロジェクトのデータセンターとして、得られたデータの収集・公開・発信や国際的なデータ交流の促進、ステークホルダーに向けた発信を担うことを目的とした。

ADS の概要

ADS は北極域研究で得られたデータの相互流通を目的として、そうしたデータの収集・登録の促進、研究データの統合的な「オープンサイエンス」の基盤の確立を行うためのシステムである。ADS の概要を図 4-9-1 に、また、ウェブサイトのトップ画面を図 4-9-2 に示す。ADS のすべてのサービスはこの画面よ

りアクセス可能である。主要なサービスを以下に示す。

- ・ データ公開サービス「極（KIWA）」とその機能の一部である Map Search と Metadata Catalog
- ・ さまざまな 2 次元データを可視化解析する「VISION」
- ・ 準リアルタイム極域環境監視モニター「VISHOP」
- ・ 北極海航路探索システム「Sea Route Search」
- ・ さまざまな地点に設置された自動気象観測装置のデータを実リアルタイムで表示する「Real Time Monitor」
- ・ 北極域研究に関する調査・観測、モデル・同化研究情報の登録・公開を行う「arDirectory」
- ・ 航路支援サービス「VENUS」



図 4-9-1. ADS の概要



図 4-9-2. ADS のウェブサイトのトップ画面

実施内容

本プロジェクトの「国際共同研究の推進」メニューには、本テーマを含め研究テーマが8つある。各研究テーマには複数の研究機関が参加し、さまざまな研究が実施された。本テーマは事務局と連携し、各テーマが実施するさまざまな調査・観測およびモデル・同化研究の内容を把握したうえで、それらの活動によって得られたデータを収集し、ADSに登録し、公開を行った。また、北極域研究に関する調査・観測およびモデル・同化研究の情報を、それらの登録・公開を行うために新規開発したサービス「Arctic Research Directory (arDirectory)」に登録・公開し、「極 (KIWA)」内のデータへの容易なアクセスを実現した。

さらに、集積された「ビッグデータ」の可視化およびオンライン解析基盤として、GRENE北極で開発したオンライン可視化アプリケーション「VISualization Interactive tool on Online Network (VISION)」の大幅な機能強化を行い、衛星データやモデル計算結果等の2次元グリッドデータや、グリーンランド等の自動気象観測装置 (AWS) 等で取得した時系列データ等がオンラインで可視化および解析できるプラットフォームの構築を推進した。本プロジェクトで取得された調査・観測データ等を「VISION」に実装することで、これまではフォーマット変換等を必要としたデータをオンライン環境で可視化および解析ができる環境を整えた。また、JAXAの氷循環変動観測衛星「しずく」搭載の高性能マイクロ波放射計 (AMSR2) による北極・南極域の海水状況、海水面温度、積雪深、海水厚、海水流動速度等のデータを1日2回更新することにより、準リアルタイムで極域環境を監視できるモニター「VISualization Service of Horizontal scale Observations at Polar region (VISHOP)」についても機能強化を行い、テーマ5が毎年5月中旬～9月末に4回発表する北極海水分布予報 (Kimura et al., 2013¹⁾) の公開を行った。

データ転送や可視化に際しては、小型デバイスを利用した「IoT (Internet of Things)」による技術開発にも取り組み、AMSR2による海水密度等のデータを、北極海を航行する研究船舶に送る航路支援サービス「VENUS」の機能強化も行った。本プロジェクト期間中、氷海域での調査航海を行う研究船舶の研究者や運航責任者からの要望に合わせ、配信するデータのカスタマイズや船舶上での可視化を可能とした。「VENUS」はさまざまな研究船舶および民間船舶1隻に対して提供され、航海上の重要ツールとなった。また、本テーマでは2018年初冬季に行われた2018年度「みらい」北極航海 (MR18-05C) で社会実装を視野にいたれた「VENUS」のテスト運用をテーマ1と協力して進めた。具体的には、YOPPの一環としてECMWFから気象・海水予報データの配信を受け、その予報値を東京大学で開発された海水・海洋結合モデル (IcePOM) に外力として与え、作成された詳細な海水予報情報をECMWFの気象・海水予報データとともに「VENUS」を用いて「みらい」に配信した。配信されたデータは、初冬季の北極航海を安全に実施するための情報として役立てられた。

4.9.2 多様な観測対象分野のデータの横断的検索・切り出し機能の構築

矢吹 裕伯・杉村 剛

極 (KIWA)

ADSでは研究データのオンライン登録が可能である。研究者がメタデータ^{*1}とデータ^{*2}をアップロードすることで登録およびウェブ上への公開が行われる。ADSで公開されるデータは位置情報を持ち、Map Searchより3D地図の表示ができるオープンソースライブラリであるCesiumEarthによって北極を中心とした地図に投影され、ユーザーは環北極域のデータの所在を直観的に把握し、時空間検索を行うことが可能である。またMetadata Catalogではさまざまなキーワードでデータ検索が可能である。ADSのメタデータは現地観測したその場で作成されることを想定し、ネットワーク接続のないオフライン環境でもマイクロソフトエクセルファイル上で作成が可能である。また、国際的な標準メタデータスキーマであるISO19139:2007をベースに、本プロジェクトに関連する要素からなる内部情報を定義し、このメタデータを用いることで、地上観測網からモデル出力まで、多様なデータセットを表現することを可能とした。登録対象のデータセットが持つ情報の細かさによって、粒度の小さいものから大きいもの、かつモデル出力等のグリッドデータまで、それぞれに合う形でメタデータ登録が可能である。

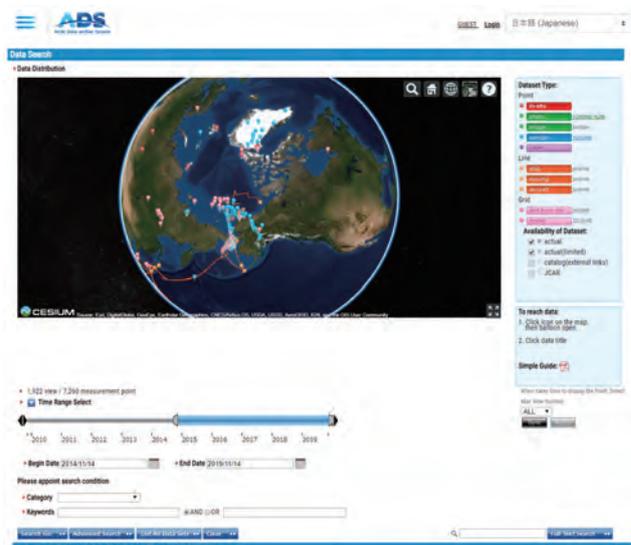


図 4-9-3. 北極を中心とした地図上でのデータ検索イメージ

ADSのメタデータは国内外のデータ機関との連携が可能であり、国際的な標準メタデータスキーマISO19139:2007や地球科学メタデータの標準になりつつあるGlobal Change Master Directory (GCMD) DIF形式のフォーマットを持つ。これらのメタデータは国際的なメタデータ交換プロトコルOAI-PMH2を用いて相互のメタデータのやり取りが可能である。これにより、国際的にはWMO-GCWやGEOSS-Potalとのメタデータの連携を行っている。また、データプロバイダーにデータを提供す

るためのインセンティブ確保目的で、国立極地研究所がデータの品質確保のために出版しているデータジャーナル PDJ (Polar Data Journal) と連携し、データへの DOI 付与を行っている。ADS は PDJ の推奨データリポジトリであり、PDJ で出版されるデータ論文のデータの受け入れもとである。そのため、PDJ において品質管理されたデータセットにはデータ DOI の付与を行う。また近年、さまざまな学術分野において論文のエビデンスとなるデータの公開が求められているため、ADS では論文のエビデンスとしてのデータの登録・公開も行っている。それらについてもデータ DOI の付与を行っている。

VISION

データ可視化はデータの概要を把握するための大変優れた手法である。しかしながら、アーカイブされたデータから、ユーザーが自らの目的に合わせ、データが内包する情報を取り出すことは存外難しく、それらを適切に可視化することもまた困難である。データ可視化は大きく分けて、1) データの取得、2) データの読み込み、3) 可視化処理、の3段階が存在するが、それぞれに困難がともなう可能性がある。まず1) では、可視化したいデータを何がしかの見聞や文献をもとに探し出す必要がある。次に2) では、データフォーマットに注意し、場合によってはフォーマットを変換して、データを PC や可視化ソフトに読み込ませる必要がある。最後に3) では、可視化ソフトウェアによる可視化作業そのものに熟練する必要がある。これらの段階をクリアしてはじめて可視化結果を確認でき、最終的にそのデータファイルが目的に対して適切であったかどうか分かるのである。もしそれが望むものでなかったとしたら、もう1度最初から同じ手順をふまなければならない。こうした一連の作業は、無駄に時間と労力を消費させるものである。

そこで、本テーマでは GRENE 北極で開発したオンライン可視化アプリケーション「VISION」の大幅な機能強化を続け、こうしたデータ抽出と可視化にかかる面倒な作業を軽減した。「VISION」を使えばデータの内容を理解するのに要する時間と労力が大幅に軽減されるので、ユーザーはデータ情報が示す重要な意味合い(すなわち結果)にその意識を集中させることができるのである。

「VISION」の機能強化においては、予備知識がなくとも直感的に簡便に利用できることと、ユーザーが検索結果を再利用できるようにすることを心がけた。

上記のとおり、「VISION」ではその可視化において、利用の平易性とユーザーの多様なニーズを満たす出力が必要である。すなわち「直感的な操作が可能な GUI インターフェース」「データの自動読み込み」「一般的な複数種の可視化結果出力(image、movie、CSV 等)」が必須要件である。これらのすべてを既存のソフトウェアで満たすことは難しいため、JavaScript を用い、そのなかで目的に応じて各種ライブラリを組み合わせることにより独自にアプリケーションの開発を行った。

ユーザーに操作ストレスを与えないためには、指示に対する素早いレスポンスが必要である。そのため、データ読み込み処理には Web Worker による並列化と、Buffer View によるバ

イナリデータの高速読み込みを採用した。Web Worker とは、HTML5 において実装された機能で、JavaScript でマルチスレッド機能を実現できる。JavaScript は基本的にシングルスレッド言語であり、Ajax 処理のためのノンブロッキングの擬似的な並列処理は存在したが、完全な並列処理機能はなく、HTML5 の Web Worker 機能によって実現された。また、Buffer View もバイナリ入出力のために HTML5 において実装された API である。型付き配列 (Array Buffer) をそのまま使用することで、バイナリデータの受け渡しのパフォーマンスが向上し、高速な入出力を行うことができる。

一方、描画処理については、海岸線や等値線などの線データは精細な SVG による描画、2次元カラーマップなどは Canvas を用いることにより高速化を実現した。SVG とは、拡大縮小が行える Scalable ベクター画像である。シャープで精細な画像を生成できる反面、描画するオブジェクト数が大きくなると処理速度が低下する。Canvas は、タグ内にラスター画像を描画する機能を指す。高速な描画ができるが、描画情報を保持しないため、可視化結果を動的に動かすためには再描画する必要がある。また、描画範囲が大きくなると処理速度が低下する。この両者の特性にもとづき、それぞれを用途別に描画方法を選択した。「VISION」の実装機能のうち、強化を行ったものを以下で説明する。

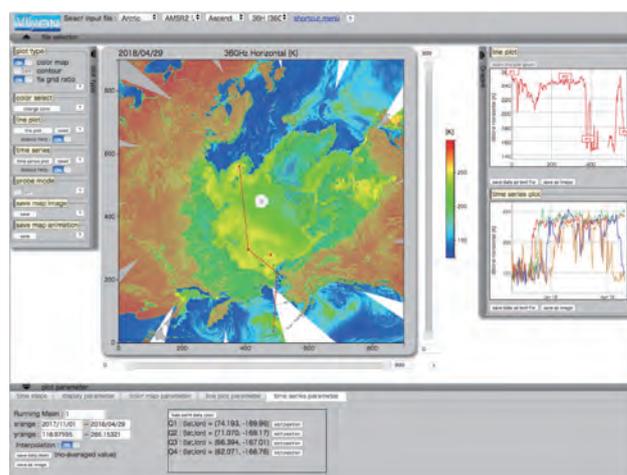


図 4-9-4. 「VISION」の実行画面。カラーマップ、断面グラフ、時系列グラフを実行表示した状態である。

1. データの自動読み込み

データセット名、プロダクト名等をマウス操作で選択することにより、自動的にデータを取得し可視化結果が得られる。現在、以下の7種類のデータを実装している。

- JAXA AMSR-E/AMSR2 極域衛星プロダクト
- NSIDC SSM/I 極域衛星プロダクト
- NCEP 再解析データ: NCEP1 (Kalnay et al., 1996²⁾)
- High-resolution gridded datasets: CRU-TS3.21 (Jones and Harris, 2013^{※3)})
- モデル計算結果出力データ: TOPAZ4 (Xie et al., 2017³⁾)、ELSE (Kim et al., 2009⁴⁾)、N14 (Nitta et al., 2014⁵⁾)

データは日時と連動しており、指定日時を変更することで、その日付に合ったデータを自動取得する。

2. カラーマップ表示

読み込まれたデータは自動的にカラーマップで表示される。数値の範囲やカラーパレットは変更可能となっており、ユーザーの望む配色を選べる。また、海岸線データ、緯線経線も自動的に位置を計算し、カラーマップに重ねて表示される。これらは、データの場所と現実の地点を比較する際に役立つ。また、表示範囲はマウス操作によりズームやパンが行え、表示したい箇所を自由に変更できる。

3. 等値線表示

等値線プロット機能も搭載している。等値線の本数や線の表す数値などは自由に変更可能である。この機能を使うことにより、データの勾配や極点などが強調表示され、さまざまな現象が見つかりやすくなる。

4. 任意断面の断面グラフ表示

指定した断面上の数値を取得し、グラフで表示する機能である。この機能をオンにすると、画面上にラインを引ける状態になり、マウス操作により複数の地点をクリックすることで任意の長さのラインを指定できる。ラインを指定すると作成されたラインに沿って数値を取得し、別ウィンドウにグラフが表示される。このグラフは、元データの日時と連動しており、日時の変更に合わせてグラフも更新される。

5. 任意地点の時系列グラフ表示

指定した地点における時系列データをグラフ化する機能である。この機能は取得する期間を指定し、画面上の地点をマウスで指定することにより、その地点のデータを必要なだけ自動的に取得してグラフ化できる。

6. プローブ機能

マウス位置の地点に関する情報（緯度経度、グリッド位置、数値）を表示する機能である。この機能により、データの実際の数値を手軽に取得することができる。

7. 簡易解析機能

読み込むデータを選択する画面でコンビネーション・プロット機能を使うことにより、簡易的なデータ解析が行える。複数の数値プロダクトの四則演算や JavaScript で標準装備されている数学関数が使用でき、計算結果を入力データとして読み込みプロットすることができる。

8. 保存機能

上記の可視化・解析結果をさまざまな形式に保存する機能も実装した。例えば、スナップショット画像、時系列動画、グラフデータの CSV などである。これにより、可視化結果を論文やプレゼンテーション資料、あるいは解析ツールの入力値として再利用することが可能である。

以下に「VISION」を用いて解析を行った例を示す。

2016年4月11日にグリーンランド氷床南部で春に大規模な表面融解が生じたことが、水循環変動観測衛星「しずく」によって捉えられた (JAXA, 2016⁶⁾)。これは、36GHz 水平偏波の輝度温度に赤色、36GHz 垂直偏波の輝度温度には緑色、18GHz 垂直偏波の輝度温度に青色をそれぞれ割り当て、各色

を合成することにより可視化した画像 (RGB 合成画像) を見ると、色の濃淡が氷床表面の融解度合いを表しており (図 4-9-5 左)、白に近い部分で融解が起きていることがわかる。この現象における可視化結果を「VISION」でも再現してみる。

まず、「VISION」のコンビネーション・プロット機能において、入力フォームに「36H>220 && 36V>220 && 18V>220」と入力してプロットを行う。これにより、36GHz 水平・垂直偏波と 18GHz 垂直偏波の輝度温度がすべて 220K より大きい場合に 1、それ以外は 0 という値が計算・可視化される。画像の色見本を近いものにするため、カラーマップはグレースケールに変更する。この状態で、データの日時を 2016年4月11日に変更することで RGB 衛星画像と似たような図を得ることができる (図 4-9-5 右)。

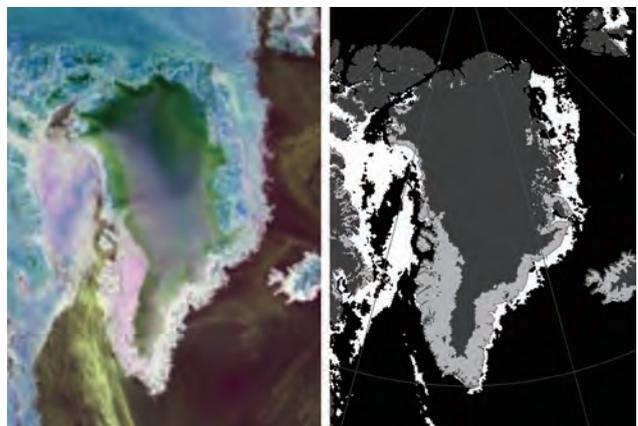


図 4-9-5. 2016年4月11日に捉えられたグリーンランド氷床南部で観測された大融解の RGB 合成画像 (左) と「VISION」のコンビネーション・プロット機能を用いて複数の衛星プロダクトから再現した画像 (右)

画像を比較すると、グリーンランド上で同じ部分が白色に表示されており、RGB 合成画像と同じように、氷床の表面融解を可視化できていることがわかる。

以上の機能を備えた「VISION」により、いままで以上にデータ相互利用が促進されると確信している。

4.9.3 北極域の環境変動問題を多くの者が体感できるデータや情報として取り出せる機能の構築

杉村 剛

VISHOP と Real Time Monitor

ADS ではリアルタイムな情報配信も行っている。さまざまなデータや情報をリアルタイムに発信することは、研究者はもちろん、一般のユーザーに対してもとても有用なことである。ADS では、準リアルタイム極域環境監視モニター「VISHOP」を用いて画像データを配信するとともに、「Real Time Monitor」によって観測ステーションの数値データのリアルタイム配信を行っている。

「VISHOP」は、極域の衛星データや各地のライブカメラ画像などをブラウザ上で準リアルタイムに表示する可視化サービス

である。極域の状態を素早く配信することを目的に機能強化を行っている。

「VISHOP」では、海水や海面水温、積雪深、雲の動きのように、多くの分野で参照される情報を自動的に可視化している。これらの情報はウェブサイトにアクセスするだけでアニメーションによるダイナミックな画像として参照可能である。これらの画像は AMSR2 による観測データをもとに作成しており、ADS のサーバー上で自動的にデータを取得し、数値データを可視化・画像化している。これにより、常に最新の情報を理解しやすい形式で配信できる体制を整えている。現在は、海氷密度度、海水厚、海水漂流速度ベクトル、89GHz の偏光比、RGB 合成画像、および海氷密度度+海面水温+積雪深の合成画像を配信している。また、北極域・南極域の選択や衛星軌道の上昇・下降も選択・変更できるようになっている。

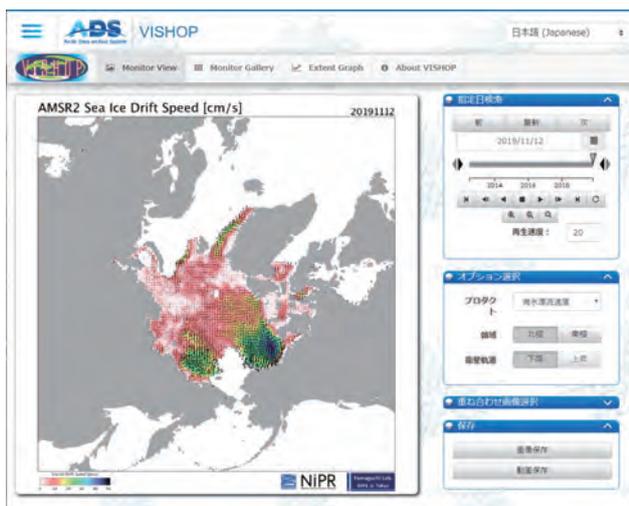
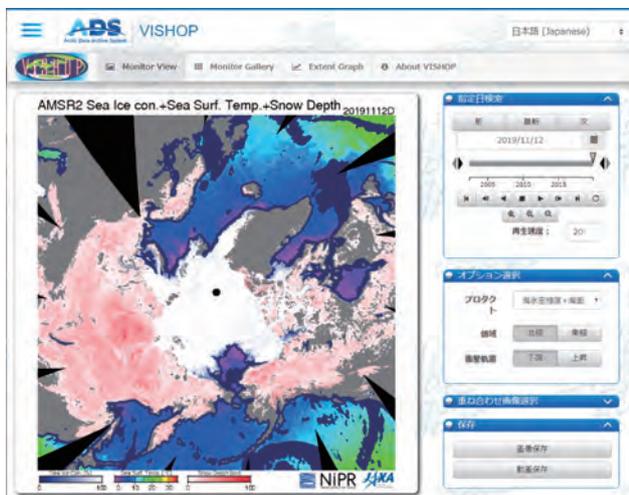


図 4-9-6. 「VISHOP」で可視化した AMSR2 による海水域、海面水温、積雪深のデータ(上)と、AMSR2 により計算される海水流動速度ベクトル(下)

また、過去の海水分布の様子や最新の北極海水分布の中期予測データも重ね合わせて表示することが可能となっており、さまざまな情報をわかりやすい形式で参照することができる。北極海水分布の中期予測データは、Kimura et al. (2013)¹⁾による海水分布の予測計算結果を 2014 年から ADS で可視化・公

開しているものである。本プロジェクト期間中も予測研究を行う研究者が所属するテーマ 5 と連携し、毎年予測結果を公開した。過去の予測結果と衛星画像を同時に表示できるため、容易に予測結果と実際の状況を比較することができ、計算精度を検証する際にも「VISHOP」は有効である。

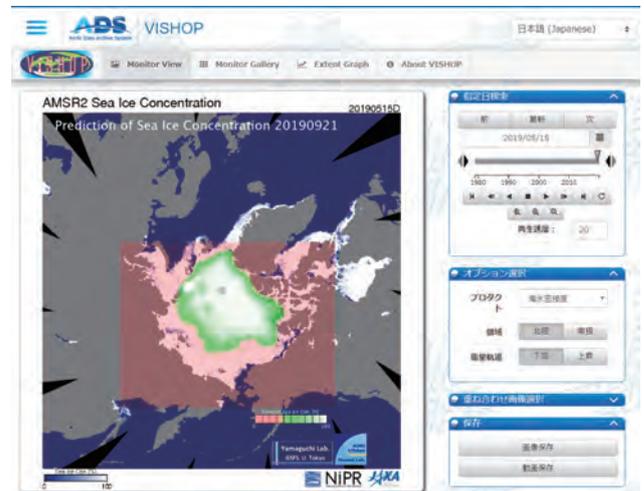


図 4-9-7. 「VISHOP」で重ね合わせ表示される北極海水分布の中期予測データ。予測値は緑色で表示される。

「VISHOP」では表示結果を保存する機能も実装している。表示結果は画像として PC に保存できるとともに、時間変化のアニメーションを動画として保存することもできる。これらのファイルは論文やプレゼンテーションなどで利用できるため、「VISHOP」は表示した情報を容易に再利用することが可能なシステムになっている。

また、「VISHOP」の 1 機能である Extent Graph では、海水面積値の数値データをグラフとして表示できる。海水面積値の数値データは ADS のサーバーが日々自動取得しており、ブラウザは Extent Graph にアクセスする際に自動的にデータを読み込み、グラフ化を行って表示する。これにより、ウェブページにアクセスするだけで極域の海水面積の増減をリアルタイムに知ることが可能である。グラフの形式はインタラクティブに変更可能であり、年間変化や日・月・年単位での最大値・最小値・平均値などを選択することもできる。この機能により、毎年の変化の比較だけでなく、夏(9月)の最小面積値の年変化や春(2月)の最大面積値の年変化などのグラフも容易に作成できる。

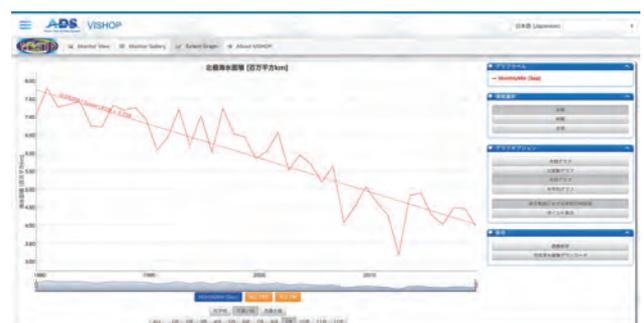


図 4-9-8. Extent Graph による 9 月の最小面積値グラフ表示

これらのプロットしたグラフに対する線形回帰機能も実装している。これにより、グラフの変動傾向なども容易に把握できるようになっている。

海水面積値グラフの画像や数値データも指定した形式でダウンロードして再利用可能となっている。別の解析ソフトから利用することでユーザー自身が海水の変動の解析を行うことができる。

「VISHOP」はADSのサービスのなかでもっともアクセス数が多く、昨年度は年間180万PV（ページビュー）を記録した。

「Real Time Monitor」は、極域の定点観測装置で得られる数値データをADSのサーバーで受信し、数値をグラフ化して配信するサービスである。このため、観測地点のさまざまなデータを常に最新の情報として配信することが可能である。画像ではなくインタラクティブに表示を変えることが可能なグラフを作成するため、スナップショット画像よりも利用価値の高い情報を配信できる。現在「Real Time Monitor」では、グリーンランドで3地点、カナダで1地点、ノルウェーで1地点、南極で2地点の計7地点のデータを配信している。

グリーンランドでは、北西地点の氷床上にSIGMA-A、SIGMA-B、SIGMA-Dという3つの気象観測装置が設置されており、気温、比湿、風速、風向、短波放射、長波放射、地表面気圧、雪高、雪温などを計測している（Aoki et al., 2014⁷⁾。現在、SIGMA-Dは観測を停止しているが、SIGMA-AとSIGMA-Bは継続して観測を実施している。

カナダでは、ウッドバッファローに気象観測装置が設置されており、大気温度、比湿、風速、風向、短波放射、長波放射、光合成有効放射、地表面気圧、土壌温度などの観測が行われている。

ノルウェーのニーオルスンに設置されていた高分解能Wバンドレーダ（FALCON-A）観測装置は電波観測により上空の雲の鉛直分布を測定している。「Real Time Monitor」では、2次元のカラーマップ表示や鉛直変化や時系列変化などの1次元グラフによって観測データを表示することが可能である。現在、FALCON-Aは機能を停止しているため、データの更新は行っていない。

これらは、観測地点と変数（測定値）、および表示期間を選択することにより、データを自動取得してグラフ化を行う。変数は複数選択することも可能となっているため、変数間の相関関係の把握や、異常値の検出などが行いやすいシステムとなっている。

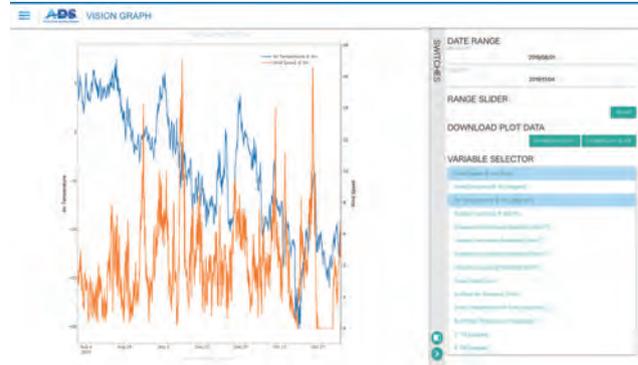


図 4-9-10. SIGMA-B における気温、風速を「Real Time Monitor」で表示

「Real Time Monitor」では、グラフのさまざまなスタイル（線の色、線の太さ、タイトル、軸の位置など）が自由に変えられるように設計されているため、グラフに表示した画像をそのまま保存し、論文やプレゼンテーションの図として使用することが可能である。また、実際の数値データをCSVやエクセルデータとしてダウンロードすることも可能なため、ユーザー自身のPCでデータの編集やグラフ化・画像化も行いやすくなっている。

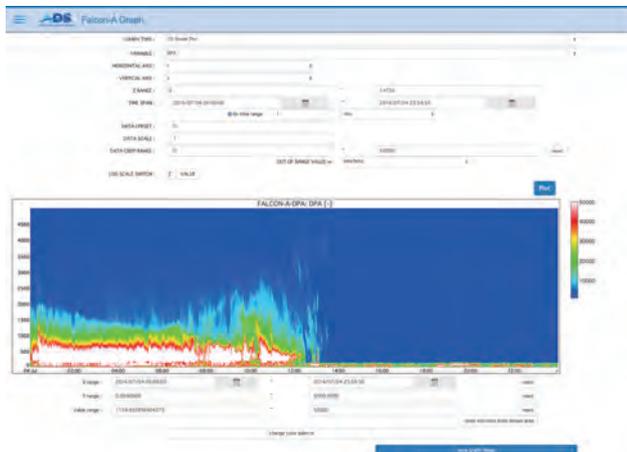


図 4-9-9. FALCON-A の鉛直分布データの 2 次元カラーマップ表示

4.9.4 データサービスの基盤の開発

照井 健志

データサービスの基盤の開発

ADS のデータサービスの構築は 2011 年から開始され、さまざまなサービスを拡張してきた。ADS のデータサービスの拡張にともない、それらを支える情報基盤についても拡大・拡張を行った。2011 年から本プロジェクト終了まで、ハードウェア、ソフトウェア、ネットワーク、運用・保守に関わるメンテナンスシステムについても、多くのアップグレードを実施した。2011～2019 年の情報基盤の構築に関するロードマップを図 4-9-11 にまとめた。

基盤種別	利用システム	年								
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
仮想化サーバー	単体サーバー体制 統合サーバー1台	■	■	■						
	ホットスタンバイ体制 本番系サーバー2台 開発系サーバー1台				■	■				
	冗長体制 統合サーバー3台						■	■	■	■
仮想化ソフト	Vmware ESXi 5	■	■	■						
	XenServer 6.2				■	■				
	XenServer 6.5						■	■		
	XenServer 7.2								■	■
	XenServer 7.1 CU									■
ストレージサーバー	ローカルストレージ	■	■	■						
	iSCSI共有ストレージ						■	■	■	■
	ZFSストレージ									■
大容量ファイルシステム	ext4	■	■	■						
	ZFS									■
バックアップシステム	単体テープローダLT08									■
	テープライブラリ(LTFS)									■
運用管理システム	Windows Server 2008R2									■
	Windows Server 2012R2									■
	Windows Storage Server 2012 R2									■
	Windows Server 2016									■
ネットワーク	24ポートスイッチ+5ポートスイッチ	■	■	■						
	24ポートスイッチ2台									■
	48ポートスイッチ2台+24ポートスイッチ									■

図 4-9-11. ADS 情報基盤に導入・設置されたシステムのロードマップ

図 4-9-11 の利用システムのうち、年(タイムライン)が緑色のものは本プロジェクト以前に構築されたシステムを表す。タイムラインが青色の濃淡で 2 種類に区別されたものは本プロジェクト実施中に構築されたシステムを表し、それぞれプロジェクト前期(淡色)と後期(濃色)に構築されたものを表す。本項では構築期間を ArCS 前期と ArCS 後期と呼称する。2015 年末時点でデータサービスの基盤には以下のような課題があった。

1. 仮想マシン上のデータ量や処理数の増加にともなう、データサービスの性能低下
2. ファイル数の増大にともなう、ストレージ能力不足
3. バックアップ体制の不足
4. 運用・保守の手間の増大
5. ネットワーク能力の不足

さらに近年の情報セキュリティリスクの増大にともない、ADS のデータサービスも情報セキュリティ対策を行う必要性が出てき

た。そのため、本プロジェクトにおけるシステム開発では、上記の課題に対応しつつ、情報セキュリティ対策を行わなければならない。本プロジェクトで実施したシステム開発のロードマップを図 4-9-12 にまとめた。

実施内容	実施年					対応課題
	2015	2016	2017	2018	2019	
仮想化基盤の強化						
→CPU、メモリーの増強						1
→共有ストレージによる冗長化						3, 4
→仮想マシンの縮退化						1, 2, 3, 4, 5
→スナップショット機能の強化						3, 4
ストレージ機能の強化						
→ストレージ容量の拡大						1, 2
→次世代ファイルシステムへの移行						1, 2, 3, 4, 5
バックアップ体制の構築						
→テープ装置の導入						3, 4
→DR体制の構築						3
→テープライブラリの導入						3, 4
運用・保守の効率化						
→遠隔監視の導入						4
→アラートシステムの構築						4
ネットワークの強化						
→ネットワークの冗長化						3, 4, 5
→VLANによるネットワーク分割						1, 2, 5

図 4-9-12. ADS 情報基盤のシステム開発のロードマップ

図 4-9-12 のシステム開発のロードマップを達成した最新の ADS の情報基盤の概要図を図 4-9-13 に示す。本項では図 4-9-13 の概要図に至るまでのシステム開発について報告する。

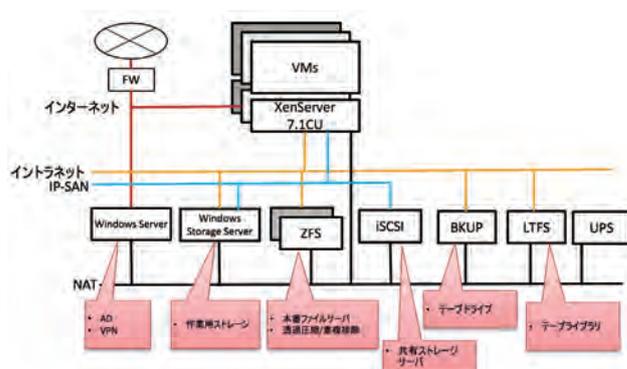


図 4-9-13. ADS 情報基盤概要図

仮想化基盤の強化

本プロジェクトにおいては、仮想化環境を抜本的に増強するため、仮想化環境の最適化された物理サーバーを 3 台導入した(図 4-9-11)。CPU の速度よりも並列して処理できる数を重視した大多数のコア(16 コア×2CPU)を搭載し、メモリー容量はサーバー導入時の 2 倍にした(32GB から 64GB)。将来的なメモリー不足を考慮してメモリーの空きスロットに余裕を持たせた。仮想化ソフトを動かすための最低限のストレージしか有しておらず、仮想マシンを保存するストレージはすべて Internet Small Computer System Interface (iSCSI) 共有ストレージサーバーを利用した。これは仮想マシンのファイルをネットワーク経由で複数の物理サーバーで共有を行うためである。このような仮想マシンを共有ストレージ上に保存し、複数の物理サーバーで動作させることを冗長化と呼ぶ。この冗長化の機能を利用す

るために最新の XenServer にアップグレードした。XenServer は 6.2 からオープンソースによる提供が行われており、6.5 から大幅にストレージやネットワークの性能強化が行われ、大容量の iSCSI 共有ストレージの利用が可能になった。

ArCS 前期では iSCSI 共有ストレージサーバーの構築と XenServer6.5 による仮想化環境の構築を行い、移行作業を実施した。冗長化により、仮想マシンの必要なリソースが不足することなく、安定的に仮想マシンを起動できるようになった。冗長化は、仮想マシンが稼働している物理サーバーに障害が発生しても、自動的にほかの物理サーバーで再起動させることが可能にする。冗長化によって運用・保守管理も効率化された。

ArCS 後期になると、想定どおり仮想マシンのメモリー不足が発生したが、用意されたサーバーの拡張性によってメモリー容量を増やすことで対応できた。その一方で仮想マシンのストレージ使用量の問題が顕在化してきた。ファイルサーバーは 2015 年時点で 6TB の使用容量だったが、2017 年開始時点で 12TB の容量を必要としていた。ストレージの使用量の増加は運用上の問題にもなっており、ファイルサーバーのバックアップに 5 日以上時間を要するようになった。このため、ArCS 後期では、ファイルサーバーやそれ以外の大容量のストレージを利用している仮想マシンの使用資源量の縮退化を行った。2018 年以降は、情報セキュリティ上のリスクとしてランサムウェアの脅威が高まったため、高頻度でスナップショットを取得し、万が一のランサムウェアの被害を受けた場合でもスナップショットからデータを復旧できるようにしておかなければならなかった。スナップショット機能を強化するため、XenServer7.1ICU と XenOrchestra を導入し、2018 年には週次でスナップショットを自動取得するようにした。2019 年には仮想マシンの縮退化とファイルサーバーの分離が完了したので、余裕ができた iSCSI 共有ストレージを利用して全仮想マシンの毎日のスナップショットを取得し、14 日分を保存するようにした。万が一情報インシデントが発生しても最短で 1 日前の時点で復旧できるようになった。

ストレージ機能の強化

ADS のデータサービスの増加は、ADS のファイルサーバー上のデータ量の増加と、そのデータの処理量の増加としてシステムに反映される。これらに対応するため ArCS 前期ではデータ量の増加への対応を、ArCS 後期ではデータの処理量の増加に対応した。

ArCS 前期では、十分な容量のストレージサーバーとして、iSCSI 共有ストレージサーバーを用意し、仮想マシンとして構築されたファイルサーバーは、このストレージ資源を利用した。大容量のストレージ資源をサーバーが利用するためには、その容量に対応したファイルシステムを利用しなければならない。ADS 構築当初から継続的に利用してきたファイルシステムは ext4 であった。このファイルシステムの仕様は ADS のデータ量に十分対応できるものだったので継続して使用し、ストレージの使用量の増加をファイルシステムの拡張によって対応できた。しかしながら、前述のとおりストレージ使用量の増大は仮想マシンの運用上の問題として現れたため、この対応を ArCS 後期で行った。

ArCS 後期では、専用の物理サーバー上にファイルサーバーを構築し、仮想マシンの縮退化作業にともない移動させたデータの保管・共有場所とした。「VISION」や「VISHOP」で利用されるデータは、衛星による観測データや数値モデルの計算結果で、これらのデータは非圧縮データとして保管される。そのため、ファイルサーバーのストレージ資源を多く使用していた。ほかのデータサービスでも利用するため同じデータの重複も発生していた。このようなファイルサーバー上の問題に対応するため、専用のファイルサーバーでは ZFS を採用した。

ZFS は次世代ファイルシステムである。ZFS の透過的圧縮は、非圧縮データをファイルシステム側で自動的に圧縮してストレージの使用量を節約する機能である。透過的圧縮によって圧縮されたデータは、非圧縮データとしてアクセス可能なため、非圧縮データを持つ ADS のデータサービスと相性がよい。ZFS は重複排除を行うことができる。これはファイルシステム内に同じファイルが複数存在していてもストレージの消費を抑制する機能である。「極 (KIWA)」や「VISION」でデータセットが重複しても、ストレージの実使用量はひとつのデータセット分で済む。ZFS の透過的圧縮と重複排除によりファイルサーバーのストレージ利用効率を向上させることができる。2017 年に専用ファイルサーバーを構築し、透過的圧縮のみで運用を開始した。2018 年には重複排除機能を有効化した。2019 年 11 月時点で、ストレージの実使用量は 21.5TB だが、圧縮率は 1.93 倍で、重複排除により 16.3TB のデータが重複排除されていた。ZFS でなければ 73TB のストレージ領域を必要としていた。

本プロジェクト期間中に次世代ファイルシステムを採用することで、非常に高性能なストレージ能力を獲得することができた。

バックアップ体制の構築

2015 年以前では定常的なバックアップ体制は構築されていなかった。計画停電や仮想化ソフトのアップグレード、セキュリティ的なアップデートの実施などの大きなイベントの前に仮想マシンや仮想化環境のバックアップを取得していた。取得されたバックアップは、NAS や外付け HDD などの余剰なストレージ領域を利用して保管されていた。そのため、定常的で安定的なバックアップ体制ではなかった。

ArCS 前期では安定的にバックアップを取得して保管するため、LTO6 テープドライブを導入した。LTO6 は非圧縮で 2.5TB のデータを保管できるテープメディアである。本プロジェクト開始時点のバックアップに必要なデータ量は 6TB を超えなかったため、3 本のテープで保管可能だった。テープの入れ替えの手間を加味し、月次のバックアップを実施した。テープの必要量は 1 年間で 36 本と見積もられ、2TB/年の増加ペースを加味すると 2017 年には年間で 60 本と見積もられた。実際には 2017 年のストレージ使用量は 12TB に達したため、バックアップのために 6 本以上の必要数となった。ファイルサーバーのバックアップを取得するために 5 日以上時間を必要とし、テープメディアへのバックアップはさらに時間が必要となってしまった。テープドライブによるバックアップ体制は手間と時間がかかるようになったため、仮想マシンの縮退化とストレージ機能の増強を待つ

てから、新たにテープライブラリを導入した。

ArCS 後期では、テープライブラリを利用したバックアップ体制に移行した。テープライブラリは44本のテープを内蔵し、ソフトウェアのコマンドに応じてテープがドライブに出し入れされるため、人手を介することなく複数のテープにバックアップを取得することができる。2018年にテープライブラリによるバックアップ体制を構築し、2019年から本格的な運用が開始された。仮想マシンの縮退化によって、月次のバックアップ使用量が削減することができた。2019年11月時点で月次に2本のテープを必要としている。

そのほかにArCS後期ではバックアップ体制として災害復旧対策(DR対策)の整備を進めた。DR対策とは、大規模災害が発生しても、システムを復旧できるように対策することで、具体的には遠隔地にバックアップデータを保管することである。ADSではArCS参加研究者から預かったデータを大量に保管しているため、首都直下型地震のような大規模な災害が起きてもデータを保全できるように、DR対策を実施した。DR対策用のバックアップシステムは北海道大学北極域研究センター内のサーバールームに設置された。2017年から構築を開始し、さまざまなテストや障害を解決し、2018年にはオンラインでバックアップデータの転送を開始した。1日あたり最大で2TBのデータ転送量であることが確かめられたので、月次に取得されたバックアップの転送が十分に可能だった。

運用・保守の効率化

2015年以前におけるシステムの運用・保守は、システムに直接アクセスして実施していた。ADSは小規模の開発リソースしかなく、システムの運用・保守はひとりの人員で行われていた。そのため、学会や出張、休暇などの状況で、システムに障害やインシデントが発生すると、サーバーの設置場所に行くまで何もできない。遠隔監視やリモートアクセスをできるようにすることで、運用・保守の効率化を図った。

ArCS後期に、遠隔監視を可能にするためVPNサーバーを構築した。VPNサーバーはルーター内蔵やLinux/UNIXで構築することが可能であるが、ADSではWindows Serverを利用した。Windows Serverでは管理ツールを利用することで簡単にセキュアなVPNサーバーを構築できた。Windows ServerはActive Directory(AD)の認証認可サーバーとしても機能するため、VPNのユーザー認証に利用することが可能である。VPNプロトコルとしてL2TP/IPsecとIKEv2で比較を行い、IKEv2を採用した。L2TP/IPsecは2001年にRFC3193で標準化されたプロトコルのため、多くのOSやスマートフォンで利用可能である。Windows Serverで簡単に設定できるのは事前共有鍵を利用したL2TP/IPsecであるが、事前共有鍵はセキュリティ的に不安であり、DR対策のバックアップシステムで利用できなかった。IKEv2を採用し、サーバー証明書とADのユーザー認証によりセキュアなVPNサーバーを構築した。この体制により遠隔地からADSのデータサービスの状態を把握できるようになった。

障害が発生したことを自動的に管理者や開発者に連絡する方

法が必要である。ArCS後期では強化された仮想化環境とストレージサーバーから、障害発生時に自動的にアラートがEメールとして送られるようにした。本プロジェクトの実施期間中に1番多く発生した障害はHDDの故障だったので、HDDの故障を素早く知ることができれば、復旧作業を迅速に行うことができる。HDDの故障により劣化したサーバーの性能は著しく低下するので、素早い復旧が重要になる。XenServer7.1CUやiSCSI共有ストレージサーバー、ZFSはシステムとしてメールを利用したアラートの通知が可能だったので、これらを整備してアラートシステムを構築した。

ネットワークの強化

ネットワークはADSで利用しているデータサービスを結合させる重要な要素である。ネットワークを介して、仮想化サーバーとストレージサーバーは結ばれている。ここまで報告した物理的、仮想的なシステムはすべてネットワーク化されている。ネットワークが利用できなくなった場合、すべてのADSのデータサービスが停止することになる。そのため、ネットワークの強化は慎重に実施する必要性があった。

ADSの構築当初からArCS前期までのネットワーク強化方針はポートの数が不足しないよう増やしていくことだった。ADSで利用しているネットワーク機器の速度は1Gbpsで統一されている。速度を物理的に向上させることができないため、1Gbpsの空きポートを利用した冗長化構成を構築した。

ネットワークの冗長化はLACPとMPIOという方式が存在する。LACPはふたつ以上のポートをソフトウェア的にひとつのポートとして定義するプロトコルで、ネットワークスイッチとソフトウェアの両方で対応している必要がある。MPIOはストレージと通信する回線を複数化することで、ストレージの入出力を冗長化する方法である。ADSで導入されたハードウェアはこれらのネットワーク冗長化を利用できる構成だったので、順次導入していった。

LACPはXenServerとZFSが対応していた。2016年から通信を冗長化するために仮想化環境で利用した。ネットワークスイッチとの相性問題が発生したので、2017年に利用を停止したが、2018年に新しいネットワークスイッチを導入したので、ZFSで利用を再開した。

MPIOはiSCSI共有ストレージサーバーとXenServerが対応していた。2018年からiSCSI共有ストレージサーバーとの通信を冗長化するために利用開始した。MPIOのおかげでiSCSI共有ストレージサーバーとの通信速度が安定するようになった。

これまでネットワークの分割は物理的なネットワークスイッチを複数台用意することで実現していた。分割の必要性が低い場合は、同じIPアドレスプールのセグメントを利用していた。ArCS後期に入り、仮想化環境とストレージ環境の強化を行った際に、それぞれでネットワーク負荷が異なっていた。パフォーマンスの低下を抑制するために、利用用途やシステムの種類でネットワークの分割が必要だった。分割はネットワークスイッチのVLAN機能を利用することで、ネットワーク機器を増やすことなく実現された。ネットワークはそれぞれ、インターネット、イントラネット、IP-SAN、NATの4つに分割された。インターネットは国立

極地研究所外と通信をするためのネットワークで、ウェブサーバーやVPNサーバーのような公開されているシステムで利用される。イントラネットは国立極地研究所内と通信し開発者や管理者が所内からシステムにアクセスする際に利用する。システム内の情報機器や仮想マシン同士の通信でも利用されるネットワークである。IP-SANはiSCSI共有ストレージやZFSファイルサーバーと通信する際に利用されるネットワークで、ストレージの入出力のために利用される専用ネットワークである。最後のNATは、サーバーの監視のために利用されるネットワークである。

用途によってネットワークを分割し、LACPやMPIOの冗長化を施すことで、ネットワークの能力を強化することができた。

まとめ

ADSのデータサービスを安定的に動かすため、プロジェクト開始時の課題を明らかにし、それぞれの課題を解決するためのハードウェア、ソフトウェア、ネットワークの能力を強化し、運用・保守の効率化を行った。これらを統合することで図4-9-13の概要図のようなADSの情報基盤を構築した。

ADSのデータサービスは仮想化環境の仮想マシンで実現されているので、仮想化環境に関する仮想化ソフトやストレージサーバーの強化が重要である。単純にハードウェアの増強だけでなく、ソフトウェア的な設定による機能付加や、ネットワークの冗長化でも十分な強化が可能だった。

本プロジェクトの期間中は、最新の仮想化ソフトや次世代ファイルシステム、Windows Serverの新機能など、最新技術の導入を積極的に行った。最新技術の導入により、情報セキュリティを維持しつつ、運用・保守の効率化を達成できた。特にスナップショット機能の強化とバックアップ体制は、脅威が増している情報セキュリティリスクに対応するために必要な機能だった。このような情報基盤を大学の研究室レベルで実現することは難しく、研究プロジェクトのなかでADSのような情報基盤を担う組織の重要性は増してくるであろう。

その一方で、現状のADSの開発リソースでこの情報基盤をさらに拡大・強化することは難しい状況である。扱うデータ量やデータサービスを拡大するためには、ハードウェア性能の制約から脱却するためクラウドの利用や、データサービスのコンテナ化、インスタント化が必要になってくるであろう。最新技術の追従が必要で、情報システムに継続的な投資を続けなければならない。

4.9.5 情報配信の強化—航路支援サービス「VENUS」—

照井 健志

はじめに

ADSはこれまで多くの研究機関と協力してデータの収集を行い、データサービスを通じてインターネット上に公開してきた。ADSのデータサービスは常時接続のインターネットが利用できることを想定して作られている。一方で極域の最新情報を本当に必要とする人々は、インターネットから隔絶された場所や状況

にいる場合が多い。

ADSのデータサービスのうち、海氷域を航行する船舶向けに衛星データや数値データを配信する「VENUS」が存在する。「VENUS」は2014年からサービス提供を開始し、北極航海については2015年の「みらい」をはじめ、「おしよる丸」や「Mulanovskiy」にも提供した。また南極海の「しらせ」、「海鷹丸」、そのほかの南半球の海水が存在する海域の調査航海にも提供した。提供可能なデータは海水密度や海面温度のみならず、海水厚、海水流動ベクトル、風向風速、海面気圧、波浪の24時間と48時間データ、海面高度データと多岐にわたるようになった。船内LANに接続し船舶情報と連携することで、GPSデータ取得によって位置情報や予定航路、観測ポイントの表示を行う。最新の海水情報は航路決定の際に極めて重要な情報なので、「VENUS」による情報配信は重要である。

2018年度と2019年度の「みらい」北極航海(MR18-05C、MR19-03C)では、結氷期の観測航海を行った。これらの航海で実施された「VENUS」の情報配信について報告する。

VENUSの構成

「VENUS」は、小型で安価なIoTデバイス(Raspberry Pi)上に、準リアルタイムで極域の衛星データや各地のライブカメラ画像などを可視化するサービスである「VISHOP」を移植し、衛星データ配信をメールベースで実現することで、衛星データの自動配信と可視化を簡易に実現している。衛星データの送信はADSのサーバーから行われている。国内の多くの研究船舶では、メールの送受信だけは限定的に利用可能であるため、送信はすべてメールを利用し、衛星データは圧縮処理をした後に添付ファイルとして送られる。IoT上で、メールの受信、添付ファイルの展開、そして衛星データの可視化が自動的に行われる。可視化された画像ファイルはウェブサーバー上で公開され、船内LANから閲覧可能となる。

「みらい」北極航海用の拡張

MR18-05CとMR19-03Cは過去に例のない初冬季の北極航海であったため、高い安全性を確保する必要があった。そのため「VENUS」を利用し、ECMWFの10日間の予報データと、IcePOMによる高解像度の10日先までの海氷予測情報を配信した。「VENUS」で取り扱ったプロダクトの取得から配信までのフローチャートを図4-9-14に示す。



図4-9-14.「みらい」北極航海用「VENUS」のフローチャート

これまでに「VENUS」で10日先までの予測情報を配信したことはない。その理由として、極域における船上のインターネット回線が主にイリジウムを使用していることがあげられる。速度が128Kbpsしかなく、非常に限られたネットワーク帯域をデータ配信で使い切ってしまう恐れがあること、通信コストが大きくなるため忌避されてきたのである。

MR18-05CとMR19-03Cは安全性が優先されたため、これらを度外視して送ることができる貴重な機会となった。「VENUS」が送付したプロダクトの一覧とその数を表4-9-1に示す。

「VENUS」はメールサーバーの容量制限を避けるため、1通のメールに添付するプロダクトはひとつのみに制限している。表4-9-1のような場合は全部で125通のメールが送信される。大量のメールを送ることを工夫するため、メールの送信スケジュールを作成した(図4-9-15)。送信スケジュールは、Raspberry Pi上の描画速度を考慮し、描画と受信が重ならないようにした。また優先度の高い情報から順番に送るよう設定した。

これらの設定をもとに「みらい」北極航海のデータ配信を実施した。

VENUSの船内利用

データを受信した船内の「VENUS」はプログラムにしたがい、バイナリデータの可視化を実施する。可視化されたデータは「VENUS」のウェブサービスを通じて、船内に公開される。公開された「VENUS」のウェブ画面を図4-9-16に示す。

表4-9-1. 配信したプロダクトの一覧

親プロダクト	パラメータ名	解像度	取扱日数
AMSR2	IC0	900x900	1
AMSR2	SST	900x900	1
AMSR2	SIT	900x900	1
GPV	HTSGW	1/2度	4
GPV	DIRPW	1/2度	4
GPV	PERPW	1/2度	4
ECMWF	MSL	1/10度	11
ECMWF	10U	1/10度	11
ECMWF	10V	1/10度	11
ECMWF	T2M	1/10度	11
ECMWF	CI	1/10度	11
ECMWF	SST	1/10度	11
IcePOM	CON	613x684	11
IcePOM	SST	613x684	11
IcePOM	THI	613x684	11
IcePOM	STR	613x684	11
小計			125

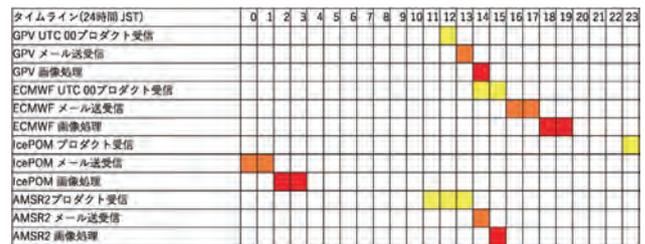


図4-9-15. 「VENUS」の配信スケジュール。オレンジ色がメール配信のタイミング。

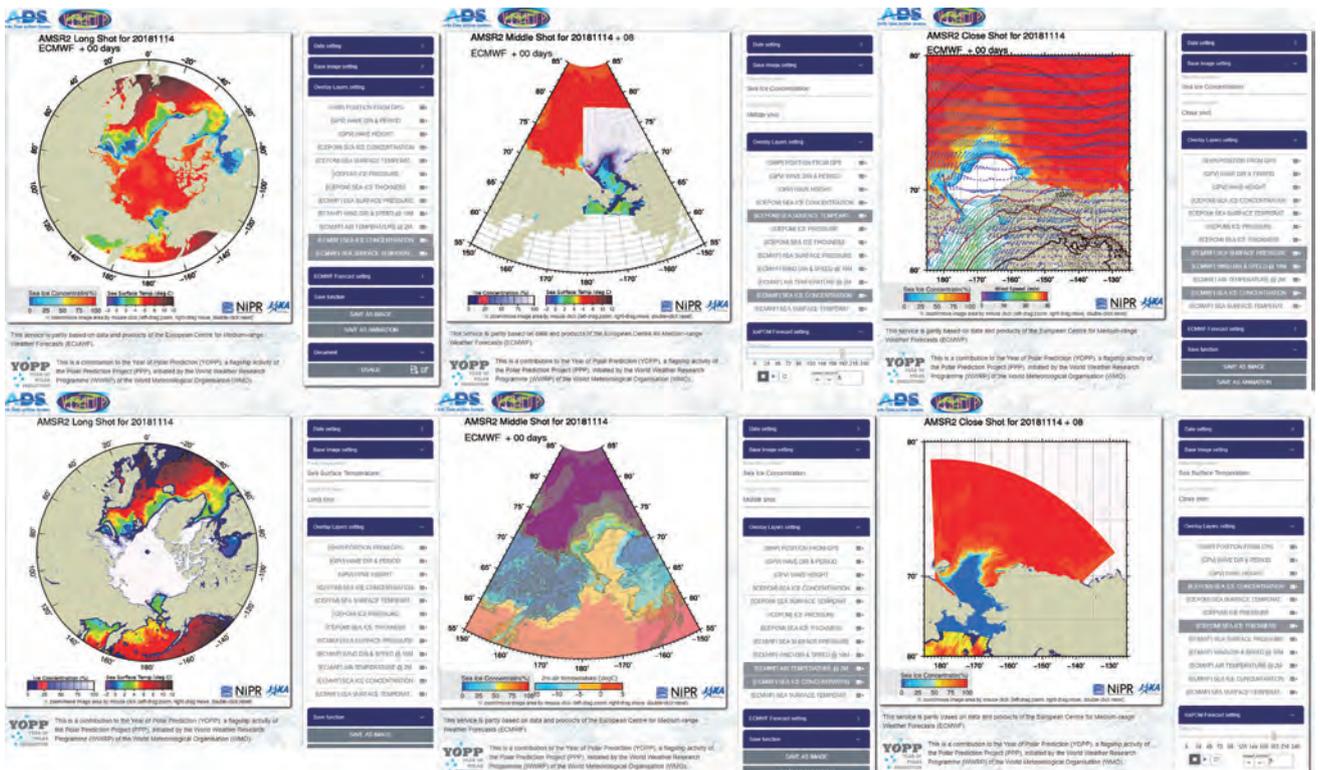


図4-9-16. 「VENUS」のウェブ画面

結果

「みらい」北極航海における「VENUS」の情報配信は、通信上の問題が発生したこと以外はうまく動作し、航路や観測スケジュールの決定に役立てることができた。

MR18-05Cではメールの容量制限によって受信拒否されたメールが発生した。MR19-03Cでは「VENUS」からのメールについて容量制限を引き上げ、拒否されないようにした。

MR18-05Cでは送信に利用したSMTPサーバーの問題でスパムメールと取り扱われることがあった。MR19-03Cでは信頼のおけるSMTPサーバーを利用することで、スパム扱いされないように改善した。

イリジウムに限られた回線でも、配信スケジュールをうまく設計することで送れることがわかった。10日間予測情報であっても問題なく送れたので、全球的に「VENUS」を利用できることを示した。

メールによる受信速度は件数に依存していることが明らかになった。メールで安定的に送ることができたが、大容量のデータの送る方法を検討しなければならない。

まとめ

高解像度の予測情報を安定的に配信することが、海水域における航海に重要であることを実証した。極域はインターネットを安定的に利用することが難しい場所である。「VENUS」のような情報配信を行うデータサービスは、今後も重要になってくるかもしれない。

その一方で、極域においてもインターネットを提供するため、通信衛星の新サービスが開始されている。「VENUS」はネットワーク回線が限られ、通信コストを気にする、研究機関所属の船舶を想定して開発されたデータサービスである。今後、民間の衛星通信サービスが広がり、気軽に誰でも利用できるようになるならば、船舶からインターネットへ直接接続できるようになるため、「VENUS」が不要になると予想される。

極域における通信インフラに注視しつつ、データサービスを研究開発する必要がある。

得した各種データを、研究だけでなく教育・産業界などにおける利用のために広く公開し、将来にわたって世界中で活用可能なように長期にわたり保管し、利用しやすい形で提供すること、また、オープンサイエンスポリシーのもと、研究結果の再現・検証のため、および散逸防止のためにデータの保管を行うことを重要な目的とした。そして、これらの目的を果たすために、本テーマが主導してプロジェクトのデータポリシーを作成し、データの利用に関する合意事項、データ提供者の権利、データの引用方法などの基本事項を明文化した。また、データの提出や公開に関する規則として「北極域研究推進プロジェクト (ArCS) 調査観測データ取扱要項」を制定し、データを定義するとともに、それらのデータの提出期限および公開猶予期限をも定義した。

これらにもとづき、本テーマではプロジェクト期間中データの収集・保管作業を行った。特に最終年度は、これまでデータ提出者が自ら行っていたメタデータ作成、およびデータの登録作業を、提出者の負担軽減を目的に可能な限り本テーマで実施するか、あるいは作業補助を行うなどし、積極的にデータの収集活動を行った。

本テーマでは、プロジェクト期間中に行われた調査・観測の概要および調査・観測地点を表示するとともに、「極 (KIWA)」に登録されたその調査・観測のデータと関連付けるために、「arDirectory」の開発を行った。「arDirectory」では、調査・観測情報だけでなく、モデル・同化研究に関する情報も参照できる。

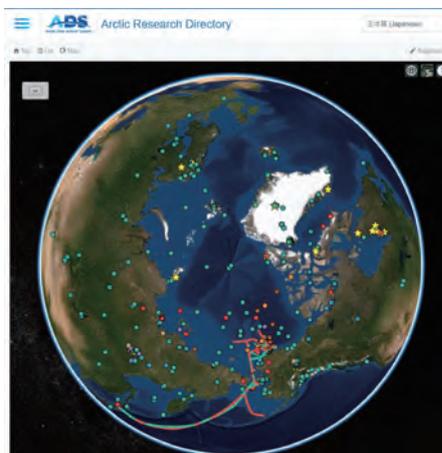


図 4-9-17. 「arDirectory」で表示される各テーマの調査観測状況

4.9.6 データの利用

矢吹 裕伯

プロジェクトによって得られたデータのアーカイブ

4.9.1で述べたように、本プロジェクトでは、研究活動で取

得られた各テーマのメタデータ、データセット等の登録数を表 4-9-2 に示す (2020年1月23日現在、重複カウントを除く)。

表 4-9-2. 各テーマのメタデータ、データセット等の登録数

	メタデータ	レベル0データ	レベル1データ	調査・観測情報	モデル情報
テーマ1	20	0	15	9	5
テーマ2	61	9	54	12	1
テーマ3	60	21	38	28	7
テーマ4	23	10	10	15	1
テーマ5	0	0	0	0	10
テーマ6	68	19	33	25	2
テーマ7	9	5	3	7	0
合計	241	64	153	96	26

北極情報館

北極情報のポータルサイトの構築を目的として、北極情報館を作成した。コンテンツとして「今日の北極」、「国内ニュース」「国際ニュース」、「日本の北極研究の歴史」、「北極環境研究に関する国際研究体制」が準備されている。



図 4-9-18. 北極情報館

「今日の北極」では、「VISHOP」で公開している AMSR2 による北極域の海水状況に関するデータとともに、最新の海水域面積のグラフを表示している。また「国内ニュース」「国際ニュース」は「北極」と「Arctic」のキーワードにヒットした Google News の最新ニュース記事の見出し集を公開するものである。日付ごとにニュースを検索することも可能である。

「日本の北極研究の歴史」では、山内 (2016)⁸⁾ をもとに執筆者に協力をいただいて 1957～2019 年の情報を更新している。

また、「北極環境研究に関する国際研究体制」は北極環境研究コンソーシアム (JCAR) の協力により北極域研究の国際的な活動一覧、また各国の北極政策文書を一覧としてまとめている。

アクセス解析

本プロジェクトの開始直後である 2015 年 10 月以降の ADS の毎月の PV 数を図 4-9-19 に示す。



図 4-9-19. 2015 年 10 月～2019 年 9 月までの ADS のサービスごとの PV 数

プロジェクト期間を通じ、「VISHOP」へのアクセスが非常に多い。これは「VISHOP」のコンテンツである、AMSR2 による北極域の海水情報や、テーマ 5 による北極海水分布の中期予測へのアクセスが多いことに起因している。また 2016 年 12 月以降、「極 (KIWA)」の研究データへのアクセス数は月間 2 万 PV を記録している。この頃から本プロジェクトが軌道に乗り、プロジェクトで得た研究データへのアクセスが多くなったことが原因と考えられる。一方、衛星データやモデルのオンライン可視化解析サービスである「VISION」は、「VISHOP」や「極 (KIWA)」ほどのアクセス数はないが、年間をとおして一定のアクセス数を記録している。また「VISION」のユーザーは毎年 12～1 月にかけてユーザーが増加する傾向がある。これは学生による卒業論文や、修士論文を執筆する季節と重なり、「VISION」が衛星データ解析の導入ツールであることをもの語っていると思われる。毎年、年末にかけて学生からの問い合わせがあるのも「VISION」についてであり、この PV 数はそれを示していると考えられる。表 4-9-3 に ADS の PV 数を年度ごとに集計したものを示す。

表 4-9-3. 年度ごとに集計した 2015 年 10 月～2019 年 9 月の PV 数

期間	PV 数
2015 年 10 月～2016 年 3 月	1,363,094
2016 年 4 月～2017 年 3 月	5,012,937
2017 年 4 月～2018 年 3 月	3,601,766
2018 年 4 月～2019 年 3 月	3,003,788
2019 年 4 月～2019 年 9 月	1,690,878

図 4-9-20 にプロジェクト期間中の国別訪問者割合を示す。ADS の日本国内からの利用は 17% にとどまり、約 83% は海外からの利用であることがわかる。詳細な解析により、これらの海外からの多くのユーザーは「VISHOP」の北極域の海水情報にアクセスしていることもわかった。

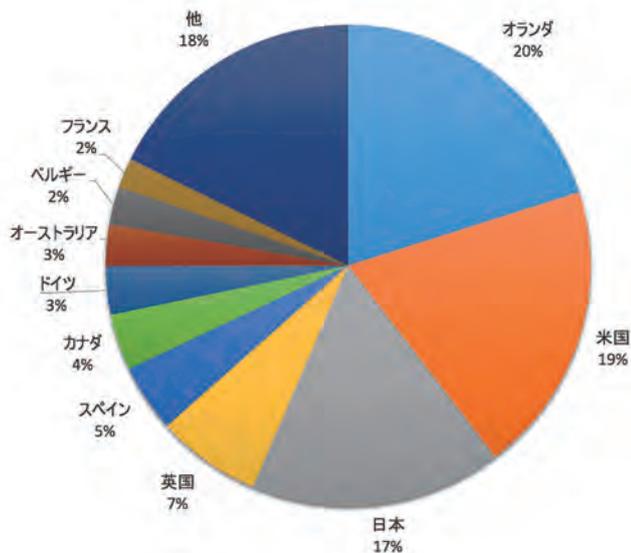


図 4-9-20. 2015 年 10 月～2019 年 9 月の国別訪問者割合

海外からのアクセスのなかでもオランダからのアクセスが多かった。詳細な解析によると、オランダの北極ポータルサイトに ADS の「VISHOP」のリンクがあり、そのサイトから直接「VISHOP」へのアクセスがなされていることがわかった。海外からのユーザーを呼び込むためには、海外のデータポータルサイトとのリンクが重要であった。

注：

- ※1 データを説明する付加的な情報をいい、第三者に公開される。分析データの提出が予定されるサンプルについては、サンプル自体の情報や分析内容もメタデータと呼ぶ。
- ※2 調査、観測、実験室での分析、または既存データの解析のような研究活動から得られたデジタルデータを指す。本プロジェクトにおいては、データの処理状態に応じてレベル0とレベル1の2段階に分類した。レベル0データは取得したままのデータをいい、基本的にはデータの散逸を防ぐことを目的に保管される。レベル1データはレベル0データに対して、補正、品質管理等の必要な処理を行い、可能な限り誤謬を除いたデータをいい、第三者に公開される。
- ※3 Jones, P., Harris, L. C., 2013, CRU TS3.21: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.21 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901 - Dec. 2012), NCAS British Atmospheric Data Centre, doi:10.5285/D0E1585D-3417-485F-87AE-4FCECF10A992.

引用文献：

- 1) Kimura, N. et al., 2013. Influence of winter sea-ice motion on summer ice cover in the Arctic. *Polar Research*, 32, <https://doi.org/10.3402/polar.v32i0.20193>.
- 2) Kalnay, E. et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-472.
- 3) Xie, J. et al., 2017. Quality assessment of the TOPAZ4 reanalysis in the Arctic over the period 1991–2013. *Ocean Science*, 13, 123-144. doi: 10.5194/os-13-123-2017.
- 4) Kim, H. et al., 2009. Role of rivers in the seasonal variations of terrestrial water storage over global basins. *Geophysical Research Letters*, 36. doi: 10.1029/2009GL039006.
- 5) Nitta, T. et al., 2014. Representing Variability in Subgrid Snow Cover and Snow Depth in a Global Land Model: Offline Validation. *Journal of Climate*, 27, 3318-3330. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00310.1.
- 6) JAXA, 2016. 地球が見える 2016年 グリーンランド氷床 春の大融解. <https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2016/tp160516.html> 最終閲覧 2019年12月16日
- 7) Aoki, T. et al., 2014. Field activities of the "Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic" (SIGMA) Project in Greenland in 2011-2013. *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 3-20. doi: 10.5331/bgr.32.3.
- 8) 山内 恭, 2016. 極域気象研究の系譜と極域・寒冷域研究連絡会. *天気*, 63, 157-171.

第 5 章

AC等北極関連会合への
専門家の派遣

5

AC等北極関連会合への 専門家の派遣

榎本 浩之

背景：北極をめぐる議論の場への関与

本プロジェクトでは科学的な研究をもとに北極環境変化の実態を把握し、変化を予測するとともに、それらの成果をステークホルダーに伝えることを目指した。本メニューはこのふたつ目の目標と関連して、関係省庁の要請を受け、北極評議会（AC: Arctic Council）の作業部会をはじめとした北極関連の会合に当該分野の専門家を派遣し、日本の北極研究の成果を北極域の諸問題検討の場に届けることで、国際社会に貢献するだけでなく、科学技術外交の一環として日本のプレゼンスを高めることを目的とした。

本プロジェクト開始以前の背景として、2013年5月に日本がACのオブザーバー資格を得て以降、我が国の高い科学技術力に対する、ACならびにその加盟国・加盟団体からの各種国際会合への参加要請が増加の一途を辿っていた。しかし、ACの議論は北極圏に領土を持つ北極圏国8カ国で行われ、日本のような非北極圏国が発言できる機会はあまり多くなかった。また、非北極圏国の研究者がACの会合に出席する機会は非常にまれであり、専門知識や日本の科学研究成果を持って議論に臨めるのは、ACの6つの分野別の作業部会や専門家グループの会合であった。

本メニューではまず、これらの作業部会や専門家グループにおいて、日本の科学研究成果による貢献を行うことを目指した。また、AC以外で北極に関する議論を行う会合としてアイスランドのArctic Circle、ノルウェーのArctic Frontiers、北極科学大臣会合（ASM: Arctic Science Ministerial）といったハイレベル会合に関しても同様に本プロジェクトをはじめとする我が国の北極研究の成果をもって、北極の持続的な発展や環境保護に貢献し、国際社会における日本の評価を高めることを目指し、要請に応じて研究者を派遣した。さらに、北極を含む全球的な観測体制に関する問題を扱う、地球観測に関する政府間会合（GEO: Group on Earth Observations）や、北極で急速に進行する温暖化影響に関わるIPCCも、本メニューの有効な関与先と考えた。

これらの会合に出席することで得られた最新の国際動向に関する情報を国内の研究者、政策決定者に届けることで、日本国内においても科学研究の知見が政策決定に活かされることを期待した。

また、単に科学的知見あるいは観測データなどを国際会議の場へ提供するだけでなく、プロジェクト内でも「国際共同研究の推進」メニューのテーマ7の活動と連携して報告会や意見交換

会を持ち、有効な情報を提供できるよう検討を行い、国内外の活動の場とプロジェクトとの間で連携を図った。このような北極の科学と社会、政策の取り組みは我が国では本プロジェクト以前にはなかったものである。本章では、本メニューの5年間の取り組みを報告する。

本メニューの構造

図5-1に本メニューの構造を示す。図に示すとおり、本プロジェクトが政府機関と北極関連会合をつなぐ役割を担った。経過や報告を届けることに加え、政府機関からのフィードバックを得ることは新たな、挑戦的な試みであった。

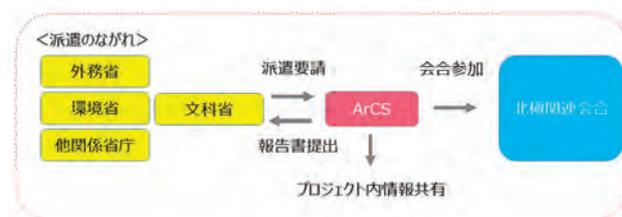


図5-1. 本プロジェクトにおける専門家派遣の活動の構造

活動概要

ACは北極域の国際政策形成の場となっており、そこでの決定事項は我が国の今後の北極域科学活動や経済活動に大きな影響をおよぼしうることから、AMAPやCAFFなどの作業部会での科学的議論、Scientific Cooperation Task Force (SCTF)などのタスクフォース（TF）、Expert Group on Black Carbon and Methane (EGBCM)などの専門家グループの会合に、本プロジェクトの実施担当者のなかから科学的に専門的な意見を表明できる専門家を派遣した。ACの作業部会のなかでは、自然科学との関連性が深く、活動も活発なAMAPとその関連会合を重要なターゲットと考えた。派遣者は年次会合などで日本の活動を紹介し、専門家会合では議論や報告書作成に参加した。前節で述べたその他の会合では、派遣者は発表やパネルディスカッションを通じて、日本の研究成果を国際社会に還元した。

また、国や文部科学省から、北極関連の外交上のハイレベル会合に対する専門家の派遣要請があった場合は、会合のための適切な助言やサポートができる専門家を派遣した。さらに本プロジェクト期間中にはIPCC-AR6作成に向けた動きが開始されたため、IPCCに関わる会合にも積極的に専門家を派遣した。

いずれの場合も派遣者は、派遣された会合で日本の研究・政策等に関する情報収集を行い、成果と収集した情報を帰国後速やかに報告した。Arctic Circleなどの会合では北極の課題が北極圏の外を含めた世界に対して持つ重要性が繰り返し論じられ、北極の課題解決に向けた活動がグローバルな構造のなかに入りつつあることを示していると考えられた。

活動報告

最終年度もすべての派遣を行うことができれば、5年間で19種類のAC作業部会・専門家グループの会合や国際会議等に、

合計 65 回、のべ 86 名の専門家の派遣を行うこととなる。派遣実績は本報告書の参考資料 IV-4 に示すが、以下に活動例を紹介する。

AC の各作業部会である AMAP、CAFF、北極圏海洋環境保護作業部会 (PAME: Protection of the Arctic Marine Environment)、持続可能な開発作業部会 (SDWG: Sustainable Development Working Groups) の年次会合に専門家を派遣した。AMAP に対しては大気物質と海洋酸性化に関する研究成果などを中心に、日本の知見の提供・科学活動の紹介を行った。また、Snow, Water, Ice, Permafrost in the Arctic (SWIPA)、Adaptation Actions for a Changing Arctic (AACA) などの報告書の執筆者および査読者に本プロジェクト研究者が選出された。CAFF については、環境省の行政官とともに参加し、同官に適切な助言を行った。さらに 2018 年 9 月の年次会合においては、テーマ 6 で実施しているセントローレンス島における海鳥研究の成果 (CAFF の予想よりも海鳥の活動領域が広がっていることが本プロジェクトの研究ではじめて明らかになった) を披露した。PAME、SDWG については、プロジェクト開始以前は研究者の参加・貢献がなかったが、各作業部会で議論されている北極海の海洋保護区 (MPA: Marine Protection Area) や北極の持続的発展などの議論に適した人文社会科学の専門家を派遣を開始した。

AC のタスクフォースについては、所管官庁である外務省の要請のもと SCTF に国際法の専門家を派遣し、北極国際科学協力促進協定が合意に至る過程の最終局面を現地で観察するとともに関係者と情報交換を行い、協定が非北極圏国にとって持つ意味を分析し報告した。

AC の専門家グループについては、EGBCM、CBird に専門家を派遣し、議論および報告書作成に参加した。特に EGBCM では BC 排出規制に関する報告書をまとめるにあたり、外部評価や翻訳の提案を積極的に行い、大きく貢献した。

AC 以外の北極関連会合については、Arctic Circle、Arctic Frontiers にプロジェクトディレクターが参加し、本プロジェクトを含む日本の北極研究の取り組みや成果を紹介した。特に Arctic Circle では外務省、文部科学省の要請のもと、毎年日本の研究者が主催するセッションで発表を行った。内容としては、策定されたばかりの『我が国の北極政策』のひとつの具現化としての本プロジェクトの紹介 (2015 年度)、また、本プロジェクトの特徴である人文社会科学の研究活動の実際の紹介 (2016 年度)、環境、社会経済、人間社会の持続性の観点から北極における研究活動がどのように SDGs に貢献するかをテーマとしたセッション (2017 年度)、予測をふまえて他の分野の将来を解説する「Arctic Decades Ahead」セッション (2018 年度)、科学研究の成果と社会との接点を議論する「Science meets Society」セッション (2019 年度) を行った。Arctic Frontiers では、全体会合で招待講演者として北極海の生物データベース構築の必要性に関する基調講演 (2016 年度)、ASM のパネルディスカッションへの参加 (2018 年度) を行った。

本プロジェクトの研究成果を広く国際社会に還元するため、例えば AMAP から IPCC の WG1 に向けたインプットについ

て議論する「AMAP Arctic Meteorological and Climate Workshop」のような、より専門的な話題に特化したワークショップ等にも派遣を行ったほか、会合派遣以外でも、AC からオプザーバー国に対して依頼される水銀のアセスメント情報 (AMAP) や IMO Polar Code の対応状況 (PAME) などの各種情報照会にも、研究者として可能な範囲で回答を行った。

また、当時の北極大使からの要請を受けて AC の高級北極実務者 (SAO: Senior Arctic Officials) 会合に同行し、大使に適切な助言やサポートを行ったほか、GEO Week、ASSW & 北極観測サミット (AOS: Arctic Observing Summit)、ASM2 にプロジェクトディレクターを中心とする専門家を派遣した。

北極に関わる国際的活動に参加する本プロジェクトの研究者

プロジェクト期間中、AC 作業部会や専門家グループ、IASC の科学分科会、ESSAS、PICES の Working Group on Integrated Ecosystem Assessment for the Central Arctic Ocean (WGICA)、RACArctic、SAON などの北極に関わる国際的活動に携わった本プロジェクトの研究者はのべ 80 名にものぼり、会合参加や報告書執筆等、さまざまな活動をもって貢献した。また、本プロジェクトからの直接の派遣ではないが、プロジェクトメンバーのひとりが依頼を受けてベルmont・フォーラムの北極課題の評価者となった。

国内の政府関係者との交流

AC の作業部会など、政府の要請を受けて出席した会議の報告は、プロジェクト開始以前からも文部科学省はもとより外務省、環境省など関係省庁に行っていたが、そのフィードバックを得ることは難しく、国内の政府関係者との情報交換のあり方は課題であった。この点については第 1 回国際助言委員会 (IAB) 等でも助言されたため、本メニューでは、政府関係者とのコミュニケーションの強化に努めた。例えば、テーマ 7 と連携して AC の作業部会に関する意見交換会を毎年度 1 回のペースで実施してきたが、2017 年度からは外務省・文部科学省等の政府関係者を交え、各作業部会に出席した研究者から海外の動向について紹介した。また、この意見交換会をきっかけに、政府関係者と研究者が意見交換するための会合を持つことができた (「北極に関する政府と研究者との懇談会」、2018 年 2 月 5 日、2019 年 6 月 10 日)。2018 年の会合では、政府側からは北極担当大使、内閣府、文部科学省関係者等が出席し、(1) 最近の北極をめぐる話題、(2) AC とその作業部会への対応、(3) ASM への対応の 3 つの話題について、情報、意見の交換を行った。この会合は、本プロジェクトにとっても重要な場となった。プロジェクト終了まであと 1 回開催予定である。

重視する成果

以下に本メニューの活動成果から特筆すべきものを紹介する。

- 2013 年に日本が AC のオプザーバー資格を得て以降高まった、我が国の高い科学技術力に対する期待に、作業部会の年次会合への専門家の派遣、情報提供などを通じて応えることができた。

- 5年間の大型研究プロジェクトにおいて専門家を包括的に実施したことにより、世界の注目が集まる北極関連の国際的学会や専門家会合のフレームワークに、継続的に我が国の研究者を送り込むことができた。また派遣者の選定にあたっては、求められる知見を提供しうる研究者を所属機関の垣根を越えて選定することができた。
- 政府関係者とのコミュニケーションについて、意見交換を行うための会合を新たに実施するなど、コミュニケーションフローの構築に取り組み、科学的知見を政府関係者に能動的に伝える道筋を確立することができた。
- 国内向けには、北極関連学会のどこでどのような問題が議論されているか、日本の関与の可能性はどのようなところにあるかを伝えることができた。特に、国内の研究者だけでなく、日本の政府関係者に科学活動の方向や成果、可能な協力を積極的に伝達する経路を確立することができた（内閣府の企画による政府関係者との意見交換会の実施、ならびにその継続化）。
- 国内の政府関係者に認知された本プロジェクトの活動は、実施期間中に策定された『我が国の北極政策』（2015年）、『第3期海洋基本計画』（2018年）において、日本が実践する北極の課題解決に向けた科学研究活動として取り上げられた。その実践内容は Arctic Circle（2016年～）、ASM（2016年、2018年）、その他多くの国際学会で紹介され、2020年のASM3日本開催の背景ともなった。
- 最終年度まで、各分野の専門家をACの作業部会などの会議に派遣し、国際社会や北極外交における日本の役割を示すことに貢献した。さらに、ASM3日本開催に向けては研究者と政府関係者の連携によって準備が進められるなど、研究の現場と政府関係者とのコミュニケーションは大きく改善した。

活動の評価指標

- 1) AC作業部会が編集した報告書の著者または査読者として本プロジェクトの研究者が選ばれた事例の増加、日本人研究者による公開論文の被引用数の増加、専門家グループに登録されている研究者の増加。
- 2) 北極関連の国際的な共同研究および会議に参加、招待された日本人研究者数の増加。
- 3) 国内の研究者および政府関係者の、北極域の問題に対する意識の高まり。これにより、新しい活動の実施することにつながりつつある。

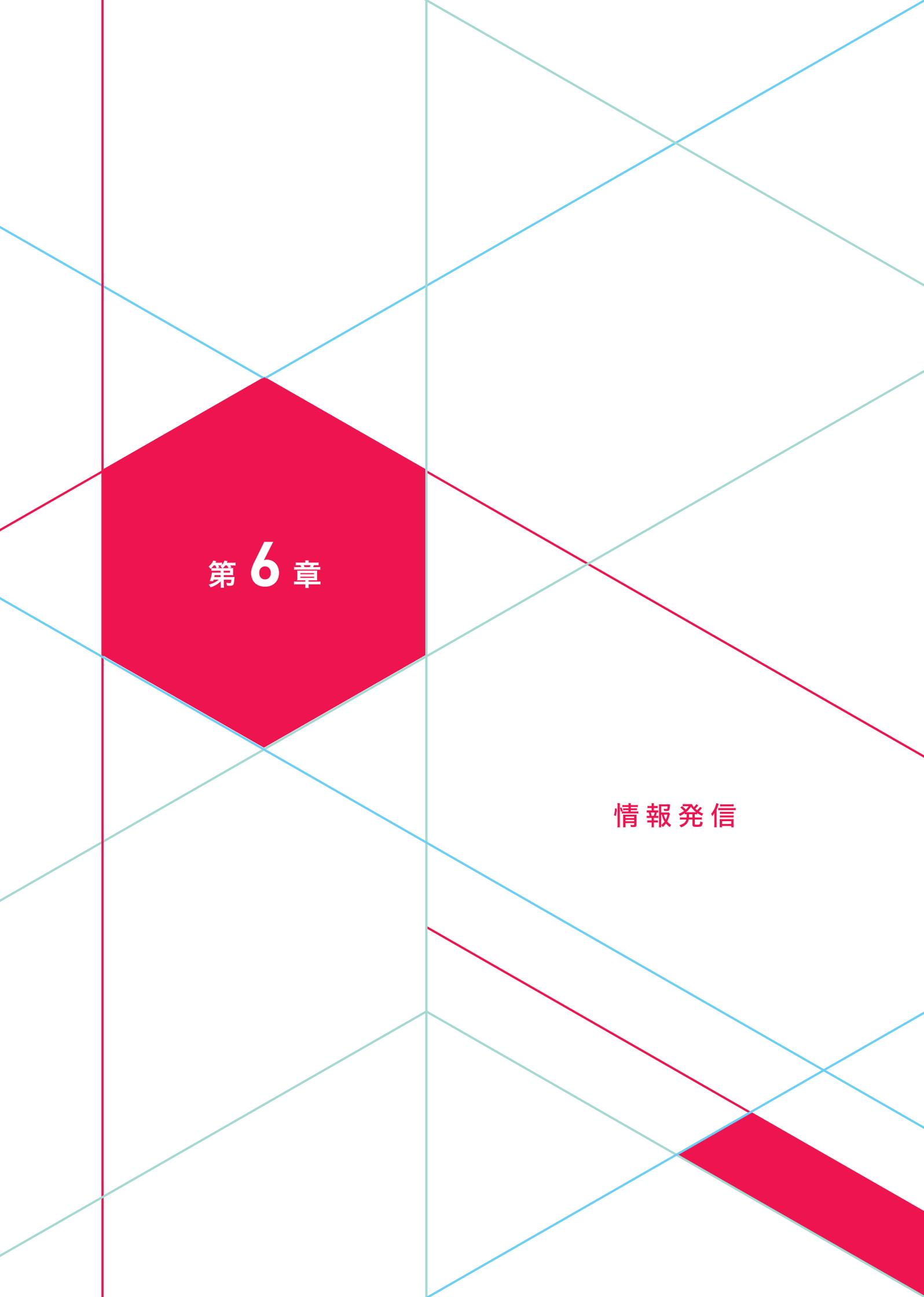
今後の課題

本メニューの活動として、テーマ7との連携により、全テーマを横断する形で、ACの作業部会に関する意見交換会が行われた。また政府関係者と意見交換を行うための会合の開催も実現した。

本プロジェクトにおいて政府関係者とのコミュニケーションのためのシステムを確立することはできたものの、具体的な対処方針を検討するメカニズムは、いまだ立ち上げに至っていない。担当行政官と個々の研究者がACの各作業部会に対する具体的な

対処方針を検討できるよう、例えば一部の省庁で設立されている北極に関する検討会に、研究者がどのように貢献できるかを模索する必要があるだろう。

この課題に対するひとつの方策として、IPCC国内支援事務局のように、AC対応に関する研究者・省庁を横断したコーディネーションができる事務局の設置を検討することがあげられる。米国の北極会合 Interagency Arctic Research Policy Committee (IARPC) のように、プロジェクトや機関の枠にとられない協力体制を作り、省庁を超えた北極検討活動につなげていけるとよいと考える。北極政策や海洋基本計画の政府方針のサイクル、IPCC報告書やAMAPのアセスメント報告書など気候変動監視における北極の状況評価など、さまざまな時間スケールや規模で北極に関する議論が行われている。さらに、これら政府方針の更新や評価報告書の多くが5～7年ごとの活動であるのに対し、北極海航路の砕氷LNG船をめぐる動きなど、産業利用の議論と決定の動きは速い。中央北極海の海洋資源保護の協定においても短期間に科学的知見のレビューと議論が行われ、合意に至るなど、従来の研究者の活動とは違った、短い時間スケールで貢献が求められることも増えている。本プロジェクトで取り組んだ国内外の連携の形を今後いかに進展させるかが今後の課題であるが、このような時間スケールの違いに機動的に対応することも社会からの要請のひとつであると考えられる。本メニューで取り組んだ活動は、そのような要請に応えつつ、政府による国際協力の促進につなげ、また国際的な場で議論を主導できる人材を育成する機会を増やすことにもつながると期待している。



第6章

情報発信

6

情報発信

末吉 哲雄

情報発信は本プロジェクトの鍵となる活動である。研究成果発信の強化、特にステークホルダーへのわかりやすい形での情報提供がプロジェクト公募時から求められていた。これは前身である GRENE 北極においてもつばら科学的成果の創出が求められたこととは対照的であり、本プロジェクトを特徴付ける制約条件であるといえる。このリクエストに応えるため、本プロジェクトでは成果発信とプロジェクト広報を主要なタスクとして、コーディネーター (CDN) をプロジェクトディレクター (PD) の直下に置き、情報発信を強化した。

本プロジェクトのステークホルダーは、活動の文脈によって多岐にわたると考えられる。北極の環境変化の影響を受けるという意味では、広く国内外のすべての人々が対象となりうるが、本プロジェクトが文部科学省の補助事業であることをふまえ、国内においてはスポンサーである納税者をもっとも重要なステークホルダーと考えて活動を実施した。一方、プロジェクト内の個々の活動においては、それらの活動の成果としてプロジェクトが提供する情報の直接の利用者である北極圏国・非北極圏国の政策決定者、AC (主にその作業部会)、産業界関係者、北極地域住民などを重要なステークホルダーと認識した。

プロジェクト内の分担として、CDN はプロジェクト全般に関わる情報発信を統括し、各研究テーマの成果・情報発信は主に各研究テーマによって実施された。北極地域住民を対象としたものなどは各テーマが実施したが、プロジェクトの目的に強く関係することから、一部の活動では連携して実施した。

情報発信の戦略としては、網羅性と時間的な費用対効果を考慮し、以下の方針に従った。

- 1) プロジェクトウェブサイトとおとした情報発信を中心に据え、更新情報はメールマガジンをおとして案内する。ソーシャル・ネットワーキング・サービス (SNS) の利用は船舶観測などのキャンペーン時に限定して実施する。プロジェクトの SNS アカウントは作成せず、代表・副代表機関の広報アカウントを用いた発信を行う。
- 2) プロジェクトとして毎年度 1 回一般向け公開講演会を開催することに加え、各研究テーマ・研究者グループも独自に一般向け講演会等のイベントを開催する。
- 3) 学術的な学会発表・論文発表は各研究テーマの発信に委ねる。一方で、研究者とステークホルダー双方が参加する国際会議 (Arctic Circle 等) においてプロジェクトの紹介や進捗紹介を定期的に行う。

プロジェクトウェブサイト

プロジェクトウェブサイト (URL については奥付参照) は、プロジェクトの情報発信のためのメインチャネルとして、本プロジェクトに関する情報全般を掲載したポータルである。プロジェクトの目的や年次計画・成果のほか、評議会委員、国際助言委員会 (IAB) 委員、参画機関等の運営体制を含むプロジェクトの基本情報、各研究テーマの紹介や実施体制等、若手研究者海外派遣支援事業などの人材育成に関わる公募、調査・観測・研究成果を登録するデータベース (ADS)、データポリシー、イベント情報など、すべてのプロジェクト情報にここからアクセスできる構成とし、日々の活動の進捗を伝えるブログ形式の「ArCS 通信」を含むほとんどの情報を日英 2 言語で掲載した。公開講演会や各研究テーマによる一般向けイベント、プレスリリースなどは新着情報としてトップページに掲載した。「ArCS 通信」にはお知らせも含めて 203 件^{*1}の記事を掲載した。調査・観測の現場から状況を写真付きで報告し、各研究テーマの活動内容やプレスリリースの発表内容の紹介を行う一方で、専門家を派遣した国際会議での報告の様子や、海外派遣支援を受けた若手研究者による派遣報告など、人材育成活動の紹介も行った。

また、定常的な更新に加え、以下の特集ページを設けて効果的な情報発信を図った。

- 1) 北極フォトアルバム：プロジェクトウェブサイトの周知を図るため、2015～2016 年度にかけて、時事通信社と共同で写真コンテンツを中心とした「北極フォトアルバム^{*2}」を実施した (図 6-1)。これは主に研究者が野外調査の際に撮影した写真に短文の説明を付して紹介したもので、コンテンツは時事通信社のウェブサイトに置かれ、説明文からリンクする形でプロジェクトウェブサイトへ誘導する形式をとった。北極での調査風景などの写真が持つ効果により、このサイトは約 10 万件のアクセスを集め、多くの人をプロジェクトウェブサイトへ誘導することに成功した。日本の極地研究においては南極観測隊の印象が強

時事ドットコムニュース > 写真特集 > 北極フォトアルバム～海洋、気象、生態系 写真特集

北極フォトアルバム～海洋、気象、生態系 写真特集



図 6-1. 北極フォトアルバム (時事通信社のウェブサイトより)

いが、以前に南極をテーマとして実施した同様の企画とほぼ同じアクセス数を得ることになり、北極への一般の関心の高まりをも同時に示す結果となった。

- 2) EGRIP フィールド調査特集：2017年度にはEGRIPでの氷床コア掘削について特集ページを開設し、調査に同行した新聞記者からの報告を中心に、研究者の活動を写真付きで詳しく紹介した。同行記者のSNSをとおした現地からの準リアルタイムな情報発信や、その後のテレビ番組での紹介が行われ、効果的なプロジェクト広報を行うことができた。
- 3) 「みらい」北極航海：2018年度と2019年度には、海洋地球研究船「みらい」による北極海の海水周辺域での観測活動を集めるウェブページを作成した。このうち2018年度の航海は国際的な極域予測プロジェクト（PPP）の一部を担当する活動であり、「みらい」初の初冬航海として厳しい環境での調査・観測が行われたため、特集ページでは航海の目的や意義の解説、プロジェクトからの提供情報が航海にどう活かされているかなどの情報、乗船研究者からの写真付きメッセージの掲載を行った。メッセージは国立極地研究所のSNSなど複数の媒体へも同時に掲載し、可能な限り広い範囲への周知となるよう発信を強化した。
- 4) 北極海水分布予報：テーマ5において東京大学の研究チームが毎年5・6・7月に発表する、その年の北極海水分布の予測結果を紹介する特集ページを設けた。

また、プッシュ型の情報配信手段として、ウェブサイトの更新状況や各種イベント情報・募集情報を伝えるためのメールマガジンプロジェクト開始当初から配信し、約500件の登録を得た^{*1}。

公開講演会と一般向けイベント

プロジェクトとして一般向けの公開講演会を毎年度1回、秋～冬にかけて開催した（図6-2）。年によってばらつきがあるものの、概ね100～250人の参加があり、毎年の活発な質疑応答から、北極に対する高い関心を感じ取れる機会となった。2015年度は「北極温暖化の実態と影響―何がわかったか、これから何をするのか―」と題して前身補助事業であるGRENE北極と共催で開催し、231名の参加者を得た。以後の公開講演会テーマと参加者数を列挙する：2016年度「北極研究と日本―我々はなぜ北極を研究するのか―」158名、2017年度「北極の未来と科学」152名、2018年度「北極の環境変化と人々への影響」122名、



図6-2. 公開講演会

2019年度「北極研究から見えてきたもの」128名。2017、2018年度については平日の夕刻に開催し、休日開催とは異なる参加者層への発信を目指した。会社員や学生の比率が高くなり、当初目的を達成した一方、参加人数はやや伸び悩み、テーマ設定と合わせて準備段階の十分な検討が必要という認識を得た。公開講演会では毎年、日本が北極研究を行う意義・背景などをテーマに設定し、さまざまな角度から北極研究プロジェクトを実施する意義を議論しつつ、成果の紹介を行ってきた。一方、参加者の関心は北極環境の変動やそのメカニズム、あるいは地域社会への影響など、具体的な研究成果に対してより高い傾向がみられた。この点も今後の北極研究活動の情報発信において留意しておきたい。また、2018年度の公開講演会に際してプロジェクトの活動をわかりやすく紹介するパネルを作成し、さらに全国科学館連携協議会をとおして利用可能とすることで、全国各地の科学館・博物館への巡回展示を可能とした。公開講演会など、情報発信の機会がどうしても東京開催に偏るため、このような形で少しでも地方での情報発信機会を増やすことを目指したものであり、既に3件の利用実績を得ている^{*1}。

各研究テーマでは一般向けのセミナー・シンポジウム等をこれまでに計20件^{*1}開催した。取り上げたテーマは北極海航路と航海支援、海洋生態系、極端気象（北極域の変動と日本の豪雪）、北極海低気圧や台風などの予測可能性、北極の国際法などがあつた。いずれも高い関心を持つ層が存在するテーマ設定であり、産業界を含む関係者の参加が多くみられる場合があつた。また自然科学の研究者が参加して開催された国際法の講演会は、分野横断的なプロジェクトの性格がよく表れたものであつた。

一部の研究テーマでは、研究チームが現地の地域住民を対象にワークショップを開催し、研究チームの活動を紹介するとともに、研究に関わる情報交換を行った。一般に北極地域住民は海外・域外から訪れて調査等を行う研究チームの活動に関心を示すが、従来の各国の研究プロジェクトではその研究目的や成果について対象地域の住民に対する説明が不十分なことが多く、不満や不信の原因ともなっていた。ワークショップなどの機会を設けて丁寧な説明を行うことは、その後の調査等の活動をスムーズに行ううえでプラスとなる。特にグリーンランド北西部での研究活動においては、過去の良好な関係や経緯もあつて調査等にも地元住民の協力を得られる関係が築かれ、双方の関心に沿って一部の活動が行われるなど、地域住民と研究を共同で実施する形が部分的に実現した。このグリーンランドのケースでは、2018年度に現地の地域住民や関係者を日本に招き、北海道と東京で一般向けイベントを開催した。北極の環境変化の実態と、それに対する日本の研究の関わり方を紹介しただけでなく、文化交流の意味でもよい機会となった。

やや違う性格を持つ活動として、一部プロジェクトメンバーの有志チームが日本科学未来館の科学コミュニケーターと連携し、約1年半をかけて北極をテーマとする学習ツール（北極ボードゲーム『The Arctic』）を開発・製作した。このボードゲーム『The Arctic』のお披露目を兼ねた体験イベントを日本科学未来館で実施したところ、各メディアから好意的に紹介され、また、実際に体験した小学生～高校生やその保護者からも好評を得た。そ

の後、日本科学未来館では定期的に来場者によるゲーム体験会が行われているほか、北海道大学でのイベント時にも体験会を開催している。国際的にも、2019年10月のArctic Circleでこのゲームを紹介するセッションを実施したところ、参加者からは好評とともに大きな関心が寄せられ、また2020年秋に東京で開催されるASM3を共同主催するアイスランドの科学担当大臣からも、英語版への強い期待の表明があった。本活動はもともと出前授業などの教育ニーズを念頭に、プロジェクトにおける分野横断的な活動の一環として製作を開始したが、話題性もあり、プロジェクト広報としての効果も大きかったといえる。

科学的成果の発信

科学プロジェクトであるArCSは、研究成果の発信が成果のベースとなる。査読のある学術雑誌における論文発表数でカウントすると、2015年度73件、2016年度104件、2017年度118件、2018年度161件、2019年度114件^{*1}の成果発表が行われた。このなかからプレスリリースが合計で53件行われ(そのうち国際プレスリリースは20件)、実際に新聞・ニュース92件、テレビ36件、ラジオ6件、雑誌22件、ウェブコンテンツ28件で取り上げられた^{*1}。

論文発表数は科学プロジェクトとして一般的な成果指標のひとつであるが、広範な分野を含む学際的研究プロジェクトとして、研究分野ごとの成果発表のスタイルの違いには特に留意が必要であることをここで指摘しておきたい。人文科学・社会科学の分野においては書籍出版が学術雑誌への論文投稿よりも重んじられる傾向が国内外問わずあり、書籍等に掲載するための原稿執筆が、レターなどの短めの論文に比べて時間を要することを考えると、これらの成果を重くカウントする必要がある。また、工学分野においては学会プロシーディングスが学術雑誌掲載の論文と同等、あるいはそれ以上に重視されるケースもある。書籍に関する点と合わせて考慮すると、成果発表1件の重みが分野やテーマによってさまざまであるということを意味する。元来、論文数という指標の限界は指摘されているが、本プロジェクトのように真に学際性を求められる場合、評価指標の設定が一般の科学プロジェクト以上に難しいことは認識すべきであろう。一方で、書籍・学術雑誌のいずれにおいても多くの成果発表が国際共著論文であり、この点でプロジェクトの目的に沿った成果が順調にあげられたといえる。

また、論文発表数とは別に、調査・観測によって得られたデータ・資料の公開をプロジェクトとして重視した。この点は、特に現在の北極の科学調査におけるオープンサイエンスへの期待や最近の動向をふまえると重要であり、関係する国際組織などからも期待が大きい点である。本プロジェクトでは、調査・観測によって取得されたデータを国立極地研究所が運用するデータベース(ADS)に集約することをデータポリシーとして定め、データの公開を推進した。データの公開・共有について諸外国の例をみると、北極研究に関わる各国においてさまざまな取り組みが行われつつも、必ずしも十二分な結果に結び付いていない現状があり、「北極研究におけるデータ共有」は現在進行形で関係する各国にとっての課題となり続けている。本プロジェクトにおいてはデータ

マネージメントを担当するテーマ8が積極的な働きかけとデータ収集を行ったことで、データ公開の強化を実現した。

学会等でのプロジェクト広報

毎年5月に開催されるJpGUの年次総会において、プロジェクトの広報と活動報告を兼ねてブース出展を行い、ADS、北極海水分布予測、国際連携拠点整備などの紹介を中心とした展示を行った。北極研究の裾野を広げるため、関連する分野の研究者や若手研究者に関心を持ってもらう場としてJpGUのブースは重要である。特に例年のJpGU総会においては大会初日(通常日曜日)に高校生および学部生が多く参加し、展示ブースを積極的に訪れる傾向があるため、若手世代への発信の場としてユニークかつ効果的であると考えられる。

国際会議としては、毎年10月に開催されるArctic Circleでセッションを開催し、本プロジェクトの活動内容を紹介してきた。Arctic Circleは北極をテーマとした会合としては最大の規模を持ち、近年は2,000人を超える北極関係者が集まる会合である。主催国であるアイスランドの意向が反映される傾向はあるものの、北極圏国・ACオブザーバー国の政治家や政府関係者、先住民団体や産業界関係者など、多様なステークホルダーが集まる場所となっており、国際的なプロジェクト広報を行う場としてはもっとも適していると考えられる。セッションでは日本のプロジェクト活動紹介を中心に行い、特に先住民との連携の仕方や、北極の将来予測など、研究プロジェクトと社会の接点に注目した形でのセッション発表を行った。また政府間会議であるGEOの年次会合(GEO Week)のJAPANブースに出展し、本プロジェクトの紹介や、PDによるショートレクチャーを実施し(図6-3)、北極のデータに関わる取り組みを中心に紹介した。今後、北極観測の国際的なコーディネーションがGEOの活動として実施される見とおしであるため、このような場での日本の北極研究に関する情報発信は有効と考えられる。

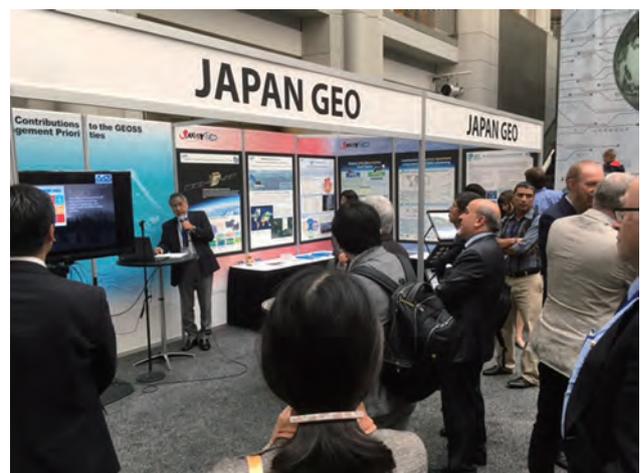


図6-3. GEOにおけるショートレクチャー

出版物の作成

上記の内容に加え、プロジェクト情報の発信のために以下の出版物を作成した^{*3}。

- 1) パンフレット：プロジェクト開始時に、本プロジェクトの目的、実施体制などをまとめたパンフレットを日英2言語で作成した。本プロジェクトでは紙媒体の利用を少なめにし、PDF ファイルやウェブベースでの情報発信を中心としているが、プロジェクト紹介のためには紙媒体が有効であった。
- 2) 中間活動報告リーフレット：中間評価の際に集約した、プロジェクト前半での成果を中心にまとめたリーフレットを日英2言語で作成した。上述のパンフレットには実際の研究活動の情報が乏しいため、活動内容が紹介できた。
- 3) 一般向け冊子：4年度目（2018年度）の主要な活動のひとつとして、『これからの北極』（A5版56p、日本語）を発行した。これは10年程度の時間スケールで将来の北極に起こりうる自然界の変化を概観し（第1章）、その影響がどのように現れるかをまとめた（第2章）もので、構成をプロジェクト執行部で検討し、プロジェクトメンバーに執筆を依頼したものである。すでにさまざまな場面で配布され、好評を得ている。

プロジェクト終了に向けた成果発信

上記の内容に加え、プロジェクトの成果をまとめて発信する活動として、以下を作成・実施した。

- 1) 英文学術誌の特集号：Elsevier社発行の『Polar Science』誌上で本プロジェクトの特集号を企画した。特集号は各テーマ実施責任者（PI）からのレビュー論文の投稿と、プロジェクトメンバーからの投稿論文によって構成される。特にPIが執筆するレビュー論文は各研究テーマの背景、本プロジェクトにおける位置付け、現時点までの成果を中心に構成され、本プロジェクトの一環として実施した研究活動と成果を国際的に周知する効果を持つことが期待される。この効果をより強化するため、プロジェクト期間内に受理された論文のうち一定数を公開直後からオープンアクセスとなるようにする予定（レビュー論文を優先）。
- 2) 成果情報の集約とデータベース整備：プロジェクトの成果情報は最終的にプロジェクトウェブサイトを集約し、プロジェクト終了までの成果を閲覧できるように整える予定である。また、プロジェクトで実施されたすべての調査観測・モデル研究について、その実施内容の情報（メタデータ）を上述のデータベース（ADS）に集約し、取得されたデータへのアクセスも可能にした。データの多くはADSサーバー上に、一部は国際プロジェクトなどの関係で外部サーバーに置かれている（公開時期は各調査によって異なる）。
- 3) 国際シンポジウムにおける成果発表：プロジェクトの成果発表の場として、2020年3月に東京で開催されるISAR-6を積極的に活用することとした。本シンポジウムは隔年で開催され、300件を超す発表（うち海外からの発表が1/3超）が行われるため、成果発表の場として適当である。特にISAR-6はASM3に向けたステートメントを発表する会議として位置付けられているため（Third Arctic Science Ministerial, 2019¹⁾）、日本のプロジェクト成果を国際的な北極観測・研究協力の文脈に載せていくうえで有効と考えられる。

注：

※1 2019年9月30日時点。

※2 https://www.jiji.com/jc/d4?p=acs168&d=d4_bbb

※3 本項で述べるすべての出版物は本プロジェクトのウェブサイト（奥付参照）にてPDF版がダウンロード可能。

引用文献：

- 1) Third Arctic Science Ministerial, 2019. Concept Note, <http://asm3.org>, 最終閲覧2019年11月1日

第7章

まとめと今後の課題

7

まとめと今後の課題

深澤 理郎

総論

本プロジェクトは、公募開始当初から科学研究費助成事業（科研費）による研究の集合体ではなく目的を持ったトップダウンの国家プロジェクトであるべしということが文部科学省のみならず各方面から要請されていた。科研費による研究と国家プロジェクトのもっとも大きな違いは、前者は論文発表等が示す個々の科学面での成果（output）が重要なものに対し、国家プロジェクトでは、そのプロジェクトがもたらす社会的波及効果（outcome）が重要となるところにある。本プロジェクトは北極域に関する国家プロジェクトとしてどのような outcome への責任を負っていたのだろうか。

プロジェクト公募中には素案の段階であった日本の北極政策が、プロジェクト開始とほぼ同時の2015年10月に『我が国の北極政策』として策定された。そのなかでは、日本は科学・技術の力をもって北極での諸外国、特に北極圏国との協力を進めることを前提として、「秩序ある北極域利用に関わるような国際的な議論の場で日本のプレゼンスを高めること」が謳われていた。また、『我が国の北極政策』の文中には日本の科学プロジェクトとして本プロジェクトの名前が明記されており、いわば『我が国の北極政策』の具現手段のひとつと位置付けられていたことになる。いいかえれば、本プロジェクトが負うべき outcome への責任そのものが『我が国の北極政策』で定義付けられていたわけである。それに対して本プロジェクトが実施したこととしては、第1に科学研究は北極に特徴的な現象について国際共同として実施したこと、第2に北極圏国内での連携拠点の増強と整備を行ったこと、第3にAC傘下あるいはそれと関連の深い作業部会さらには北極関連の国際会議に多数の専門家を派遣したこと、があげられる。これらはまさに『我が国の北極政策』の具現化であったと考えている。また、同様に重要なこととして、outcome を考慮しつつ研究者以外の人々あるいは社会、政策決定者に本プロジェクトの科学的成果を情報として積極的に提供するために、後述するように成果と情報の発信を担う方策を準備し実施した。

一方、国連のミレニアム開発目標（MDGs）の終了を受け、持続可能な開発のための2030アジェンダ（2030 agenda）が同じく2015年9月に決定されている。そこでは大別して、自然環境への責任、社会経済の発展、人間生活と社会の持続という3項目のバランスのうえに人類の平和とその持続的発展があるとし17のSDGsを置いている。本プロジェクトがSDGsへの貢献を念頭に置くことは国際共同研究の根拠をより明確にする点で当然であった。しかしSDGsはその下に169のターゲットがあり、そ

れぞれが複数のSDGsに関与していたことから必ずしも17のSDGsは互いに独立しているものではない。特に地球温暖化の影響を大きく受けることで海水の減少や永久凍土の崩壊といった自然環境の急激な変化が新たな社会経済活動の大きな変化と密接に関連していた北極域では、個々のSDGよりはおおもとにあたる2030 agendaの3項目への統合的な貢献が重要と考えた。とりわけ北極特有の諸問題、いわゆる北極問題については北極海航路開発に関わる経済的な側面とそれを支える海水・気象予測とが連携して研究を進め、また極域住民に関わる問題については自然環境変化という自然科学研究と地域住民の生活変化という人文科学研究が連携して研究を推進する等、テーマ間での相互補完を意識した。

科学的成果について

前章までに、本プロジェクトで実施された自然科学、人文社会科学の成果については詳細に述べられているのでここで繰り返すことはしないが、これまで述べられてこなかった、あるいは簡単にしか触れられてこなかった研究も本プロジェクトには多数存在した。例えばシベリアと日本の間を往復する渡り鳥研究や北極海を中心に生息するサメの研究があげられる。繰り返し述べてきたように本プロジェクトは国のプロジェクト研究であることから期待される outcome はどうしても国益につながるものとなる。したがって本プロジェクトで実施された研究は日本の『我が国の北極政策』と国連の2030 agendaに直結するような成果が期待されるものが中心とならざるを得なかった。しかし、科学活動が科学以外の価値観に強く規制（あるいは自制）され、それによって研究の対象が絞られることは本プロジェクトの outcome そのものが数少ない科学的成果のみに補強されざるを得ないという結果を招いてしまう。例えば北極海航路の開発を考えると、確かにその経済効率や航路を維持するための海水・気象予測の研究の重要性は論を待たない。それらの成果に立って北極海航路が頻繁に利用されるという経済的にポジティブな outcome は十分に期待できる。しかし、北極海航路の利用による影響は、極域での化石燃料消費の増加をはじめ、北極海の生物のみならず沿岸住民の生活等、広範囲におよぶ。そのなかにはポジティブなものにせよ、ネガティブなものにせよ、我々が現在では想像も付かない影響があるのかもしれない。北極域の自然環境、生態系さらには住民の生活の持つ脆弱性についての十分な科学的知見と予測を社会に発信できる研究が必要とされるゆえんである。以上は一例に過ぎないが、本プロジェクトからの著作、論文投稿をはじめとする多数の研究発表を見ればわかるように、北極域でのできごとを扱いつつもバラエティに富んだ研究が成果をあげている。北極研究のダイバーシティ（多様性）確保は、現在さらには将来、日本や世界が北極に向き合っていく指針を補強するために重要と考え、予算に制限があるとはいえプロジェクト傘下の研究に多様性を持たせることに留意した。

ファシリティについて

本プロジェクトにおけるファシリティとして、北極域における研究・観測拠点の整備、若手研究者および専門家の北極関連研究

機関あるいは会議への派遣、データマネージメントの4点を考えた。それぞれの詳細な経過や成果は前章までに詳しいが、全体の動きからみると以下のようにまとめることができる。

研究・観測拠点の整備については、プロジェクト開始以降拠点数とその設置国がともに増加し日本の北極研究におけるプレゼンスを向上させたほか、研究者派遣事業によって派遣された研究者と北極圏の国の研究者との共同研究が展開される場ともなった。特に述べておくべきこととしてヤクーツクとフェアバンクスの観測タワーの維持をあげることができる。これらの観測タワーでは、気象関係のデータのみではなく植生のデータも取得したことから、積雪と植生の関係、さらには永久凍土の変化と植生の変化の関係といった北極域に特有の現象を多項目かつ長期にわたって比較的安価に取得できる世界的にも稀有な拠点となった。さらに設置された国（ロシア、米国）の研究者のみならず、北極域の植生変化に興味を持つ第三国の研究者との共同研究が行われる側面も持つに至っている。

若手研究者の北極関連研究機関あるいは会議への派遣事業については、当初は若手研究者と北極圏国研究者との現地での中・長期にわたる研究交流を通じて次世代の国際的な北極研究者を育成することを大きな目的としていたが、本プロジェクトが日本の国家プロジェクトであることと日本が北極圏国やACへの貢献を『我が国の北極政策』に織り込んでいることが各国に認識されるようになった2017年度以降は、民間企業職員や地方自治体職員を短期派遣の形でArctic FrontiersやArctic Circleなど北極関係の国際会議に派遣し、北極を取り巻く社会的な状況の理解と他国からの出席者との会話を促すことも目的に加えた。これは、後述する『我が国の北極政策』と本プロジェクトの周知を目的に行われた北極関連の会合への専門家派遣と合わせ、日本が北極に向けた視線が北極を一義的に日本主導の経済活動の場として捉えたものではないことを示すのに有効であったと同時に、北極を取り巻く世界的な情勢を研究者以外にも理解してもらうよい機会となった。

北極関連会議等への専門家派遣についてはAC傘下の作業部会やASSWに組み込まれた多数の北極観測関連の委員会への派遣といったまさに本プロジェクト研究者が専門家としての役割を果たすことが期待されている場所への派遣を行ったほか、研究者が特に生態系や先住民を含んだ調査を行い国際会議や学会等で重要な成果を発表する際にも派遣を行った。これらの活動によって日本が北極での科学活動について国際共同の立場を重視しているだけでなく、非北極圏国でありながらも積極的に科学的な活動をしていることを示せた。さらに特記すべきこととして、毎年10月にレイキャピクで開催されるArctic Circleにはプロジェクト期間中にあたる2015～2019年まで5回について専門家を派遣し、セッションを開催した。セッションの内容として、初年度は本プロジェクトと『我が国の北極政策』の説明を行い、その後は、現地住民との連携、SDGsと北極、北極の将来、科学と政策決定と、本プロジェクトの活動の広がりや北極の社会的な動きを意識しつつ主題を順次変えていった。聴衆の数は40～100名とまちまちであったが毎回参加する聴衆が多く、主題がどのように変化していくのか、その理由は何かなど、本プロジェクトを中

心とする日本の北極域での活動とそのoutcomeについて会話を持つことができた。

データマネージメントについては、既存のADS(国立極地研究所)を中心に置いて活動を進めた。データセンターとしての業務は、データの収集と保管、データ活用のためのワークベンチ、データとその加工物の配布という3つが重要であるわけだが、研究者が研究テーマのひとつとしてADSを運営する形態であったことによりワークベンチとしての機能は拡充された。特に北極海での気象、海水状況の予測と北極海航路支援情報の統合を主題とする研究テーマ(テーマ1)と連携し、海水予測等の情報を船舶へ配信して手軽に利用できるシステムを考案した。その結果は北極海を航行する民間船舶の一部にも利用されるに至っている。一方、文部科学省に設置されたArCS推進委員会で、本プロジェクトの開始当初から指摘されたデータ収集の徹底については、少なくともプロジェクト傘下で行われた観測とモデル開発結果についてはすべて収集することを目標とした。各テーマから年度当初に提出される実施計画にもとづいて提出されるべきデータと予測結果等を定めて収集にあたったが、本プロジェクトの活動が北極域という地域を指定した総合的なものであるために、収集されるべきデータの種類が単に物理量のみならず文化人類学的なデータや社会科学的数据と極めて多岐にわたることから、一部についてはいわゆるメタデータのみ提出となっている部分もある(2019年11月現在)。データの配布については、GEOのデータポータルとの接続と通常のウェブでの公開を行ったが、ウェブ上ではADSがワークベンチとして作成したデータ加工物も公開された。

もともと観測データの可及的速やかな公開は観測を実施した研究者のデータに対する意識、いかえればデータは誰に帰属するかという意識に依存する面が大きい。本プロジェクトは国税による事業であることを考慮すれば、データは日本とその国民に帰属するものであるといえる。個人や少数のグループに帰属するわけではない。また国際共同研究と銘打つ以上、観測データは世界に向かって開かれたものでなければならない。ADSの活動は、これら当然のことを当然として実現するべく進められてきた。人員の制限が大きかったとはいえ、少なくとも本プロジェクトで誰がいつどこでどのような観測やモデル開発を行ったかという情報(メタデータ)は公開されており、さらにもとものデータやそれを加工した結果についてもプロジェクト終了までにはほぼ公開が完了する見とおしである。ここで特に強調しておくべきことは、ひとつのプロジェクトで得られたすべてのデータが公開されるのは北極に関する限り本プロジェクト以外には世界的にも少数ということである。これは『我が国の北極政策』の国際的な共同という目標が本プロジェクトにおいて確実に達成されてきたことの証左であり、国際的な日本への信用を強力に支えてきている。

プロジェクト外との関係

本プロジェクトと外部との意思疎通の方法として、プロジェクトのウェブサイトの運営、メールマガジンの配布、一般に向けた公開講演会の開催、さらには国外有識者による国際助言委員会(IAB)の設置、北極研究者以外にもメンバーとする評議会の設置

等を行った。また、4年度目にあたる2018年には研究者以外を読者と想定した北極に関する小冊子を発行した。

プロジェクトのウェブサイト運営とメールマガジンについては、英語版も準備することで広く国内外に本プロジェクトの構造や、その活動報告、さらには適宜、代表的な科学的成果を発信すると同時に閲覧者との双方向のコミュニケーションも意図した。これらのうち、双方向のコミュニケーションについてはほぼ皆無という状況であったが、後述する公開講演会の参加申請あるいは各テーマで持つ公開講演会の宣伝等には十分な効果があった。英語版については、専門家を派遣等の機会にウェブサイトのURLの紹介に努めたこともあり特に諸外国の北極関連研究者や政府関係者に本プロジェクトの活動を紹介する際や、本プロジェクトで取得されたデータやその加工データを前述のADSから利用してもらう際に有効であった。プロジェクトでのウェブサイト運営は、現在では国内外を含め普通のことになってきているが、不特定多数かつ年代の異なる閲覧者がアクセスするウェブサイトでの双方向コミュニケーションについては子供も含めた若い人向けのウェブサイトを持つべきといったアイデアはあったものの実現には至らなかった。

一般向けの公開講演会では、その大きな目的として、日本にとって北極という場所とその研究がなぜいま必要なのかを研究者以外の人々にも考えて理解してもらうことを意図した。そのため毎回の講演会タイトルを社会との関連を前面に出すものとしたと同時に、各講演会の内容は北極研究の社会的な、特に日本にとっての必要性を補強するような成果について、誰でも理解可能な平易な言葉で説明することを各講演者が心がけた。聴衆として一般の人々に加え国会議員の参加もあり、政策決定に直接的に関与する人々にとって日本が北極研究を推進する際の論拠を提供する一助となったと考えている。この講演会の大きな特徴は、聴衆の反応を確認しつつ講演全体を進めることができる点にあり、質疑応答時間や休憩時間に参加者と本プロジェクト関係者が双方向のコミュニケーションを持つよい機会であった。

IABは、本プロジェクトの進め方および個々の科学的な成果への評価を含む助言を世界的な視野から行ってもらべく、北極関連の国家あるいは国際的な大規模プロジェクトの代表者5名を委員に任命しメールベースでの議論も含め3回の会合を持つことができた。2018年度の対面形式の会合は、参加者に所属等の制限を設けず日本で開催した。会合では本プロジェクトの研究者からすべてのメニュー・テーマ等の説明を行いプロジェクトの科学的な進捗と国際的な貢献について意見を交換した。全委員に共通する意見として、本プロジェクトがこれまでに提出してきた自然科学、社会科学の成果が世界的にも高いと認められること、海外の連携拠点の整備、専門家の国際会議や作業部会への派遣が国際協力に大きく貢献していることがあげられ、それらをもとに、今後の社会的なoutcome醸成への期待が表明された。この会合の結果は、IABからレポートとして提出され、プロジェクトはそれを文部科学省をはじめとする関係各所にも配布した。ひとつの国内プロジェクトでその成果や方向性を国際的なメンバーで議論し助言を受けるという例は多くない。これまでは国外の有力な北極研究者が日本の研究者個人と意見交換をし、主

としてそれをもとに日本の北極研究の内容や方向が定められてきたように思う。IABは日本の北極研究の成果や意義について世界がどう受け止め評価し期待しているかということを多くの日本の北極研究者が同じ場で同時に受け止め議論できることが重要と考え、2年度目(2016年度)から実施した。IABを通じて、これまで分野によってはあまり世界的には知られていなかったような研究も世界の有力な研究者に知られると同時に各研究者が北極研究全体における自らの立ち位置をより深く認識できるよい機会となった。なお、特記すべきこととして5人の委員全員が前述の2018年度の対面形式の会合に出席したことがあげられる。日程の調整が首尾よく可能であったことも確かであるが、それ以前の国際的な北極関連の会合で本プロジェクトの存在とその内容を説明し続けてきた結果であり、いわば本プロジェクトのoutcomeのひとつとしても捉えることができるであろう。

評議会については、2015～2018年度までに4回開催された。本プロジェクトでは評議会をプロジェクトと社会の会話の窓口という非常に重要な会合と位置付けた。評議会の役割については、プロジェクトの運営方法および社会との関連の持ち方についてプロジェクト側から提出された問題点を幅広い観点から議論し活動の方向性にアドバイスを与えることとし、1回目の評議会でプロジェクト実施に至った背景、プロジェクトの目的と日本の北極政策との関わりについて評議会委員の理解を求めた。委員にマスコミ関係者も含まれており、北極研究の存在を社会に知らせるというプロジェクトにとって重要な課題についてその手段と方法さらには評議会の協力可能性について示唆と提案がなされたことは評議会が本プロジェクトの社会的な位置取りの改善に有用であったことを示している。一方で運用の実態はプロジェクトの活動報告とそれに対する感想が主要な内容となってしまう、当初期待した位置付けからはかなり距離が生じてしまった。本プロジェクトから評議会委員への情報発信がまだ不十分であったこと、評議会と本プロジェクトの関係あるいは評議会のTerms of Reference (TOR) が明確ではなかったことが要因と思われる。また、評議会には複数の北極研究関連者が含まれていたことから議論が具体的な北極研究活動の一般論に帰着する傾向があり、『我が国の北極政策』のもとでのプロジェクトの進め方という観点が希薄になることもあった。そのためか、例えば北極研究を始めた学生の吸収先が少ない、あるいは研究のさらなる拡大と継続が北極研究にとって重要等の指摘があったが、いずれもプロジェクトの活動内で解決できる問題としては大き過ぎ問題点についてプロジェクト側と評議会委員間で意識を確認しあう段階でとどまった。

小冊子の発行は、社会への情報の発信という課題に対するひとつの試みとしての意味を持っていた。つまり、本プロジェクトで科学的な個々の成果から作り上げられた情報を政策決定者や社会に発信する際の手段として公開講演会やウェブサイト、メールマガジン等を利用してきたが、そのどれもが情報の受け手側に情報を探しにくくという行為を期待するものとなっている。つまり、本プロジェクトでいかに情報を作り上げても、それを受け取って欲しいとこちらが望む相手(例えば政策決定者等)に最初に行動を起こしてもらわなければ発信は受け止められないということになる。小冊子の発行は、今後北極の自然や人々の生活がどのよう

に変わっていくのかということを中心としていくつかのテーマのもとに複数の研究テーマを集めてできる限り平易に解説し、全体としてひとつの読みものに仕上げたものである。この主題は、近い将来に日本が北極に対してどのように向き合うことが必要になるかを伝えることを意識して選定した。小冊子は「気が向いたとき」にいつでも手にとれるようにと、『これからの北極』というA5版56ページと手頃なものに作り上げ関係省庁、国会議員、学校の図書館を中心に配布した。この小冊子がどのような outcome を引き起こすかについてはまだ計り知れないが、成果を不特定多数に公開しそこへの政策決定者や社会からのアクセスを待つのではなく、例えば数は少なくとも情報の受け手として望む相手にプロジェクト側からアクセスしたことはプロジェクトの目的、目標を実現する大きな一歩となっている。

社会的波及効果 (outcome)

前章までに紹介されたように本プロジェクトからは多くの成果があげられている(一覧は巻末の研究業績を参照)。科学論文や書籍等の著作、学会での発表など数字的に示せるものばかりでなく、北極関連の会合や報告書作成のための専門家派遣、海外連携拠点の充実・強化など、数字として示すことが難しい事業についても実施された内容について詳しく紹介されている。一方、本プロジェクトとしての成果は、第1章や本章の冒頭でも述べたように、これらの個々の成果を情報として統合し、それを社会に開示することによって社会的波及効果 (outcome) を誘起することで示されるべきものである。Outcome とは、プロジェクトが作り上げた成果そのものを指すのではなく、成果のうえに社会に生じる変化である。この研究成果報告書の冒頭で述べたが、本プロジェクトが負うべき outcome への責任は、『我が国の北極政策』が推進されることであった。したがって、本プロジェクトの目的と2015年に策定された『我が国の北極政策』の目指すものとを合わせて2019年11月までに生じたもっとも重要な outcome は、ASM3 が2020年11月に日本でアイスランドと共同で開催される運びとなったことであろう。またそれと同様に重要な outcome は、北極が日本にとっても重要な地域あるいは海域であるという論調がテレビ等のマスコミにみいだされるようになった(例えばニュース解説等)ことであろう。ArCS という北極に関する国家プロジェクトの存在なしにはこのような動きにはなりえなかったと考えている。さらに他の動きをあげるならば、2018年に改定された海洋基本計画中で北極が大きく取り扱われるようになったこと、北極域観測船の建造が明確化したことを証左として、北極研究に対して日本がより主体的な位置をとるようになったことがある。

今後の課題

本プロジェクトは2019年度で終了することから、固有の課題についてこの場で述べることはしない。それに代わって、北極研究が国家プロジェクトとして行われる場合に考えられる課題について簡単に述べるならば、第1に自然科学にせよ人文社会科学にせよ、より多数の研究者が生活面でも安定して参画できるような仕組みを持つこと、第2に日本のための北極研究を中心に置く研究所あるいは研究組織を持ち、研究に対する事務的なサポー

トも強化すること、第3に北極研究を広く全球的、全人類的な観点から考えられる人材を育成し北極研究に関わらせること、第4に科学的思考を社会実装するべく工学的 (engineering) な視野と研究者を積極的に取り入れること、第5に北極政策のよりどころとなるような情報を社会に提供できる効率的な仕組みを作ること、に集約されると考えている。いずれの課題についても一朝一夕でその十分な解決をみられるものではないにせよ、今後も日本が国家プロジェクトとしての北極研究を継続していくなかで、個々の課題に着実な前進が見られることを期待する。

さらに、新たな課題として次のことを考えておく必要がある。本プロジェクトも含めこれまでの北極研究は、ACに属する作業部会への参加や、先住民との協働等を通じてACと北極圏国への科学的な貢献を中心に据えてきた。しかし2020年にASM3を我が国が東京で開催することによって、将来のプロジェクトではACとASMが北極ガバナンスに果たす位置の違いを考慮する必要があるだろうということである。しかし、どのような状況であっても、先にあげた研究プロジェクトにおける5つの課題は、日本の北極研究が日本の社会に根ざしつつ国際的な優位性を確保するために重要であり、北極ガバナンスへの我が国の関与が、北極圏国のみならず世界から歓迎され尊重されるための要点と考えている。

研究業績

- 1 研究業績数
- 2 研究業績一覧
 - 2-1 論文発表
 - 2-1-(1) 査読あり論文 (published)
 - 2-1-(2) 査読あり論文 (submitted)
 - 2-1-(3) 査読なし論文 (published)
 - 2-1-(4) 査読なし論文 (submitted)
 - 2-2 誌上発表
 - 2-3 書籍出版

研究業績

1 研究業績数

2015年9月10日～2019年9月30日の本プロジェクトの業績数を以下に示す。このうち、論文発表、誌上発表、書籍出版については2に一覧を記載する。

- ・2015年9月10日は、初年度の交付決定通知がなされた日。
- ・報告書作成の都合上、最終年度上半期の2019年9月30日までを集計対象とする。
- ・最終年度下半期を含む最終的な研究業績は、本プロジェクトのウェブサイト(奥付参照)に掲載される。

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
論文発表	82	128	165	233	171	779
査読あり論文 (published)	73	104	118	161	114	570
査読あり論文 (submitted)	0	0	0	6	30	36
査読なし論文 (published)	9	24	47	66	27	173
査読なし論文 (submitted)	0	0	0	0	0	0
誌上発表	6	15	14	22	7	64
書籍出版	3	4	6	4	4	21
学会および学会に準ずる会合での発表	215	463	540	513	209	1940
講演	9	66	87	102	20	284
受賞	0	2	6	9	3	20
教材等作成	0	0	0	0	2	2
取材対応	17	30	44	66	27	184
新聞・ニュース	11	7	26	36	12	92
テレビ	0	6	6	17	7	36
ラジオ	1	2	1	1	1	6
雑誌	4	5	2	6	5	22
ウェブコンテンツ	1	10	9	6	2	28
プレスリリース	4	12	11	22	4	53
プレスリリース (日)	3	7	8	11	4	33
プレスリリース (英)	1	5	3	11	0	20

- ・論文発表：学術雑誌、学会予稿集、書籍等による論文発表のうち、次のものを対象とする。
 - 査読あり論文 (published) 査読が行われる論文のうち、2019年9月30日時点で公開済み (published) のものを対象とする (受理済み (accepted) のものも含む)。
 - 査読あり論文 (submitted) 査読が行われる論文のうち、2019年9月30日時点で投稿済み (submitted) かつまだ受理 (accepted) されていないものを対象とする。
 - 査読なし論文 (published) 査読が行われない論文のうち、2019年9月30日時点で公開済み (published) のものを対象とする (公開準備中のもも含む)。
 - 査読なし論文 (submitted) 査読が行われない論文のうち、2019年9月30日時点で投稿済み (submitted) かつまだ公開が確定していないものを対象とする。
- ・誌上発表：一般雑誌等の定期刊行物による誌上発表のうち、2019年9月30日時点で出版済みの刊行物に掲載された記事を対象とする (出版準備中 (in press 等) のものも含む)。
- ・書籍出版：本プロジェクトの研究者が、執筆、編集等を担当した書籍出版のうち、2019年9月30日時点で出版済みの書籍を対象とする (出版準備中 (in press 等) のものも含む)。
- ・学会および学会に準ずる会合での発表：学術会議およびそれに準ずる会合における口頭発表、ポスター発表等を対象とする。
- ・講演：主に一般に向けたイベントにおける講演を対象とする。
- ・受賞：学会等により授与された賞を対象とする。
- ・教材等作成：本プロジェクトの活動により作成された一般向けの学習ツール、地域住民向けの教材等を対象とする。
- ・取材対応：新聞、テレビ、ラジオ、雑誌、ウェブコンテンツ向けの取材対応等のうち、実際に公開 (掲載、放送) されたものを対象とする。
- ・プレスリリース：各研究機関から報道機関に向けた (主に論文発表に関する) 情報の提供、告知、発表を対象とする。

2 研究業績一覧

2015年9月10日～2019年9月30日の論文発表、誌上发表、書籍出版の一覧を以下に示す。

- ・下線は本プロジェクトに参加した実施責任者、実施担当者、研究協力者を示す。
- ・末尾の [T1]、[T2]…は当該の論文発表・誌上发表・書籍出版を行った参加研究者が所属する「国際共同研究の推進」メニューのテーマ番号を示す。
- ・各項目における掲載順は、筆頭著者名のアルファベット順とする（日英混合）。

2-1 論文発表

- ・学術雑誌、学会予稿集、書籍等による論文発表の一覧。査読あり/なし、公開/未公開で区分して記載する。

(1) 査読あり論文 (published)

- ・査読が行われる論文のうち、2019年9月30日時点で公開済み(published)のものを対象とする(受理済み(accepted)のものも含む)。

- Abe, H., Sampei, M., Hirawake, T., Waga, H., Nishino, S., Ooki, A., 2019. Sediment-Associated Phytoplankton Release From the Seafloor in Response to Wind-Induced Barotropic Currents in the Bering Strait. *Frontiers in Marine Science*, 6. doi: 10.3389/fmars.2019.00097. [T4] [T6]
- Abe, M., Nozawa, T., Ogura, T., Takata, K., 2016a. Effect of retreating sea ice on Arctic cloud cover in simulated recent global warming. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 14343-14356. doi: 10.5194/acp-16-14343-2016. [T5]
- Abe, M., Takata, K., Kawamiya, M., Watanabe, S., 2017. Vegetation masking effect on future warming and snow albedo feedback in a boreal forest region of northern Eurasia according to MIROC-ESM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 9245-9261. doi: 10.1002/2017JD026957. [T5]
- Abe, M., Otsuka, N., 2019. Northern Sea Route (NSR) as a Major Transport Route: Opportunities and Challenges. *Asian Transport Studies*, 5, 617-634. doi: 10.11175/eastsats.5.617. [T1] [T5] [T7]
- Abe, T., Furuya, M., Sakakibara, D., 2016b. Brief Communication: Twelve-year cyclic surging episodes at Donjek Glacier in Yukon, Canada. *The Cryosphere*, 10, 1427-1432. doi: 10.5194/tc-10-1427-2016. [T2]
- 阿部 隆博, 古屋 正人, 2016. 合成開口レーダーで捉えたアラスカ・ユーコン地域におけるサージ型氷河の動態 (衛星観測特集号). *雪氷*, 78, 425-438. [T2]
- Abe, Y., Yamada, Y., Saito, R., Matsuno, K., Yamaguchi, A., Komatsu, K., Imai, I., 2016c. Short-term changes in abundance and population structure of dominant pelagic amphipod species in the Oyashio region during the spring phytoplankton bloom. *Regional Studies in Marine Science*, 3, 154-162. doi: https://doi.org/10.1016/j.rsma.2015.07.005. [T2] [T6]
- Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kageyama, M., Braconnot, P., Harrison, S. P., Lambeck, K., Otto-Bliesner, B. L., Peltier, W. R., Tarasov, L., Peterschmitt, J. Y., Takahashi, K., 2015. Ice-sheet configuration in the CMIP5/PMIP3 Last Glacial Maximum experiments. *Geoscientific Model Development*, 8, 3621-3637. doi: 10.5194/gmd-8-3621-2015. [T2] [T5]
- Adachi, K., Moteki, N., Kondo, Y., Igarashi, Y., 2016. Mixing states of light-absorbing particles measured using a transmission electron microscope and a single-particle soot photometer in Tokyo, Japan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 9153-9164. doi: 10.1002/2016JD025153. [T3]
- Aksenov, Y., Karcher, M., Proshutinsky, A., Gerdes, R., de Cuevas, B., Golubeva, E., Kauker, F., Nguyen, A. T., Platov, G. A., Wadley, M., Watanabe, E., Coward, A. C., Nurser, A. J. G., 2016. Arctic pathways of Pacific Water: Arctic Ocean Model Intercomparison experiments. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 27-59. doi: 10.1002/2015JC011299. [T4] [T6]
- Alabia, I. D., García Molinos, J., Saitoh, S-I., Hirawake, T., Hirata, T., Mueter, F. J., 2018. Distribution shifts of marine taxa in the Pacific Arctic under contemporary climate changes. *Diversity and Distributions*, 24, 1583-1597. doi: 10.1111/ddi.12788. [T6] [T7]
- Alvarado, M. J., Lonsdale, C. R., Macintyre, H. L., Bian, H., Chin, M., Ridley, D. A., Heald, C. L., Thornhill, K. L., Anderson, B. E., Cubison, M. J., Jimenez, J. L., Kondo, Y., Sahu, L. K., Dibb, J. E., Wang, C., 2016. Evaluating model parameterizations of submicron aerosol scattering and absorption with in situ data from ARCTAS 2008. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 9435-9455. doi: 10.5194/acp-16-9435-2016. [T3]
- Amano, K., Abe, Y., Matsuno, K., Yamaguchi, A., 2019. Yearly comparison of the planktonic chaetognath community in the Chukchi Sea in the summers of 1991 and 2007. *Polar Science*, 19, 112-119. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.11.011. [T2] [T6]
- Ando, Y., Yamazaki, K., Tachibana, Y., Ogi, M., Ukita, J., 2018. Detection of a climatological short break in the polar night jet in early winter and its relation to cooling over Siberia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 12639-12661. doi: 10.5194/acp-18-12639-2018. [T3] [T5]
- Arima, D., Matsuno, K., Yamaguchi, A., Nobetsu, T., Imai, I., 2015. Seasonal and inter-species comparison of asymmetry in the genital system of some species of the oceanic copepod genus *Metridia* (Copepoda, Calanoida). *Crustaceana*, 88, 1307-1321. doi: https://doi.org/10.1163/15685403-00003485. [T2] [T6]
- Arima, D., Yamaguchi, A., Nobetsu, T., Imai, I., 2016a. Seasonal abundance, population structure, sex ratio and gonad maturation of *Metridia okhotensis* Brodsky, 1950 in the Okhotsk Sea: analysis of samples collected by pumping up from deep water. *Crustaceana*, 89, 151-161. doi: https://doi.org/10.1163/15685403-00003516. [T2] [T6]

- Arima, D., Yamaguchi, A., Nobetsu, T., Imai, I., 2016b. Usefulness of deep-ocean water pumping for the seasonal monitoring of mesozooplankton. *Regional Studies in Marine Science*, 3, 18-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2015.10.005>. [T2] [T6]
- Bakker, P., Schmittner, A., Lenaerts, J. T. M., Abe-Ouchi, A., Bi, D., van den Broeke, M. R., Chan, W. L., Hu, A., Beadling, R. L., Marsland, S. J., Mernild, S. H., Saenko, O. A., Swingedouw, D., Sullivan, A., Yin, J., 2016. Fate of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting. *Geophysical Research Letters*, 43, 12,252-12,260. doi: 10.1002/2016GL070457. [T2] [T5]
- Bautista, A. T., Miyake, Y., Matsuzaki, H., Iizuka, Y., Horiuchi, K., 2018. High-resolution ¹²⁹I bomb peak profile in an ice core from SE-Dome site, Greenland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 184-185, 14-21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.12.015>. [T2]
- Bertelsen, R., 2019. The Role of Transnational Knowledge Networks and Epistemic Communities in Arctic Shipping Governance. in: Shibata, A., Zou, L., Sellheim, N., et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge. [T7]
- Bröll, F., Barkley, A. N., Pettitt-Wade, H., Watanabe, Y. Y., Marcoux, M., Hussey, N. E., 2019. A framework to estimate the likelihood of species interactions and behavioral responses using animal-borne acoustic telemetry transceivers and accelerometers. *Journal of Animal Ecology*. [T6]
- Brown, K. A., McLaughlin, F., Tortell, P. D., Yamamoto-Kawai, M., Francois, R., 2016. Sources of dissolved inorganic carbon to the Canada Basin halocline: A multitracer study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 2918-2936. doi: 10.1002/2015JC011535. [T4]
- Bui, O. T. N., Kameyama, S., Yoshikawa-Inoue, H., Ishii, M., Sasano, D., Uchida, H., Tsunogai, U., 2018. Estimates of methane emissions from the Southern Ocean from quasi-continuous underway measurements of the partial pressure of methane in surface seawater during the 2012/13 austral summer. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 70, 1-15. doi: 10.1080/16000889.2018.1478594. [T4]
- Bui, O. T. N., Kameyama, S., Kawaguchi, Y., Nishino, S., Tsunogai, U., Yoshikawa-Inoue, H., 2019. Influence of warm-core eddy on dissolved methane distributions in the southwestern Canada basin during late summer/early fall 2015. *Polar Science*, 100481. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.100481>. [T4] [T6]
- Buizert, C., Sigl, M., Severi, M., Markle, B. R., Wettstein, J. J., McConnell, J. R., Pedro, J. B., Sodemann, H., Goto-Azuma, K., Kawamura, K., Fujita, S., Motoyama, H., Hirabayashi, M., Uemura, R., Stenni, B., Parrenin, F., He, F., Fudge, T. J., Steig, E. J., 2018. Abrupt ice-age shifts in southern westerly winds and Antarctic climate forced from the north. *Nature*, 563, 681-685. doi: 10.1038/s41586-018-0727-5. [T2] [T3]
- Calov, R., Beyer, S., Greve, R., Beckmann, J., Willeit, M., Kleiner, T., Rückamp, M., Humbert, A., Ganopolski, A., 2018. Simulation of the future sea level contribution of Greenland with a new glacial system model. *The Cryosphere*, 12, 3097-3121. doi: 10.5194/tc-12-3097-2018. [T2]
- Carmack, E. C., Yamamoto-Kawai, M., Haine, T. W. N., Bacon, S., Bluhm, B. A., Lique, C., Melling, H., Polyakov, I. V., Straneo, F., Timmermans, M. L., Williams, W. J., 2016. Freshwater and its role in the Arctic Marine System: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121, 675-717. doi: 10.1002/2015JG003140. [T4]
- Cesana, G., Chepfer, H., Winker, D., Getzewich, B., Cai, X., Jourdan, O., Mioche, G., Okamoto, H., Hagihara, Y., Noel, V., Reverdy, M., 2016. Using in situ airborne measurements to evaluate three cloud phase products derived from CALIPSO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 5788-5808. doi: 10.1002/2015JD024334. [T3]
- Chikamoto, M. O., Timmermann, A., Yoshimori, M., Lehner, F., Laurian, A., Abe-Ouchi, A., Mouchet, A., Joos, F., Raible, C. C., Cobb, K. M., 2016. Intensification of tropical Pacific biological productivity due to volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 43, 1184-1192. doi: 10.1002/2015GL067359. [T2] [T5]
- Choi, M., De Silva, L. W. A., Yamaguchi, H., 2019. Artificial Neural Network for the Short-Term Prediction of Arctic Sea Ice Concentration. *Remote Sensing*, 11. doi: 10.3390/rs11091071. [T1]
- Churkina, A. I., Mochenov, S. Y., Sabrekov, S. F., Glagolev, M. V., Il'yasov, D. V., Terentjeva, I. E., Maksyutov, S. S., 2018. Trees as methane sources: A case study of West Siberian South taiga. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 138, 012002. doi: 10.1088/1755-1315/138/1/012002. [T3]
- Crasemann, B., Handorf, D., Jaiser, R., Dethloff, K., Nakamura, T., Ukita, J., Yamazaki, K., 2017. Can preferred atmospheric circulation patterns over the North-Atlantic-Eurasian region be associated with arctic sea ice loss? *Polar Science*, 14, 9-20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2017.09.002>. [T3] [T5]
- Crate, S., Ulrich, M., Habeck, J. O., Desyatkin, A. R., Desyatkin, R. V., Fedorov, A. N., Hiyama, T., Iijima, Y., Ksenofontov, S., Mészáros, C., Takakura, H., 2017. Permafrost livelihoods: A transdisciplinary review and analysis of thermokarst-based systems of indigenous land use. *Anthropocene*, 18, 89-104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.06.001>. [T3] [T4] [T7]
- Dainard, P. G., Guéguen, C., Yamamoto-Kawai, M., Williams, W. J., Hutchings, J. K., 2019. Interannual Variability in the Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter in the Canada Basin Polar Mixed Waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 5258-5269. doi: 10.1029/2018JC014896. [T4]
- Dallmayr, R., Goto-Azuma, K., Astrid KjÆR, H., Azuma, N., Takata, M., SchÛpbach, S., Hirabayashi, M., 2016. A High-Resolution Continuous Flow Analysis System for Polar Ice Cores. *Bulletin of Glaciological Research*, 34, 11-20. doi: 10.5331/bgr.16R03. [T2] [T3]
- Dammann, D. O., Eriksson, L. E. B., Jones, J. M., Mahoney, A. R., Romeiser, R., Meyer, F. J., Eicken, H., Fukamachi, Y., 2019. Instantaneous sea ice drift speed from TanDEM-X interferometry. *The Cryosphere*, 13, 1395-1408. doi: 10.5194/tc-13-1395-2019. [T2] [T4]
- Davydov, D. K., Dyachkova, A. V., Fofonov, A. V., Maksyutov, S. S., Dyukarev, E. A., Smirnov, S. V., Glagolev, M. V., 2018. Measurements of methane and carbon dioxide fluxes from wetland ecosystems of the Southern Taiga of West Siberia. *Proceedings of the SPIE, XXIV*

- International Symposium, Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 10833. [T3]
- Day, J., Tietsche, S., Collins, M., F. Goessling, H., Guemas, V., Guillory, A-S., J. Hurlin, W., Ishii, M., Keeley, S., Matei, D., Msadek, R., Sigmond, M., Tatebe, H., Hawkins, E., 2016. The Arctic Predictability and Prediction on Seasonal-to-Interannual Timescales (APPO-SITE) data set version 1. *Geoscientific Model Development*, 9, 2255-2270. doi: 10.5194/gmd-9-2255-2016. [T5]
- De Silva, L. W. A., Yamaguchi, H., Ono, J., 2015. Ice-ocean coupled computations for sea-ice prediction to support ice navigation in Arctic sea routes. *Polar Research*, 34, 25008. doi: 10.3402/polar.v34.25008. [T1] [T5]
- De Silva, L. W. A., Yamaguchi, H., 2016. An assessment of short-term sea ice predictions in the Northern sea routes. Proceedings of the 23rd IAHR International Symposium on Ice. [T1]
- De Silva, L. W. A., Yamaguchi, H., 2018. Study of Short-Term Sea Ice Prediction Along the Northern Sea Route. The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, Sapporo, Japan. [T1]
- De Silva, L. W. A., Yamaguchi, H., 2019. Grid size dependency of short-term sea ice forecast and its evaluation during extreme Arctic cyclone in August 2016. *Polar Science*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.08.001>. [T1]
- De Silva, L. W. A., Inoue, J., Yamaguchi, H., Terui, T., 2020. Medium range sea ice prediction in support of Japanese research vessel MI-RAI's expedition cruise in 2018. *Polar Geography*. doi: 10.1080/1088937X.2019.1707317. [T1] [T8]
- DeMott, P. J., Hill, T. C. J., Petters, M. D., Bertram, A. K., Tobo, Y., Mason, R. H., Suski, K. J., McCluskey, C. S., Levin, E. J. T., Schill, G. P., Boose, Y., Rauker, A. M., Miller, A. J., Zaragoza, J., Rocci, K., Rothfuss, N. E., Taylor, H. P., Hader, J. D., Chou, C., Huffman, J. A., Pöschl, U., Prenni, A. J., Kreidenweis, S. M., 2017. Comparative measurements of ambient atmospheric concentrations of ice nucleating particles using multiple immersion freezing methods and a continuous flow diffusion chamber. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 11227-11245. doi: 10.5194/acp-17-11227-2017. [T3]
- DeMott, P. J., Mason, R. H., McCluskey, C. S., Hill, T. C. J., Perkins, R. J., Desyaterik, Y., Bertram, A. K., Trueblood, J. V., Grassian, V. H., Qiu, Y., Molinero, V., Tobo, Y., Sultana, C. M., Lee, C., Prather, K. A., 2018. Ice nucleation by particles containing long-chain fatty acids of relevance to freezing by sea spray aerosols. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20, 1559-1569. doi: 10.1039/C8EM00386F. [T3]
- Dong, C., Matsui, H., Spak, S., Kalafut-Pettibone, A., Stanier, C., 2019. Impacts of New Particle Formation on Short-term Meteorology and Air Quality as Determined by the NPF-explicit WRF-Chem in the Midwestern United States. *Aerosol and Air Quality Research*, 19, 204-220. doi: 10.4209/aaqr.2018.05.0163. [T3]
- Dorough, D. S., 2019. Our Homeland: Arctic Indigenous Peoples' Perspective on Non-Arctic States. in: Shibata, A., Zou, L., Sellheim, N., et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge, 69-90. [T7]
- Edwards, J. E., Hiltz, E., Broell, F., Bushnell, P. G., Campana, S. E., Christiansen, J. S., Devine, B. M., Gallant, J. J., Hedges, K. J., MacNeil, M. A., McMeans, B. C., Nielsen, J., Præbel, K., Skomal, G. B., Steffensen, J. F., Walter, R. P., Watanabe, Y. Y., VanderZwaag, D. L., Hussey, N. E., 2019. Advancing Research for the Management of Long-Lived Species: A Case Study on the Greenland Shark. *Frontiers in Marine Science*, 6. doi: 10.3389/fmars.2019.00087. [T6] [T7]
- Eichler, J., Kleitz, I., Bayer-Giraldi, M., Jansen, D., Kipfstuhl, S., Shigeyama, W., Weikusat, C., Weikusat, L., 2017. Location and distribution of micro-inclusions in the EDML and NEMM ice cores using optical microscopy and in situ Raman spectroscopy. *The Cryosphere*, 11, 1075-1090. doi: 10.5194/tc-11-1075-2017. [T2]
- Erdenebat, E., Sato, T., 2016. Recent increase in heat wave frequency around Mongolia: role of atmospheric forcing and possible influence of soil moisture deficit. *Atmospheric Science Letters*, 17, 135-140. doi: 10.1002/asl.616. [T5]
- Erdenebat, E., Sato, T., 2018. Role of soil moisture-atmosphere feedback during high temperature events in 2002 over Northeast Eurasia. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5, 37. doi: 10.1186/s40645-018-0195-4. [T5]
- Ershova, E., Hopcroft, R., Kosobokova, K., Matsuno, K., Nelson, R., Yamaguchi, A., Eisner, L., 2015. Long-Term Changes in Summer Zooplankton Communities of the Western Chukchi Sea, 1945–2012. *Oceanography*, 28, 100-115. doi: 10.5670/oceanog.2015.60. [T2] [T6]
- Evans, L. K., Nishioka, J., 2018. Quantitative analysis of Fe, Mn and Cd from sea ice and seawater in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Polar Science*, 17, 50-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.07.002>. [T2] [T6]
- Evans, L. K., Nishioka, J., 2019. Accumulation processes of trace metals into Arctic sea ice: distribution of Fe, Mn and Cd associated with ice structure. *Marine Chemistry*, 209, 36-47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2018.11.011>. [T2] [T6]
- Fanourgakis, G. S., Kanakidou, M., Nenes, A., Bauer, S. E., Bergman, T., Carslaw, K. S., Grini, A., Hamilton, D. S., Johnson, J. S., Karydis, V. A., Kirkevåg, A., Kodros, J. K., Lohmann, U., Luo, G., Makkonen, R., Matsui, H., Neubauer, D., Pierce, J. R., Schmale, J., Stier, P., Tsigaridis, K., van Noije, T., Wang, H., Watson-Parris, D., Westervelt, D. M., Yang, Y., Yoshioka, M., Daskalakis, N., Decesari, S., Gysel-Beer, M., Kalivitis, N., Liu, X., Mahowald, N. M., Myriokefalitakis, S., Schrödner, R., Sfakianaki, M., Tsimpidi, A. P., Wu, M., Yu, F., 2019. Evaluation of global simulations of aerosol particle and cloud condensation nuclei number, with implications for cloud droplet formation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 8591-8617. doi: 10.5194/acp-19-8591-2019. [T3]
- 藤岡 悠一郎, 高倉 浩樹, 田中 利和, Grigorev, S., 2020. 変化と適応 (第5章). 北極の人間と社会: 持続的発展の可能性, 北海道大学出版会. [T7]
- Fujita, R., Morimoto, S., Umezawa, T., Ishijima, K., Patra, P. K., Worthy, D. E. J., Goto, D., Aoki, S., Nakazawa, T., 2018. Temporal Variations of the Mole Fraction, Carbon, and Hydrogen Isotope Ratios of Atmospheric Methane in the Hudson Bay Lowlands, Canada. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 4695-4711. doi: 10.1002/2017JD027972. [T3]
- Fujiwara, A., Hirawake, T., Suzuki, K., Eisner, L., Imai, I., Nishino, S., Kikuchi, T., Saitoh, S.-I., 2016. Influence of timing of sea ice retreat on phytoplankton size during marginal ice zone bloom period on the Chukchi and Bering shelves. *Biogeosciences*, 13, 115-131. doi:

- 10.5194/bg-13-115-2016. [T4] [T6]
- Fujiwara, A., Nishino, S., Matsuno, K., Onodera, J., Kawaguchi, Y., Hirawake, T., Suzuki, K., Inoue, J., Kikuchi, T., 2018. Changes in phytoplankton community structure during wind-induced fall bloom on the central Chukchi shelf. *Polar Biology*, 41, 1279-1295. doi: 10.1007/s00300-018-2284-7. [T1] [T4] [T6]
- Fukai, Y., Matsuno, K., Fujiwara, A., Yamaguchi, A., 2019. The community composition of diatom resting stages in sediments of the northern Bering Sea in 2017 and 2018: the relationship to the interannual changes in the extent of the sea ice. *Polar Biology*, 42, 1915-1922. doi: 10.1007/s00300-019-02552-x. [T2] [T4] [T6]
- Fukamachi, Y., Simizu, D., Ohshima, K. I., Eicken, H., Mahoney, A. R., Iwamoto, K., Moriya, E., Nihashi, S., 2017. Sea-ice thickness in the coastal northeastern Chukchi Sea from moored ice-profiling sonar. *Journal of Glaciology*, 63, 888-898. doi: 10.1017/jog.2017.56. [T2] [T4]
- 古市 正彦, 大塚 夏彦, 2016. コンテナ船の超大型化が北極海航路 (NSR) コンテナ輸送の競争力に及ぼす影響. *運輸政策研究*, 19, 002-013. doi: 10.24639/tpsr.TPSR_19R_01. [T1] [T7]
- Furuichi, M., Otsuka, N., 2018. Examining quick delivery at an affordable cost by the NSR/SCR-combined shipping in the age of Mega-ships. *Maritime Policy & Management*, 45, 1057-1077. doi: 10.1080/03088839.2018.1473656. [T1] [T7]
- Furukawa, R., Uemura, R., Fujita, K., Sjolte, J., Yoshimura, K., Matoba, S., Izuka, Y., 2017. Seasonal-Scale Dating of a Shallow Ice Core From Greenland Using Oxygen Isotope Matching Between Data and Simulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 10,873-10,887. doi: 10.1002/2017JD026716. [T2] [T5]
- Gavrilyeva, T. N., Sugimoto, A., Fujii, M., Yamanaka, R., Pavlov, G. N., Kirillin, D. A., 2018. Sustainable Development of Universities: International and Russian Practices. *Higher Education in Russia*, 27, 52-65. doi: 10.31992/0869-3617-2018-27-7-52-65. [T7]
- Goelzer, H., Nowicki, S., Edwards, T., Beckley, M., Abe-Ouchi, A., Aschwanden, A., Calov, R., Gagliardini, O., Gillet-Chaulet, F., Gollledge, N. R., Gregory, J., Greve, R., Humbert, A., Huybrechts, P., Kennedy, J. H., Larour, E., Lipscomb, W. H., Le clec'h, S., Lee, V., Morlighem, M., Pattyn, F., Payne, A. J., Rodehacke, C., Rückamp, M., Saito, E., Schlegel, N., Seroussi, H., Shepherd, A., Sun, S., van de Wal, R., Ziemen, F. A., 2018. Design and results of the ice sheet model initialisation experiments initMIP-Greenland: an ISMIP6 intercomparison. *The Cryosphere*, 12, 1433-1460. doi: 10.5194/tc-12-1433-2018. [T2] [T5]
- Goto, D., Morimoto, S., Aoki, S., Patra, P. K., Nakazawa, T., 2017a. Seasonal and short-term variations in atmospheric potential oxygen at Ny-Ålesund, Svalbard. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 69, 1311767. doi: 10.1080/16000889.2017.1311767. [T3]
- Goto, D., Morimoto, S., Ishidoya, S., Aoki, S., Nakazawa, T., 2017b. Terrestrial biospheric and oceanic CO₂ uptakes estimated from long-term measurements of atmospheric CO₂ mole fraction, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2)$ at Ny-Ålesund, Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122, 1192-1202. doi: 10.1002/2017JG003845. [T3] [T4]
- Goto, M., 2018. Cutting through channels: Local entrepreneurship of indigenous actors in Arctic Russia. in: Tynkkynen, V. P., Tabata, S., Gritsenko, D., et al. (Eds.), *Russia's Far North: The Contested Energy Frontier*, Routledge. [T7]
- 後藤 正憲, 中田 篤, 飯島 慈裕, 2020. 凍土と文化 (第4章). 北極の人間と社会: 持続的発展の可能性, 北海道大学出版会. [T4] [T7]
- Goto-Azuma, K., Hirabayashi, M., Motoyama, H., Miyake, T., Kuramoto, T., Uemura, R., Igarashi, M., Izuka, Y., Sakurai, T., Horikawa, S., Suzuki, K., Suzuki, T., Fujita, K., Kondo, Y., Hattori, S., Fujii, Y., 2019. Reduced marine phytoplankton sulphur emissions in the Southern Ocean during the past seven glacials. *Nature Communications*, 10, 3247. doi: 10.1038/s41467-019-11128-6. [T2] [T3]
- 東久美子, 2019. 北極域のアイスコアによる古環境研究: 歴史と今後の展望. *地球化学*. [T2] [T3]
- Gourmelen, N., Goldberg, D. N., Snow, K., Henley, S. F., Bingham, R. G., Kimura, S., Hogg, A. E., Shepherd, A., Mougnot, J., Lenaerts, J. T. M., Ligtenberg, S. R. M., van de Berg, W. J., 2017. Channelized Melting Drives Thinning Under a Rapidly Melting Antarctic Ice Shelf. *Geophysical Research Letters*, 44, 9796-9804. doi: 10.1002/2017GL074929. [T4]
- Greve, R., Blatter, H., 2016. Comparison of thermodynamics solvers in the polythermal ice sheet model SICOPOLIS. *Polar Science*, 10, 11-23. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2015.12.004. [T2]
- Greve, R., 2019. Geothermal heat flux distribution for the Greenland ice sheet, derived by combining a global representation and information from deep ice cores. *Polar Data Journal*, 3, 22-36. doi: 10.20575/00000006. [T2]
- Guéguen, C., Itoh, M., Kikuchi, T., Eert, J., Williams, W. J., 2015. Variability in dissolved organic matter optical properties in surface waters in the Amerasian Basin. *Frontiers in Marine Science*, 2. doi: 10.3389/fmars.2015.00078. [T4]
- Harada, N., 2016. Review: Potential catastrophic reduction of sea ice in the western Arctic Ocean: Its impact on biogeochemical cycles and marine ecosystems. *Global and Planetary Change*, 136, 1-17. doi: https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.11.005. [T4]
- Hashino, T., Satoh, M., Hagihara, Y., Kato, S., Kubota, T., Matsui, T., Nasuno, T., Okamoto, H., Sekiguchi, M., 2016. Evaluating Arctic cloud radiative effects simulated by NICAM with A-train. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 7041-7063. doi: 10.1002/2016JD024775. [T3] [T5]
- Hayasaka, H., Yamazaki, K., Naito, D., 2019a. Weather conditions and warm air masses during active fire-periods in boreal forests. *Polar Science*, 100472. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.07.002. [T5]
- Hayasaka, H., Yamazaki, K., Naito, D., 2019b. Weather Conditions and Warm Air Masses in Southern Sakha During Active Forest Fire Periods. *Journal of Disaster Research*, 14, 641-648. doi: 10.20965/jdr.2019.p0641. [T5]
- Hayashi, N., Walls, M., 2019. Endogenous community development in Greenland: A perspective on creative transformation and the perception of future. *Polar Science*, 21, 52-57. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.06.002. [T2]
- Hays, G. C., Bailey, H., Bograd, S. J., Bowen, W. D., Campagna, C., Carmichael, R. H., Casale, P., Chiaradia, A., Costa, D. P., Cuevas, E., Nico de Bruyn, P. J., Dias, M. P., Duarte, C. M., Dunn, D. C., Dutton, P. H., Esteban, N., Friedlaender, A., Goetz, K. T., Godley, B.

- J., Halpin, P. N., Hamann, M., Hammerschlag, N., Harcourt, R., Harrison, A.-L., Hazen, E. L., Heupel, M. R., Hoyt, E., Humphries, N. E., Kot, C. Y., Lea, J. S. E., Marsh, H., Maxwell, S. M., McMahon, C. R., Notarbartolo di Sciara, G., Palacios, D. M., Phillips, R. A., Righton, D., Schofield, G., Seminoff, J. A., Simpfendorfer, C. A., Sims, D. W., Takahashi, A., Tetley, M. J., Thums, M., Trathan, P. N., Villegas-Amtmann, S., Wells, R. S., Whiting, S. D., Wildermann, N. E., Sequeira, A. M. M., 2019. Translating Marine Animal Tracking Data into Conservation Policy and Management. *Trends in Ecology & Evolution*, 34, 459-473. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.01.009>. [T6]
- Haywood, A. M., Dowsett, H. J., Dolan, A. M., Rowley, D., Abe-Ouchi, A., Otto-Bliesner, B., Chandler, M. A., Hunter, S. J., Lunt, D. J., Pound, M., Salzmann, U., 2016. The Pliocene Model Intercomparison Project (PlioMIP) Phase 2: scientific objectives and experimental design. *Climate of the Past*, 12, 663-675. doi: 10.5194/cp-12-663-2016. [T2] [T5]
- Hikichi, H., Arima, D., Abe, Y., Matsuno, K., Hamaoka, S., Katakura, S., Kasai, H., Yamaguchi, A., 2018. Seasonal variability of zooplankton size spectra at Mombetsu Harbour in the southern Okhotsk Sea during 2011: An analysis using an optical plankton counter. *Regional Studies in Marine Science*, 20, 34-44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.03.011>. [T2] [T6]
- Hill, T. C. J., DeMott, P. J., Tobo, Y., Fröhlich-Nowoisky, J., Moffett, B. F., Franc, G. D., Kreidenweis, S. M., 2016. Sources of organic ice nucleating particles in soils. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 7195-7211. doi: 10.5194/acp-16-7195-2016. [T3]
- Hirano, D., Fukamachi, Y., Watanabe, E., Ohshima, K. I., Iwamoto, K., Mahoney, A. R., Eicken, H., Simizu, D., Tamura, T., 2016. A wind-driven, hybrid latent and sensible heat coastal polynya off Barrow, Alaska. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 980-997. doi: 10.1002/2015JC011318. [T1] [T2] [T4] [T6]
- Hirano, D., Fukamachi, Y., Ohshima, K. I., Watanabe, E., Mahoney, A. R., Eicken, H., Itoh, M., Simizu, D., Iwamoto, K., Jones, J., Takatsuka, T., Kikuchi, T., Tamura, T., 2018. Winter Water Formation in Coastal Polynyas of the Eastern Chukchi Shelf: Pacific and Atlantic Influences. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 5688-5705. doi: 10.1029/2017JC013307. [T1] [T2] [T4] [T6]
- Hiranuma, N., Möhler, O., Kulkarni, G., Schnaiter, M., Vogt, S., Vochezer, P., Järvinen, E., Wagner, R., Bell, D. M., Wilson, J., Zelenyuk, A., Cziczo, D. J., 2016. Development and characterization of an ice-selecting pumped counterflow virtual impactor (IS-PCVI) to study ice crystal residuals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 3817-3836. doi: 10.5194/amt-9-3817-2016. [T3]
- Hirota, N., Shioyama, H., Akiyoshi, H., Ogura, T., Takahashi, M., Kawatani, Y., Kimoto, M., Mori, M., 2018. The influences of El Niño and Arctic sea-ice on the QBO disruption in February 2016. *npj Climate and Atmospheric Science*, 1, 10. doi: 10.1038/s41612-018-0020-1. [T5]
- Hiyama, T., Fujinami, H., Kanamori, H., Ishige, T., Oshima, K., 2016. Recent interdecadal changes in the interannual variability of precipitation and atmospheric circulation over northern Eurasia. *Environmental Research Letters*, 11, 065001. doi: 10.1088/1748-9326/11/6/065001. [T3] [T4] [T7]
- Hiyama, T., Takakura, H., 2018. *Global Warming and Human - Nature Dimension in Northern Eurasia*. Springer. ISBN: 978-981-10-4647-6. [T3] [T7]
- 檜山 哲哉, 2019a. 北東ユーラシアの「大気-植生-凍土-河川」システムの現在と将来. *天気*, 66, 230-236. doi: 10.24761/tenki.66.3_230. [T3] [T7]
- Holland, P. R., Kimura, N., 2016. Observed Concentration Budgets of Arctic and Antarctic Sea Ice. *Journal of Climate*, 29, 5241-5249. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0121.1. [T1] [T5]
- Homma, T., Matayoshi, Y., Voskoboinikov, R., 2015. Application of the Bons-Azuma method and determination of grain growth mechanism in rolled Ti-Zr alloys. *Philosophical Magazine Letters*, 95, 564-573. doi: 10.1080/09500839.2015.1122243. [T2]
- Homma, T., Mima, H., Nanko, M., Takeda, M., 2016. Dispersion of nanoscale oxides in MnSi_{1.73} fabricated by solid state reaction and pulsed electric current sintering. *Applied Physics Letters*, 108, 103901. doi: 10.1063/1.4943075. [T2]
- Honda, M., Yamazaki, A., Kuwano-Yoshida, A., Kimura, Y., Iwamoto, K., 2016. Synoptic Conditions Causing an Extreme Snowfall Event in the Kanto-Koshin District of Japan on 14-15 February 2014. *SOLA*, 12, 259-264. doi: 10.2151/sola.2016-051. [T5]
- Honda, S., 2018. Climate change and local knowledge in Eastern Arctic Inuit society: Perceptions, responses, and practice. *The World Multiple: The Quotidian Politics of Knowing and Generating Entangled Worlds*, 83-102. ISBN: 9780429456725. [T7]
- Hori, M. E., Oshima, K., 2018. Robustness of the Warm Arctic/Cold Eurasian Signature within a Large Ensemble Model Experiment. *SOLA*, 14, 69-73. doi: 10.2151/sola.2018-012. [T1] [T4]
- Hoshi, K., Ukita, J., Honda, M., Iwamoto, K., Nakamura, T., Yamazaki, K., Dethloff, K., Jaiser, R., Handorf, D., 2017. Poleward eddy heat flux anomalies associated with recent Arctic sea ice loss. *Geophysical Research Letters*, 44, 446-454. doi: 10.1002/2016GL071893. [T3] [T5]
- Hoshi, K., Ukita, J., Honda, M., Nakamura, T., Yamazaki, K., Miyoshi, Y., Jaiser, R., 2019. Weak Stratospheric Polar Vortex Events Modulated by the Arctic Sea-Ice Loss. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 858-869. doi: 10.1029/2018JD029222. [T3] [T5]
- Hoshiba, Y., Hirata, T., Shigemitsu, M., Nakano, H., Hashioka, T., Masuda, Y., Yamanaka, Y., 2018. Biological data assimilation for parameter estimation of a phytoplankton functional type model for the western North Pacific. *Ocean Science*, 14, 371-386. doi: 10.5194/os-14-371-2018. [T6] [T7]
- 星野 聖太, 館山 一孝, 田中 康弘, 2018. 北極海における衛星高度計 Cryosat-2 SIRAL を用いた海水厚推定手法の改良と南極海への応用. *雪氷*, 80, 297-317. [T1] [T2]
- Howell, F. W., Haywood, A. M., Otto-Bliesner, B. L., Bragg, F., Chan, W. L., Chandler, M. A., Contoux, C., Kamae, Y., Abe-Ouchi, A., Rosenbloom, N. A., Stepanek, C., Zhang, Z., 2016. Arctic sea ice simulation in the PlioMIP ensemble. *Climate of the Past*, 12, 749-767. doi: 10.5194/cp-12-749-2016. [T2] [T5]

- Hu, W., Murata, K., Horikawa, Y., Naganuma, A., Zhang, D., 2017a. Bacterial community composition in rainwater associated with synoptic weather in an area downwind of the Asian continent. *Science of The Total Environment*, 601-602, 1775-1784. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.052>. [T3]
- Hu, W., Murata, K., Toyonaga, S., Zhang, D., 2017b. Bacterial abundance and viability in rainwater associated with cyclones, stationary fronts and typhoons in southwestern Japan. *Atmospheric Environment*, 167, 104-115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.013>. [T3]
- Hu, W., Murata, K., Zhang, D., 2017c. Applicability of LIVE/DEAD BacLight stain with glutaraldehyde fixation for the measurement of bacterial abundance and viability in rainwater. *Journal of Environmental Sciences*, 51, 202-213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.05.030>. [T3]
- Ichii, K., Ueyama, M., Kondo, M., Saigusa, N., Kim, J., Alberto, M. C., Ardö, J., Euskirchen, E. S., Kang, M., Hirano, T., Joiner, J., Kobayashi, H., Marchesini, L. B., Merbold, L., Miyata, A., Saitoh, T. M., Takagi, K., Varlagin, A., Bret-Harte, M. S., Kitamura, K., Kotsugi, Y., Kotani, A., Kumar, K., Li, S-G., Machimura, T., Matsuura, Y., Mizoguchi, Y., Ohta, T., Mukherjee, S., Yanagi, Y., Yasuda, Y., Zhang, Y., Zhao, F., 2017. New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122, 767-795. doi: [10.1002/2016JG003640](https://doi.org/10.1002/2016JG003640). [T2] [T3]
- Iijima, Y., Nakamura, T., Park, H., Tachibana, Y., Fedorov, A. N., 2016. Enhancement of Arctic storm activity in relation to permafrost degradation in eastern Siberia. *International Journal of Climatology*, 36, 4265-4275. doi: [10.1002/joc.4629](https://doi.org/10.1002/joc.4629). [T4] [T5] [T7]
- Iijima, Y., Park, H., Konstantinov, P. Y., Pudov, G. G., Fedorov, A. N., 2017. Active-Layer Thickness Measurements Using a Handheld Penetrometer at Boreal and Tundra Sites in Eastern Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28, 306-313. doi: [10.1002/ppp.1908](https://doi.org/10.1002/ppp.1908). [T4] [T7]
- Iijima, Y., Hori, M. E., 2018. Cold air formation and advection over Eurasia during “dzud” cold disaster winters in Mongolia. *Natural Hazards*, 92, 45-56. doi: [10.1007/s11069-016-2683-4](https://doi.org/10.1007/s11069-016-2683-4). [T1] [T4] [T7]
- 飯島 慈裕, 2019. 北極域の永久凍土研究の現在：陸域環境変化の視点から . 土壌の物理性 . [T4] [T7]
- Iizuka, Y., Matoba, S., Yamasaki, T., Oyabu, I., Kadota, M., Aoki, T., 2016. Glaciological and meteorological observations at the SE-Dome site, southeastern Greenland Ice Sheet. *Bulletin of Glaciological Research*, 34, 1-10. doi: [10.5331/bgr.15R03](https://doi.org/10.5331/bgr.15R03). [T2] [T3]
- Iizuka, Y., Miyamoto, A., Hori, A., Matoba, S., Furukawa, R., Saito, T., Fujita, S., Hirabayashi, M., Yamaguchi, S., Fujita, K., Takeuchi, N., 2017. A Firn Densification Process in the High Accumulation Dome of Southeastern Greenland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 49, 13-27. doi: [10.1657/AAAR0016-034](https://doi.org/10.1657/AAAR0016-034). [T2]
- Iizuka, Y., Uemura, R., Fujita, K., Hattori, S., Seki, O., Miyamoto, C., Suzuki, T., Yoshida, N., Motoyama, H., Matoba, S., 2018. A 60 Year Record of Atmospheric Aerosol Depositions Preserved in a High-Accumulation Dome Ice Core, Southeast Greenland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 574-589. doi: [10.1002/2017JD026733](https://doi.org/10.1002/2017JD026733). [T2]
- Iizuka, Y., Miyamoto, C., Matoba, S., Iwahana, G., Horiuchi, K., Takahashi, Y., Kanna, N., Suzuki, K., Ohno, H., 2019. Ion concentrations in ice wedges: An innovative approach to reconstruct past climate variability. *Earth and Planetary Science Letters*, 515, 58-66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.03.013>. [T2] [T3]
- Ikenoue, T., Björklund, K. R., Fujiwara, A., Uchimiya, M., Kimoto, K., Harada, N., Nishino, S., 2019. Horizontal and vertical distribution of polycystine radiolarians in the western Arctic Ocean during the late summers of 2013 and 2015. *Polar Biology*, 42, 285-305. doi: [10.1007/s00300-018-2421-3](https://doi.org/10.1007/s00300-018-2421-3). [T4] [T6]
- Illingworth, A. J., Barker, H. W., Beljaars, A., Ceccaldi, M., Chepfer, H., Clerbaux, N., Cole, J., Delanoë, J., Domenech, C., Donovan, D. P., Fukuda, S., Hirakata, M., Hogan, R. J., Huenerbein, A., Kollias, P., Kubota, T., Nakajima, T., Nakajima, T. Y., Nishizawa, T., Ohno, Y., Okamoto, H., Oki, R., Sato, K., Satoh, M., Shephard, M. W., Velázquez-Blázquez, A., Wandinger, U., Wehr, T., van Zadelhoff, G. J., 2015. The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 1311-1332. doi: [10.1175/BAMS-D-12-00227.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00227.1). [T3] [T5]
- Imada, Y., Tatebe, H., Ishii, M., Chikamoto, Y., Mori, M., Arai, M., Watanabe, M., Kimoto, M., 2015. Predictability of Two Types of El Niño Assessed Using an Extended Seasonal Prediction System by MIROC. *Monthly Weather Review*, 143, 4597-4617. doi: [10.1175/MWR-D-15-0007.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0007.1). [T5]
- 稲垣 治, 幡谷 咲子, 2020. 北極評議会 (第 8 章) . 北極の人間と社会：持続的発展の可能性, 北海道大学出版会 . [T7]
- 稲飯 洋一, 2017. 総説 - トピックス「物質交換・物質循環」- 対流圏 - 成層圏間の輸送過程 Transport processes between the troposphere and stratosphere. *大気化学研究*, 37, 8-16. [T3]
- Inai, Y., 2018. Long-Term Variation in the Mixing Fraction of Tropospheric and Stratospheric Air Masses in the Upper Tropical Tropopause Layer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 4890-4909. doi: [10.1029/2018JD028300](https://doi.org/10.1029/2018JD028300). [T3]
- Inai, Y., Fujita, R., Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Tsuboi, K., Katsumata, K., Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T., 2019. Seasonal characteristics of trace gas transport into the extratropical upper troposphere and lower stratosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 7073-7103. doi: [10.5194/acp-19-7073-2019](https://doi.org/10.5194/acp-19-7073-2019). [T3]
- Inoue, J., Yamazaki, A., Ono, J., Dethloff, K., Maturilli, M., Neuber, R., Edwards, P., Yamaguchi, H., 2015. Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route. *Scientific Reports*, 5, 16868. doi: [10.1038/srep16868](https://doi.org/10.1038/srep16868). [T1] [T5]
- Inoue, J., Sato, K., Oshima, K., 2018. Comparison of the Arctic tropospheric structures from the ERA-Interim reanalysis with in situ observations. *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 2, 7-12. [T1] [T4]
- Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Nakatsuru, T., Yoshida, Y., Yokota, T., Wunch, D., Wennberg, P. O., Roehl, C. M., Griffith, D. W. T.,

- Velazco, V. A., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Robinson, J., Sherlock, V., Hase, F., Blumenstock, T., Rettinger, M., Sussmann, R., Kyrö, E., Kivi, R., Shiomi, K., Kawakami, S., De Mazière, M., Arnold, S. G., Feist, D. G., Barrow, E. A., Barney, J., Dubey, M., Schneider, M., Iraci, L. T., Podolske, J. R., Hillyard, P. W., Machida, T., Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., Sweeney, C., Tans, P. P., Andrews, A. E., Biraud, S. C., Fukuyama, Y., Pittman, J. V., Kort, E. A., Tanaka, T., 2016. Bias corrections of GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ with TCCON data and their evaluation using aircraft measurement data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 3491-3512. doi: 10.5194/amt-9-3491-2016. [T3]
- Inoue, T., Uchida, M., Inoue, M., Kaneko, R., Kudoh, S., Minami, Y., Kanda, H., 2019. Vegetation data of high Arctic lichens on Austre Brøggerbreen glacier foreland, Ny-Ålesund, Svalbard, in 1994. *Polar Data Journal*, 3, 1-11. doi: 10.20575/00000005. [T6]
- Ishidoya, S., Uchida, H., Sasano, D., Kosugi, N., Taguchi, S., Ishii, M., Morimoto, S., Tohjima, Y., Nishino, S., Murayama, S., Aoki, S., Ishijima, K., Fujita, R., Goto, D., Nakazawa, T., 2016. Ship-based observations of atmospheric potential oxygen and regional air-sea O₂ flux in the northern North Pacific and the Arctic Ocean. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 68, 29972. doi: 10.3402/tellusb.v68.29972. [T3] [T4] [T6]
- Ishii, S., Sato, A., Aoki, M., Akahane, K., Nagano, S., Nakagawa, K., Sato, K., Okamoto, H., 2018. Development of Tm, Ho: YLF laser for future space-based doppler wind lidar. *Proceedings of SPIE*, 10779. [T3]
- Ishikawa, M., Jamvaljav, Y., Dashtseren, A., Sharkhuu, N., Davaa, G., Iijima, Y., Baatarbileg, N., Yoshikawa, K., 2018. Thermal states, responsiveness and degradation of marginal permafrost in Mongolia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 29, 271-282. doi: 10.1002/ppp.1990. [T4] [T7]
- Ito, A., 2018. Methane emission from pan-Arctic natural wetlands estimated using a process-based model, 1901–2016. *Polar Science*. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.12.001. [T3]
- Ito, M., Ohshima, K. I., Fukamachi, Y., Hirano, D., Mahoney, A. R., Jones, J., Takatsuka, T., Eicken, H., 2020. Favorable conditions for suspension freezing in an Arctic coastal polynya. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124. doi: 10.1029/2019jc015536. [T2] [T4]
- Iwahana, G., Harada, K., Uchida, M., Tsuyuzaki, S., Saito, K., Narita, K., Kushida, K., Hinzman, L. D., 2016. Geomorphological and geochemistry changes in permafrost after the 2002 tundra wildfire in Kougarak, Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121, 1697-1715. doi: 10.1002/2016JF003921. [T3]
- Iwasaki, S., Seguchi, T., Okamoto, H., Sato, K., Katagiri, S., Fujiwara, M., Shibata, T., Tsuboki, K., Ono, T., Sugidachi, T., 2019. Large-and-Sparse-particle Clouds (LSC): Clouds which are subvisible for space-borne lidar and observable for space-borne cloud radar. *Polar Science*, 21, 117-123. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.05.003. [T3]
- Jaiser, R., Nakamura, T., Handorf, D., Dethloff, K., Ukita, J., Yamazaki, K., 2016. Atmospheric winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 7564-7577. doi: 10.1002/2015JD024679. [T3] [T5]
- Ji, B. Y., Sandwith, Z. O., Williams, W. J., Diaconescu, O., Ji, R., Li, Y., Van Scoy, E., Yamamoto-Kawai, M., Zimmermann, S., Stanley, R. H. R., 2019. Variations in Rates of Biological Production in the Beaufort Gyre as the Arctic Changes: Rates From 2011 to 2016. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 3628-3644. doi: 10.1029/2018JC014805. [T4]
- Jin, Y., Sugimoto, N., Nishizawa, T., Okamoto, H., 2018. Aerosol profile measurement by a high-spectral-resolution lidar with a scanning interferometer. 19th Coherent Laser Radar Conference, CLRC 2018. [T3]
- Jin, Y., Sugimoto, N., Nishizawa, T., Yoshitomi, T., Sawada, A., Sarae, W., Hattori, A., Yamasaki, Y., Okamoto, H., Sato, K., 2019. Measurement of water mist particle size generated by rocket launch using a two-wavelength multi-static lidar. *Applied Optics*, 58, 6274-6279. doi: 10.1364/AO.58.006274. [T3]
- Johnson, N. C., Xie, S-P., Kosaka, Y., Li, X., 2018. Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown. *Nature Communications*, 9, 1724. doi: 10.1038/s41467-018-04040-y. [T5]
- Jones, J., Eicken, H., Mahoney, A., MV, R., Kambhamettu, C., Fukamachi, Y., Ohshima, K. I., George, J. C., 2016. Landfast sea ice breakouts: Stabilizing ice features, oceanic and atmospheric forcing at Barrow, Alaska. *Continental Shelf Research*, 126, 50-63. doi: https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.07.015. [T2] [T4]
- Jouvet, G., Weidmann, Y., Seguinot, J., Funk, M., Abe, T., Sakakibara, D., Seddik, H., Sugiyama, S., 2017. Initiation of a major calving event on the Bowdoin Glacier captured by UAV photogrammetry. *The Cryosphere*, 11, 911-921. doi: 10.5194/tc-11-911-2017. [T2]
- Jouvet, G., Weidmann, Y., Kneib, M., Detert, M., Seguinot, J., Sakakibara, D., Sugiyama, S., 2018. Short-lived ice speed-up and plume water flow captured by a VTOL UAV give insights into subglacial hydrological system of Bowdoin Glacier. *Remote Sensing of Environment*, 217, 389-399. doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.027. [T2]
- Jung, O., Sung, M-K., Sato, K., Lim, Y-K., Kim, S-J., Baek, E-H., Jeong, J-H., Kim, B-M., 2017. How does the SST variability over the western North Atlantic Ocean control Arctic warming over the Barents–Kara Seas? *Environmental Research Letters*, 12, 034021. doi: 10.1088/1748-9326/aa5f3b. [T1]
- Jung, T., Gordon, N. D., Bauer, P., Bromwich, D. H., Chevallier, M., Day, J. J., Dawson, J., Doblus-Reyes, F., Fairall, C., Goessling, H. F., Holland, M., Inoue, J., Iversen, T., Klebe, S., Lemke, P., Losch, M., Makshtas, A., Mills, B., Nurmi, P., Perovich, D., Reid, P., Renfrew, I. A., Smith, G., Svensson, G., Tolstykh, M., Yang, Q., 2016. Advancing Polar Prediction Capabilities on Daily to Seasonal Time Scales. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 1631-1647. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00246.1. [T1]
- Kaiho, K., Oshima, N., Adachi, K., Adachi, Y., Mizukami, T., Fujibayashi, M., Saito, R., 2016. Global climate change driven by soot at the K-Pg boundary as the cause of the mass extinction. *Scientific Reports*, 6, 28427. doi: 10.1038/srep28427. [T3]
- Kaiho, K., Oshima, N., 2017. Site of asteroid impact changed the history of life on Earth: the low probability of mass extinction. *Scientific*

- Reports, 7, 14855. doi: 10.1038/s41598-017-14199-x. [T3]
- 亀山 宗彦, 大木 淳之, 野村 大樹, 2019. 北極域における臭素および有機硫黄化合物の生物地球化学. 地球化学. [T1] [T2] [T4] [T6]
- 神谷 秀明, 沖 一雄, Kim, H., 小林 秀樹, 2018. 全球 3 次元放射伝達スキーム構築に向けた森林構造を表現するパラメータの比較研究. 土木学会論文集 B1 (水工学), 74, 61-66. [T3]
- Kanaya, Y., Pan, X., Miyakawa, T., Komazaki, Y., Taketani, F., Uno, I., Kondo, Y., 2016. Long-term observations of black carbon mass concentrations at Fukue Island, western Japan, during 2009–2015: constraining wet removal rates and emission strengths from East Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 10689-10705. doi: 10.5194/acp-16-10689-2016. [T3]
- Kanaya, Y., Matsui, H., Taketani, F., Pan, X., Komazaki, Y., Wang, Z., Chang, L., Kang, D., Choi, M., Kim, S.-Y., Kang, C.-H., Takami, A., Tanimoto, H., Ikeda, K., Yamaji, K., 2017. Observed and Modeled Mass Concentrations of Organic Aerosols and PM_{2.5} at Three Remote Sites around the East China Sea: Roles of Chemical Aging. *Aerosol and Air Quality Research*, 17, 3091-3105. doi: 10.4209/aaqr.2016.12.0573. [T3] [T7]
- Kanaya, Y., Miyazaki, K., Taketani, F., Miyakawa, T., Takashima, H., Komazaki, Y., Pan, X., Kato, S., Sudo, K., Sekiya, T., Inoue, J., Sato, K., Oshima, K., 2019. Ozone and carbon monoxide observations over open oceans on R/V Mirai from 67° S to 75° N during 2012 to 2017: testing global chemical reanalysis in terms of Arctic processes, low ozone levels at low latitudes, and pollution transport. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 7233-7254. doi: 10.5194/acp-19-7233-2019. [T1] [T3] [T4]
- Kanna, N., Sugiyama, S., Ohashi, Y., Sakakibara, D., Fukamachi, Y., Nomura, D., 2018. Upwelling of Macronutrients and Dissolved Inorganic Carbon by a Subglacial Freshwater Driven Plume in Bowdoin Fjord, Northwestern Greenland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 1666-1682. doi: 10.1029/2017JG004248. [T1] [T2] [T4] [T6]
- Kashiwase, H., Oshima, K. I., Nishashi, S., Eicken, H., 2017. Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal ice zone. *Scientific Reports*, 7, 8170. doi: 10.1038/s41598-017-08467-z. [T4]
- Kashiwase, H., Oshima, K. I., Fukamachi, Y., Nishashi, S., Tamura, T., 2019. Evaluation of AMSR-E Thin Ice Thickness Algorithm from a Mooring-Based Observation: How Can the Satellite Observe a Sea Ice Field with Nonuniform Thickness Distribution? *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36, 1623-1641. doi: 10.1175/JTECH-D-18-0218.1. [T1] [T2] [T4]
- Katagiri, S., Sato, K., Ohta, K., Okamoto, H., 2018. Refinement of the CALIOP cloud mask algorithm. *EPJ Web of Conferences*, 176. [T3]
- Kataoka, T., Ooki, A., Nomura, D., 2019. Production of Dibromomethane and Changes in the Bacterial Community in Bromoform-Enriched Seawater. *Microbes and Environments*, 34, 215-218. doi: 10.1264/jsme2.ME18027. [T1] [T2] [T6]
- Katayama, T., Makabe, R., Sampei, M., Hattori, H., Sasaki, H., Taguchi, S., 2017. Photoprotection and recovery of photosystem II in the Southern Ocean phytoplankton. *Polar Science*, 12, 5-11. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.12.003. [T6]
- Kawaguchi, Y., Nishino, S., Inoue, J., Maeno, K., Takeda, H., Oshima, K., 2016a. Enhanced Diapycnal Mixing due to Near-Inertial Internal Waves Propagating through an Anticyclonic Eddy in the Ice-Free Chukchi Plateau. *Journal of Physical Oceanography*, 46, 2457-2481. doi: 10.1175/JPO-D-15-0150.1. [T1] [T4] [T6]
- Kawaguchi, Y., Itoh, M., Fukamachi, Y., Moriya, E., Onodera, J., Kikuchi, T., Harada, N., 2019. Year-round observations of sea-ice drift and near-inertial internal waves in the Northwind Abyssal Plain, Arctic Ocean. *Polar Science*. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.01.004. [T2] [T4]
- Kawai, Y., Katsumata, M., Oshima, K., Hori, M. E., Inoue, J., 2017. Comparison of Vaisala radiosondes RS41 and RS92 launched over the oceans from the Arctic to the tropics. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 2485-2498. doi: 10.5194/amt-10-2485-2017. [T1] [T4]
- Kawasaki, T., Hasumi, H., 2016. The inflow of Atlantic water at the Fram Strait and its interannual variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 502-519. doi: 10.1002/2015JC011375. [T5]
- Kikuchi, M., Okamoto, H., Sato, K., Hagihara, Y., 2017a. Testing hydrometeor particle type discrimination derived from CloudSat and CALIPSO. *AIP Conference Proceedings*, 1810, 070005. doi: 10.1063/1.4975526. [T3]
- Kikuchi, M., Okamoto, H., Sato, K., Suzuki, K., Cesana, G., Hagihara, Y., Takahashi, N., Hayasaka, T., Oki, R., 2017b. Development of Algorithm for Discriminating Hydrometeor Particle Types With a Synergistic Use of CloudSat and CALIPSO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 11,022-11,044. doi: 10.1002/2017JD027113. [T3]
- Kikuchi, M., Oki, R., Kubota, T., Yoshida, M., Hagihara, Y., Takahashi, C., Oki, Y., Nishizawa, T., Nakajima, T. Y., Suzuki, K., Sato, M., Okamoto, H., Tomita, E., 2019a. Overview of Earth, Clouds, Aerosols and Radiation Explorer (EarthCARE) - Integrative Observation of Cloud and Aerosol and Their Radiative Effects on the Climate System. *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*. [T3]
- Kim, J., Kim, H. M., Cho, C. H., Boo, K. O., Jacobson, A. R., Sasakawa, M., Machida, T., Arshinov, M., Fedoseev, N., 2017. Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 2881-2899. doi: 10.5194/acp-17-2881-2017. [T3]
- Kimura, S., Jenkins, A., Regan, H., Holland, P. R., Assmann, K. M., Whitt, D. B., Van Wessem, M., van de Berg, W. J., Reijmer, C. H., Dutrieux, P., 2017. Oceanographic Controls on the Variability of Ice-Shelf Basal Melting and Circulation of Glacial Meltwater in the Amundsen Sea Embayment, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 10131-10155. doi: 10.1002/2017JC012926. [T4]
- Kimura, S., Onodera, J., Itoh, M., Kikuchi, T., Nishino, S., Kawaguchi, Y., Watanabe, E., Harada, N., 2019a. The Warming of the Chukchi Slope Through the Barrow Canyon Outflow in the 2016–2017 Winter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. doi: 10.1029/2019JC015093. [T4] [T6]
- Kinase, T., Kita, K., Tsukagawa-Ogawa, Y., Goto-Azuma, K., Kawashima, H., 2016. Influence of the melting temperature on the measurement of the mass concentration and size distribution of black carbon in snow. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 1939-1945. doi: 10.5194/amt-9-1939-2016. [T2] [T3]

- Kinoshita, T., Sato, K., [Ishijima, K.](#), [Takigawa, M.](#), Yamashita, Y., 2019. Formulation of Three-Dimensional Quasi-Residual Mean Flow Balanced with Diabatic Heating Rate and Potential Vorticity Flux. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 76, 851-863. doi: 10.1175/JAS-D-18-0085.1. [T3]
- [Kitagawa, R.](#), [Masumoto, S.](#), Nishizawa, K., [Kaneko, R.](#), [Osono, T.](#), [Hasegawa, M.](#), [Uchida, M.](#), [Mori, A. S.](#), 2019. Positive interaction facilitates landscape homogenization by shrub expansion in the forest-tundra ecotone. *Journal of Vegetation Science*. doi: 10.1111/jvs.12818. [T6]
- [Kitamura, M.](#), Amakasu, K., [Kikuchi, T.](#), [Nishino, S.](#), 2017. Seasonal dynamics of zooplankton in the southern Chukchi Sea revealed from acoustic backscattering strength. *Continental Shelf Research*, 133, 47-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.12.009>. [T4] [T6]
- 北野 慈和, [山田 朋人](#), 2017. 開水路流れとの類似点に着目したジェット気流が有するエネルギーの解析. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 73, I_439-I_444. doi: 10.2208/jscejhe.73.I_439. [T5]
- Kitano, Y., [Yamada, T. J.](#), 2016. Relationship between atmospheric blocking and cold day extremes in current and RCP8.5 future climate conditions over Japan and the surrounding area. *Atmospheric Science Letters*, 17, 616-622. doi: 10.1002/asl.711. [T5]
- Kjær, H. A., Dallmayr, R., Gabrieli, J., [Goto-Azuma, K.](#), [Hirabayashi, M.](#), Svensson, A., [Vallelonga, P.](#), 2015. Greenland ice cores constrain glacial atmospheric fluxes of phosphorus. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 10,810-10,822. doi: 10.1002/2015JD023559. [T2] [T3]
- [Knecht, S.](#), Spence, J., 2019. State Observers and Science Cooperation in the Arctic Council: Same same but different? in: [Shibata, A.](#), [Zou, L.](#), [Sellheim, N.](#), et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge, 226-243. [T7]
- Knox, S. H., Jackson, R. B., Poulter, B., McNicol, G., Fluet-Chouinard, E., Zhang, Z., Hugelius, G., Bousquet, P., Canadell, J. G., Saunois, M., Papale, D., Chu, H., Keenan, T. F., Baldocchi, D., Torn, M. S., Mammarella, I., Trotta, C., Aurela, M., Bohrer, G., Campbell, D. I., Cescatti, A., Chamberlain, S., Chen, J., Chen, W., Dengel, S., Desai, A. R., Euskirchen, E., Friborg, T., Gasbarra, D., Goded, I., Goeckede, M., Heimann, M., Helbig, M., Hirano, T., Hollinger, D. Y., [Iwata, H.](#), Kang, M., Klatt, J., Krauss, K. W., Kutzbach, L., Lohila, A., Mitra, B., Morin, T. H., Nilsson, M. B., Niu, S., Noormets, A., Oechel, W. C., Peichl, M., Peltola, O., Reba, M. L., Richardson, A. D., Runkle, B. R. K., Ryu, Y., Sachs, T., Schäfer, K. V. R., Schmid, H. P., Shurpali, N., Sonntag, O., Tang, A. C. I., [Ueyama, M.](#), Vargas, R., Vesala, T., Ward, E. J., Windham-Myers, L., Wohlfahrt, G., Zona, D., 2019. FLUXNET-CH₄ Synthesis Activity: Objectives, Observations, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. doi: 10.1175/BAMS-D-18-0268.1. [T3]
- [Kobayashi, H.](#), [Nagai, S.](#), Kim, Y., [Yang, W.](#), Ikeda, K., Ikawa, H., Nagano, H., [Suzuki, R.](#), 2018a. In Situ Observations Reveal How Spectral Reflectance Responds to Growing Season Phenology of an Open Evergreen Forest in Alaska. *Remote Sensing*, 10. doi: 10.3390/rs10071071. [T3]
- [Kobayashi, H.](#), [Suzuki, R.](#), [Yang, W.](#), Ikawa, H., Inoue, T., Nagano, H., Kim, Y., 2018b. Spectral reflectance and associated photograph of boreal forest understory formation in interior Alaska. *Polar Data Journal*, 2, 14-29. doi: 10.20575/00000004. [T3]
- 小林 秀樹, 永野 博彦, 金 龍元, 鈴木 力英, 2018. アラスカのトウヒ林における晴天・曇天時の森林ギャップ確率の測定と葉面積指数推定値の比較. *日本リモートセンシング学会誌*, 38, 44-50. doi: 10.11440/rssj.38.44. [T3]
- [Koike, M.](#), Asano, N., [Nakamura, H.](#), Sakai, S., Nagao, T. M., Nakajima, T. Y., 2016. Modulations of aerosol impacts on cloud microphysics induced by the warm Kuroshio Current under the East Asian winter monsoon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 12,282-12,297. doi: 10.1002/2016JD025375. [T3] [T5]
- [Koike, M.](#), [Ukita, J.](#), Ström, J., Tunved, P., [Shiobara, M.](#), Vitale, V., Lupi, A., Baumgardner, D., Ritter, C., Hermansen, O., [Yamada, K.](#), Pedersen, C. A., 2019. Year-Round In Situ Measurements of Arctic Low-Level Clouds: Microphysical Properties and Their Relationships With Aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 1798-1822. doi: 10.1029/2018JD029802. [T3] [T5]
- [Koivurova, T.](#), 2019. The current and future role of non-Arctic states in Arctic governance. in: [Shibata, A.](#), [Zou, L.](#), [Sellheim, N.](#), et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge. [T7]
- [Kokubun, N.](#), Yamamoto, T., Sato, N., [Watanuki, Y.](#), [Will, A. P.](#), Kitaysky, A. S., [Takahashi, A.](#), 2016. Foraging segregation of two congeneric diving seabird species breeding on St. George Island, Bering Sea. *Biogeosciences*, 13, 2579-2591. doi: 10.5194/bg-13-2579-2016. [T2] [T6]
- [Kokubun, N.](#), [Takahashi, A.](#), Paredes, R., Young, R. C., Sato, N. N., Yamamoto, T., Kikuchi, D. M., Kitaiskaia, E., Ito, M., [Watanuki, Y.](#), [Will, A. P.](#), Lauth, R., Romano, M. D., Kitaysky, A. S., 2018. Inter-annual climate variability affects foraging behavior and nutritional state of thick-billed murres breeding in the southeastern Bering Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 593, 195-208. [T2] [T6]
- Komatsu, K. K., Alexeev, V. A., Repina, I. A., [Tachibana, Y.](#), 2018. Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air. *Scientific Reports*, 8, 2872. doi: 10.1038/s41598-018-21159-6. [T5]
- Komori, N., Enomoto, T., Miyoshi, T., Yamazaki, A., Kuwano-Yoshida, A., [Taguchi, B.](#), 2018. Ensemble-Based Atmospheric Reanalysis Using a Global Coupled Atmosphere-Ocean GCM. *Monthly Weather Review*, 146, 3311-3323. doi: 10.1175/MWR-D-17-0361.1. [T5]
- 近藤 祉秋, 2017a. ボブ老師はこう言った: 内陸アラスカ・ニコライ村におけるキリスト教・信念・生存. *社会人類学年報*, 43, 57-78. [T7]
- 近藤 祉秋, 2019a. 内陸アラスカ・クスコクイム川上流域におけるサケ漁撈史と現代的課題. *北海道立北方民族博物館研究紀要*, 28, 7-31. [T7]
- 近藤 祉秋, 2020. 環境モニタリング (第 6 章). *北極の人間と社会: 持続的発展の可能性*, 北海道大学出版会. [T7]
- [Kondo, Y.](#), [Moteki, N.](#), [Oshima, N.](#), Ohata, S., [Koike, M.](#), Shibano, Y., [Takegawa, N.](#), Kita, K., 2016. Effects of wet deposition on the abundance and size distribution of black carbon in East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 4691-4712. doi: 10.1002/2015JD024479. [T3]
- Konoshonkin, A., Borovoi, A., Kustova, N., [Okamoto, H.](#), Ishimoto, H., Grynko, Y., Förstner, J., 2017. Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: From exact numerical methods to physical-optics approximation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative*

- Transfer, 195, 132-140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.12.024>. [T3]
- Konoshonkin, A. V., Kustova, N. V., Borovoi, A. G., Ishimoto, H., Masuda, K., [Okamoto, H.](#), 2015a. Comparison of the physical optics code with the GOIE method and the direct solution of Maxwell equations obtained by FDTD. Proceedings of SPIE, 9680. doi: 10.1117/12.2203288. [T3]
- Konoshonkin, A. V., Kustova, N. V., Borovoi, A. G., [Okamoto, H.](#), 2015b. Coherent and incoherent additions of light beams at solutions of the light scattering problem by use the beam tracing method within the framework of physical optics. Proceedings of SPIE, 9680. doi: 10.1117/12.2204879. [T3]
- Konoshonkin, A. V., Borovoi, A. G., Kustova, N. V., [Okamoto, H.](#), [Sato, K.](#), 2016a. Optical and microphysical properties of cirrus clouds retrieved from combined lidar and radar measurements. Proceedings of SPIE, 10035. doi: 10.1117/12.2249115. [T3]
- Konoshonkin, A. V., Kustova, N. V., Borovoi, A. G., [Okamoto, H.](#), [Sato, K.](#), Ishimoto, H., Grynko, Y., Foerstner, J., 2016b. Comparison between the physical-optics approximation and exact methods solving the problem of light scattering by ice crystals of cirrus clouds. Proceedings of SPIE, 10035. doi: 10.1117/12.2248409. [T3]
- [Kosaka, Y.](#), Xie, S-P., 2016. The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming. Nature Geoscience, 9, 669. doi: 10.1038/ngeo2770. [T5]
- [Kosugi, N.](#), [Sasano, D.](#), [Ishii, M.](#), [Nishino, S.](#), Uchida, H., Yoshikawa-Inoue, H., 2017. Low pCO₂ under sea-ice melt in the Canada Basin of the western Arctic Ocean. Biogeosciences, 14, 5727-5739. doi: 10.5194/bg-14-5727-2017. [T4] [T6]
- [Kotani, A.](#), Saito, A., Kononov, A. V., Petrov, R. E., Maximov, T. C., [Iijima, Y.](#), [Ohta, T.](#), 2019. Impact of unusually wet permafrost soil on understory vegetation and CO₂ exchange in a larch forest in eastern Siberia. Agricultural and Forest Meteorology, 265, 295-309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.025>. [T3] [T4] [T7]
- [Koyama, T.](#), Stroeve, J., 2019. Greenland monthly precipitation analysis from the Arctic System Reanalysis (ASR): 2000–2012. Polar Science, 19, 1-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.09.001>. [T1]
- Krasnov, O. A., [Maksyutov, S. S.](#), Davydov, D. K., Fofonov, A. V., Glagolev, M. V., 2015. Measurements of methane and carbon dioxide fluxes on the Bakchar bog in warm season. XXI International Symposium Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. doi: 10.1117/12.2205557. [T3]
- Kudo, K., Yamada, K., Toyoda, S., Yoshida, N., [Sasano, D.](#), [Kosugi, N.](#), [Ishii, M.](#), Yoshikawa, H., [Murata, A.](#), Uchida, H., [Nishino, S.](#), 2018. Spatial distribution of dissolved methane and its source in the western Arctic Ocean. Journal of Oceanography, 74, 305-317. doi: 10.1007/s10872-017-0460-y. [T4] [T6]
- Kumamoto, Y., Aoyama, M., Hamajima, Y., [Nishino, S.](#), [Murata, A.](#), [Kikuchi, T.](#), 2016. Meridional distribution of Fukushima-derived radiocesium in surface seawater along a trans-Pacific line from the Arctic to Antarctic Oceans in summer 2012. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 307, 1703-1710. doi: 10.1007/s10967-015-4439-0. [T4] [T6]
- Kumamoto, Y., Aoyama, M., Hamajima, Y., [Nishino, S.](#), [Murata, A.](#), [Kikuchi, T.](#), 2017. Radiocesium in the western subarctic area of the North Pacific Ocean, Bering Sea, and Arctic Ocean in 2013 and 2014. Applied Radiation and Isotopes, 126, 88-92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.02.036>. [T4] [T6]
- Kumamoto, Y., Aoyama, M., Hamajima, Y., [Nishino, S.](#), [Murata, A.](#), [Kikuchi, T.](#), 2018. Radiocesium in the western subarctic area of the North Pacific ocean, Bering Sea, and Arctic Ocean in 2015 and 2017. Polar Science. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.08.007>. [T4] [T6]
- 黒崎 豊, 的場 澄人, 飯塚 芳徳, 庭野 匡思, 谷川 朋範, 青木 輝夫, 2018a. バフィン湾周辺の環境がグリーンランド北西部の降雪中の d-excess と化学成分に与える影響. 雪氷, 80, 515-529. [T2] [T3]
- Lainé, A., [Yoshimori, M.](#), [Abe-Ouchi, A.](#), 2016. Surface Arctic Amplification Factors in CMIP5 Models: Land and Oceanic Surfaces and Seasonality. Journal of Climate, 29, 3297-3316. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0497.1. [T2] [T5]
- Lamb, K. D., Perring, A. E., Samset, B., Peterson, D., Davis, S., Anderson, B. E., Beyersdorf, A., Blake, D. R., Campuzano-Jost, P., Corr, C. A., Diskin, G. S., [Kondo, Y.](#), [Moteki, N.](#), Nault, B. A., Oh, J., Park, M., Pusede, S. E., Simpson, I. J., Thornhill, K. L., Wisthaler, A., Schwarz, J. P., 2018. Estimating Source Region Influences on Black Carbon Abundance, Microphysics, and Radiative Effect Observed Over South Korea. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 13,527-13,548. doi: 10.1029/2018JD029257. [T3]
- Ladeira, J. M., [Matsuno, K.](#), [Yamaguchi, A.](#), [Hirawake, T.](#), [Kikuchi, T.](#), 2017. Abundance, development stage, and size of decapod larvae through the Bering and Chukchi Seas during summer. Polar Biology, 40, 1805-1819. doi: 10.1007/s00300-017-2103-6. [T2] [T4] [T6]
- Ladeira, J. M., [Matsuno, K.](#), Tanaka, Y., [Yamaguchi, A.](#), 2018. First record of the larvae of tanner crab *Chionoecetes bairdi* in the Chukchi Sea: A future northward expansion in the Arctic? Polar Science, 16, 86-89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.002>. [T2] [T6]
- Lau, W. K. M., Sang, J., Kim, M. K., Kim, K. M., Koster, R. D., [Yasunari, T. J.](#), 2018. Impacts of Snow Darkening by Deposition of Light-Absorbing Aerosols on Hydroclimate of Eurasia During Boreal Spring and Summer. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 8441-8461. doi: 10.1029/2018JD028557. [T5]
- Lee, M-H., Kim, J-H., Song, H-J., [Inoue, J.](#), [Sato, K.](#), Yamazaki, A., 2019a. Potential benefit of extra radiosonde observations around the Chukchi Sea for the Alaskan short-range weather forecast. Polar Science, 21, 124-135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.12.005>. [T1]
- Lee, S-B., Kim, B-M., [Ukita, J.](#), Ahn, J-B., 2019b. Uncertainties in Arctic Sea Ice Thickness Associated with Different Atmospheric Reanalysis Datasets Using the CICE5 Model. Atmosphere, 10. doi: 10.3390/atmos10070361. [T3] [T5]
- Liljedahl, A. K., Boike, J., Daanen, R. P., Fedorov, A. N., Frost, G. V., Grosse, G., Hinzman, L. D., Iijma, Y., Jorgenson, J. C., Matveyeva, N., Necsoiu, M., Reynolds, M. K., Romanovsky, V. E., Schulla, J., Tape, K. D., Walker, D. A., Wilson, C. J., [Yabuki, H.](#), Zona, D., 2016.

- Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience*, 9, 312-318. doi: 10.1038/ngeo2674. [T8]
- Liu, Z., Kimball, J. S., Parazoo, N. C., Ballantyne, A. P., Wang, W. J., Madani, N., Pan, C. G., Watts, J. D., Reichle, R. H., Sonnentag, O., Marsh, P., Hurkuck, M., Helbig, M., Quinton, W. L., Zona, D., [Ueyama, M.](#), [Kobayashi, H.](#), Euskirchen, E. S., 2019. Increased high-latitude photosynthetic carbon gain offset by respiration carbon loss during an anomalous warm winter to spring transition. *Global Change Biology*. doi: 10.1111/gcb.14863. [T3]
- Machguth, H., Thomsen, H. H., Weidick, A., Ahlstrøm, A. P., Abermann, J., Andersen, M. L., Andersen, S. B., Bjørk, A. A., Box, J. E., Braithwaite, R. J., Bøggild, C. E., Citterio, M., Clement, P., Colgan, W., Fausto, R. S., Gleie, K., Gubler, S., Hasholt, B., Hynes, B., Knudsen, N. T., Larsen, S. H., Mernild, S. H., Oerlemans, J., Oerter, H., Olesen, O. B., Smeets, C. J. P. P., Steffen, K., Stober, M., [Sugiyama, S.](#), Van As, D., Van Den Broeke, M. R., Van De Wal, R. S. W., 2016. Greenland surface mass-balance observations from the ice-sheet ablation area and local glaciers. *Journal of Glaciology*, 62, 861-887. doi: 10.1017/jog.2016.75. [T2]
- Mäkelä, J., Knauer, J., Aurela, M., Black, A., Heimann, M., [Kobayashi, H.](#), Lohila, A., Mammarella, I., Margolis, H., Markkanen, T., Susiluoto, J., Thum, T., Viskari, T., Zaehle, S., Aalto, T., 2019. Parameter calibration and stomatal conductance formulation comparison for boreal forests with adaptive population importance sampler in the land surface model JSBACH. *Geoscientific Model Development*, 12, 4075-4098. doi: 10.5194/gmd-12-4075-2019. [T3]
- Markowicz, K. M., Pakszys, P., Ritter, C., Zielinski, T., Udisti, R., Cappelletti, D., Mazzola, M., [Shiobara, M.](#), Xian, P., Zawadzka, O., Lisok, J., Petelski, T., Makuch, P., Karasiński, G., 2016. Impact of North American intense fires on aerosol optical properties measured over the European Arctic in July 2015. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 14,487-14,512. doi: 10.1002/2016JD025310. [T3]
- [Masumoto, S.](#), [Tojo, M.](#), [Imura, S.](#), Herrero, M. L., [Uchida, M.](#), 2018a. Occurrence pattern of the parasitic fungus *Rhytisma polare* (Ascomycota) on the polar willow (*Salix polaris*) under limited water conditions in a high-Arctic semi-desert. *Polar Biology*, 41, 1105-1110. doi: 10.1007/s00300-018-2269-6. [T6]
- [Masumoto, S.](#), [Uchida, M.](#), [Tojo, M.](#), Herrero, M. L., [Mori, A. S.](#), [Imura, S.](#), 2018b. The effect of tar spot pathogen on host plant carbon balance and its possible consequences on a tundra ecosystem. *Oecologia*, 186, 843-853. doi: 10.1007/s00442-017-4037-7. [T6]
- Masunaga, R., [Nakamura, H.](#), Kamahori, H., Onogi, K., Okajima, S., 2018. JRA-55CHS: An Atmospheric Reanalysis Produced with High-Resolution SST. *SOLA*, 14, 6-13. doi: 10.2151/sola.2018-002. [T3] [T5]
- Masunaga, R., [Nakamura, H.](#), [Taguchi, B.](#), Miyasaka, T., 2019. Processes shaping the frontal-scale time-mean surface wind convergence patterns around the Kuroshio Extension in winter. *Journal of Climate*. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0097.1. [T3] [T5]
- [Matoba, S.](#), [Motoyama, H.](#), Fujita, K., Yamasaki, T., Minowa, M., Onuma, Y., [Komuro, Y.](#), [Aoki, T.](#), Yamaguchi, S., [Sugiyama, S.](#), [Enomoto, H.](#), 2015. Glaciological and meteorological observations at the SIGMA-D site, northwestern Greenland Ice Sheet. *Bulletin of Glaciological Research*, 33, 7-14. doi: 10.5331/bgr.33.7. [T2] [T3]
- [Matoba, S.](#), [Niwano, M.](#), Tanikawa, T., [Iizuka, Y.](#), Yamasaki, T., Kurosaki, Y., [Aoki, T.](#), Hashimoto, A., Hosaka, M., [Sugiyama, S.](#), 2018. Field activities at the SIGMA-A site, northwestern Greenland Ice Sheet, 2017. *Bulletin of Glaciological Research*, 36, 15-22. doi: 10.5331/bgr.18R01. [T2] [T3]
- [Matsueda, M.](#), Kyouda, M., 2016. Wintertime East Asian Flow Patterns and Their Predictability on Medium-Range Timescales. *SOLA*, 12, 121-126. doi: 10.2151/sola.2016-027. [T1]
- [Matsui, H.](#), 2016a. Black carbon simulations using a size- and mixing-state-resolved three-dimensional model: 1. Radiative effects and their uncertainties. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 1793-1807. doi: 10.1002/2015jd023998. [T3]
- [Matsui, H.](#), 2016b. Black carbon simulations using a size- and mixing-state-resolved three-dimensional model: 2. Aging timescale and its impact over East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 1808-1821. doi: 10.1002/2015jd023999. [T3]
- [Matsui, H.](#), [Koike, M.](#), 2016. Enhancement of aerosol responses to changes in emissions over East Asia by gas-oxidant-aerosol coupling and detailed aerosol processes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 7161-7171. doi: 10.1002/2015JD024671. [T3]
- [Matsui, H.](#), 2017. Development of a global aerosol model using a two-dimensional sectional method: 1. Model design. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9, 1921-1947. doi: 10.1002/2017MS000936. [T3]
- [Matsui, H.](#), Mahowald, N., 2017. Development of a global aerosol model using a two-dimensional sectional method: 2. Evaluation and sensitivity simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9, 1887-1920. doi: 10.1002/2017MS000937. [T3]
- [Matsui, H.](#), Hamilton, D. S., Mahowald, N. M., 2018a. Black carbon radiative effects highly sensitive to emitted particle size when resolving mixing-state diversity. *Nature Communications*, 9, 3446. doi: 10.1038/s41467-018-05635-1. [T3]
- [Matsui, H.](#), Mahowald, N. M., [Moteki, N.](#), Hamilton, D. S., Ohata, S., Yoshida, A., [Koike, M.](#), Scanza, R. A., Flanner, M. G., 2018b. Anthropogenic combustion iron as a complex climate forcer. *Nature Communications*, 9, 1593. doi: 10.1038/s41467-018-03997-0. [T3]
- Matsumura, S., [Kosaka, Y.](#), 2019. Arctic-Eurasian climate linkage induced by tropical ocean variability. *Nature Communications*, 10, 3441. doi: 10.1038/s41467-019-11359-7. [T5]
- [Matsumura, Y.](#), [Ohshima, K. I.](#), 2015. Lagrangian modelling of frazil ice in the ocean. *Annals of Glaciology*, 56, 373-382. doi: 10.3189/2015AoG69A657. [T2] [T4] [T5]
- [Matsuno, K.](#), [Abe, Y.](#), [Yamaguchi, A.](#), [Kikuchi, T.](#), 2016a. Regional patterns and controlling factors on summer population structure of *Calanus glacialis* in the western Arctic Ocean. *Polar Science*, 10, 503-510. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.09.001. [T2] [T4] [T6]
- [Matsuno, K.](#), Landeira Sanchez, J. M., [Yamaguchi, A.](#), [Hirawake, T.](#), [Kikuchi, T.](#), 2016b. Spatial and geographical changes in the mesozooplankton community in the Bering and Chukchi Seas during the summers of 2007 and 2008. *Polar Science*, 10, 335-345. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.04.006. [T2] [T4] [T6]

- 南山 泰之, 照井 健志, 村山 泰啓, 矢吹 裕伯, 山地 一禎, 金尾 政紀, 2017. データジャーナル『Polar Data Journal』創刊の取り組み: 極域科学データの新たな公開体制構築に向けて. 情報管理, 60, 147-156. doi: 10.1241/johokanri.60.147. [T8]
- Minowa, M., Podolskiy, E. A., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Skvarca, P., 2018. Glacier calving observed with time-lapse imagery and tsunami waves at Glaciario Perito Moreno, Patagonia. *Journal of Glaciology*, 64, 362-376. doi: 10.1017/jog.2018.28. [T2]
- Minowa, M., Podolskiy, E. A., Jouvet, G., Weidmann, Y., Sakakibara, D., Tsutaki, S., Genco, R., Sugiyama, S., 2019. Calving flux estimation from tsunami waves. *Earth and Planetary Science Letters*, 515, 283-290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.03.023>. [T2] [T6]
- Misumi, R., Uji, Y., Tobo, Y., Miura, K., Uetake, J., Iwamoto, Y., Maesaka, T., Iwanami, K., 2018. Characteristics of Droplet Size Distributions in Low-Level Stratiform Clouds Observed from Tokyo Skytree. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 96, 405-413. doi: 10.2151/jmsj.2018-040. [T3] [T6]
- Miyakawa, T., Kanaya, Y., Komazaki, Y., Miyoshi, T., Nara, H., Takami, A., Moteki, N., Koike, M., Kondo, Y., 2016a. Emission Regulations Altered the Concentrations, Origin, and Formation of Carbonaceous Aerosols in the Tokyo Metropolitan Area. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 1603-1614. doi: 10.4209/aaqr.2015.11.0624. [T3]
- Miyakawa, T., Kanaya, Y., Komazaki, Y., Taketani, F., Pan, X., Irwin, M., Symonds, J., 2016b. Intercomparison between a single particle soot photometer and evolved gas analysis in an industrial area in Japan: Implications for the consistency of soot aerosol mass concentration measurements. *Atmospheric Environment*, 127, 14-21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.018>. [T3]
- Miyakawa, T., Oshima, N., Taketani, F., Komazaki, Y., Yoshino, A., Takami, A., Kondo, Y., Kanaya, Y., 2017. Alteration of the size distributions and mixing states of black carbon through transport in the boundary layer in east Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 5851-5864. doi: 10.5194/acp-17-5851-2017. [T3]
- Miyamoto, A., Nakamura, H., Miyasaka, T., 2018. Influence of the Subtropical High and Storm Track on Low-Cloud Fraction and Its Seasonality over the South Indian Ocean. *Journal of Climate*, 31, 4017-4039. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0229.1. [T3] [T5]
- Mizobata, K., Watanabe, E., Kimura, N., 2016. Wintertime variability of the Beaufort gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 1685-1699. doi: 10.1002/2015JC011218. [T1] [T4] [T5] [T6]
- Mizuno, Y., Nishioka, J., Tanaka, T., Tada, Y., Suzuki, K., Tsuzuki, Y., Sugimoto, A., Yamashita, Y., 2018. Determination of the freshwater origin of Coastal Oyashio Water using humic-like fluorescence in dissolved organic matter. *Journal of Oceanography*, 74, 509-521. doi: 10.1007/s10872-018-0477-x. [T2] [T6]
- Mochenov, Y. S., Churkina, A. I., Sabrekov, S. F., Glagolev, M. V., Il'yasov, D. V., Terentieva, I. E., Maksyutov, S. S., 2018. Soils in seasonally flooded forests as methane sources: A case study of West Siberian South taiga. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 138, 012012. doi: 10.1088/1755-1315/138/1/012012. [T3]
- Molenaar, E., 2019. Participation in the Central Arctic Ocean Fisheries Agreement. in: Shibata, A., Zou, L., Sellheim, N., et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge. [T7]
- Mori, A. S., Osono, T., Cornelissen, J. H. C., Craine, J., Uchida, M., 2017. Biodiversity-ecosystem function relationships change through primary succession. *Oikos*, 126, 1637-1649. doi: 10.1111/oik.04345. [T6]
- Mori, M., Kosaka, Y., Watanabe, M., Nakamura, H., Kimoto, M., 2019a. A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. *Nature Climate Change*, 9, 123-129. doi: 10.1038/s41558-018-0379-3. [T3] [T5]
- Mori, M., Kosaka, Y., Watanabe, M., Taguchi, B., Nakamura, H., Kimoto, M., 2019b. Reply to: Is sea-ice-driven Eurasian cooling too weak in models?. *Nature Climate Change*, 9, 937-939. doi: 10.1038/s41558-019-0636-0. [T3] [T5]
- Mori, T., Moteki, N., Ohata, S., Koike, M., Goto-Azuma, K., Miyazaki, Y., Kondo, Y., 2016. Improved technique for measuring the size distribution of black carbon particles in liquid water. *Aerosol Science and Technology*, 50, 242-254. doi: 10.1080/02786826.2016.1147644. [T2] [T3]
- Mori, T., Goto-Azuma, K., Kondo, Y., Tsukagawa-Ogawa, Y., Miura, K., Hirabayashi, M., Oshima, N., Koike, M., Kupiainen, K., Moteki, N., Ohata, S., Sinha, P. R., Sugiura, K., Aoki, T., Schneebeli, M., Steffen, K., Sato, A., Tsushima, A., Makarov, V., Omiya, S., Sugimoto, A., Takano, S., Nagatsuka, N., 2019c. Black Carbon and Inorganic Aerosols in Arctic Snowpack. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. doi: 10.1029/2019JD030623. [T2] [T3]
- Morimoto, S., Fujita, R., Aoki, S., Goto, D., Nakazawa, T., 2017. Long-term variations of the mole fraction and carbon isotope ratio of atmospheric methane observed at Ny-Ålesund, Svalbard from 1996 to 2013. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 69, 1380497. doi: 10.1080/16000889.2017.1380497. [T3]
- Morioka, Y., Taguchi, B., Behera, S. K., 2017. Eastward propagating decadal temperature variability in the South Atlantic and Indian Oceans. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 5611-5623. doi: 10.1002/2017JC012706. [T5]
- Morishita, J., 2019. The Arctic Five-plus-Five process on central Arctic Ocean fisheries negotiations: Reflecting the interests of Arctic and non-Arctic actors. in: Shibata, A., Zou, L., Sellheim, N., et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge. [T7]
- Morozumi, T., Shingubara, R., Murase, J., Nagai, S., Kobayashi, H., Takano, S., Tei, S., Fan, R., Maximov, T. C., Sugimoto, A., 2019. Usability of water surface reflectance for the determination of riverine dissolved methane during extreme flooding in northeastern Siberia. *Polar Science*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.01.005>. [T3]
- Moteki, N., Adachi, K., Ohata, S., Yoshida, A., Harigaya, T., Koike, M., Kondo, Y., 2017. Anthropogenic iron oxide aerosols enhance atmospheric heating. *Nature Communications*, 8, 15329. doi: 10.1038/ncomms15329. [T3]
- Moteki, N., Mori, T., Matsui, H., Ohata, S., 2019. Observational constraint of in-cloud supersaturation for simulations of aerosol rainout in atmospheric models. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2, 6. doi: 10.1038/s41612-019-0063-y. [T3]

- 茂木 信宏, 森 樹大, 松井 仁志, 大畑 祥, 2019. 降水雲の過飽和度を観測から制約する: エアロゾル空間分布の予測のために. 大気化学研究, 41, 041A003. [T3]
- Motomura, M., 2018. Perspectives of Oil and Gas Development in the Russian Arctic. in: Tynkkynen, V. P., Tabata, S., Gritsenko, D., et al. (Eds.), *Russia's Far North: The Contested Energy Frontier*, Routledge.
- Mudunkotuwa, D., De Silva, L. W. A., Yamaguchi, H., 2016. Data assimilation system to improve sea ice predictions in the Arctic Ocean using an ice-ocean coupled model. *Proceedings of the 23rd IAHR International Symposium on Ice*. [T1]
- Nagai, H., Kudo, A., Yamagata, T., Kumamoto, Y., Nishino, S., Matsuzaki, H., 2019. The 2013-15 temporal variation in the ¹²⁹I concentration in seawater in the southern Canada Basin. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 455, 305-310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.01.036>. [T4] [T6]
- Nagai, S., Akitsu, T., Saitoh, T. M., Busey, R. C., Fukuzawa, K., Honda, Y., Ichie, T., Ide, R., Ikawa, H., Iwasaki, A., Iwao, K., Kajiwara, K., Kang, S., Kim, Y., Khoon, K. L., Kononov, A. V., Kosugi, Y., Maeda, T., Mamiya, W., Matsuoka, M., Maximov, T. C., Menzel, A., Miura, T., Mizunuma, T., Morozumi, T., Motohka, T., Muraoka, H., Nagano, H., Nakai, T., Nakaji, T., Oguma, H., Ohta, T., Ono, K., Pungga, R. A. S., Petrov, R. E., Sakai, R., Schunk, C., Sekikawa, S., Shakhmatov, R., Son, Y., Sugimoto, A., Suzuki, R., Takagi, K., Takanashi, S., Tei, S., Tsuchida, S., Yamamoto, H., Yamasaki, E., Yamashita, M., Yoon, T. K., Yoshida, T., Yoshimura, M., Yoshitake, S., Wilkinson, M., Wingate, L., Nasahara, K. N., 2018a. 8 million phenological and sky images from 29 ecosystems from the Arctic to the tropics: the Phenological Eyes Network. *Ecological Research*, 33, 1091-1092. doi: [10.1007/s11284-018-1633-x](https://doi.org/10.1007/s11284-018-1633-x). [T3] [T6]
- Nagai, S., Ikeda, K., Kobayashi, H., 2018b. Simple method to detect year-to-year variability of blooming phenology of *Cerasus × yedoensis* by digital camera. *International Journal of Biometeorology*, 62, 2183-2188. doi: [10.1007/s00484-018-1620-5](https://doi.org/10.1007/s00484-018-1620-5). [T3]
- Nagai, S., Nasahara, K. N., Akitsu, T., Saitoh, T. M., Muraoka, H., 2020. Importance of the collection of abundant ground-truth data for accurate detection of spatial and temporal variability of vegetation by satellite remote sensing. *Biogeochemical cycles: ecological drivers and environmental impact*, American Geophysical Union. ISBN: 978-1-119-41330-1. [T3] [T6]
- Nagano, H., Iwata, H., 2017. Evaluating the relationship between wildfire extent and nitrogen dry deposition in a boreal forest in interior Alaska. *Polar Science*, 11, 96-104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.11.002>. [T3]
- Nagano, H., Ikawa, H., Nakai, T., Matsushima-Yashima, M., Kobayashi, H., Kim, Y., Suzuki, R., 2018. Extremely dry environment down-regulates nighttime respiration of a black spruce forest in Interior Alaska. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 297-309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.001>. [T3]
- Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Uetake, J., Shimada, R., Onuma, Y., Tanaka, S., Nakano, T., 2016. Variations in Sr and Nd Isotopic Ratios of Mineral Particles in Cryoconite in Western Greenland. *Frontiers in Earth Science*, 4. doi: [10.3389/feart.2016.00093](https://doi.org/10.3389/feart.2016.00093). [T2] [T6]
- Naito, A., Abe, Y., Matsuno, K., Nishizawa, B., Kanna, N., Sugiyama, S., Yamaguchi, A., 2019. Surface zooplankton size and taxonomic composition in Bowdoin Fjord, north-western Greenland: A comparison of ZooScan, OPC and microscopic analyses. *Polar Science*, 19, 120-129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.01.001>. [T2] [T6]
- Nakada, A., 2018a. Reindeer Herding and Environmental Change in the Tompo District, Sakha Republic. in: Hiyama, T., Takakura, H. (Eds.), *Global Warming and Human - Nature Dimension in Northern Eurasia*, Springer Singapore, 161-178. ISBN: 978-981-10-4648-3. [T7]
- Nakada, A., 2018b. Reindeer Herding of the Evenki in the Aldan District, Sakha Republic: Cace Study Research at the Summer Base. *Bulletin of the Hokkaido Museum of Northern Peoples*, 27, 15-26. [T7]
- Nakada, A., Grigorev, S., 2019. The Importance of Alaas and Influence of Its Environmental Change to Horse Herding in Churapcha District, Central Yakutia. *Bulletin of the Hokkaido Museum of Northern Peoples*, 28, 75-84. doi: [10.34330/hoppohmbulletin.28.0_75](https://doi.org/10.34330/hoppohmbulletin.28.0_75). [T7]
- 中田 篤, 2017. サハ共和国アルダン郡におけるエベンキのトナカイ牧畜. 北海道立北方民族博物館研究紀要, 26, 31-42. [T7]
- Nakada, M., Okuno, J. i., Yokoyama, Y., 2016. Total meltwater volume since the Last Glacial Maximum and viscosity structure of Earth's mantle inferred from relative sea level changes at Barbados and Bonaparte Gulf and GIA-induced J2. *Geophysical Journal International*, 204, 1237-1253. doi: [10.1093/gji/ggv520](https://doi.org/10.1093/gji/ggv520). [T2]
- Nakada, M., Okuno, J. i., 2017. Secular variations in zonal harmonics of Earth's geopotential and their implications for mantle viscosity and Antarctic melting history due to the last deglaciation. *Geophysical Journal International*, 209, 1660-1676. doi: [10.1093/gji/ggx116](https://doi.org/10.1093/gji/ggx116). [T2]
- Nakada, M., Okuno, J. i., Irie, Y., 2017. Inference of viscosity jump at 670 km depth and lower mantle viscosity structure from GIA observations. *Geophysical Journal International*, 212, 2206-2225. doi: [10.1093/gji/ggx519](https://doi.org/10.1093/gji/ggx519). [T2]
- Nakai, T., Hiyama, T., Petrov, R. E., Kotani, A., Ohta, T., Maximov, T. C., 2020. Application of an open-path eddy covariance methane flux measurement system to a larch forest in eastern Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 282-283, 107860. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107860>. [T3] [T7]
- Nakamura, A., Matsuno, K., Abe, Y., Shimada, H., Yamaguchi, A., 2017. Length-weight Relationships and Chemical Composition of the Dominant Mesozooplankton Taxa/species in the Subarctic Pacific, with Special Reference to the Effect of Lipid Accumulation in Copepoda. *Zoological Studies*, 56. doi: [10.6620/ZS.2017.56-13](https://doi.org/10.6620/ZS.2017.56-13). [T2] [T6]
- Nakamura, H., Nishii, K., Wang, L., Orsolini, Y. J., Takaya, K., 2016a. Cold-air outbreaks over East Asia associated with blocking highs: mechanisms and their interaction with the polar stratosphere. in: Volkert, H., Li, J., Grotjahn, R., et al. (Eds.), *Dynamics and Predictability of Large-Scale, High-Impact Weather and Climate Events*, Cambridge University Press, Cambridge, 225-236. ISBN: 9781107071421. [T3] [T5]

- Nakamura, T., Yamazaki, K., Honda, M., Ukita, J., Jaiser, R., Handorf, D., Dethloff, K., 2016b. On the atmospheric response experiment to a Blue Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 43, 10,394-10,402. doi: 10.1002/2016GL070526. [T3] [T5]
- Nakamura, T., Yamazaki, K., Iwamoto, K., Honda, M., Miyoshi, Y., Ogawa, Y., Tomikawa, Y., Ukita, J., 2016c. The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate. *Geophysical Research Letters*, 43, 3494-3501. doi: 10.1002/2016GL068330. [T3] [T5]
- Nakamura, T., Yamazaki, K., Sato, T., Ukita, J., 2019. Memory effects of Eurasian land processes cause enhanced cooling in response to sea ice loss. *Nature Communications*, 10, 5111. doi: 10.1038/s41467-019-13124-2. [T3] [T5]
- Nakanowatari, T., Inoue, J., Sato, K., Kikuchi, T., 2015. Summertime atmosphere–ocean preconditionings for the Bering Sea ice retreat and the following severe winters in North America. *Environmental Research Letters*, 10, 094023. doi: 10.1088/1748-9326/10/9/094023. [T1] [T4]
- Nakanowatari, T., Inoue, J., Sato, K., Bertino, L., Xie, J., Matsueda, M., Yamagami, A., Sugimura, T., Yabuki, H., Otsuka, N., 2018a. Medium-range predictability of early summer sea ice thickness distribution in the East Siberian Sea based on the TOPAZ4 ice–ocean data assimilation system. *The Cryosphere*, 12, 2005-2020. doi: 10.5194/tc-12-2005-2018. [T1] [T7] [T8]
- Nakata, H., Takahashi, A., Takano, T., Saito, A., Sakanoi, T., 2018. Observation of equatorial plasma bubbles by the airglow imager on ISS-IMAP. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5, 66. doi: 10.1186/s40645-018-0227-0. [T3]
- Nakata, K., Ohshima, K. I., Nihashi, S., 2019. Estimation of Thin-Ice Thickness and Discrimination of Ice Type From AMSR-E Passive Microwave Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57, 263-276. doi: 10.1109/TGRS.2018.2853590. [T4]
- 成田 大樹, 平譯 享, 2020. 漁業 (第 3 章) . 北極の人間と社会 : 持続的発展の可能性 , 北海道大学出版会 . [T6] [T7]
- Natsuike, M., Saito, R., Fujiwara, A., Matsuno, K., Yamaguchi, A., Shiga, N., Hirawake, T., Kikuchi, T., Nishino, S., Imai, I., 2017. Evidence of increased toxic Alexandrium tamarense dinoflagellate blooms in the eastern Bering Sea in the summers of 2004 and 2005. *PLOS ONE*, 12, e0188565. doi: 10.1371/journal.pone.0188565. [T2] [T4] [T6]
- Newman, M., Alexander, M. A., Ault, T. R., Cobb, K. M., Deser, C., Di Lorenzo, E., Mantua, N. J., Miller, A. J., Minobe, S., Nakamura, H., Schneider, N., Vimont, D. J., Phillips, A. S., Scott, J. D., Smith, C. A., 2016. The Pacific Decadal Oscillation, Revisited. *Journal of Climate*, 29, 4399-4427. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0508.1. [T3] [T5]
- Nielsson, E. T., Magnússon, B. M., 2019. China's Arctic Policy White Paper and Its Influence on the Future of Arctic Legal Developments. in: Shibata, A., Zou, L., Sellheim, N., et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge, 49-66. [T7]
- Nihashi, S., Kurtz, N. T., Markus, T., Ohshima, K. I., Tateyama, K., Toyota, T., 2018. Estimation of sea-ice thickness and volume in the Sea of Okhotsk based on ICESat data. *Annals of Glaciology*, 59, 101-111. doi: 10.1017/aog.2018.8. [T1] [T2] [T4]
- Nishino, S., Kikuchi, T., Fujiwara, A., Hirawake, T., Aoyama, M., 2016. Water mass characteristics and their temporal changes in a biological hotspot in the southern Chukchi Sea. *Biogeosciences*, 13, 2563-2578. doi: 10.5194/bg-13-2563-2016. [T4] [T6]
- Nishino, S., Kawaguchi, Y., Fujiwara, A., Shiozaki, T., Aoyama, M., Harada, N., Kikuchi, T., 2018. Biogeochemical Anatomy of a Cyclonic Warm-Core Eddy in the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 45, 11,284-11,292. doi: 10.1029/2018GL079659. [T4] [T6]
- Nishino, S., Kawaguchi, Y., Inoue, J., Yamamoto-Kawai, M., Aoyama, M., Harada, N., Kikuchi, T., 2020. Do strong winds impact water mass, nutrient, and phytoplankton distributions in the ice-free Canada Basin in the fall? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015428. doi: 10.1029/2018GL079659. [T1] [T4] [T6]
- Nishizawa, B., Matsuno, K., Labunski, E. A., Kuletz, K. J., Yamaguchi, A., Watanuki, Y., 2017. Seasonal distribution of short-tailed shearwaters and their prey in the Bering and Chukchi seas. *Biogeosciences*, 14, 203-214. doi: 10.5194/bg-14-203-2017. [T2] [T6]
- Nishizawa, B., Onishi, H., Watanuki, Y., 2019a. Seabird densities and species and hydrographic features across Amchitka Pass, Aleutian Islands. *Fisheries Science*, 85, 53-60. doi: 10.1007/s12562-018-1259-5. [T2] [T6]
- Nishizawa, B., Kanna, N., Abe, Y., Ohashi, Y., Sakakibara, D., Asaji, I., Sugiyama, S., Yamaguchi, A., Watanuki, Y., 2019b. Contrasting assemblages of seabirds in the subglacial meltwater plume and oceanic water of Bowdoin Fjord, northwestern Greenland. *ICES Journal of Marine Science*. doi: 10.1093/icesjms/fsz213. [T2] [T6]
- Nitta, T., Yoshimura, K., Abe-Ouchi, A., 2017. Impact of Arctic Wetlands on the Climate System: Model Sensitivity Simulations with the MIROC5 AGCM and a Snow-Fed Wetland Scheme. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 2923-2936. doi: 10.1175/JHM-D-16-0105.1. [T2] [T5]
- Niwano, M., Aoki, T., Hashimoto, A., Matoba, S., Yamaguchi, S., Tanikawa, T., Fujita, K., Tsushima, A., Iizuka, Y., Shimada, R., Hori, M., 2018. NHM–SMAP: spatially and temporally high-resolution nonhydrostatic atmospheric model coupled with detailed snow process model for Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, 12, 635-655. doi: 10.5194/tc-12-635-2018. [T2] [T3] [T6]
- Noguchi, H., Kondo, S., 2019. Hunting tools and prestige in Northern Athabaskan culture: Types, distribution, usage, and prestige of Athabaskan daggers. *Polar Science*, 21, 85-100. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.03.003. [T7]
- Nomura, D., Granskog, M. A., Fransson, A., Chierici, M., Silyakova, A., Ohshima, K. I., Cohen, L., Delille, B., Hudson, S. R., Dieckmann, G. S., 2018. CO₂ flux over young and snow-covered Arctic pack ice in winter and spring. *Biogeosciences*, 15, 3331-3343. doi: 10.5194/bg-15-3331-2018. [T1] [T2] [T4] [T6]
- 野村 大樹, 漢那 直也, 大木 淳之, 2019. 氷河と海氷の融解現象が北極海表層の物質循環過程に与える影響 . 地球化学 . [T1] [T2] [T6]
- Nose, T., Webb, A., Waseda, T., Inoue, J., Sato, K., 2018. Predictability of storm wave heights in the ice-free Beaufort Sea. *Ocean Dynamics*, 68, 1383-1402. doi: 10.1007/s10236-018-1194-0. [T1]
- Nowicki, S. M. J., Payne, A., Larour, E., Seroussi, H., Goelzer, H., Lipscomb, W., Gregory, J., Abe-Ouchi, A., Shepherd, A., 2016. Ice Sheet Model Intercomparison Project (ISMIP6) contribution to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 4521-4545. doi: 10.5194/gmd-

- 9-4521-2016. [T2] [T5]
- Ogawa, F., Keenlyside, N., Gao, Y., Koenigk, T., Yang, S., Suo, L., Wang, T., Gastineau, G., Nakamura, T., Cheung, H. N., Omrani, N-E., Ukita, J., Semenov, V., 2018. Evaluating Impacts of Recent Arctic Sea Ice Loss on the Northern Hemisphere Winter Climate Change. *Geophysical Research Letters*, 45, 3255-3263. doi: 10.1002/2017GL076502. [T3] [T5]
- Ogi, M., Rysgaard, S., Barber, D. G., Nakamura, T., Taguchi, B., 2016. Is summer sea surface temperature over the Arctic Ocean connected to winter air temperature over North America? *Climate Research*, 70, 19-27. [T5]
- Ohashi, Y., Iida, T., Sugiyama, S., Aoki, S., 2016. Spatial and temporal variations in high turbidity surface water off the Thule region, north-western Greenland. *Polar Science*, 10, 270-277. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.07.003>. [T2]
- Ohata, S., Moteki, N., Mori, T., Koike, M., Kondo, Y., 2016a. A key process controlling the wet removal of aerosols: new observational evidence. *Scientific Reports*, 6, 34113. doi: 10.1038/srep34113. [T3]
- Ohata, S., Schwarz, J. P., Moteki, N., Koike, M., Takami, A., Kondo, Y., 2016b. Hygroscopicity of materials internally mixed with black carbon measured in Tokyo. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 362-381. doi: 10.1002/2015JD024153. [T3]
- Ohata, S., Yoshida, A., Moteki, N., Adachi, K., Takahashi, Y., Kurisu, M., Koike, M., 2018. Abundance of Light-Absorbing Anthropogenic Iron Oxide Aerosols in the Urban Atmosphere and Their Emission Sources. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 8115-8134. doi: 10.1029/2018JD028363. [T3]
- Ohata, S., Kondo, Y., Moteki, N., Mori, T., Yoshida, A., Sinha, P. R., Koike, M., 2019. Accuracy of black carbon measurements by a filter-based absorption photometer with a heated inlet. *Aerosol Science and Technology*, 53, 1079-1091. doi: 10.1080/02786826.2019.1627283. [T3]
- 大西 富士夫, 2019a. 終わりの始まり? 大国間競争時代の北極国際政治. *ユーラシア研究*, 60, 22-26. [T7]
- 大西 富士夫, 2020. 国際関係 (第7章). *北極の人間と社会: 持続的発展の可能性*, 北海道大学出版会. [T7]
- Ohshima, K. I., Nihashi, S., Iwamoto, K., 2016. Global view of sea-ice production in polynyas and its linkage to dense/bottom water formation. *Geoscience Letters*, 3, 13. doi: 10.1186/s40562-016-0045-4. [T4]
- 太田 岳史, 檜山 哲哉, 小谷 亜由美, 山崎 剛, Maximov, T. C., 2016. 東シベリア・カラマツ林における水・エネルギー・炭素循環- GAME, CREST, RIHN の成果より-. *水文・水資源学会誌*, 29, 294-312. doi: 10.3178/jjshwr.29.294. [T3] [T7]
- Okajima, S., Nakamura, H., Nishii, K., Miyasaka, T., Kuwano-Yoshida, A., Taguchi, B., Mori, M., Kosaka, Y., 2017. Mechanisms for the Maintenance of the Wintertime Basin-Scale Atmospheric Response to Decadal SST Variability in the North Pacific Subarctic Frontal Zone. *Journal of Climate*, 31, 297-315. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0200.1. [T3] [T5]
- Okamoto, H., Sato, K., Hagihara, Y., Ishimoto, H., Borovoi, A., Konoshonkin, A., Kustova, N., 2016a. Evaluation of Retrieval Algorithms for Ice Microphysics Using CALIPSO/CloudSat and Earthcare. *EPJ Web of Conferences*, 119. [T3]
- Okamoto, H., Sato, K., Makino, T., Nishizawa, T., Sugimoto, N., Jin, Y., Shimizu, A., 2016b. Depolarization Ratio of Clouds Measured by Multiple-Field of view Multiple Scattering Polarization Lidar. *EPJ Web of Conferences*, 119. [T3]
- Okamoto, H., Sato, K., Nishizawa, T., Sugimoto, N., Makino, T., Jin, Y., Shimizu, A., Takano, T., Fujikawa, M., 2016c. Development of a multiple-field-of-view multiple-scattering polarization lidar: comparison with cloud radar. *Optics Express*, 24, 30053-30067. doi: 10.1364/OE.24.030053. [T3]
- Okamoto, H., Sato, K., Hagihara, Y., Ishimoto, H., 2017a. Relationship between ice supersaturation and ice microphysics inferred from CloudSat, CALIPSO and AIRS. *AIP Conference Proceedings*, 1810, 070006. doi: 10.1063/1.4975527. [T3]
- Okamoto, H., Sato, K., Nishizawa, T., Sugimoto, N., Jin, Y., 2017b. Development of multiple scattering polarization lidar to observe depolarization ratio of optically thick low level clouds. *AIP Conference Proceedings*, 1810, 050002. doi: 10.1063/1.4975514. [T3]
- Okamoto, H., Sato, K., Ishii, S., Aoki, M., Nishizawa, T., Sugimoto, N., Jin, Y., Ohno, Y., Horie, H., Fujikawa, M., 2018a. Next-generation-synergetic-observation-system for the unified analysis of CALIPSO, ADM-Aeolus and EarthCARE-ATLID. 19th Coherent Laser Radar Conference, CLRC 2018. [T3]
- Okamoto, H., Sato, K., Katagiri, S., Fujikawa, M., Nishizawa, T., Sugimoto, N., Jin, Y., Shimizu, A., Ishimoto, H., 2018b. Application of multiple-scattering polarization lidar for the evaluation of space-borne lidar algorithms. *EPJ Web of Conferences*, 176. [T3]
- Okamoto, H., Sato, K., 2019. Analyzing Cloud Physical Properties with the CloudSat, CALIPSO, and EarthCARE satellites. *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, 39, 197-206. doi: 10.11440/rssj.39.197.
- Okamoto, H., Sato, K., Borovoi, A., Ishimoto, H., Masuda, K., Konoshonkin, A., Kustova, N., 2019. Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectral-resolution polarization lidar. *Optics Express*, 27, 36587-36600. doi: 10.1364/OE.27.036587. [T3]
- 岡本 創, 2016. 氷粒子・ダスト・惑星間塵の非球形散乱特性. *エアロゾル研究*, 31, 176-184. doi: 10.11203/jar.31.176. [T3]
- Okazaki, A., Yoshimura, K., 2017. Development and evaluation of a system of proxy data assimilation for paleoclimate reconstruction. *Climate of the Past*, 13, 379-393. doi: 10.5194/cp-13-379-2017. [T5]
- 奥野 淳一, 2018a. 南極氷床変動と氷河性地殻均衡. *低温科学*, 76, 205-225. doi: 10.14943/lowtemsci.76.205. [T2]
- Omrani, N-E., Ogawa, F., Nakamura, H., Keenlyside, N., Lubis, S. W., Matthes, K., 2019. Key Role of the Ocean Western Boundary currents in shaping the Northern Hemisphere climate. *Scientific Reports*, 9, 3014. doi: 10.1038/s41598-019-39392-y. [T3] [T5]
- Ono, J., Inoue, J., Yamazaki, A., Dethloff, K., Yamaguchi, H., 2016. The impact of radiosonde data on forecasting sea-ice distribution along the Northern Sea Route during an extremely developed cyclone. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, 292-303. doi: 10.1002/2015ms000552. [T1] [T5]
- Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y., Nodzu, M. I., Ishii, M., 2018. Mechanisms influencing seasonal to inter-annual prediction skill of sea ice

- extent in the Arctic Ocean in MIROC. *The Cryosphere*, 12, 675-683. doi: 10.5194/tc-12-675-2018. [T1] [T5]
- Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y., 2019a. Mechanisms for and Predictability of a Drastic Reduction in the Arctic Sea Ice: APPOSITE Data with Climate Model MIROC. *Journal of Climate*, 32, 1361-1380. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0195.1. [T1] [T5]
- Onodera, J., Watanabe, E., Nishino, S., Harada, N., 2016. Distribution and vertical fluxes of silicoflagellates, ebridians, and the endoskeletal dinoflagellate *Actiniscus* in the western Arctic Ocean. *Polar Biology*, 39, 327-341. doi: 10.1007/s00300-015-1784-y. [T4] [T6]
- Onuma, Y., Takeuchi, N., Tanaka, S., Nagatsuka, N., Niwano, M., Aoki, T., 2018. Observations and modelling of algal growth on a snow-pack in north-western Greenland. *The Cryosphere*, 12, 2147-2158. doi: 10.5194/tc-12-2147-2018. [T2] [T3]
- 大沼 友貴彦, 金 炯俊, 芳村 圭, 新田 友子, 大石 龍太, 高田 久美子, 2018. 陸域モデル国際相互比較実験 (LS3MIP) を想定した MATSIRO による 20 世紀再現実験. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 74, 43-48. [T5]
- Ooki, A., Kawasaki, S., Kuma, K., Nishino, S., Kikuchi, T., 2016. Concentration maxima of volatile organic iodine compounds in the bottom layer water and the cold, dense water over the Chukchi Sea in the western Arctic Ocean: a possibility of production related to the degradation of organic matter. *Biogeosciences*, 13, 133-145. doi: 10.5194/bg-13-133-2016. [T4] [T6]
- Oppel, S., Bolton, M., Carneiro, A. P. B., Dias, M. P., Green, J. A., Masello, J. F., Phillips, R. A., Owen, E., Quillfeldt, P., Beard, A., Bertrand, S., Blackburn, J., Boersma, P. D., Borges, A., Broderick, A. C., Catry, P., Cleasby, I., Clingham, E., Creuwels, J., Crofts, S., Cuthbert, R. J., Dallmeijer, H., Davies, D., Davies, R., Dilley, B. J., Dinis, H. A., Dossa, J., Dunn, M. J., Efe, M. A., Fayet, A. L., Figueiredo, L., Frederico, A. P., Gjerdrum, C., Godley, B. J., Granadeiro, J. P., Guilford, T., Hamer, K. C., Hazin, C., Hedd, A., Henry, L., Hernández-Montero, M., Hinke, J., Kokubun, N., Leat, E., Tranquilla, L. M., Metzger, B., Militão, T., Montrond, G., Mullié, W., Padget, O., Pearmain, E. J., Pollet, I. L., Pütz, K., Quintana, F., Ratcliffe, N., Ronconi, R. A., Ryan, P. G., Saldanha, S., Shoji, A., Sim, J., Small, C., Soanes, L., Takahashi, A., Trathan, P., Trivelpiece, W., Veen, J., Wakefield, E., Weber, N., Weber, S., Zango, L., Daunt, F., Ito, M., Harris, M. P., Newell, M. A., Wanless, S., González-Solis, J., Croxall, J., 2018. Spatial scales of marine conservation management for breeding seabirds. *Marine Policy*, 98, 37-46. doi: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.08.024. [T6]
- Orben, R. A., Kokubun, N., Fleishman, A. B., Will, A. P., Yamamoto, T., Shaffer, S. A., Paredes, R., Takahashi, A., Kitaysky, A. S., 2018. Persistent annual migration patterns of a specialist seabird. *Marine Ecology Progress Series*, 593, 231-245. [T6]
- Orsi, A. J., Kawamura, K., Fegyveresi, J. M., Headly, M. A., Alley, R. B., Severinghaus, J. P., 2015. Differentiating bubble-free layers from melt layers in ice cores using noble gases. *Journal of Glaciology*, 61, 585-594. doi: 10.3189/2015JoG14J237. [T2]
- Orsi, A. J., Kawamura, K., Masson-Delmotte, V., Fettweis, X., Box, J. E., Dahl-Jensen, D., Clow, G. D., Landais, A., Severinghaus, J. P., 2017. The recent warming trend in North Greenland. *Geophysical Research Letters*, 44, 6235-6243. doi: 10.1002/2016GL072212. [T2]
- Orsolini, Y. J., Nishij, K., Nakamura, H., 2018. Duration and decay of Arctic stratospheric vortex events in the ECMWF seasonal forecast model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 2876-2888. doi: 10.1002/qj.3417. [T3] [T5]
- Oshima, K., Yamazaki, K., 2017. Atmospheric hydrological cycles in the Arctic and Antarctic during the past four decades. *Czech Polar Reports*, 7, 169-180. doi: 10.5817/CPR2017-2-17. [T4] [T5]
- Oshima, K., Ogata, K., Park, H., Tachibana, Y., 2018. Influence of atmospheric internal variability on the long-term Siberian water cycle during the past 2 centuries. *Earth System Dynamics*, 9, 497-506. doi: 10.5194/esd-9-497-2018. [T4] [T5]
- Otsuka, N., Tamura, T., Furuichi, M., 2018a. Northern Sea Route (NSR) shipping, current status, and feasibility. in: Tynkkynen, V. P., Ta-bata, S., Gritsenko, D., et al. (Eds.), *Russia's Far North: The Contested Energy Frontier*, Routledge. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 大西 富士夫, 泉山 耕, 2017. 北極海航路による海上輸送の変遷と特徴. *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, 73, I_25-I_30. doi: 10.2208/jscejoe.73.I_25. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, Li, X., 泉山 耕, 2018. 北極海航路における海氷条件と航行可能速度の関係に関する基礎的研究. *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, 74, I_25-I_30. doi: 10.2208/jscejoe.74.I_25. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2020. 北極海航路 (第 1 章). *北極の人間と社会: 持続的発展の可能性*, 北海道大学出版会. [T1] [T7]
- Oyabu, I., Matoba, S., Yamasaki, T., Kadota, M., Iizuka, Y., 2016. Seasonal variations in the major chemical species of snow at the South East Dome in Greenland. *Polar Science*, 10, 36-42. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.01.003. [T2]
- Ozeki, T., Shiga, T., Sawamura, J., Yashiro, Y., Adachi, S., Yamaguchi, H., 2016. Development of Sea Spray Meters and an Analysis of Sea Spray Characteristics in Large Vessels. *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece. [T1]
- Ozeki, T., Toda, S., Yamaguchi, H., 2018. An Investigation on the Feature of Seawater Spray Impinging on the R/V Mirai. *The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Sapporo, Japan. [T1]
- Paasche, Ø., Olsen, A., Årthun, M., Anderson, L. G., Wängberg, S-Å., Ashjian, C. J., Grebmeier, J. M., Kikuchi, T., Nishino, S., Yasunaka, S., Kang, S-H., Cho, K-H., Azetsu-Scott, K., Williams, W. J., Carmack, E., Torres-Valdés, S., Tyrrell, T., Edelvang, K., He, J., Kassens, H. M., 2019. Addressing Arctic challenges requires a synoptic ocean survey. *Eos*, 100. doi: 10.1029/2019EO136200. [T4] [T6]
- Park, H., Kim, Y., Kimball, J. S., 2016a. Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. *Remote Sensing of Environment*, 175, 349-358. doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.046. [T4]
- Park, H., Yoshikawa, Y., Oshima, K., Kim, Y., Ngo-Duc, T., Kimball, J. S., Yang, D., 2016b. Quantification of Warming Climate-Induced Changes in Terrestrial Arctic River Ice Thickness and Phenology. *Journal of Climate*, 29, 1733-1754. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0569.1. [T4]
- Park, H., Yoshikawa, Y., Yang, D., Oshima, K., 2017. Warming Water in Arctic Terrestrial Rivers under Climate Change. *Journal of Hydro-meteorology*, 18, 1983-1995. doi: 10.1175/JHM-D-16-0260.1. [T4]
- Park, H., Launiainen, S., Konstantinov, P. Y., Iijima, Y., Fedorov, A. N., 2018. Modeling the Effect of Moss Cover on Soil Temperature

- and Carbon Fluxes at a Tundra Site in Northeastern Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 3028-3044. doi: 10.1029/2018JG004491. [T4] [T7]
- Parvin, F., Seki, O., Fujita, K., Iizuka, Y., Matoba, S., Ando, T., Sawada, K., 2018. Assessment for paleoclimatic utility of biomass burning tracers in SE-Dome ice core, Greenland. *Atmospheric Environment*, 196, 86-94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.012>. [T2]
- Past Interglacials Working Group of PAGES, Berger, A., Crucifix, M., Hodell, D. A., Mangili, C., McManus, J. F., Otto-Bliesner, B., Pol, K., Raynaud, D., Skinner, L. C., Tzedakis, P. C., Wolff, E. W., Yin, Q. Z., Abe-Ouchi, A., Barbante, C., Brovkin, V., Cacho, I., Capron, E., Ferretti, P., Ganopolski, A., Grimalt, J. O., Hönisch, B., Kawamura, K., Landais, A., Margari, V., Martrat, B., Masson-Delmotte, V., Mokeddem, Z., Parrenin, F., Prokopenko, A. A., Rashid, H., Schulz, M., Vazquez Riveiros, N., 2016. Interglacials of the last 800,000 years. *Reviews of Geophysics*, 54, 162-219. doi: 10.1002/2015RG000482. [T2] [T5]
- Patra, P. K., Saeki, T., Dlugokencky, E. J., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Aoki, S., Morimoto, S., Kort, E. A., Crotwell, A., Ravi Kumar, K., Nakazawa, T., 2016. Regional Methane Emission Estimation Based on Observed Atmospheric Concentrations (2002-2012). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 94, 91-113. doi: 10.2151/jmsj.2016-006. [T3]
- Patra, P. K., Takigawa, M., Watanabe, S., Chandra, N., Ishijima, K., Yamashita, Y., 2018. Improved Chemical Tracer Simulation by MI-ROC4.0-based Atmospheric Chemistry-Transport Model (MIROC4-ACTM). *SOLA*, 14, 91-96. doi: 10.2151/sola.2018-016. [T3]
- Petty, A. A., Stroeve, J. C., Holland, P. R., Boisvert, L. N., Bliss, A. C., Kimura, N., Meier, W. N., 2018. The Arctic sea ice cover of 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows. *The Cryosphere*, 12, 433-452. doi: 10.5194/tc-12-433-2018. [T1] [T5]
- Pickart, R. S., Nobre, C., Lin, P., Arrigo, K. R., Ashjian, C. J., Berchok, C., Cooper, L. W., Grebmeier, J. M., Hartwell, I., He, J., Itoh, M., Kikuchi, T., Nishino, S., Vagle, S., 2019. Seasonal to mesoscale variability of water masses and atmospheric conditions in Barrow Canyon, Chukchi Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 162, 32-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.02.003>. [T4] [T6]
- Podolskiy, E. A., Sugiyama, S., Funk, M., Walter, F., Genco, R., Tsutaki, S., Minowa, M., Ripepe, M., 2016. Tide-modulated ice flow variations drive seismicity near the calving front of Bowdoin Glacier, Greenland. *Geophysical Research Letters*, 43, 2036-2044. doi: 10.1002/2016GL067743. [T2] [T6]
- Podolskiy, E. A., Walter, F., 2016. Cryoseismology. *Reviews of Geophysics*, 54, 708-758. doi: 10.1002/2016RG000526. [T2]
- Preußner, A., Ohshima, K. I., Iwamoto, K., Willmes, S., Heinemann, G., 2019. Retrieval of Wintertime Sea Ice Production in Arctic Polynyas Using Thermal Infrared and Passive Microwave Remote Sensing Data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 5503-5528. doi: 10.1029/2019JC014976. [T4]
- Proshutinsky, A., Krishfield, R., Toole, J., Timmermans, M-L., Williams, W., Zimmerman, S., Yamamoto-Kawai, M., Armitage, T. W. K., Dukhovskoy, D., Golubeva, E., Manucharyan, G. E., Platov, G., Watanabe, E., Kikuchi, T., Nishino, S., Itoh, M., Kang, S-H., Cho, K-H., Tateyama, K., Zhao, J., 2019. Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003-2018. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124. doi: 10.1029/2019jc015281. [T1] [T2] [T4] [T6]
- Reddington, C. L., Carslaw, K. S., Stier, P., Schutgens, N., Coe, H., Liu, D., Allan, J., Browse, J., Pringle, K. J., Lee, L. A., Yoshioka, M., Johnson, J. S., Regayre, L. A., Spracklen, D. V., Mann, G. W., Clarke, A., Hermann, M., Henning, S., Wex, H., Kristensen, T. B., Leaitch, W. R., Pöschl, U., Rose, D., Andreae, M. O., Schmale, J., Kondo, Y., Oshima, N., Schwarz, J. P., Nenes, A., Anderson, B., Roberts, G. C., Snider, J. R., Leck, C., Quinn, P. K., Chi, X., Ding, A., Jimenez, J. L., Zhang, Q., 2017. The Global Aerosol Synthesis and Science Project (GASSP): Measurements and Modeling to Reduce Uncertainty. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 1857-1877. doi: 10.1175/BAMS-D-15-00317.1. [T3]
- Rezvanbehbahani, S., Stearns, L. A., van der Veen, C. J., Oswald, G. K. A., Greve, R., 2019. Constraining the geothermal heat flux in Greenland at regions of radar-detected basal water. *Journal of Glaciology*, 1-12. doi: 10.1017/jog.2019.79. [T2]
- Romanowsky, E., Handorf, D., Jaiser, R., Wohltmann, I., Dorn, W., Ukita, J., Cohen, J., Dethloff, K., Rex, M., 2019. The role of stratospheric ozone for Arctic-midlatitude linkages. *Scientific Reports*, 9, 7962. doi: 10.1038/s41598-019-43823-1. [T3] [T5]
- Roukaerts, A., Nomura, D., Deman, F., Hattori, H., Dehairs, F., Fripiat, F., 2019. The effect of melting treatments on the assessment of biomass and nutrients in sea ice (Saroma-ko lagoon, Hokkaido, Japan). *Polar Biology*, 42, 347-356. doi: 10.1007/s00300-018-2426-y. [T1] [T2] [T6]
- Rückamp, M., Greve, R., Humbert, A., 2018. Comparative simulations of the evolution of the Greenland ice sheet under simplified Paris Agreement scenarios with the models SICOPOLIS and ISSM. *Polar Science*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.12.003>. [T2]
- Sabrekov, A. F., Filippov, I. V., Glagolev, M. V., Terent'eva, I. E., Il'yasov, D. V., Kotsyurbenko, O. R., Maksyutov, S. S., 2016a. Methane emission from West Siberian forest-steppe and subtaiga reed fens. *Russian Meteorology and Hydrology*, 41, 37-42. doi: 10.3103/S1068373916010052. [T3]
- Sabrekov, A. F., Filippov, I. V., Terent'eva, I. E., Glagolev, M. V., Il'yasov, D. V., Smolentsev, B. A., Maksyutov, S. S., 2016b. The spatial variability of methane emission from subtaiga and forest-steppe grass-moss fens of Western Siberia. *Biology Bulletin*, 43, 162-168. doi: 10.1134/S1062359016020060. [T3]
- Sabrekov, A. F., Runkle, B. R. K., Glagolev, M. V., Terent'eva, I. E., Stepanenko, V. M., Kotsyurbenko, O. R., Maksyutov, S. S., Pokrovsky, O. S., 2017. Variability in methane emissions from West Siberia's shallow boreal lakes on a regional scale and its environmental controls. *Biogeosciences*, 14, 3715-3742. doi: 10.5194/bg-14-3715-2017. [T3]
- Saito, F., Abe-Ouchi, A., Takahashi, K., Blatter, H., 2016a. SeaRISE experiments revisited: potential sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, 10, 43-63. doi: 10.5194/tc-10-43-2016. [T2] [T5]

- Saito, H., [Iijima, Y.](#), Basharin, I. N., Fedorov, N. A., Kunitsky, V. V., 2018a. Thermokarst Development Detected from High-Definition Topographic Data in Central Yakutia. *Remote Sensing*, 10. doi: 10.3390/rs10101579. [T4] [T7]
- Saito, J., [Sugiyama, S.](#), [Tsutaki, S.](#), Sawagaki, T., 2016b. Surface elevation change on ice caps in the Qaanaaq region, northwestern Greenland. *Polar Science*, 10, 239-248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.05.002>. [T2] [T6]
- [Saito, K.](#), [Iwahana, G.](#), Ikawa, H., Nagano, H., Busey, R. C., 2018b. Links between annual surface temperature variation and land cover heterogeneity for a boreal forest as characterized by continuous, fibre-optic DTS monitoring. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 7, 223-234. doi: 10.5194/gi-7-223-2018. [T3]
- [斉藤 和之](#), [森 淳子](#), [町屋 広和](#), [宮崎 真](#), [伊勢 武史](#), [末吉 哲雄](#), [山崎 剛](#), [飯島 慈裕](#), [伊川 浩樹](#), [市井 和仁](#), [伊藤 昭彦](#), [大石 龍太](#), [太田 岳史](#), [堅田 元喜](#), [小谷 亜由美](#), [佐々井 崇博](#), [佐藤 篤司](#), [佐藤 永](#), [杉本 敦子](#), [鈴木 力英](#), [田中 克典](#), [新田 友子](#), [庭野 匡思](#), [Burke, E.](#), [朴 昊澤](#), [山口 悟](#), 2018. 北極陸域モデル相互比較 GTMIP の熱・水収支解析 (気象水文特集). *雪氷*, 80, 159-174. [T2] [T3] [T4] [T5] [T7]
- [Sakai, T.](#), [Matsunaga, T.](#), [Maksyutov, S. S.](#), [Gotovtsev, S.](#), [Gagarin, L.](#), [Hiyama, T.](#), [Yamaguchi, Y.](#), 2016. Climate-Induced Extreme Hydrologic Events in the Arctic. *Remote Sensing*, 8. doi: 10.3390/rs8110971. [T3] [T7]
- [Sakakibara, D.](#), [Sugiyama, S.](#), 2018. Ice front and flow speed variations of marine-terminating outlet glaciers along the coast of Prudhoe Land, northwestern Greenland. *Journal of Glaciology*, 64, 300-310. doi: 10.1017/jog.2018.20. [T2]
- [Sakakibara, D.](#), [Sugiyama, S.](#), 2019. Seasonal ice-speed variations in 10 marine-terminating outlet glaciers along the coast of Prudhoe Land, northwestern Greenland. *Journal of Glaciology*, 1-10. doi: 10.1017/jog.2019.81. [T2]
- [Saruya, T.](#), [Nakajima, K.](#), [Takata, M.](#), [Homma, T.](#), [Azuma, N.](#), [Goto-Azuma, K.](#), 2019. Effects of microparticles on deformation and microstructural evolution of fine-grained ice. *Journal of Glaciology*, 65, 531-541. doi: 10.1017/jog.2019.29. [T2] [T3]
- [Sato, H.](#), [Kobayashi, H.](#), [Iwahana, G.](#), [Ohta, T.](#), 2016a. Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends. *Ecology and Evolution*, 6, 5690-5704. doi: 10.1002/ece3.2285. [T3]
- [Sato, H.](#), [Kobayashi, H.](#), 2018. Topography Controls the Abundance of Siberian Larch Forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 106-116. doi: 10.1002/2017JG004096. [T3]
- [佐藤 永](#), [伊藤 昭彦](#), [橋本 昌司](#), 2018. 全球スケールの陸域物質動態シミュレーション. *日本土壤肥科学雑誌*, 89, 152-160. doi: 10.20710/dojo.89.2_152. [T3]
- [Sato, K.](#), [Okamoto, H.](#), [Ishimoto, H.](#), 2016b. Modeling Lidar Multiple Scattering. *EPJ Web of Conferences*, 119. doi: 10.1051/epj-conf/201611921005. [T3]
- [Sato, K.](#), [Inoue, J.](#), [Yamazaki, A.](#), [Kim, J-H.](#), [Maturilli, M.](#), [Dethloff, K.](#), [Hudson, S. R.](#), [Granskog, M. A.](#), 2017. Improved forecasts of winter weather extremes over midlatitudes with extra Arctic observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 775-787. doi: 10.1002/2016JC012197. [T1]
- [Sato, K.](#), [Okamoto, H.](#), 2017. Information content of cloud physical properties derived from satellite active remote sensors. *AIP Conference Proceedings*, 1810, 050003. doi: 10.1063/1.4975515. [T3]
- [Sato, K.](#), [Inoue, J.](#), 2018. Comparison of Arctic sea ice thickness and snow depth estimates from CFSR with in situ observations. *Climate Dynamics*, 50, 289-301. doi: 10.1007/s00382-017-3607-z. [T1]
- [Sato, K.](#), [Inoue, J.](#), [Yamazaki, A.](#), [Kim, J-H.](#), [Makshtas, A.](#), [Kustov, V.](#), [Maturilli, M.](#), [Dethloff, K.](#), 2018a. Impact on predictability of tropical and mid-latitude cyclones by extra Arctic observations. *Scientific Reports* 8, 12104. doi: 10.1038/s41598-018-30594-4. [T1]
- [Sato, K.](#), [Okamoto, H.](#), [Ishimoto, H.](#), 2018b. Physical model for multiple scattered space-borne lidar returns from clouds. *Optics Express*, 26, A301-A319. doi: 10.1364/OE.26.00A301. [T3]
- [Sato, K.](#), [Okamoto, H.](#), [Katagiri, S.](#), [Shiobara, M.](#), [Yabuki, M.](#), [Takano, T.](#), 2018c. Active sensor synergy for arctic cloud microphysics. *EPJ Web of Conferences* 176. [T3]
- [Sato, K.](#), [Inoue, J.](#), 2019. Relationship between transpolar flights over the Arctic and upper atmospheric circulation. *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 3, 1-6. [T1]
- [Sato, K.](#), [Okamoto, H.](#), [Ishimoto, H.](#), 2019. Modeling the depolarization of space-borne lidar signals. *Optics Express*, 27, A117-A132. doi: 10.1364/OE.27.00A117. [T3]
- [Sato, K.](#), [Okamoto, H.](#), 2020. Application of single and multiple-scattering theories to analysis of space-borne cloud radar and lidar data. *Springer Series in Light Scattering*.
- [Sato, T.](#), [Nakamura, T.](#), 2019. Intensification of hot Eurasian summers by climate change and land-atmosphere interactions. *Scientific Reports*, 9, 10866. doi: 10.1038/s41598-019-47291-5. [T5]
- [Saunavaara, J.](#), 2017a. The Changing Arctic & the Development of Hokkaido. *Arctic Yearbook*, 326-338. [T7]
- [Saunavaara, J.](#), 2017b. Commercial utilization of the Northern Sea Route and regional development policy – Hokkaido as a case study. in: [Kari, A.](#), [Matti, E.](#) (Eds.), *The Barents and the Baltic Sea Region: Contacts, Influences and Social Change*, *Pohjois-Suomen Historiallinen Yhdistys*, 271-286. ISBN: 978-952-9888-60-3. [T7]
- [Saunavaara, J.](#), 2018. Arctic subsea communication cables and the regional development of northern peripheries. *Arctic and North*, 32, 63-81. doi: 10.17238/issn2221-2698.2018.32.63. [T7]
- [Saunavaara, J.](#), 2019a. Connecting the Arctic while installing submarine data cables between East Asia, North America and Europe? in: [Hossain, K. M. S.](#), [Zojer, G.](#) (Eds.), *Digitalization and Human Security: A Multi-Disciplinary Approach to Cybersecurity in the European High North*, Springer. [T7]
- [Saunavaara, J.](#), 2019b. 北方開発 - 北海道の地域開発政策モデルとしてのフィンランドとオウル地方 (第7章). [Saunavaara, J.](#), [鈴木 大路郎](#) (編), *日本とフィンランドの出会いとつながり*, 大学教育出版, 97-107. ISBN: 9784866920351. [T7]

- [Saunavaara, J.](#), 2019c. 東アジア・欧州・北米を繋げる北極海：光海底ケーブルプロジェクトの過去と未来 . ユーラシア研究 , 60, 16-21. [T7]
- [Saunois, M.](#), [Bousquet, P.](#), [Poulter, B.](#), [Peregon, A.](#), [Ciais, P.](#), [Canadell, J. G.](#), [Dlugokencky, E. J.](#), [Etiope, G.](#), [Bastviken, D.](#), [Houweling, S.](#), [Janssens-Maenhout, G.](#), [Tubiello, F. N.](#), [Castaldi, S.](#), [Jackson, R. B.](#), [Alexe, M.](#), [Arora, V. K.](#), [Beerling, D. J.](#), [Bergamaschi, P.](#), [Blake, D. R.](#), [Brailsford, G.](#), [Bruhwiler, L.](#), [Crevoisier, C.](#), [Crill, P.](#), [Covey, K.](#), [Frankenberg, C.](#), [Gedney, N.](#), [Höglund-Isaksson, L.](#), [Ishizawa, M.](#), [Ito, A.](#), [Joos, F.](#), [Kim, H. S.](#), [Kleinen, T.](#), [Krummel, P.](#), [Lamarque, J. F.](#), [Langenfelds, R.](#), [Locatelli, R.](#), [Machida, T.](#), [Maksyutov, S. S.](#), [Melton, J. R.](#), [Morino, I.](#), [Naik, V.](#), [O'Doherty, S.](#), [Parmentier, F. J. W.](#), [Patra, P. K.](#), [Peng, C.](#), [Peng, S.](#), [Peters, G. P.](#), [Pison, I.](#), [Prinn, R.](#), [Ramonet, M.](#), [Riley, W. J.](#), [Saito, M.](#), [Santini, M.](#), [Schroeder, R.](#), [Simpson, I. J.](#), [Spahni, R.](#), [Takizawa, A.](#), [Thornton, B. F.](#), [Tian, H.](#), [Tohjima, Y.](#), [Viovy, N.](#), [Voulgarakis, A.](#), [Weiss, R.](#), [Wilton, D. J.](#), [Wiltshire, A.](#), [Worthy, D.](#), [Wunch, D.](#), [Xu, X.](#), [Yoshida, Y.](#), [Zhang, B.](#), [Zhang, Z.](#), [Zhu, Q.](#), 2017. Variability and quasi-decadal changes in the methane budget over the period 2000–2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 11135-11161. doi: 10.5194/acp-17-11135-2017. [T3] [T4]
- [Sawa, Y.](#), [Tamura, C.](#), [Ikeuchi, T.](#), [Fujii, K.](#), [Ishioroshi, A.](#), [Shimada, T.](#), [Ward, D.](#), 2019a. A leg-hold noose capture method for Brent Geese *Branta bernicla* at staging or wintering sites. *Wildfowl*, 69, 230-241. [T6]
- [Sawa, Y.](#), [Tamura, C.](#), [Ikeuchi, T.](#), [Shimada, T.](#), [Fujii, K.](#), [Ishioroshi, A.](#), [Tatsuzawa, S.](#), [Ward, D.](#), 2019b. Connectivity of Autumn staging Brent Geese *Branta bernicla* at Notsuke Bay with Wintering Sites in Japan. *Ornithological Science*. [T6] [T7]
- [Schacht, J.](#), [Heinold, B.](#), [Quaas, J.](#), [Backman, J.](#), [Cherian, R.](#), [Ehrlich, A.](#), [Herber, A.](#), [Huang, W. T. K.](#), [Kondo, Y.](#), [Massling, A.](#), [Sinha, P. R.](#), [Weinzierl, B.](#), [Zanatta, M.](#), [Tegen, I.](#), 2019. The importance of the representation of air pollution emissions for the modeled distribution and radiative effects of black carbon in the Arctic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 11159-11183. doi: 10.5194/acp-19-11159-2019. [T3]
- [Schüpbach, S.](#), [Fischer, H.](#), [Bigler, M.](#), [Erhardt, T.](#), [Gfeller, G.](#), [Leuenberger, D.](#), [Mini, O.](#), [Mulvaney, R.](#), [Abram, N. J.](#), [Fleet, L.](#), [Frey, M. M.](#), [Thomas, E.](#), [Svensson, A.](#), [Dahl-Jensen, D.](#), [Kettner, E.](#), [Kjaer, H.](#), [Seierstad, I.](#), [Steffensen, J. P.](#), [Rasmussen, S. O.](#), [Vallelonga, P.](#), [Winstrup, M.](#), [Wegner, A.](#), [Twarloh, B.](#), [Wolff, K.](#), [Schmidt, K.](#), [Goto-Azuma, K.](#), [Kuramoto, T.](#), [Hirabayashi, M.](#), [Uetake, J.](#), [Zheng, J.](#), [Bourgeois, J.](#), [Fisher, D.](#), [Zhiheng, D.](#), [Xiao, C.](#), [Legrand, M.](#), [Spolaor, A.](#), [Gabrieli, J.](#), [Barbante, C.](#), [Kang, J. H.](#), [Hur, S. D.](#), [Hong, S. B.](#), [Hwang, H. J.](#), [Hong, S.](#), [Hansson, M.](#), [Iizuka, Y.](#), [Oyabu, I.](#), [Muscheler, R.](#), [Adolphi, F.](#), [Maselli, O.](#), [McConnell, J.](#), [Wolff, E. W.](#), 2018. Greenland records of aerosol source and atmospheric lifetime changes from the Eemian to the Holocene. *Nature Communications*, 9, 1476. doi: 10.1038/s41467-018-03924-3. [T2] [T3] [T6]
- [Scopelliti, M.](#), [Sellheim, N.](#), 2019. Sustaining a conservationist agenda?: NGO influence on Arctic sealing, whaling and hydrocarbon regimes. in: [Shibata, A.](#), [Zou, L.](#), [Sellheim, N.](#), et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge. [T7]
- [Seddik, H.](#), [Greve, R.](#), [Sakakibara, D.](#), [Tsutaki, S.](#), [Minowa, M.](#), [Sugiyama, S.](#), 2019. Response of the flow dynamics of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland, to basal lubrication and tidal forcing. *Journal of Glaciology*, 65, 225-238. doi: 10.1017/jog.2018.106. [T2] [T6]
- [Segawa, T.](#), [Matsuzaki, R.](#), [Takeuchi, N.](#), [Akiyoshi, A.](#), [Navarro, F.](#), [Sugiyama, S.](#), [Yonezawa, T.](#), [Mori, H.](#), 2018. Bipolar dispersal of red-snow algae. *Nature Communications*, 9, 3094. doi: 10.1038/s41467-018-05521-w. [T2]
- [Seguchi, T.](#), [Iwasaki, S.](#), [Kamogawa, M.](#), [Ushiyama, T.](#), [Okamoto, H.](#), 2019. Observation of Jumping Cirrus with Ground-Based Cameras, Radiosonde, and Himawari-8. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 97, 615-632. doi: 10.2151/jmsj.2019-033. [T3]
- [Seiki, T.](#), [Kodama, C.](#), [Satoh, M.](#), [Hagihara, Y.](#), [Okamoto, H.](#), 2019. Characteristics of Ice Clouds Over Mountain Regions Detected by CALIPSO and CloudSat Satellite Observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124. doi: 10.1029/2019JD030519. [T3] [T5]
- [Sekizawa, S.](#), [Nakamura, H.](#), [Kosaka, Y.](#), 2018. Interannual Variability of the Australian Summer Monsoon System Internally Sustained Through Wind-Evaporation Feedback. *Geophysical Research Letters*, 45, 7748-7755. doi: 10.1029/2018GL078536. [T3] [T5]
- [Sellheim, N.](#), [Zou, L.](#), [Inagaki, O.](#), 2017. Legal 'Arctopia'? How Arctic Governance Expresses a Better World. *Arctic Yearbook*, 2017, 415-427. [T7]
- [Sellheim, N.](#), 2017a. Scopes and limits of 'Arcticness' Arctic livelihoods, marine mammals and the law. in: [Kelman, I.](#) (Ed.), *Arcticness*, UCL Press, 102-112. ISBN: 9781787350144. [T7]
- [Shibata, A.](#), 2015. Japan and 100 Years of Antarctic Legal Order: Any Lessons for the Arctic? *The Yearbook of Polar Law Online*, 7, 1-54. doi: https://doi.org/10.1163/2211-6427_002. [T7]
- [Shibata, A.](#), [Raita, M.](#), 2017. An Agreement on Enhancing International Arctic Scientific Cooperation: Only for the Eight Arctic States and Their Scientists? *The Yearbook of Polar Law Online*, 8, 129-162. doi: https://doi.org/10.1163/22116427_008010009. [T7]
- [Shibata, A.](#), 2019. The Arctic Science Cooperation Agreement: A perspective from non-Arctic actors. in: [Shibata, A.](#), [Zou, L.](#), [Sellheim, N.](#), et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge. [T7]
- [Shibata, A.](#), [Zou, L.](#), [Sellheim, N.](#), [Scopelliti, M.](#), 2019a. An ocean in the making: Non-Arctic actors and emerging Arctic legal orders. in: [Shibata, A.](#), [Zou, L.](#), [Sellheim, N.](#), et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge. [T7]
- [柴田 明穂](#), 2020. 国際法に基づく秩序づくり (第9章) . 北極の人間と社会：持続的発展の可能性 , 北海道大学出版会 . [T7]
- [Shibata, T.](#), [Shiraishi, K.](#), [Shiobara, M.](#), [Iwasaki, S.](#), [Takano, T.](#), 2018. Seasonal Variations in High Arctic Free Tropospheric Aerosols Over Ny-Ålesund, Svalbard, Observed by Ground-Based Lidar. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 12,353-12,367. doi: 10.1029/2018JD028973. [T3]
- [Shigeyama, W.](#), [Nagatsuka, N.](#), [Homma, T.](#), [Takata, M.](#), [Goto-Azuma, K.](#), [Weikusat, I.](#), [Drury, M. R.](#), [Kuiper, E.-J. N.](#), [Mateiu, R. V.](#), [Azuma, N.](#), [Dahl-Jensen, D.](#), [Kipfstuhl, S.](#), 2019. Microstructural analysis of Greenland ice using a cryogenic scanning electron microscope equipped with an electron backscatter diffraction detector. *Bulletin of Glaciological Research*, 37, 31-45. doi: 10.5331/bgr.19R01. [T2]

[T3]

- Shiozaki, T., Fujiwara, A., Ijichi, M., Harada, N., Nishino, S., Nishi, S., Nagata, T., Hamasaki, K., 2018. Diazotroph community structure and the role of nitrogen fixation in the nitrogen cycle in the Chukchi Sea (western Arctic Ocean). *Limnology and Oceanography*, 63, 2191-2205. doi: 10.1002/lno.10933. [T4] [T6]
- Shiozaki, T., Ijichi, M., Fujiwara, A., Makabe, A., Nishino, S., Yoshikawa, C., Harada, N., 2019. Factors Regulating Nitrification in the Arctic Ocean: Potential Impact of Sea Ice Reduction and Ocean Acidification. *Global Biogeochemical Cycles*, 33, 1085-1099. doi: 10.1029/2018GB006068. [T4] [T6]
- 庄司 悟, 岡崎 淳史, 芳村 圭, 2018. 気候プロキシデータ同化における観測インパクトの時空間偏在性に関する考察. 土木学会論文集 B1 (水工学), 74, 49-54. [T5]
- Sinha, P. R., Kondo, Y., Koike, M., Ogren, J. A., Jefferson, A., Barrett, T. E., Sheesley, R. J., Ohata, S., Moteki, N., Coe, H., Liu, D., Irwin, M., Tunved, P., Quinn, P. K., Zhao, Y., 2017. Evaluation of ground-based black carbon measurements by filter-based photometers at two Arctic sites. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 3544-3572. doi: 10.1002/2016JD025843. [T3]
- Sinha, P. R., Kondo, Y., Goto-Azuma, K., Tsukagawa-Ogawa, Y., Fukuda, K., Koike, M., Ohata, S., Moteki, N., Mori, T., Oshima, N., Førland, E. J., Irwin, M., Gallet, J.-C., Pedersen, C. A., 2018. Seasonal Progression of the Deposition of Black Carbon by Snowfall at Ny-Ålesund, Spitsbergen. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 997-1016. doi: 10.1002/2017jd028027. [T2] [T3]
- Smith, D. M., Screen, J. A., Deser, C., Cohen, J., Fyfe, J. C., García-Serrano, J., Jung, T., Kattsov, V., Matei, D., Msadek, R., Peings, Y., Sigmond, M., Ukita, J., Yoon, J. H., Zhang, X., 2019. The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification. *Geoscientific Model Development*, 12, 1139-1164. doi: 10.5194/gmd-12-1139-2019. [T3] [T5]
- Smith, I. J., Eicken, H., Mahoney, A. R., Van Hale, R., Gough, A. J., Fukamachi, Y., Jones, J., 2016. Surface water mass composition changes captured by cores of Arctic land-fast sea ice. *Continental Shelf Research*, 118, 154-164. doi: https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.008. [T2] [T4]
- Spall, M. A., Pickart, R. S., Li, M., Itoh, M., Lin, P., Kikuchi, T., Qi, Y., 2018. Transport of Pacific Water Into the Canada Basin and the Formation of the Chukchi Slope Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 7453-7471. doi: 10.1029/2018JC013825. [T4]
- Spolaor, A., Vallelonga, P., Turetta, C., Maffezzoli, N., Cozzi, G., Gabrieli, J., Barbante, C., Goto-Azuma, K., Saiz-Lopez, A., Cuevas, C. A., Dahl-Jensen, D., 2016. Canadian Arctic sea ice reconstructed from bromine in the Greenland NEM ice core. *Scientific Reports*, 6, 33925. doi: 10.1038/srep33925. [T2] [T3]
- Sugie, K., Yoshimura, T., Wakita, M., 2018. Impact of CO₂ on the elemental composition of the particulate and dissolved organic matter of marine diatoms emerged after nitrate depletion. *Limnology and Oceanography*, 63, 1924-1943. doi: 10.1002/lno.10816. [T4] [T6]
- Sugie, K., Fujiwara, A., Nishino, S., Kameyama, S., Harada, N., 2020. Impacts of temperature, CO₂, and salinity on phytoplankton community composition in the western Arctic Ocean. *Frontiers in Marine Science*. [T4] [T6]
- 杉江 恒二, 2018. 植物プランクトン動態および生元素循環に対する海洋酸性化の影響評価. 海の研究, 27, 125-140. doi: 10.5928/kaiyou.27.3_125. [T4] [T6]
- 杉山 慎, 2017a. グリーンランド沿岸の環境変化とその人間生活への影響. 雪氷, 79, 443-449. [T2]
- Sullivan, R. C., Crippa, P., Matsui, H., Leung, L. R., Zhao, C., Thota, A., Pryor, S. C., 2018. New particle formation leads to cloud dimming. *npj Climate and Atmospheric Science*, 1, 9. doi: 10.1038/s41612-018-0019-7. [T3]
- Sumata, H., Kauker, F., Karcher, M., Rabe, B., Timmermans, M. L., Behrendt, A., Gerdes, R., Schauer, U., Shimada, K., Cho, K. H., Kikuchi, T., 2018. Decorrelation scales for Arctic Ocean hydrography – Part I: Amerasian Basin. *Ocean Science*, 14, 161-185. doi: 10.5194/os-14-161-2018. [T1] [T4]
- Suzuki, K., Matsuo, K., Hiyama, T., 2016. Satellite gravimetry-based analysis of terrestrial water storage and its relationship with run-off from the Lena River in eastern Siberia. *International Journal of Remote Sensing*, 37, 2198-2210. doi: 10.1080/01431161.2016.1165890. [T3] [T7]
- Suzuki, K., Matsuo, K., Yamazaki, D., Ichii, K., Iijima, Y., Papa, F., Yanagi, Y., Hiyama, T., 2018. Hydrological Variability and Changes in the Arctic Circumpolar Tundra and the Three Largest Pan-Arctic River Basins from 2002 to 2016. *Remote Sensing*, 10. doi: 10.3390/rs10030402. [T3] [T4] [T7]
- Swinbank, R., Kyouda, M., Buchanan, P., Froude, L., Hamill, T. M., Hewson, T. D., Keller, J. H., Matsueda, M., Methven, J., Pappenberger, F., Scheuerer, M., Tittley, H. A., Wilson, L., Yamaguchi, M., 2016. The TIGGE Project and Its Achievements. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 49-67. doi: 10.1175/BAMS-D-13-00191.1. [T1]
- Tabata, S., Tabata, T., 2018. Economic development of the Arctic regions of Russia. in: Tynkkynen, V. P., Tabata, S., Gritsenko, D., et al. (Eds.), *Russia's Far North: The Contested Energy Frontier*, Routledge. [T7]
- Tabata, S., 2019. Flow of financial resources between the federal budget and the Arctic regions in Russia. *Region: Economics and Sociology*, 3, 3-25. doi: 10.15372/REG20190301. [T7]
- 田畑 伸一郎, 本村 眞澄, 2020. 石油とガス (第2章). 北極の人間と社会: 持続的発展の可能性, 北海道大学出版会. [T7]
- Tachibana, Y., Inoue, Y., Komatsu, K. K., Nakamura, T., Honda, M., Ogata, K., Yamazaki, K., 2018. Interhemispheric Synchronization Between the AO and the AAO. *Geophysical Research Letters*, 45, 13,477-13,484. doi: 10.1029/2018GL081002. [T5]
- Tachibana, Y., Komatsu, K. K., Alexeev, V. A., Cai, L., Ando, Y., 2019. Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017-18. *Scientific Reports*, 9, 5567. doi: 10.1038/s41598-019-41682-4. [T5]
- Taguchi, B., Schneider, N., Nonaka, M., Sasaki, H., 2017. Decadal Variability of Upper-Ocean Heat Content Associated with Merid-

- ional Shifts of Western Boundary Current Extensions in the North Pacific. *Journal of Climate*, 30, 6247-6264. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0779.1. [T5]
- Takahashi, C., Arai, M., Watanabe, M., Shioyama, H., Imada, Y., Kosaka, Y., Mori, M., Kamae, Y., 2019a. The Effects of Natural Variability and Climate Change on the Record Low Sunshine over Japan during August 2017. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, S67-S71. doi: 10.1175/BAMS-D-18-0107.1. [T5]
- Takahashi, M., 2015. The Politics of the Right to Self-Determination: Reframing the Debate on Greenland's Autonomy. *Eurasia Border Review*, 6, 25-43. doi: 10.14943/ebr.6.1.25. [T2] [T7]
- Takahashi, M., 2016. Greenland, the Island of Military Bases: Negotiations for Turning the Island into a Missile Defence Stronghold. *The Journal of Island Studies*, 17-1. [T2] [T7]
- Takahashi, M., 2019a. Introduction: The Influence of Sub-state Actors on National Security. *The Influence of Sub-state Actors on National Security*, 1-9. ISBN: 978-3-030-01676-0. [T2] [T7]
- Takahashi, M., 2019b. Greenland's Quest for Autonomy and the Political Dynamics Surrounding the Thule Air Base. *The Influence of Sub-state Actors on National Security*, 25-49. ISBN: 978-3-030-01676-0. [T2] [T7]
- Takahashi, M., 2019c. Conclusion: The Political Choices of Sub-state Actors and the Politics Surrounding U.S. Military Bases. *The Influence of Sub-state Actors on National Security*, 131-140. ISBN: 978-3-030-01676-0 [T2] [T7]
- Takahashi, M., 2019d. The Contours of the Development of Non-Living Resources in Greenland. *Polar Record: Special Issue: International Law for Sustainability in Arctic Resource Development*. [T2] [T7]
- Takahashi, M., 2019e. The Politics of Whaling and the European Union. *Senri Ethnological Studies (SES)*. [T2] [T7]
- Takahashi, M., Kawana, S., Saitou, K., Koizumi, Y., Hateruma, S., Shimizu, A., 2019b. Autonomy and military bases: USAF Thule base in Greenland as the study case. *Yearbook 2019: Redefining Arctic Security*. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2018a. 捕鯨 水産資源の利用と保護. 佐藤 史郎, 川名 晋史, 上野 友也, 他 (編), 日本外交の論点, 法律文化社, 273-282. ISBN: 978-4589039033. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2019a. EUの「クジラの生と死に対する管理」とその政治的含意. 国立民族学博物館調査報告, 175-193. doi: info:doi/10.15021/00009435. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2019b. 政治的取引財としてのチューレ空軍基地:デンマーク国内交渉を中心にして. 川名 晋史 (編), 共振する国際政治学と地域研究: 基地・紛争・秩序, 勁草書房. ISBN: 9784326302734. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2020. 開発と先住民族 (第10章). 北極の人間と社会: 持続的発展の可能性, 北海道大学出版会. [T2] [T7]
- Takakura, H., 2016. Limits of pastoral adaptation to permafrost regions caused by climate change among the Sakha people in the middle basin of Lena River. *Polar Science*, 10, 395-403. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.04.003. [T7]
- Takakura, H., 2018. Local Perception of River Thaw and Spring Flooding of the Lena River. in: Hiyama, T., Takakura, H. (Eds.), *Global Warming and Human - Nature Dimension in Northern Eurasia*, Springer Singapore, Singapore, 29-51. ISBN: 978-981-10-4648-3. [T7]
- Takakura, H., Yoshikawa, Y., Watanabe, M., Sakai, T., Hiyama, T., 2018. Ice Movement in the Lena River and Effects of Spring Flooding on Human Society: An Interpretation of Local Sources Integrated with Satellite Imagery in a Multidisciplinary Approach. in: Hiyama, T., Takakura, H. (Eds.), *Global Warming and Human - Nature Dimension in Northern Eurasia*, Springer Singapore, Singapore, 101-123. ISBN: 978-981-10-4648-3. [T3] [T7]
- 高倉 浩樹, 2017a. 先住少数民族の権利と資源環境問題—ポスト社会主義ロシアへの一視角. 宇山 智彦 (編), 越境する革命と民族 (ロシア革命とソ連の世紀 第5巻), 岩波書店, 289-314. ISBN: 978-4000282703. [T7]
- Takata, K., Patra, P. K., Kotani, A., Mori, J., Belikov, D., Ichii, K., Saeki, T., Ohta, T., Saito, K., Ueyama, M., Ito, A., Maksyutov, S. S., Miyazaki, S., Burke, E. J., Ganshin, A., Iijima, Y., Ise, T., Machiya, H., Maximov, T. C., Niwa, Y., O'ishi, R., Park, H., Sasai, T., Sato, H., Tei, S., Zhuravlev, R., Machida, T., Sugimoto, A., Aoki, S., 2017. Reconciliation of top-down and bottom-up CO2 fluxes in Siberian larch forest. *Environmental Research Letters*, 12, 125012. doi: 10.1088/1748-9326/aa926d. [T3] [T4] [T5] [T7]
- Takenaka, C., Miyahara, M., Ohta, T., Maximov, T. C., 2016. Response of larch root development to annual changes of water conditions in eastern Siberia. *Polar Science*, 10, 160-166. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.04.012. [T3]
- Taketani, F., Miyakawa, T., Takashima, H., Komazaki, Y., Pan, X., Kanaya, Y., Inoue, J., 2016. Shipborne observations of atmospheric black carbon aerosol particles over the Arctic Ocean, Bering Sea, and North Pacific Ocean during September 2014. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 1914-1921. doi: 10.1002/2015jd023648. [T1] [T3]
- Takeuchi, N., Sakaki, R., Uetake, J., Nagatsuka, N., Shimada, R., Niwano, M., Aoki, T., 2018. Temporal variations of cryoconite holes and cryoconite coverage on the ablation ice surface of Qaanaaq Glacier in northwest Greenland. *Annals of Glaciology*, 59, 21-30. doi: 10.1017/aog.2018.19. [T2] [T3] [T6]
- Takigawa, M., Yamaguchi, M., Taketani, F., Kanaya, Y., Kondo, Y., 2018. Near real-time simulation data of atmospheric components and meteorology in the Arctic region using the WRF-Chem model from August to September 2016. *Polar Data Journal*, 2, 1-13. doi: 10.20575/00000003. [T3]
- Tanaka, K., Takesue, N., Nishioka, J., Kondo, Y., Ooki, A., Kuma, K., Hirawake, T., Yamashita, Y., 2016a. The conservative behavior of dissolved organic carbon in surface waters of the southern Chukchi Sea, Arctic Ocean, during early summer. *Scientific Reports*, 6, 34123. doi: 10.1038/srep34123. [T2] [T6]
- Tanaka, S., Nishii, K., Nakamura, H., 2016b. Vertical Structure and Energetics of the Western Pacific Teleconnection Pattern. *Journal of Climate*, 29, 6597-6616. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0549.1. [T3] [T5]
- Tanaka, Y., Tateyama, K., Kameda, T., Hutchings, J. K., 2016c. Estimation of melt pond fraction over high-concentration Arctic sea ice us-

- ing AMSR-E passive microwave data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 7056-7072. doi: 10.1002/2016JC011876. [T1] [T2]
- Tanaka, Y., Tateyama, K., Hoshino, S., 2018. An algorithm for estimating sea-ice type from AMSR-E data in the Beaufort Sea. *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 2, 1-6. [T1] [T2]
- Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., Sudo, K., Sekiguchi, M., Abe, M., Saito, E., Chikira, M., Watanabe, S., Mori, M., Hirota, N., Kawatani, Y., Mochizuki, T., Yoshimura, K., Takata, K., O'ishi, R., Yamazaki, D., Suzuki, T., Kurogi, M., Kataoka, T., Watanabe, M., Kimoto, M., 2019. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12, 2727-2765. doi: 10.5194/gmd-12-2727-2019. [T2] [T5]
- Tateyama, K., Inoue, J., Hoshino, S., Sasaki, S., Tanaka, Y., 2018. Development of a new algorithm to estimate Arctic sea-ice thickness based on Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 data. *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 2, 13-18. [T1] [T2]
- Teramura, H., Sato, T., Tamura, K., 2019. Observed Evidence of Enhanced Probability of Mesoscale Convective System Initiations due to Land Surface Heterogeneity in Semiarid East Asia. *SOLA*, 15, 143-148. doi: 10.2151/sola.2019-026. [T5]
- Terentieva, I. E., Glagolev, M. V., Lapshina, E. D., Sabrekov, A. F., Maksyutov, S. S., 2016. Mapping of West Siberian taiga wetland complexes using Landsat imagery: implications for methane emissions. *Biogeosciences*, 13, 4615-4626. doi: 10.5194/bg-13-4615-2016. [T3]
- Terentieva, I. E., Sabrekov, A. F., Glagolev, M. V., Lapshina, E. D., Smolentsev, B. A., Maksyutov, S. S., 2017. A new map of wetlands in the southern taiga of the West Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide. *Water Resources*, 44, 297-307. doi: 10.1134/S0097807817020154. [T3]
- Terentieva, I. E., Sabrekov, A. F., Ilyasov, D., Ebrahimi, A., Glagolev, M. V., Maksyutov, S. S., 2019. Highly Dynamic Methane Emission from the West Siberian Boreal Floodplains. *Wetlands*, 39, 217-226. doi: 10.1007/s13157-018-1088-4. [T3]
- Tobo, Y., 2016. An improved approach for measuring immersion freezing in large droplets over a wide temperature range. *Scientific Reports*, 6, 32930. doi: 10.1038/srep32930. [T3]
- Tobo, Y., Adachi, K., DeMott, P. J., Hill, T. C. J., Hamilton, D. S., Mahowald, N. M., Nagatsuka, N., Ohata, S., Uetake, J., Kondo, Y., Koike, M., 2019. Glacially sourced dust as a potentially significant source of ice nucleating particles. *Nature Geoscience*, 12, 253-258. doi: 10.1038/s41561-019-0314-x. [T2] [T3] [T6]
- 當房 豊, 2019. 混相雲内でのエアロゾルの氷晶核としての役割. *大気化学研究*, 41, 041A002. [T3]
- Tokuhiro, K., Abe, Y., Matsuno, K., Onodera, J., Fujiwara, A., Harada, N., Hirawake, T., Yamaguchi, A., 2019. Seasonal phenology of four dominant copepods in the Pacific sector of the Arctic Ocean: Insights from statistical analyses of sediment trap data. *Polar Science*, 19, 94-111. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.08.006. [T2] [T4] [T6]
- Tonami, A., 2019. The rise of Asia and Arctic legal order-making: Political-economic settings. in: Shibata, A., Zou, L., Sellheim, N., et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge. [T7]
- Toride, K., Neluwala, P., Kim, H., Yoshimura, K., 2017. Feasibility Study of the Reconstruction of Historical Weather with Data Assimilation. *Monthly Weather Review*, 145, 3563-3580. doi: 10.1175/MWR-D-16-0288.1. [T5]
- Toyoda, T., Hirose, N., Urakawa, L. S., Tsujino, H., Nakano, H., Usui, N., Fujii, Y., Sakamoto, K., Yamanaka, G., 2019a. Effects of Inclusion of Adjoint Sea Ice Rheology on Backward Sensitivity Evolution Examined Using an Adjoint Ocean-Sea Ice Model. *Monthly Weather Review*, 147, 2145-2162. doi: 10.1175/MWR-D-18-0198.1. [T5]
- Toyoda, T., Iwamoto, K., Urakawa, L. S., Tsujino, H., Nakano, H., Sakamoto, K., Yamanaka, G., Komuro, Y., Nishino, S., Ukita, J., 2019b. Incorporation of satellite-derived thin-ice data into a global OGCM simulation. *Climate Dynamics*, 53, 7113-7130. doi: 10.1007/s00382-019-04979-8. [T3] [T4] [T5] [T6]
- Toyota, T., Kimura, N., 2018. An Examination of the Sea Ice Rheology for Seasonal Ice Zones Based on Ice Drift and Thickness Observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 1406-1428. doi: 10.1002/2017JC013627. [T1] [T5]
- Tsuji, M., Tanabe, Y., Vincent, W. F., Uchida, M., 2018a. *Gelidatrema psychrophila* sp. nov., a novel yeast species isolated from an ice island in the Canadian High Arctic. *Mycoscience*, 59, 67-70. doi: https://doi.org/10.1016/j.myc.2017.08.010. [T6]
- Tsuji, M., Tanabe, Y., Vincent, W. F., Uchida, M., 2018b. *Mrakia arctica* sp. nov., a new psychrophilic yeast isolated from an ice island in the Canadian High Arctic. *Mycoscience*, 59, 54-58. doi: https://doi.org/10.1016/j.myc.2017.08.006. [T6]
- Tsuji, M., Tanabe, Y., Vincent, W. F., Uchida, M., 2019a. *Mrakia hoshinonis* sp. nov., a novel psychrophilic yeast isolated from a retreating glacier on Ellesmere Island in the Canadian High Arctic. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 69, 944-948. doi: https://doi.org/10.1099/ijsem.0.003216. [T6]
- Tsuji, M., Tanabe, Y., Vincent, W. F., Uchida, M., 2019b. *Vishniacozyma ellesmerensis* sp. nov., a psychrophilic yeast isolated from a retreating glacier in the Canadian High Arctic. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 69, 696-700. doi: https://doi.org/10.1099/ijsem.0.003206. [T6]
- Tsukada, Y., Ueno, H., Ohta, N., Itoh, M., Watanabe, E., Kikuchi, T., Nishino, S., Mizobata, K., 2018. Interannual variation in solar heating in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Polar Science*, 17, 33-39. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.06.003. [T4] [T6]
- 塚川 佳美, 東久美子, 近藤 豊, 杉浦 幸之助, 大畑 祥, 森 樹大, 茂木 信宏, 小池 真, 平林 幹啓, Dallmayr, R., 榎本 浩之, 2016. アラスカ積雪中のブラックカーボンの緯度分布. *雪氷*, 78, 459-478. [T2] [T3]
- Tsukazaki, C., Ishii, K-I., Matsuno, K., Yamaguchi, A., Imai, I., 2018. Distribution of viable resting stage cells of diatoms in sediments and water columns of the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Phycologia*, 57, 440-452. doi: 10.2216/16-108.1. [T2] [T6]
- Tsutaki, S., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Sawagaki, T., 2016. Surface elevation changes during 2007-13 on Bowdoin and Tugto Glaciers, northwestern Greenland. *Journal of Glaciology*, 62, 1083-1092. doi: 10.1017/jog.2016.106. [T2] [T6]
- Tsutaki, S., Sugiyama, S., Sakakibara, D., 2017a. Surface elevations on Qaanaaq and Bowdoin Glaciers in northwestern Greenland as mea-

- sured by a kinematic GPS survey from 2012–2016. *Polar Data Journal*, 1, 1-16. doi: 10.20575/00000001. [T2] [T6]
- Tsutaki, S., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Aoki, T., Niwano, M., 2017b. Surface mass balance, ice velocity and near-surface ice temperature on Qaanaaq Ice Cap, northwestern Greenland, from 2012 to 2016. *Annals of Glaciology*, 58, 181-192. doi: 10.1017/aog.2017.7. [T2] [T3] [T6]
- Tyrlis, E., Manzini, E., Bader, J., Ukita, J., Nakamura, H., Matei, D., 2019. Ural Blocking Driving Extreme Arctic Sea Ice Loss, Cold Eurasia, and Stratospheric Vortex Weakening in Autumn and Early Winter 2016–2017. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. doi: 10.1029/2019JD031085. [T3] [T5]
- Uchida, M., Muraoka, H., Nakatsubo, T., 2016. Sensitivity analysis of ecosystem CO₂ exchange to climate change in High Arctic tundra using an ecological process-based model. *Polar Biology*, 39, 251-265. doi: 10.1007/s00300-015-1777-x. [T6]
- Uchimiya, M., Motegi, C., Nishino, S., Kawaguchi, Y., Inoue, J., Ogawa, H., Nagata, T., 2016. Coupled Response of Bacterial Production to a Wind-Induced Fall Phytoplankton Bloom and Sediment Resuspension in the Chukchi Sea Shelf, Western Arctic Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 3. doi: 10.3389/fmars.2016.00231. [T1] [T4] [T6]
- Uetake, J., Tanaka, S., Segawa, T., Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Motoyama, H., Aoki, T., 2016. Microbial community variation in cryoconite granules on Qaanaaq Glacier, NW Greenland. *FEMS Microbiology Ecology*, 92. doi: 10.1093/femsec/fiw127. [T2] [T3] [T6]
- Ueyama, M., Tahara, N., Nagano, H., Makita, N., Iwata, H., Harazono, Y., 2018. Leaf- and ecosystem-scale photosynthetic parameters for the overstory and understory of boreal forests in interior Alaska. *Journal of Agricultural Meteorology*, 74, 79-86. doi: 10.2480/agrmet.D-17-00031. [T3]
- Ueyama, M., Iwata, H., Nagano, H., Tahara, N., Iwama, C., Harazono, Y., 2019. Carbon dioxide balance in early-successional forests after forest fires in interior Alaska. *Agricultural and Forest Meteorology*, 275, 196-207. doi: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.020. [T3]
- Ullrich, R., Hoose, C., Möhler, O., Niemand, M., Wagner, R., Höhler, K., Hiranuma, N., Saathoff, H., Leisner, T., 2016. A New Ice Nucleation Active Site Parameterization for Desert Dust and Soot. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 74, 699-717. doi: 10.1175/JAS-D-16-0074.1. [T3]
- Ulrich, M., Matthes, H., Schirrmeister, L., Schütze, J., Park, H., Iijima, Y., Fedorov, A. N., 2017. Differences in behavior and distribution of permafrost-related lakes in Central Yakutia and their response to climatic drivers. *Water Resources Research*, 53, 1167-1188. doi: 10.1002/2016WR019267. [T4] [T7]
- Usman, M., Furuya, M., 2018. Interannual modulation of seasonal glacial velocity variations in the Eastern Karakoram detected by ALOS-1/2 data. *Journal of Glaciology*, 64, 465-476. doi: 10.1017/jog.2018.39. [T2]
- Uttal, T., Starkweather, S., Drummond, J. R., Vihma, T., Makshtas, A. P., Darby, L. S., Burkhart, J. F., Cox, C. J., Schmeisser, L. N., Haiden, T., Maturilli, M., Shupe, M. D., De Boer, G., Saha, A., Grachev, A. A., Crepinsek, S. M., Bruhwiler, L., Goodison, B., McArthur, B., Walden, V. P., Dlugokencky, E. J., Persson, P. O. G., Lesins, G., Laurila, T., Ogren, J. A., Stone, R., Long, C. N., Sharma, S., Massling, A., Turner, D. D., Stanitski, D. M., Asmi, E., Aurela, M., Skov, H., Eleftheriadis, K., Virkkula, A., Platt, A., Førland, E. J., Iijima, Y., Nielsen, I. E., Bergin, M. H., Candlish, L., Zimov, N. S., Zimov, S. A., O'Neill, N. T., Fogal, P. F., Kivi, R., Konopleva-Akish, E. A., Verlinde, J., Kustov, V. Y., Vasel, B., Ivakhov, V. M., Viisanen, Y., Intrieri, J. M., 2015. International Arctic Systems for Observing the Atmosphere: An International Polar Year Legacy Consortium. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 1033-1056. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00145.1. [T4] [T7]
- van Dongen, F., Jouvét, G., Walter, A., Todd, J., Zwinger, T., Asaji, I., Sugiyama, S., Walter, F., Funk, M., 2019. Tides modulate crevasse opening prior to a major calving event at Bowdoin Glacier, Northwest Greenland. *Journal of Glaciology*. [T2]
- van der Molen, M. K., de Jeu, R. A. M., Wagner, W., van der Velde, I. R., Kolari, P., Kurbatova, J., Varlagin, A., Maximov, T. C., Kononov, A. V., Ohta, T., Kotani, A., Krol, M. C., Peters, W., 2016. The effect of assimilating satellite-derived soil moisture data in SiBCASA on simulated carbon fluxes in Boreal Eurasia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 605-624. doi: 10.5194/hess-20-605-2016. [T3]
- Vivier, F., Hutchings, J. K., Kawaguchi, Y., Kikuchi, T., Morison, J. H., Lourenço, A., Noguchi, T., 2016. Sea ice melt onset associated with lead opening during the spring/summer transition near the North Pole. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 2499-2522. doi: 10.1002/2015JC011588. [T4]
- Waga, H., Hirawake, T., Fujiwara, A., Kikuchi, T., Nishino, S., Suzuki, K., Takao, S., Saitoh, S-I., 2017. Differences in Rate and Direction of Shifts between Phytoplankton Size Structure and Sea Surface Temperature. *Remote Sensing*, 9. doi: 10.3390/rs9030222. [T4] [T6]
- Waga, H., Hirawake, T., Fujiwara, A., Grebmeier, J. M., Saitoh, S-I., 2019. Impact of spatiotemporal variability in phytoplankton size structure on benthic macrofaunal distribution in the Pacific Arctic. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 162, 114-126. doi: https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.10.008. [T4] [T6]
- Wang, C-Y., Xie, S-P., Kosaka, Y., Liu, Q., Zheng, X-T., 2017. Global Influence of Tropical Pacific Variability with Implications for Global Warming Slowdown. *Journal of Climate*, 30, 2679-2695. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0496.1. [T5]
- Wang, C-Y., Xie, S-P., Kosaka, Y., 2018. Indo-Western Pacific Climate Variability: ENSO Forcing and Internal Dynamics in a Tropical Pacific Pacemaker Simulation. *Journal of Climate*, 31, 10123-10139. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0203.1. [T5]
- Waseda, T., Webb, A., Sato, K., Inoue, J., Kohout, A., Penrose, B., Penrose, S., 2017. Arctic Wave Observation by Drifting Type Wave Buoys in 2016. The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA. [T1]
- Waseda, T., Nose, T., Webb, A., 2018a. Comparison of the Long-Term Trends of the Largest Waves in the Ice-Free Arctic Waters From Different Reanalysis Products. ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. [T1]
- Waseda, T., Webb, A., Sato, K., Inoue, J., Kohout, A., Penrose, B., Penrose, S., 2018b. Correlated Increase of High Ocean Waves and Winds

- in the Ice-Free Waters of the Arctic Ocean. *Scientific Reports*, 8, 4489. doi: 10.1038/s41598-018-22500-9. [T1]
- Watanabe, E., Onodera, J., Harada, N., Aita, M. N., Ishida, A., Kishi, M. J., 2015. Wind-driven interannual variability of sea ice algal production in the western Arctic Chukchi Borderland. *Biogeosciences*, 12, 6147-6168. doi: 10.5194/bg-12-6147-2015. [T4] [T6]
- Watanabe, E., Onodera, J., Itoh, M., Nishino, S., Kikuchi, T., 2017. Winter transport of subsurface warm water toward the Arctic Chukchi Borderland. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 128, 115-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.08.009>. [T4] [T6]
- Watanabe, E., Jin, M., Hayashida, H., Zhang, J., Steiner, N., 2019. Multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice-algal productivity on seasonal, interannual, and decadal timescales. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. doi: 10.1029/2019JC015100. [T4] [T6]
- Wei, Z., Yoshimura, K., Wang, L., Miralles, D. G., Jasechko, S., Lee, X., 2017. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration. *Geophysical Research Letters*, 44, 2792-2801. doi: 10.1002/2016GL072235. [T5]
- Wei, Z., Lee, X., Liu, Z., Seeboonruang, U., Koike, M., Yoshimura, K., 2018. Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 488, 181-192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.015>. [T5]
- Wu, M., Liu, X., Zhang, L., Wu, C., Lu, Z., Ma, P-L., Wang, H., Tilmes, S., Mahowald, N., Matsui, H., Easter, R. C., 2018. Impacts of Aerosol Dry Deposition on Black Carbon Spatial Distributions and Radiative Effects in the Community Atmosphere Model CAM5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10, 1150-1171. doi: 10.1029/2017MS001219. [T3]
- Xie, S-P., Kosaka, Y., 2017. What Caused the Global Surface Warming Hiatus of 1998–2013? *Current Climate Change Reports*, 3, 128-140. doi: 10.1007/s40641-017-0063-0. [T5]
- Xu, X., Riley, W. J., Koven, C. D., Billesbach, D. P., Chang, R. Y. W., Commane, R., Euskirchen, E. S., Hartery, S., Harazono, Y., Iwata, H., McDonald, K. C., Miller, C. E., Oechel, W. C., Poulter, B., Raz-Yaseef, N., Sweeney, C., Torn, M., Wofsy, S. C., Zhang, Z., Zona, D., 2016. A multi-scale comparison of modeled and observed seasonal methane emissions in northern wetlands. *Biogeosciences*, 13, 5043-5056. doi: 10.5194/bg-13-5043-2016. [T3]
- Xue, B-L., Guo, Q., Gong, Y., Hu, T., Liu, J., Ohta, T., 2016. The influence of meteorology and phenology on net ecosystem exchange in an eastern Siberian boreal larch forest. *Journal of Plant Ecology*, 9, 520-530. doi: 10.1093/jpe/rtv075. [T3]
- Xue, J., Sun, C., Li, J., Mao, J., Nakamura, H., Miyasaka, T., Xu, Y., 2018. Divergent Responses of Extratropical Atmospheric Circulation to Interhemispheric Dipolar SST Forcing over the Two Hemispheres in Boreal Winter. *Journal of Climate*, 31, 7599-7619. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0817.1. [T3] [T5]
- 矢吹 裕伯, 2019. 北極における地球環境研究とそのデータの取り扱い. *パテント*, 72, 40-50. [T8]
- Yamada, T. J., Takeuchi, D., Farukh, M. A., Kitano, Y., 2016. Climatological Characteristics of Heavy Rainfall in Northern Pakistan and Atmospheric Blocking over Western Russia. *Journal of Climate*, 29, 7743-7754. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0445.1. [T5]
- Yamada, Y., Yokokawa, T., Uchimiya, M., Nishino, S., Fukuda, H., Ogawa, H., Nagata, T., 2017. Transparent exopolymer particles (TEP) in the deep ocean: full-depth distribution patterns and contribution to the organic carbon pool. *Marine Ecology Progress Series*, 583, 81-93. [T4] [T6]
- Yamagami, A., Matsueda, M., Tanaka, H. L., 2017. Extreme Arctic cyclone in August 2016. *Atmospheric Science Letters*, 18, 307-314. doi: 10.1002/asl.757. [T1]
- Yamagami, A., Matsueda, M., Tanaka, H. L., 2018a. Medium-Range Forecast Skill for Extraordinary Arctic Cyclones in Summer of 2008–2016. *Geophysical Research Letters*, 45, 4429-4437. doi: 10.1029/2018GL077278. [T1]
- Yamagami, A., Matsueda, M., Tanaka, H. L., 2018b. Predictability of the 2012 Great Arctic Cyclone on medium-range timescales. *Polar Science*, 15, 13-23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.01.002>. [T1]
- Yamagami, A., Matsueda, M., Tanaka, H. L., 2019. Skill of medium-range reforecast for summertime extraordinary Arctic Cyclones in 1986–2016. *Polar Science*, 20, 107-116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.02.003>. [T1]
- Yamaguchi, A., Matsuno, K., Abe, Y., Arima, D., Imai, I., 2017a. Latitudinal variations in the abundance, biomass, taxonomic composition and estimated production of epipelagic mesozooplankton along the 155°E longitude in the western North Pacific during spring. *Progress in Oceanography*, 150, 13-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2015.04.011>. [T2] [T6]
- Yamaguchi, A., Ashjian, C. J., Campbell, R. G., Abe, Y., 2019a. Ontogenetic vertical migration of the mesopelagic carnivorous copepod *Paraeuchaeta* spp. is related to their increase in body mass. *Journal of Plankton Research*. doi: 10.1093/plankt/fbz051. [T2] [T6]
- Yamaguchi, H., Nakano, Y., 2016. Research on Navigation Support System and Optimum Route Search for the Northern Sea Route. *Proceedings of the 23rd IAHR International Symposium on Ice*. [T1]
- Yamaguchi, H., De Silva, L. W. A., 2017. The impact of data assimilation and atmospheric forcing data on predicting short-term sea ice distribution along the Northern sea route. *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 1, 1-6. [T1]
- Yamaguchi, H., Mudunkotuwa, D., De Silva, L. W. A., 2017b. Improving numerical sea ice predictions in the Arctic Ocean by data assimilation using satellite observations. *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*, 1, 7-11. [T1]
- 山口 一, 大塚 夏彦, 2017. 北極海航路実現に向けた総合的研究と課題. *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, 73, I_36-I_41. doi: 10.2208/jscejoe.73.I_36. [T1] [T7]
- Yamamoto, T., Kokubun, N., Kikuchi, D. M., Sato, N., Takahashi, A., Will, A. P., Kitaysky, A. S., Watanuki, Y., 2016. Differential responses of seabirds to environmental variability over 2 years in the continental shelf and oceanic habitats of southeastern Bering Sea. *Biogeosciences*, 13, 2405-2414. doi: 10.5194/bg-13-2405-2016. [T2] [T6]
- Yamamoto-Kawai, M., Mifune, T., Kikuchi, T., Nishino, S., 2016. Seasonal variation of CaCO₃ saturation state in bottom water of a biolog-

- ical hotspot in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Biogeosciences*, 13, 6155-6169. doi: 10.5194/bg-13-6155-2016. [T4] [T6]
- 山内 晃, 河本 和明, 岡本 創, 佐藤 可織, 2017. CALIPSO 衛星データから得られたバレンツ海周辺と東シベリア海周辺の雲特性の違いについて. *日本リモートセンシング学会誌*, 37, 434-441. doi: 10.11440/rssj.37.434. [T3] [T5]
- Yamasaki, S., Tabusa, T., Iwasaki, S., Hiramatsu, M., 2017. Acoustic water bottom investigation with a remotely operated watercraft survey system. *Progress in Earth and Planetary Science*, 4, 25. doi: 10.1186/s40645-017-0140-y. [T2]
- Yamashita, Y., Yagi, Y., Ueno, H., Ooki, A., Hirawake, T., 2019. Characterization of the water masses in the shelf region of the Bering and Chukchi Seas with fluorescent organic matter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. doi: 10.1029/2019JC015476. [T6]
- Yamauchi, A., Kawamoto, K., Okamoto, H., 2018. Differences in the fractions of ice clouds between eastern and western parts of Eurasian continent using CALIPSO in January 2007. *Atmospheric Science Letters*, 19, e807. doi: 10.1002/asl.807. [T3] [T5]
- Yamazaki, K., Ogi, M., Tachibana, Y., Nakamura, T., Oshima, K., 2018. Recent Breakdown of the Seasonal Linkage between the Winter North Atlantic Oscillation/Northern Annular Mode and Summer Northern Annular Mode. *Journal of Climate*, 32, 591-605. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0820.1. [T4] [T5]
- Yang, W., Kobayashi, H., Wang, C., Shen, M., Chen, J., Matsushita, B., Tang, Y., Kim, Y., Bret-Harte, M. S., Zona, D., Oechel, W., Kondoh, A., 2019. A semi-analytical snow-free vegetation index for improving estimation of plant phenology in tundra and grassland ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 228, 31-44. doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.028. [T3]
- Yasunaka, S., Murata, A., Watanabe, E., Chierici, M., Fransson, A., van Heuven, S., Hoppema, M., Ishii, M., Johannessen, T., Kosugi, N., Lauvset, S. K., Mathis, J. T., Nishino, S., Omar, A. M., Olsen, A., Sasano, D., Takahashi, T., Wanninkhof, R., 2016. Mapping of the air-sea CO₂ flux in the Arctic Ocean and its adjacent seas: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability. *Polar Science*, 10, 323-334. doi: https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.03.006. [T4] [T6]
- Yasunaka, S., Siswanto, E., Olsen, A., Hoppema, M., Watanabe, E., Fransson, A., Chierici, M., Murata, A., Lauvset, S. K., Wanninkhof, R., Takahashi, T., Kosugi, N., Omar, A. M., van Heuven, S., Mathis, J. T., 2018. Arctic Ocean CO₂ uptake: an improved multiyear estimate of the air-sea CO₂ flux incorporating chlorophyll a concentrations. *Biogeosciences*, 15, 1643-1661. doi: 10.5194/bg-15-1643-2018. [T4] [T6]
- Yasunari, T. J., Kim, K.-M., da Silva, A. M., Hayasaki, M., Akiyama, M., Muraio, N., 2018a. Extreme air pollution events in Hokkaido, Japan, traced back to early snowmelt and large-scale wildfires over East Eurasia: Case studies. *Scientific Reports*, 8, 6413. doi: 10.1038/s41598-018-24335-w. [T5]
- Yokoi, N., Matsuno, K., Ichinomiya, M., Yamaguchi, A., Nishino, S., Onodera, J., Inoue, J., Kikuchi, T., 2016. Short-term changes in a microplankton community in the Chukchi Sea during autumn: consequences of a strong wind event. *Biogeosciences*, 13, 913-923. doi: 10.5194/bg-13-913-2016. [T1] [T2] [T4] [T6]
- Yokoyama, Y., Esat, T. M., Thompson, W. G., Thomas, A. L., Webster, J. M., Miyairi, Y., Sawada, C., Aze, T., Matsuzaki, H., Okuno, J. i., Fallon, S., Braga, J.-C., Humblet, M., Iryu, Y., Potts, D. C., Fujita, K., Suzuki, A., Kan, H., 2018. Rapid glaciation and a two-step sea level plunge into the Last Glacial Maximum. *Nature*, 559, 603-607. doi: 10.1038/s41586-018-0335-4. [T2]
- Yoshida, A., Moteki, N., Ohata, S., Mori, T., Tada, R., Dagsson-Waldhauserová, P., Kondo, Y., 2016. Detection of light-absorbing iron oxide particles using a modified single-particle soot photometer. *Aerosol Science and Technology*, 50, 1-4. doi: 10.1080/02786826.2016.1146402. [T3]
- Yoshida, A., Ohata, S., Moteki, N., Adachi, K., Mori, T., Koike, M., Takami, A., 2018. Abundance and Emission Flux of the Anthropogenic Iron Oxide Aerosols From the East Asian Continental Outflow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 11,194-11,209. doi: 10.1029/2018JD028665. [T3]
- Yoshikawa, Y., Kuroda, Y., Abe, T., Toyabe, T., Park, H., Oshima, K., 2016. Study on the Ice-jam Occurrence based on Hydraulic Experimentation. *Proceedings of the 23rd IAHR International Symposium on Ice*. [T4]
- 吉川 泰弘, 朴 昊澤, 大島 和裕, 横山 洋, 2018. 寒冷地河川における簡易的なアイスジャム計算モデルに関する検討. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 74, I_1351-I_1356. doi: 10.2208/jscejhe.74.I_1351. [T4]
- Yoshimori, M., Abe-Ouchi, A., Laine, A., 2017. The role of atmospheric heat transport and regional feedbacks in the Arctic warming at equilibrium. *Climate Dynamics*, 49, 3457-3472. doi: 10.1007/s00382-017-3523-2. [T2] [T5]
- Yoshimori, M., Suzuki, M., 2019. The relevance of mid-Holocene Arctic warming to the future. *Climate of the Past*, 15, 1375-1394. doi: 10.5194/cp-15-1375-2019. [T5]
- 芳村 圭, 2016. 水同位体比情報を用いたデータ同化. *日本水文科学会誌*, 46, 87-99. doi: 10.4145/jahs.46.87. [T5]
- 芳村 圭, 2018. 同位体気象水文学の展望. *水文・水資源学会誌*, 31, 554-559. doi: 10.3178/jjshwr.31.554. [T5]
- Yumimoto, K., Tanaka, T. Y., Oshima, N., Maki, T., 2017. JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0. *Geoscientific Model Development*, 10, 3225-3253. doi: 10.5194/gmd-10-3225-2017. [T3]
- Zanatta, M., Laj, P., Gysel, M., Baltensperger, U., Vratolis, S., Eleftheriadis, K., Kondo, Y., Dubuisson, P., Winiarek, V., Kazadzis, S., Tunved, P., Jacobi, H. W., 2018. Effects of mixing state on optical and radiative properties of black carbon in the European Arctic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 14037-14057. doi: 10.5194/acp-18-14037-2018. [T3]
- Zhang, D., Murata, K., Hu, W., Yuan, H., Li, W., Matsusaki, H., Kakikawa, M., 2017. Concentration and Viability of Bacterial Aerosols Associated with Weather in Asian Continental Outflow: Current Understanding. *Aerosol Science and Engineering*, 1, 66-77. doi: 10.1007/s41810-017-0008-y. [T3]
- Zhang, H., Devred, E., Fujiwara, A., Qiu, Z., Liu, X., 2018a. Estimation of phytoplankton taxonomic groups in the Arctic Ocean using phytoplankton absorption properties: implication for ocean-color remote sensing. *Optics Express*, 26, 32280-32301. doi: 10.1364/

OE.26.032280. [T4] [T6]

- Zhang, W., Ebuchi, N., [Fukamachi, Y.](#), Cheng, F., [Ohshima, K. I.](#), Emery, B. M., Toyota, T., [Abe, H.](#), Shirasawa, K., 2019. Sea Ice Observation With Oceanographic HF Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1-13. doi: 10.1109/TGRS.2019.2936576. [T2] [T4] [T6]
- Zhang, Y., Xie, S-P., [Kosaka, Y.](#), Yang, J-C., 2018b. Pacific Decadal Oscillation: Tropical Pacific Forcing versus Internal Variability. *Journal of Climate*, 31, 8265-8279. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0164.1. [T5]
- Zhang, Y., [Yamamoto-Kawai, M.](#), Williams, W. J., 2020. Two decades of ocean acidification in the surface waters of the Beaufort Gyre, Arctic Ocean: effects of sea ice melt and retreat from 1997-2016. *Geophysical Research Letters*. doi: 10.1029/2019GL086421. [T4]
- [Zou, L.](#), Fu, Y., 2017a. Arctic Indigenous Claim for Interests and Rights under the Climate Change. *Journal of World Nations*, 4, 103-110. [T7]
- [Zou, L.](#), Fu, Y., 2017b. Enlightenment of Arctic Shipping Management to Arctic Fisheries Management. *Chinese Journal of Polar Research*, 29, 270-278. [T7]
- [Zou, L.](#), 2019. Russia's legislative development pertaining to the Northern Sea Route and its interactions with Sino-Russian Arctic cooperation. in: [Shibata, A.](#), [Zou, L.](#), [Sellheim, N.](#), et al. (Eds.), *Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors*, Routledge. [T7]

(2) 査読あり論文 (submitted)

・査読が行われる論文のうち、2019年9月30日時点で投稿済み (submitted) かつまだ受理 (accepted) されていないものを対象とする。

- [Hashino, T.](#), de Boer, G., [Okamoto, H.](#), Tripoli, G., submitted. Relationships between ice nucleation process and crystal habit for Arctic mixed-phase clouds – a numerical study. *Journal of the Atmospheric Sciences*. [T3]
- [Helbig, M.](#), Waddington, J. M., Alekseychik, P., Amiro, B., Aurela, M., Barr, A. G., Black, T. A., Blanken, P. D., Carey, S. K., Chen, J., Chi, J., Desai, A. R., Dunn, A., Euskirchen, E., Friberg, T., Flanagan, L. B., Forbrich, I., Grelle, A., Harder, S., Heliasz, M., Humphreys, E. R., Ikawa, H., [Iwata, H.](#), Isabelle, P-E., Jassal, R., Kurbatova, J., Korkiakoski, M., Kutzbach, M., [Ohta, T.](#), Lindroth, A., Löfvenius, M. O., Lohila, A., Maksimov, T., Mammarella, I., Marsh, P., Melton, J. R., Moore, P. A., Nadeau, D., Nicholls, E. M., Nilsson, M. B., Peichl, M., Petrone, R. M., Petrov, R., Quinton, W., Roulet, N., Reed, D., Runkle, B. R. K., Rutgersson, A., Sahlee, E., Sonnentag, O., Strachan, I. B., Taillardat, P., Tuittila, E-S., Tuovinen, J-P., Turner, J., [Ueyama, M.](#), Varlagin, A., Wilmking, M., Wofsy, S., submitted. Peatland-dominated boreal ecoregions at risk of drying in a warmer climate. *Nature Climate Change*. [T3]
- [Hori, M. E.](#), [Inoue, J.](#), submitted. Upper atmospheric soundings in Ice Base Cape Baranova during the YOPP special observing period. *Polar Data Journal*. [T1] [T4]
- [Kimura, N.](#), [Tateyama, K.](#), [Sato, K.](#), Krishfield, R. A., [Yamaguchi, H.](#), submitted. Unusual behavior of Beaufort Sea ice in summer 2018. *Polar Research*. [T1] [T2] [T5]
- Kylli, R., [Saunavaara, J.](#), submitted. Sámi and the early transport infrastructure in Finnish Lapland. *Barents Studies*. [T7]
- Maeda, K., [Kimura, N.](#), [Yamaguchi, H.](#), submitted. Temporal and spatial change of relationship between sea ice motion and wind in the Arctic Ocean. *Polar Research*. [T1] [T5]
- Martineau, P., [Nakamura, H.](#), [Kosaka, Y.](#), Yamamoto, A., submitted. Importance of a vertically tilting structure for energizing the North Atlantic Oscillation. *Scientific Reports*. [T3] [T5]
- Massicotte, P., Amiraux, R., Amyot, M-P., Archambault, P., Ardyna, M., Arnaud, L., Artigue, L., Aubry, C., Ayotte, P., Bécu, G., Bélanger, S., Benner, R., Bittig, H. C., Bricaud, A., Brossier, É., Bruyant, F., Chauvaud, L., Christiansen-Stowe, D., Claustre, H., Cornet-Barthaux, V., Coupel, P., Cox, C., Delaforge, A., Dezutter, T., Dimier, C., Dominé, F., Dufour, F., Dufresne, C., Dumont, D., Ehn, J., Else, B., Ferland, J., Forget, M-H., Fortier, L., Galí, M., Galindo, V., Gallinari, M., Garcia, N., Gérikas-Ribeiro, C., Gourdal, M., Gourvil, P., Goyens, C., Grondin, P-L., Guillot, P., Guilmette, C., Houssais, M-N, Joux, F., Lacour, L., Lacour, T., Lafond, A., Lagunas, J., Lalande, C., Laliberté, J., Lambert-Girard, S., Larivière, J., Lavaud, J., Le Gall, F., LeBaron, A., Leblanc, K., Legras, J., Lemire, M., Levasseur, M., Leymarie, E., Leynaert, A., Lopes dos Santos, A., Lourenço, A., Mah, D., Marec, C., Marie, D., Martin, N., Marty, C., Marty, S., Massé, G., Matsuoka, A., Matthes, L., Moriceau, B., Muller, P-E., Mundy, C. J., Neukermans, G., Oziel, L., Panagiotopoulos, C., Panagazi, J-J., Picard, G., Picheral, M., Pinczon du Sel, F., Pogorzelec, N., Probert, I., Queguiner, B., Raimbault, P., Ras, J., Rehm, E., Reimer, E., Rontani, J-F., Rysgaard, S., Saint-Béat, B., [Sampei, M.](#), Sansoulet, J., Schmidt, S., Sempéré, R., Sévigny, C., Shen, Y., Tragin, M., Tremblay, J-É., Vaulot, D., Verin, G., Vivier, F., Vladoiu, A., Whitehead, J., Babin, M., submitted. Green Edge ice camp campaigns: understanding the processes controlling the under-ice Arctic phytoplankton spring bloom. *Earth System Science Data*. [T6]
- Matsumoto, Y. T., [Yamaguchi, A.](#), submitted. Seasonal changes in the community structure of chaetognaths and the life cycle of dominant chaetognath *Eukrohnia hamata* in the Oyashio region, western subarctic Pacific. *Plankton and Benthos Research*. [T2] [T6]
- [Matsuno, K.](#), [Kanna, N.](#), [Sugiyama, S.](#), [Yamaguchi, A.](#), Yang, E. J., submitted. Impacts of meltwater discharge from marine-terminating glaciers on the protist community in Inglefield Bredning, northwestern Greenland. *Marine Ecology Progress Series*. [T2] [T6]
- Mojtabavi, S., Wilhelms, F., Cook, E., Davies, S., Sinnl, G., Skov Jensen, M., [Dahl-Jensen, D.](#), Svensson, A., Vinther, B., Kipfstuhl, S., Jones, G., Karlsson, N. B., [Faria, S. H.](#), Gkinis, V., Kjær, H., Erhardt, T., Berben, S. M. P., Nisancioglu, K. H., Koldtoft, I., Rasmussen, S. O., submitted. A first chronology for the East Greenland Ice-core Project (EGRIP) over the Holocene and last glacial termination. *Climate of the Past*. [T2]
- Mori, T., Ohata, S., Morino, Y., [Koike, M.](#), [Moteki, N.](#), [Kondo, Y.](#), submitted. Changes in black carbon aerosols in Tokyo in 2003–2017. Pro-

- ceedings of the Japan Academy, Series B. [T3]
- Mudunkotuwa, D. Y., De Silva, L. W. A., Yamaguchi, H., submitted. Impact of assimilating satellite sea ice observations on an ice-ocean coupled model in the Arctic Ocean. *Polar Science*. [T1]
- Nakamura, T., Yamazaki, K., Hoshi, K., Honda, M., Ukita, J., submitted. A comparison of the Arctic sea ice-climate impacts based on multiple sea ice concentration datasets. *Nature Communications*. [T3] [T5]
- Nakazawa, F., Nagatsuka, N., Hirabayashi, M., Goto-Azuma, K., submitted. Variation in recent annual snow deposition and seasonality of snow chemistry at the East Greenland Ice Core Project (EGRIP) camp, Greenland. *Polar Science*. [T2]
- Nandan, V., Scharien, R. K., Geldsetzer, T., Kwok, R., Rösel, A., Tonboe, R., Yackel, J. J., Mahmud, M., Granskog, M., Nomura, D., Frey, M., submitted. Snow property controls on modelled Ku-band altimeter estimates of first-year sea ice thickness: Case studies from the Canadian and Norwegian Arctic. *IEEE JSTARS*. [T1] [T2] [T6]
- Nomura, D., Wongpan, P., Toyota, T., Tanikawa, T., Kawaguchi, Y., Ono, T., Ishino, T., Tozawa, M., Tamura, T. P., Yabe, I. S., Son, E. Y., Vivier, F., Lourenco, A., Lebrun, M., Nosaka, Y., Hirawake, T., Ooki, A., Aoki, S., Else, B., Fripiat, F., Inoue, J., Vancoppenolle, M., submitted. Saroma-ko Lagoon Observations for sea ice Physico-chemistry and Ecosystems 2019 (SLOPE2019). *Bulletin of Glaciological Research*. [T1] [T2] [T4] [T6]
- Nose, T., Waseda, T., Kodaira, T., Inoue, J., submitted. Satellite retrieved sea ice concentration uncertainty and its effect on modelling wave evolution in marginal ice zones. *The Cryosphere*. [T1]
- Ohashi, Y., Aoki, S., Matsumura, Y., Sugiyama, S., Kanna, N., Sakakibara, D., submitted. Water mass structure and the effect of subglacial discharge in Bowdoin Fjord, northwestern Greenland. *Ocean Science*. [T2] [T5]
- Ono, J., Komuro, Y., Tatebe, H., submitted. Impact of sea ice thickness initialized in April on Arctic sea ice extent predictability with the MIROC climate model. [T1] [T5]
- Sampei, M., Forest, A., Fortier, L., Yamamoto, T., Hattori, H., Sasaki, H., submitted a. Variabilities in contribution of sinking dead copepods to downward flux of particulate organic carbon in Beaufort Sea. *Marine Ecology Progress Series*. [T6]
- Sampei, M., Fortier, L., Raimbault, P., Matsuno, K., Abe, Y., Babin, M., Hirawake, T., submitted b. An estimation of quantitative impacts of copepod feeding on under ice phytoplankton spring bloom (UPSB) in the western Baffin Bay. *Canadian Arctic water*. [T6]
- Sato, K., Inoue, J., Yamazaki, A., submitted. Improved Hurricane Irma track forecast with additional Arctic radiosonde observation. *Atmosphere*. [T1]
- Seguinot, J., Funk, M., Bauder, A., Wyder, T., Senn, C., Sugiyama, S., submitted. Englacial warming indicates deep crevassing in Bowdoin Glacier, Greenland. *Journal of Glaciology*. [T2]
- Shiau, C. J., Kimura, N., Yamaguchi, H., submitted. Prediction of Sea Ice Distribution in the Autumn Arctic. *Polar Science*. [T1] [T5]
- Sugiyama, S., submitted. Through the Japanese field research in Greenland: A changing natural environment and its impact on human society. *Polar Record: Special Issue: International Law for Sustainability in Arctic Resource Development*. [T2]
- Takegawa, N., Seto, T., Moteki, N., Koike, M., Oshima, N., Adachi, K., Kita, K., Takami, A., Kondo, Y., submitted. Enhanced New Particle Formation above the Marine 1 Boundary Layer over 2 the Yellow Sea: Potential Impacts on Cloud Condensation Nuclei. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. [T3]
- Thomas, J. L., Stutz, J. P., Frey, M. M., Bartels-Rausch, T., Altieri, K., Baladima, F., Browse, J., Dall'Osto, M., Marelle, L., Mougnot, J., Murphy, J. G., Nomura, D., Pratt, K., Willis, M., Zieger, P., Abbatt, J., Douglas, T. A., Facchini, M. C., France, J., Jones, A. E., Kim, K., Matrai, P. A., McNeill, V. F., Saiz-Lopez, A., Shepson, P., Steiner, N., Law, K. S., Arnold, S. R., Delille, B., Schmale, J., Sonke, J., Dommergue, A., Voisin, D., Melamed, M. L., Gier, J., submitted. A transdisciplinary initiative to foster understanding interactions between the Cryosphere and Atmospheric Chemistry (CATCH). *Elementa: Science of the Anthropocene*. [T1] [T2] [T6]
- Toyota, T., Ono, T., Tanikawa, T., Wongpan, P., Nomura, D., submitted. Effects of snowfall on sea ice properties at the early growth stage. *Annals of Glaciology*. [T1] [T2] [T6]
- Tyrllis, E., Matei, D., Bader, J., Manzini, E., Ukita, J., Nakamura, H., submitted. On the role of Ural Blocking in driving the Warm-Arctic/Cold-Siberia pattern. *Geophysical Research Letters*. [T3] [T5]
- Waga, H., Hirawake, T., Grebmeier, J. M., submitted a. Recent change in benthic macrofaunal community composition in relation to physical forcing in the Pacific Arctic. *Polar Biology*. [T6]
- Waga, H., Hirawake, T., Nakaoka, M., submitted b. Influences of size structure and post-bloom supply of phytoplankton on body size variations in a common Pacific Arctic bivalve (*Macoma calcarea*). *ICES Journal of Marine Science*. [T6]
- Yamaguchi, A., Ashjian, C. J., Campbell, R. G., Abe, Y., submitted. Vertical distribution, population structure and developmental characteristics of the less studied but globally distributed mesopelagic copepod *Scaphocalanus magnus* in the western Arctic Ocean. *Journal of Plankton Research*. [T2] [T6]
- Yamamura, O., Kooka, K., submitted. Community structure of demersal fish over the continental shelf off Doto coast, Hokkaido Island. *Ecological Research*. [T6]
- Yamazaki, A., Miyoshi, T., Enomoto, T., Komori, N., Inoue, J., submitted. Verification of EFSO at different geographical locations: Dynamics of propagation of observation impacts. *Monthly Weather Review*. [T1]
- Yang, J.-C., Lin, X., Xie, S.-P., Zhang, Y., Kosaka, Y., Li, Z., submitted. Synchronized tropical Pacific and continental variability during the past three decades. *Nature Climate Change*. [T5]

(3) 査読なし論文 (published)

・査読が行われない論文のうち、2019年9月30日時点で公開済み (published) のものを対象とする (公開準備中のものも含む)。

- Abe, Y., 2016. Ecological Study on the Zooplankton Community in the Oyashio Region During the Spring Phytoplankton Bloom. *Memiors of the Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University*, 58, 13-63. doi: 10.14943/mem.fish.58.1-2.13. [T6]
- Arrigo, K., Hill, V., Bélanger, S., Mitchell, B. G., Hirawake, T., Babin, M., 2015. Estimates of Net Primary Production from Space-based Measurements (Chapter 5). *Ocean Colour Remote Sensing in Polar Seas (IOCCG Report Number 16)*. International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG), 95-108. ISBN: 978-1-896246-51-2. [T6]
- Asaji, I., Sakakibara, D., Yamasaki, S., Sugiyama, S., 2019. Rapid retreat of Bowdoin Glacier in northwestern Greenland controlled by the ocean and glacier bed geometries. *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 46-47. [T2]
- 浅地 泉, 榑原 大貴, 山崎 新太郎, 杉山 慎, 2017. グリーンランド北西部 Bowdoin 氷河における末端位置の変動と海底地形の関係. 北海道の雪氷, 36, 49-52. [T2]
- 浅地 泉, 榑原 大貴, 杉山 慎, 山崎 新太郎, 2018. グリーンランド北西部 Bowdoin 氷河における末端位置の変動と海底地形の関係. 北海道の雪氷, 37, 119-122. [T2]
- Barber, D. G., Meier, W. N., Gerland, S., Mundy, C. J., Holland, M., Kern, S., Li, Z., Michel, C., Perovich, D. K., Tamura, T., Berge, J., Bowman, J., Christiansen, J. S., Ehn, J. K., Ferguson, S., Granskog, M. A., Kikuchi, T., Kuosa, H., Light, B., Lundholm, N., Melnikov, I. A., Polashenski, C., Smedsrud, L. H., Spreen, G., Tschudi, M., Vihma, T., Webster, M., Zhang, L., 2017. Arctic sea ice (Chapter 5). *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*, 103-136. ISBN: 978-82-7971-101-8. [T1] [T4]
- Bertelsen, R., Noori, N., Rickli, J-M., 2018a. Transnational Knowledge Relations for Building Knowledge-Based Societies in the Gulf. in: Bertelsen, R., Noori, N., Rickli, J-M. (Eds.), *Strategies of Knowledge Transfer for Economic Diversification in the Arab States of the Gulf*, Gerlach Press, 2-16. ISBN: 9783959940146. [T7]
- Chambers, C., Greve, R., Altena, B., Lefevre, P-M., 2019. On the possibility of a long subglacial river under the north Greenland ice sheet. *The Cryosphere Discussions 2019*, 1-21. doi: 10.5194/tc-2019-141. [T2]
- Cordeiro, L. M. P., Yamada, T. J., 2018. Sensitivity experiments on multiple equilibria observed in a soil-atmosphere model. 平成 29 年度土木学会論文報告集第 74 号 CD-ROM: B-04. [T5]
- De Silva, L. W. A., Yamaguchi, H., 2017. Numerical Study of Oil Spilled Behavior under Ice-Covered Area in the East Siberian Sea. 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'17), 366-375. [T1]
- De Silva, L. W. A., Terui, T., Yamaguchi, H., Inoue, J., 2019. Operational sea ice prediction for the Japanese research vessel MIRAI's expedition cruise in 2018. *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 67-70. [T1] [T8]
- 藤支 良貴, 深町 康, 漢那 直也, 杉山 慎, 2019. グリーンランド北西部ボードイン氷河前縁フィヨルドにおける水温・塩分・流速の長期係留観測. 北海道の雪氷, 38, 15-18. [T2] [T4]
- Furuichi, M., Otsuka, N., 2016. Container Quick Delivery Scenario between East Asia and Northwest Europe by the NSR/SCR-combined Shipping in the Age of Mega-ships. *The International Association of Maritime Economists*. [T1] [T7]
- Fushimi, S., Ozeki, T., Yamaguchi, H., Katsumata, M., Inoue, J., 2019. Sea spray observation and analysis on R/V Mirai. *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 255-257. [T1]
- Gavril'eva, T., Prisiazhnyi, M., Tabata, S., Stepanova, H., Bochkarev, N., Sivtseva, T. i., 2016. Territorial Differentiation in the Providing of Accessibility of Electrical and Thermal Energy in Yakutia. *Arktika, XXI vek. Gumanitarnye nauki*, 2, 42-56. [T7]
- 東久美子, 2015. グリーンランドのアイスコアから分ること. 南極OB会編集委員会 (編), 北極読本, 成山堂書店. ISBN: 978-4425948413. [T2] [T3]
- Greve, R., Calov, R., Herzfeld, U. C., 2017. Projecting the response of the Greenland ice sheet to future climate change with the ice sheet model SICOPOLIS. *低温科学*, 75, 117-129. doi: info:doi/10.14943/lowtemsci.75.117. [T2]
- Greve, R., 2018a. Ice sheets, global warming and sea level. *Proceedings of the 18th Chitose International Forum on Photonics Science & Technology*, 12-17. [T2]
- Greve, R., 2018b. Simulations of the present state and future evolution of the Greenland ice sheet with the model SICOPOLIS. *低温研ニュース*, 45, 8-9. [T2]
- 濱 齊之, 阿部 義之, 松野 孝平, 山口 篤, 2019. 4 連ノルパックネットを用いたネット目合いの違いが濾過効率と採集効率に与える影響に関する研究. 北海道大学水産科学研究彙報, 69, 47-56. doi: 10.14943/bull.fish.69.1.47. [T2] [T6]
- Hashimoto, A., Niwano, M., Aoki, T., Tsutaki, S., Sugiyama, S., Yamasaki, T., Iizuka, Y., Matoba, S., 2017. Numerical weather prediction system based on JMA-NHM for field observation campaigns on the Greenland ice sheet. *低温科学*, 75, 91-104. doi: 10.14943/lowtemsci.75.91. [T2] [T3] [T6]
- Hashimoto, A., Niwano, M., Yamaguchi, S., Yamasaki, T., Aoki, T., 2018. Numerical simulation of a lee-side downslope wind at Siorapaluk in the northwest Greenland. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, 48, 5.05-5.06. [T2] [T3]
- Hayashi, N., 2017. The human dimension of climate change research in Greenland: Towards a new form of knowledge generation. *低温科学*, 75, 131-141. doi: 10.14943/lowtemsci.75.131. [T2]
- 林 直孝, 2019. グリーンランド=イヌイットの生活と気候変動-気候が変わると人の生活はどうなるのかな?- . 南極・北極から学ぶ地球環境変動, 日本極地研究振興会, 23-24. [T2]
- 羽月 稜, 黒崎 豊, 的場 澄人, 杉山 慎, 2018. 2016/17 年グリーンランド北西部カナック氷帽上における年間ダストフラックスの空間分布. 北海道の

- 雪氷, 37, 23-26. [T2]
- Henriksen, T., 2017. Institutional Approaches to (Future) Governance of the Arctic Ocean. PCRC Working Paper No.7. [T7]
- Henriksen, T., 稲垣 治 (監訳), 柴田 明穂 (監訳), 2018. 北極海がバナンス(の将来)への制度的アプローチ(第8章). 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋, 東信堂, 125-144. ISBN: 978-4798915081. [T7]
- 終 萌乃, 山口 篤, 2019. 初夏のオホーツク海における深海におよぶ優占大型カイアシ類の鉛直分布および個体群構造. 北海道大学水産科学研究 彙報, 69, 83-91. doi: 10.14943/bull.fish.69.2.83. [T2] [T6]
- 平林 幹啓, 2017. 連続融解・分析装置による雪氷コアの分析. 化学と教育, 65, 338-339. doi: 10.20665/kakyoshi.65.7_338. [T2]
- 平澤 享, 鈴木 光次, 2018. 海洋中の光(第8章) 海洋観測ガイドライン編集委員会 (編), 海洋観測ガイドライン 第8巻 センサー観測, 日本海洋学会, G808JP:001-008. ISBN: 978-4-908553-55-4. [T6]
- 平澤 享, 綿貫 豊, 2019. 北極海の生態系・水産活動へのインパクト(第2章第3節). 北極域研究推進プロジェクト事務局 (編), これからの北極, 36-41. [T2] [T6]
- Hiyama, T., Hatta, S., Park, H., 2019. River Discharge. Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia, Springer Singapore, 207-229. ISBN: 978-981-13-6317-7. [T3] [T4] [T7]
- 檜山 哲哉, 2019b. 陸域の水物質循環へのインパクト(第2章第4節) 北極域研究推進プロジェクト事務局 (編), これからの北極, 42-46. [T3] [T7]
- 本多 俊和, 2017. 極北民族イヌイト社会にみる衣装の機能と象徴性. 西垣内 磨磨美, 山本 伸, 馬場 聡 (編), 衣装が語るアメリカ文学, 金星堂, 69-84. ISBN: 978-4-7647-1172-3. [T7]
- 星 一平, 浮田 甚郎, 本田 明治, 中村 哲, 山崎 孝治, 三好 勉信, 2019. 少氷年に発生した Weak Polar Vortex event における成層圏 - 対流圏鉛直結合の特徴. 月刊海洋, 51, 89-96. [T3] [T5]
- Hoshino, S., Tateyama, K., 2018. Validation and evaluation of sea-ice thickness derived from satellite altimeter SIRAL in the Arctic. Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018, 43-46. [T1] [T2]
- 細井 遵敬, 山田 朋人, 2018. エネルギーバランスモデルによる気候の安定性. 平成 29 年度土木学会論文報告集第 74 号 CD-ROM: B-01. [T5]
- Ichii, K., Kondo, M., Ueyama, M., 2018. Current status of empirical estimates of terrestrial carbon and water cycles using eddy-covariance network and remote sensing data. iLEAPS Newsletter: Special Issue Asia, 4-11. [T3]
- 市井 和仁, 渡辺 裕之, 谷口 弘智, 植山 雅仁, 近藤 雅征, 2018. 機械学習を用いた地上観測・衛星観測データの統合による広域陸域熱・水・炭素フラックスの推定. 日本リモートセンシング学会誌, 38, 114-120. doi: 10.11440/rssj.38.114. [T3]
- Iijima, Y., Fedorov, A. N., 2019. Permafrost-Forest Dynamics. Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia, Springer Singapore, 175-205. ISBN: 978-981-13-6317-7. [T4] [T7]
- 飯島 慈裕, 2017. 寒い大地の大きな変化(特集 北極 地球温暖化がもたらすもの). 地理, 62, 34-41, 図巻頭 31. [T4] [T7]
- 飯島 慈裕, 2018a. 科学通信 地球を俯瞰する自然地理学 寒冷圏陸域の環境変動研究の経験から見えてきたもの. 科学, 88, 342-344. [T4] [T7]
- 飯塚 芳徳, 的場 澄人, 藤田 秀二, 新堀 邦夫, 山崎 哲秀, 宮本 淳, 堀 彰, 齊藤 健, 古川 峻仁, 杉山 慎, 青木 輝夫, 2017. グリーンランド南東ドームにおける浅層アイスコア掘削と初期物理解析. 低温科学, 75, 45-52. doi: 10.14943/lowtemsci.75.45. [T2] [T3]
- 稲垣 治, 2018. 国際海洋開発理事会と北極評議会の協働: その規範的背景(第12章). 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋, 東信堂, 180-192. ISBN: 978-4798915081. [T7]
- Inoue, J., 2017. Chukchi Sea radiosondes help detecting hurricane Irma. PolarPredictNews #4, 6-7. [T1]
- 猪上 淳, 2016a. 北極の海と空の研究(第5章). 筆保 弘徳, 和田 章義 (編), 天気と海の関係についてわかっていることとわかっていないこと, ベレ出版. ISBN: 978-4860644734. [T1]
- 猪上 淳, 2017a. 暖かくなった北極とその影響(特集 北極 地球温暖化がもたらすもの). 地理, 62, 12-19. [T1]
- 井浦 太一, 鷹野 敏明, 中田 裕之, 河村 洋平, 矢永 賢洋, 永瀬 雄斗, 2017. 北極ニーオルスン基地での雲レーダ FALCON-A と CloudSAT/CPR の同時観測. 大気電気学会誌, 90. [T3]
- Johnstone, R. L., 稲垣 治 (監訳), 柴田 明穂 (監訳), 2018. 北極評議会を通じた環境ガバナンス(第3章). 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋, 東信堂, 30-48. ISBN: 978-4798915081. [T7]
- 金谷 有剛, 2018. 海洋性大気中での汚染物質計測と数値モデル解析: アジアから北極まで. マリンエンジニアリング, 53, 172-176. doi: 10.5988/jime.53.172. [T3]
- Kanna, N., Sugiyama, S., Ando, T., Asaji, I., Fujishi, Y., 2019. Ocean measurement near the fronts of marine-terminating glaciers in North-western Greenland. Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019, 254. [T2]
- 漢那 直也, 西岡 純, 豊田 威信, 2016. オホーツク海における海水が関わる鉄の供給過程の解明. 低温科学, 74, 105-114. doi: 10.14943/lowtemsci.74.105. [T2] [T6]
- Kawaguchi, Y., Nishino, S., Inoue, J., Takeda, H., Maeno, K., Oshima, K., 2016b. Enhanced turbulent energy dissipation due to internal wave breaking within an anticyclonic Arctic eddy. Proceedings of the 31st International Symposium on the Okhotsk Sea & Sea Ice 2016, 128-130. [T1] [T4] [T6]
- Kikuchi, T., Yamaguchi, H., Yoshinaga, H., Fukuba, S., Miwa, M., Kashiwagi, T., Yoshida, H., Ohshima, K. I., Fukamachi, Y., Yabuki, H., Kodama, Y., 2019b. Arctic Technology Research Forum to consolidate opinions from industry. Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019, 171-175. [T1] [T2] [T4] [T8]
- 菊地 隆, 2017. 北極(2. 海洋物理 -2.3 極域の変化 -2). 日本海洋学会 (編), 海の温暖化 一変わりゆく海と人間活動の影響一, 朝倉書店, 29-34. ISBN: 978-4254161304. [T4]
- 菊地 隆, 2018. 変化する北極海環境に関する観測研究と国際協力: 過去・現在・未来(第14章). 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋, 東信堂, 198-208. ISBN: 978-4798915081. [T4]
- Kim, S-J., Kim, B-M., Ukita, J., 2019. How is recent Arctic warming impacting East Asian weather? Eos, 100. doi: https://doi.

- org/10.1029/2019EO129517. [T3] [T5]
- Kimura, N., Tateyama, K., Yamaguchi, H., Hasumi, H., 2019b. Observation of multi-year ice distribution using the satellite microwave data. Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019, 283-284. [T1] [T2] [T5]
- 小林 秀樹, 2018. クラウドベースの地理空間データ解析プラットフォーム「Google Earth Engine」. 日本リモートセンシング学会誌, 38, 125-130. doi: 10.11440/rssj.38.125. [T3]
- 近藤 研, 榎原 大貴, 津滝 俊, 杉山 慎, 2019. グリーンランド北西部カナック氷帽における氷流動速度のモニタリング観測と数値モデリング. 北海道の雪氷, 38, 105-108. [T2] [T6]
- 近藤 祉秋, 2017b. 石油時代のアラスカ先住民社会: 自然・人・産業. 寒地技術論文・報告集 寒地技術シンポジウム, 33, 18-23. [T7]
- 近藤 祉秋, 2018a. 「アラスカ物語」の後で—グイッチン社会の狩猟をめぐる文化復興・政治・文学. North to the Future: 北方から未来へ: 日本人が出会ったアラスカ (第 33 回特別展図録), 40-45. [T7]
- 近藤 祉秋, 2018b. 食料主権論からみたアラスカ先住民の生業と伝統食の現在. 日本食生活学会誌, 29, 5-9. doi: 10.2740/jisdh.29.1_5. [T7]
- 近藤 祉秋, 2019b. 人新世の北方漁業史: 変わり続ける環境と社会に生きる北方民族. 北海道立北方民族博物館研究紀要, 28, 1-6. [T7]
- Kotani, A., Ohta, T., 2019. Water Cycles in Forests. Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia, Springer Singapore, 43-67. ISBN: 978-981-13-6317-7. [T3]
- 呉 勉, 佐藤 友徳, 2017. 気象庁の視程観測データを用いた冬季視程の統計解析. 北海道の雪氷, 36, 133-136. [T5]
- 黒崎 豊, 的場 澄人, 飯塚 芳徳, 杉山 慎, 安藤 卓人, 青木 輝夫, 2018b. 2017 年グリーンランド北西部 (SIGMA-A サイト) におけるアイスコアの氷安定同位体比. 北海道の雪氷, 37, 91-94. [T2] [T3]
- Li, X., Otsuka, N., 2019. Characteristics of recent NSR shipping activities by destination and objective. Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019, 155-158. [T1] [T7]
- Maekakuchi, M., Abe, Y., Matsuno, K., Hirawake, T., Yamaguchi, A., 2018. Horizontal and vertical distribution of the appendicularian community and population structure in the Bering and Chukchi Seas during the summer of 2007. 北海道大学水産科学研究彙報, 68, 43-49. doi: 10.14943/bull.fish.68.3.43. [T2] [T6]
- Masumoto, S., 2019. Pathogenic fungi on vascular plants in the Arctic: Diversity, Adaptation, Effect on host and ecosystems, and response to climate change. in: Tsuji, M., Hoshino, T. (Eds.), Fungi in Polar Regions, CRC Press. [T6]
- 的場 澄人, 山口 悟, 對馬 あかね, 青木 輝夫, 杉山 慎, 2017. グリーンランド氷床北西部沿岸部における表面質量収支の変動. 低温科学, 75, 37-44. doi: 10.14943/lowtemsci.75.37. [T2] [T3]
- 的場 澄人, 山崎 哲秀, 2018. 2016 年 12 月にグリーンランド北西部カナック村で生じた海水流出事故と漁業被害—グリーンランド北西部における社会・自然環境と生業の変化—. 北海道の雪氷, 37, 51-54. [T2]
- 松村 義正, 大橋 良彦, 青木 茂, 杉山 慎, 2017. 氷河融解水を起源とする高濁度水ブルームの数値モデリング. 低温科学, 75, 77-84. doi: 10.14943/lowtemsci.75.77. [T2] [T5]
- Matsuno, K., Fujiwara, A., Hirawake, T., Yamaguchi, A., 2019. Ingestion rates and grazing impacts of Arctic and Pacific copepods in the western Arctic Ocean during autumn. Bulletin of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 69, 93-102. doi: 10.14943/bull.fish.69.2.93. [T2] [T4] [T6]
- Matsuoka, S., Sugiyama, Y., Doi, H., 2019. DNA metabarcoding for fungal diversity integration in polar regions. in: Tsuji, M., Hoshino, T. (Eds.), Fungi in Polar Regions, CRC Press. [T6]
- 三島 かおり, 松野 孝平, 山口 篤, 2019. 光学式プランクトンカウンターによる夏季の西部北太平洋における動物プランクトン群集のサイズ構造解析. 北海道大学水産科学研究彙報, 69, 37-45. doi: 10.14943/bull.fish.69.1.37. [T2] [T6]
- 三隅 良平, 岩崎 紇紀, 道端 拓朗, 竹見 哲也, 山下 克也, 佐藤 陽祐, 當房 豊, 大畑 祥, 橋本 明弘, 折笠 成宏, 田尻 拓也, 村上 正隆, 2016. シンポジウム 第 17 回国際雲・降水会議 (ICCP2016) の報告. 天気, 63, 862-868. [T3]
- 森 大知, 森川 康平, 関谷 和樹, 河村 洋平, 鷹野 敏明, 2016. 1 アンテナ方式雲粒観測用 95GHz FM-CW レーダの開発 (アンテナ・伝播). 電子情報通信学会技術研究報告 IEICE technical report, 116, 5-8. [T3]
- 森下 丈二, 2018. 北極公海での新漁業管理機関の設立の動きについて (第 10 章). 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋, 東信堂, 156-168. ISBN: 978-4798915081. [T7]
- 本村 眞澄, 田畑 伸一郎, 2019. 資源開発へのインパクト (第 2 章第 2 節). 北極域研究推進プロジェクト事務局 (編), これからの北極, 27-35. [T7]
- Mudunkotuwa, D., Yamaguchi, H., 2016. Data assimilation in an ice-ocean coupled model to improve sea ice predictions in the Arctic Ocean. Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice 2016, 235-238. [T1]
- Mudunkotuwa, D. Y., De Silva, L. W. A., Yamaguchi, H., 2019. Kalman filter based data assimilation system to improve numerical sea ice predictions in the Arctic Ocean. OCEANS 2019 - Marseille, 1-5. doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867109. [T1]
- 永井 尚生, 山形 武靖, 長谷川 憲, 工藤 輝, 熊本 雄一郎, 西野 茂人, 2018a. 北太平洋 - 北極海における ^{129}I の分布 (総特集 海洋システムの謎に挑む化学: 蒲生俊敬教授退職記念号). 海洋号外, 98-104. [T4] [T6]
- 永井 信, 斎藤 琢, 奈佐原 (西田) 顕郎, 2018b. リモートセンシングとオープンアクセスデータの統合的解析による植物季節観測と土地利用土地被覆分類の高精度化. 日本リモートセンシング学会誌, 38, 99-104. doi: 10.11440/rssj.38.99. [T3]
- Nakanowatari, T., Inoue, J., Sato, K., Bertino, L., Xie, J., Matsueda, M., Yamagami, A., Yabuki, H., Sugimura, T., Otsuka, N., 2018b. Medium-range predictability of summertime sea ice thickness distribution in the East Siberian Sea on TOPAZ4 data assimilation system. Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018, 11-14. [T1] [T7] [T8]
- Nakanowatari, T., Mitsudera, H., 2019. Long-term trend and interannual to decadal variability in the Sea of Okhotsk. Changing Asia-Pacific Marginal Seas, Springer. [T1]
- 西本 健太郎, 2018. 極海コード採択後の北極海の航行規制 (第 4 章). 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋, 東信堂, 49-56. ISBN: 978-

4798915081. [T7]
- Ohnishi, E., 2016. The Arctic Concert System and its Challenges. *Baltic Rim Economies*, 3, 10. [T7]
- Ohnishi, E., Saunavaara, J., Otsuka, N., 2019. How the “Arctic League” views the use of the Arctic Ocean under climate change? *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 142-145. [T1] [T7]
- 大西 富士夫, 2016a. ロシアの北極協調路線はいつまで続くのか: 現状維持政策の要因と修正主義政策への転換の可能性. *インテリジェンス・レポート*, 65-74. [T7]
- 大西 富士夫, 2017a. 地球温暖化をめぐる北極国際関係 (特集 北極 地球温暖化がもたらすもの). *地理*, 62, 51-59. [T7]
- Ohta, T., Maximov, T. C., Fedorov, A. N., Desyatkin, A. R., 2019a. *Water and Carbon Dynamics in Eastern Siberia: Introduction*. *Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia*, Springer Singapore, 1-23. ISBN: 978-981-13-6317-7. [T3]
- Ohta, T., Hiyama, T., 2019. *Water and Carbon Dynamics in Eastern Siberia: Concluding Remarks*. *Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia*, Springer Singapore, 299-301. ISBN: 978-981-13-6317-7. [T3] [T7]
- Okada, K., Yamaguchi, H., Ono, J., Matsuzawa, T., 2019. Evaluation of the Northern Sea Route Feasibility by Optimum Route Search. *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 262-265. [T1] [T5]
- Okuda, H., Tateyama, K., Otsuka, N., 2018. Study on observation of ice condition and ship speed using satellite remote sensing in the Northern Sea Route. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018*, 97-100. [T1] [T2] [T7]
- Okuda, H., Tateyama, K., Otsuka, N., 2019. Development of ship speed prediction method in the ice-covered waters along the Northern Sea Route. *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 273-274. [T1] [T2] [T7]
- 奥野 淳一, 2018b. 後氷期地殻変動. 鳥海 光弘, 入船 徹男, 岩森 光, 他 (編), *図説地球科学の事典*, 朝倉書店. ISBN: 978-4254160727. [T2]
- Ono, J., Komuro, Y., Tatebe, H., 2019b. Impact of sea ice thickness on the predictability of the Arctic environmental variability. *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 88-89. [T1] [T5]
- Osabe, T., Fukuda, J., Hara, T., Ohnishi, E., Otsuka, N., Saitoh, S-I., Sugimoto, A., Takahashi, M., Tanaka, M., Tanaka, S., Yasunaga, H., 2018. Future scenarios for Arctic 2050. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018*, 117-118. [T1] [T2] [T7]
- 大島 和裕, 堀 正岳, 2017. 2016 年春季「極域・寒冷域研究連絡会」の報告: 極域における気象庁客観解析データの再現性と利用. *天気*, 64, 113-117. [T1] [T4]
- 大島 和裕, 堀 正岳, 佐藤 和敏, 浅井 博明, 荒木 健太郎, 2017. 2017 年春季「極域・寒冷域研究連絡会」の報告: マルチスケールで考える, 都市における降雪・積雪. *天気*, 64, 823-826. [T1] [T4]
- 大島 和裕, 山崎 孝治, 2017. 南極・北極域の水蒸気輸送過程 (南極氷床と大気物質循環・気候, 南極への大気・水・物質輸送). *気象研究ノート*, 37-50. [T4] [T5]
- Osono, T., Matsuoka, S., Hobara, S., Hirose, D., Uchida, M., 2019. Diversity and ecology of fungi in polar region: Comparisons between Arctic and Antarctic plant remains. in: Tsuji, M., Hoshino, T. (Eds.), *Fungi in Polar Regions*, CRC Press, 17-29. [T6]
- Otsuka, N., Imai, K., Nagakawa, K., Furuichi, M., 2016. Northern Sea Route Transport Scenarios for various cargoes. *Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice 2016*, 53-57. [T1] [T7]
- Otsuka, N., Li, X., Izumiyama, K., 2018b. Characteristics of sea ice condition along the Northern Sea Route. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018*, 89-92. [T1] [T7]
- Otsuka, N., Li, X., Izumiyama, K., 2018c. The Northern Sea Route, recent activities and trend. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018*, 86-88. [T1] [T7]
- Otsuka, N., Yamaguchi, H., Tateyama, K., Kashiwagi, T., 2018d. Study on navigability of the Arctic Sea Route. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018*, 124-125. [T1] [T2] [T7]
- Otsuka, N., Li, X., Izumiyama, K., 2019a. Characteristics of sea ice condition for safe navigation along the Northern Sea Route. *Proceedings of Civil Engineering Conference in the Asian Region CECAR 8*. [T1] [T7]
- Otsuka, N., Li, X., Tateyama, K., 2019b. Investigation of ship speed along the Northern Sea Route by satellite AIS. *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 152-154. [T1] [T2] [T7]
- Otsuka, N., Nakamura, E., Saunavaara, J., Ohnishi, E., 2019c. Desktop study of Northern Sea Route trial shipping. *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 159-161. [T1] [T7]
- Otsuka, N., Nakamura, E., Saunavaara, J., Ohnishi, E., 2019d. Recent activity and possibility of the Northern Sea Route. *Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019*, 183-185. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2016. 北極海航路 (Northern Sea Route) の過去, 現在, 未来. *運輸と経済*, 76, 52-59. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2017a. 国際化する北極問題と各国の北極政策. *寒地技術論文・報告集 寒地技術シンポジウム*, 33, 12-17. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2018a. 氷上シルクロードの展開. 進藤 榮一, 周 璋生 (編), *一帯一路からユーラシア新世紀の道*, 日本評論社, 第 12 章. ISBN: 978-4-535-55933-2. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2018b. 北極海航路による海上輸送の経済合理性と今後の可能性. *マリンエンジニアリング*, 53, 694-698. doi: 10.5988/jime.53.694. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2018c. 北極海航路の利活用と新たな展開. *運輸と経済*, 78, 55-62. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2019a. 北極海航路へのインパクト (第 2 章第 1 節). *北極域研究推進プロジェクト事務局 (編), これからの北極*, 19-26. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2019b. ひらかれる海のみち-北極海は通れるか?- 南極・北極から学ぶ地球環境変動, *日本極地研究振興会*, 27-28. [T1] [T7]
- Ozeki, T., Adachi, S., Aoki, S., 2019. An Investigation of Oxygen Isotope Fractionation during Sea Spray Icing and Observation of Snow Mass Fraction of Spray Ice. *Proceedings of the International Workshop on Atmospheric Icing of Structures 2019*. [T1] [T2]

- Pérez, E. C., Scopelliti, M., 2018. Arctic Region. Oxford Bibliographies in International Law. doi: 10.1093/OBO/9780199796953-0090. [T7]
- Podolskiy, E. A., Genco, R., Sugiyama, S., Walter, F., Funk, M., Minowa, M., Tsutaki, S., Ripepe, M., 2017. Seismic and infrasound monitoring of Bowdoin Glacier, Greenland. 低温科学, 75, 15-36. doi: 10.14943/lowtemsci.75.15. [T2] [T6]
- Reynolds, R. A., Matsuoka, A., Hirawake, T., Bélanger, S., Mitchell, B. G., 2015. Ocean Colour Algorithms and Bio-optical Relationships for Polar Seas (Chapter 4). Ocean Colour Remote Sensing in Polar Seas (IOCCG Report Number 16). International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG), 61-94. ISBN: 978-1-896246-51-2. [T6]
- 榎原 大貴, 漢那 直也, 杉山 慎, 中坪 俊一, 森 章一, 齋藤 史明, 2016. グリーンランドにおける氷河・海洋観測報告. 北海道大学低温科学研究所技術部技術報告. 22, 7-10. [T2]
- 佐藤 友徳, 中村 哲, Erdenebat, E., 寺村 大輝, 2019. 総観気象と大気: 陸面相互作用. 低温科学, 77, 61-70. doi: 10.14943/lowtemsci.77.61. [T5]
- Saunavaara, J., 2019d. Improving connectivity between East Asia and Europe through the Arctic: Submarine fiber-optic cable projects current status. Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019, 146-147. [T7]
- Scopelliti, M., 2018. Liderazgo climático europeo: ¿qué está en juego? ICEI Occasional Papers OP03/18, 32-39. [T7]
- 柴田 明穂, 2016. 北極: 国際科学協力推進のための独自の法域. 国際協力論集, 24, 45-56. doi: info:doi/10.24546/81009634. [T7]
- 柴田 明穂, 2018a. 北極国際科学協力促進協定の意義 (第 17 章). 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋, 東信堂, 225-254. ISBN: 978-4798915081. [T7]
- 柴田 麻衣, 山口 悟, 藤田 耕史, 安達 聖, 安藤 卓人, 藤田 秀二, 堀 彰, 青木 輝夫, 飯塚 芳徳, 2018. グリーンランド南東ドームアイスコアの近赤外線反射率測定. 北海道の雪氷, 37, 129-130. [T1] [T2] [T3]
- 末吉 哲雄, 2019. 北極域で起きている変化と今後の予測 (第 1 章). 北極域研究推進プロジェクト事務局 (編), これからの北極, 3-17.
- 杉浦 幸之助, 2018. 北東アジアの水循環. 和田 直也, 今村 弘子 (編), 自然と経済から見つめる北東アジアの環境 増補改訂, 富山大学出版会, 54-69. ISBN: 978-4-340-53030-4. [T3]
- Sugiyama, S., Tsutaki, S., Sakakibara, D., Saito, J., Ohashi, Y., Katayama, N., Podolskiy, E. A., Matoba, S., Funk, M., Genco, R., 2017. Recent ice mass loss in northwestern Greenland: Results of the GRENE Greenland project and overview of the ArCS project. 低温科学, 75, 1-13. doi: 10.14943/lowtemsci.75.1. [T2] [T6]
- 杉山 慎, 2017b. 氷の島グリーンランドが氷を失っています (特集 北極 地球温暖化がもたらすもの). 地理, 62, 20-27. [T2]
- Syroechkovskiy, E., Lancot, R. B., Jun, L., Beng, H. C., Kang, S-R., Ichikawa, T., Tatsuzawa, S., Kumar, S., Sivananthaperumal, B., Yong, D. L., Price, C., Watkins, D., 2019. Arctic Migratory Birds Initiative (AMBI): East Asian-Australasian Flyway Workplan, Arctic Migratory Birds Initiative (AMBI): Workplan 2019-2023. CAFF, 42-49. [T6] [T7]
- Tabata, S., 2016. Research on the Socio-Economic Development of the Russian Far North. Baltic Rim Economies, 3, 31. [T7]
- 田畑 伸一郎, 2018. ロシア北極域経済の現状: 地域財政の分析を中心に (特集 北極開発に向かうロシア). ロシア NIS 調査月報, 63, 22-32. [T7]
- Takahashi, M., 2017a. Autonomy and Security: Greenland's Right to Self-Determination and the Thule Air Base (Chapter2). Working paper for Arctic Politics Research Seminars 2017. [T2] [T7]
- Takahashi, M., 2017b. Introduction: The Influence of Sub-State Actors on National Security. Working paper for Arctic Politics Research Seminars 2017. [T2] [T7]
- Takahashi, M., 2019f. Part II - The Future of Greenland: Political and Economic Implications for the Arctic - Commentary: An International Relations Perspective. The Arctic in World Affairs: A North Pacific Dialogue on Global-Arctic Interactions - The Arctic Moves from Periphery to Center (2019 North Pacific Arctic Conference Proceedings). [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2017a. 北極をめぐる政治. 北欧文化協会, バルト＝スカンディナヴィア研究会, 北欧建築・デザイン協会 (編), 北欧文化事典, 丸善出版, 68-69. ISBN: 978-4621301715. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2017b. グリーンランドの政治経済. 北欧文化協会, バルト＝スカンディナヴィア研究会, 北欧建築・デザイン協会 (編), 北欧文化事典, 丸善出版, 70-71. ISBN: 978-4621301715. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2017c. グリーンランドの対外関係. 北欧文化協会, バルト＝スカンディナヴィア研究会, 北欧建築・デザイン協会 (編), 北欧文化事典, 丸善出版, 72-73. ISBN: 978-4621301715. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2019c. 日本のなかの北極, 北極のなかの北海道. 長嶋 俊介 (編), 日本ネシア論 (別冊『環』25), 藤原書店, 434-436. ISBN: 9784865782233. [T2] [T7]
- 高倉 浩樹, 2017b. 北極域に暮らす先住民と環境変動 (特集 北極 地球温暖化がもたらすもの). 地理, 62, 42-50. [T7]
- 高倉 浩樹, 2019. 北極域の先住民と環境へのインパクト (第 2 章第 5 節). 北極域研究推進プロジェクト事務局 (編), これからの北極, 47-53. [T7]
- 鷹野 敏明, 矢永 賢洋, 河村 洋平, 井浦 太一, 森 大知, 森谷 哲平, 2016. 高分解能 W バンドレーダ FALCON-A による北極域雲観測 (アンテナ・伝播). 電子情報通信学会技術研究報告 IEICE technical report, 116, 1-4. [T3]
- 鷹野 敏明, 水田 篤秀, 井浦 太一, 森 大知, 森谷 哲平, 池田 卓史, 小池 康太, 鈴木 康樹, 森川 康平, 河村 洋平, 中田 裕之, 大矢 浩代, 2017. 雲レーダ FALCON による雲・雨の内部運動ドップラー解析. 大気電気学会誌, 90. [T3]
- 鷹野 敏明, 鈴木 康樹, 小池 康太, 森川 康平, 笹田 亮, 五十嵐 涼, 森田 日向, 水田 篤秀, 河村 洋平, 中田 裕之, 大矢 浩代, 高村 民雄, 2018. ミリ波雲レーダ FALCON による雲雨の内部構造ドップラー解析. 第 20 回 CERES 環境リモートセンシングシンポジウム資料集, 13. [T3]
- 高谷 祐平, 中澤 哲夫, 松枝 未遠, 2017. 季節内から季節予測プロジェクト. 天気, 64, 457-462. [T1]
- Takeda, H., Kawaguchi, Y., Sato, N., 2016. Turbulent mixing within the mixed layer from direct microstructure measurements during Arctic cruise MR14-05. Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice 2016, 138-141. [T4]
- 田中 里実, 川合 美千代, 安中 さやか, 2018. 自己組織化マップを用いた北極海における炭酸カルシウム飽和度の推定. 月刊海洋, 50, 254-262. [T4]
- 照井 雄大, 館山 一孝, 渡邊 達也, 2018. ドローンを用いた多視点ステレオ写真測量による海水厚分布の測定に関する研究. 北海道の雪氷, 37,

- 103-106. [T1] [T2]
- 照井 雄大, 館山 一孝, 渡邊 達也, 2019. UAVを用いた多視点ステレオ写真測量による海水厚分布測定手法の開発. 北海道の雪氷, 38, 85-88. [T1] [T2]
- Thorsteinson, L., Outridge, P., Klepikov, A., Ananicheva, M., Antonov, E., Bashkirova, V., Chaschin, V., Gaden, A., Hughes, L., Jia, G., Kikuchi, T., Kivva, K., Lima, J., Muir, M., Nikitina, E., Poussenkova, N., Pozhilova, N., Sergeeva, V., Skean, V., Somov, A., Stern, G., Valeeva, V., 2017. Status of natural and human environments (Chapter 3). Adaptation Actions for a Changing Arctic: Perspectives from the Bering-Chukchi-Beaufort Region. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 39-88. ISBN: 978-82-7971-103-2. [T4]
- Tojo, M., 2017. Selective media for practical isolations of *Pythium* spp. from natural and agricultural environments. Agricultural Research & Technology: Open Access Journal, 7, 555723. [T6]
- Toyoda, T., Iwamoto, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Nakano, H., Sakamoto, K., Yamanaka, G., Komuro, Y., Nishino, S., Ukita, J., 2019c. Incorporation of satellite-derived thin ice data into a global OGCM simulation. Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019, 90-93. [T3] [T4] [T5] [T6]
- 豊田 隆寛, 広瀬 成章, 浦川 昇吾, 碓氷 典久, 藤井 陽介, 中野 英之, 坂本 圭, 辻野 博之, 山中 吾郎, 堤 之智, 2018. 海水アジョイントモデルを用いた海洋・海水場の解析に向けて. 月刊海洋, 50, 127-132. [T5]
- 豊田 隆寛, 岩本 勉之, 浦川 昇吾, 辻野 博之, 中野 英之, 坂本 圭, 山中 吾郎, 小室 芳樹, 西野 茂人, 浮田 甚郎, 2019. 衛星観測の薄氷データを用いた海洋・海水シミュレーションの改善. 月刊海洋, 51, 121-127. [T3] [T4] [T5] [T6]
- Uetake, J., Tobo, Y., Uji, Y., Hill, T. C. J., DeMott, P. J., Kreidenweis, S., Misumi, R., 2019. Seasonal changes of airborne bacterial communities over Tokyo and influence of local meteorology. bioRxiv, 542001. doi: 10.1101/542001. [T3] [T6]
- VanderZwaag, D. L., 稲垣 治 (監訳), 柴田 明徳 (監訳), 2018. 北極海のガバナンス: 揺れうごく海の姿、霞む水平線 (第2章). 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋, 東信堂, 15-29. ISBN: 978-4798915081. [T7]
- 渡邊 英嗣, 2017. 北極海生態系モデリングの現状と課題 - FAMOS プロジェクトの紹介 -. 月刊海洋, 49, 423-429. [T4] [T6]
- Yabuki, H., Sugimura, T., Terui, T., Inoue, J., Yamaguchi, H., De Silva, L. W. A., Sueyoshi, S., 2019. Navigation support by ADS in R/V MIRA Arctic cruise 2018. Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019, 270-272. [T1] [T8]
- Yaguchi, S., Kimura, N., Itoh, M., Fukamachi, Y., Kikuchi, T., Yamaguchi, H., 2019. High resolution sea ice motion analysis with MODIS data in the western Arctic region. Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019, 291-294. [T1] [T2] [T4] [T5]
- Yamaguchi, H., 2016. Research on navigation support system for the Arctic sea routes. Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice 2016, 45-48. [T1]
- Yamaguchi, H., Matsuzawa, T., Imai, K., 2019b. Sailing route optimization for the NSR to minimize the fuel consumption. Extended Abstract/Full Paper, Proceedings of the 8th CECAR, ACECC (Asian Civil Engineering Coordinating Council). [T1]
- 川合 美千代, 2017a. 変わりゆく北極海と海の生物たち (特集 北極 地球温暖化がもたらすもの). 地理, 62, 28-33. [T4]
- 川合 美千代, 2017b. 北極海における物質循環の変化 (3. 海の物質循環の変化 -5). 日本海洋学会 (編), 海の温暖化 - 変わりゆく海と人間活動の影響一, 朝倉書店, 59-62. ISBN: 978-4254161304. [T4]
- 山村 織生, 2018. 亜寒帯・極域公海における調査研究と我が国漁業の現状 (第15章). 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋, 東信堂, 206-208. ISBN: 978-4-7989-1508-1. [T6]
- 山崎 孝治, 2016. 北極振動. 河村 公隆, 大島 慶一郎, 小達 恒夫, 他 (編), 低温環境の科学事典, 朝倉書店. ISBN: 978-4254161281. [T5]
- 山崎 孝治, 中村 哲, 本田 明治, 浮田 甚郎, 2016. 極端な北極海の海水減少に対する大気応答. 北海道の雪氷, 35, 103-106. [T3] [T5]
- Yasunari, T. J., Kim, K.-M., da Silva, A. M., Matsumi, Y., 2018b. A review of causes of wildfire occurrences in/around Siberia and their air pollution impacts on remote places, and future plans of PM2.5 measurements in Russia. Natural hazards, modern environmental risks and ecosystem resilience: VII Druzhinin's Readings: the Scientific Conference Proceedings, 135-138. ISBN: 978-5-906575-09-8. [T5]
- 吉森 正和, 2019. 地球温暖化の将来予測 - 未来の気候はどのように予測するのでしょうか? -. 南極・北極から学ぶ地球環境変動, 日本極地研究振興会, 5-6. [T5]
- Zou, L., 2017. Arctic Fisheries, Arctic Fisheries Management and China's Response. China Ocean University Press. ISBN: 9787567015043. [T7]

(4) 査読なし論文 (submitted)

- ・査読が行われない論文のうち、2019年9月30日時点で投稿済み (submitted) かつまだ公開が確定していないものを対象とする。

該当なし

2-2 誌上発表

- ・一般雑誌等の定期刊行物による誌上発表の一覧。
- ・2019年9月30日時点で出版済みの刊行物に掲載された記事を対象とする (出版準備中 (in press 等) のものも含む)。

後藤 正憲, 2017. 第9回北極社会科学国際会議報告. 文化人類学, 82, 395-396. doi: 10.14890/jjcanth.82.3_395. [T7]

後藤 正憲, 2018. 地球の鼓動を聞く - 東シベリア・サハの牧畜を通して. Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 109. [T7]

- 東久美子, 2018. グリーンランドと南極の氷床コアが語る過去の気候・環境変動(特集 北極・南極から迫る地球温暖化). 極地, 日本極地研究振興会, 54, 20-23. [T2] [T3]
- 幡谷 咲子, 本田 悠介, 柴田 明穂, 2019. 本における北極国際法政策研究の推進-神戸 PCRC について. Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 110. [T7]
- 林 直孝, 2018. 変化する環境の中で生きるグリーンランドのイヌイット (特集 北極・南極から迫る地球温暖化). 極地, 日本極地研究振興会, 54, 24-30. [T2]
- 檜山 哲哉, 2015. 科学通信 地球を俯瞰する自然地理学 気候変動がシベリア永久凍土帯の水環境と社会に及ぼす影響. 科学, 85, 1127-1129. [T3] [T7]
- 本間 智之, 2018. 国際深層氷床コア掘削プロジェクトのフィールドワークに参加して. 軽金属, 68, 503. [T2]
- 本多 俊和, 2018. カナダの先住民は今. まほら, 97号, 50-51. [T7]
- 飯島 慈裕, 2016. 書評 檜山哲哉, 藤原潤子編『シベリア: 温暖化する極北の水環境と社会 (環境人間学と地域)』. 東北アジア研究, 147-151. [T4] [T7]
- 飯島 慈裕, 2018b. シベリアの自然環境—地理的背景とその変化. 永山 ゆかり, 吉田 睦 (編), アジアとしてのシベリア, 勉強出版. ISBN: 978-4-585-22693-2. [T4] [T7]
- 猪上 淳, 2016b. 北米を襲った北極起源の猛烈寒波. 世界気象カレンダー 2017, 日宣テクノ・コムズ. [T1]
- 猪上 淳, 2017b. 北極気象観測が熱帯低気圧の経路予測を向上させる. 世界気象カレンダー 2018, 日宣テクノ・コムズ. [T1]
- 猪上 淳, 2018. 暖かい北極・冷たい大陸—日本への影響と予測可能性— (特集 北極・南極から迫る地球温暖化). 極地, 日本極地研究振興会, 54, 12-15. [T1]
- 漢那 直也, 2017. 機器中性子放射化分析法を用いた南極アイスコア中大気ダストの極微量元素分析. ぶんせき, 社団法人日本分析化学会, 2017年1号, 34. [T2]
- 漢那 直也, 2018. グリーンランドにおけるフィヨルドの持続可能性—カナックに暮らす人々と共に考える—. Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 109. [T2]
- 漢那 直也, 杉山 慎, 2019. フィヨルドの生態系を支える「氷河ポンプ」を発見. 北海道大学環境報告書 2019, 18. [T2]
- 菊地 隆, 2016. PAG (Pacific Arctic Group) の紹介と, ASSW 2016 における PAG Spring meeting. 北極環境研究コンソーシアムニュースレター, 5, 3. [T4]
- 菊地 隆, 2019a. 極地のサイエンス (第1章第2節2). 海洋白書 2019, 17-23. [T4]
- 菊地 隆, 2019b. 地球温暖化最前線 北極域の海水がなくなる日. 文藝春秋オピニオン 2020年の論点100, 文藝春秋. ISBN: 978-4160086975. [T4]
- 小林 秀樹, 2017. Marine Science Seminar 地球環境にまつわる地図のはなし -3次元地図とは? 植物の発する光の世界地図とは?-. Blue Earth: 海と地球の情報誌, 29, 28-31. [T3]
- 近藤 豊, 2017c. 科研費に支援されてきた研究者人生. 私と科研費 科研費ニュース, 98. [T3]
- 近藤 豊, 2017d. 地球大気環境科学の研究(第7章第4節 コラム) 文部科学省 (編), 平成28年度 文部科学白書, 258. ISBN: 978-4865790900. [T3]
- 的場 澄人, 2016a. 地球温暖化に影響を受けるグリーンランド氷床を観測する. Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 100. [T2]
- Matsueda, M., 2016. The S2S Museum. S2S News Letter, 4, 3-4. [T1]
- 大西 富士夫, 2016b. 北極協調体制が直面する問題. Ocean Newsletter, 376. [T7]
- 大西 富士夫, 2017b. 北極をめぐる新たな動き (第1章3節3). 海洋白書 2017, 34-36. [T7]
- 大西 富士夫, 2017c. 北極協調体制が直面する問題. 人と海洋の共生を目指して~150人のオピニオンVIII. [T7]
- 大西 富士夫, 2019b. 冷戦後の北極海をめぐる国際関係: 平和の際から対立の海へ?. Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 111, 4-9. [T7]
- 大塚 夏彦, 2017b. 北極海航路と北海道~北極をめぐる新たな国際関係出現に備えて~. ほかよう調査レポート, 247, 17-23. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2017c. 北極海航路の利活用と今後の方向性. 情報誌 港湾, 94 巻10月号, 16-17. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2018d. 拓かれる海の道 北極海航路. Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 108. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2018e. 北極海航路における北海道・欧州間海上輸送モデルの提案. 開発こうほう, 30-33. [T1] [T7]
- 大塚 夏彦, 2018f. 北極海航路の利用と砕氷船 (特集 南極と北極で活躍する砕氷船). 極地, 日本極地研究振興会, 55, 26-31. [T1] [T7]
- Podolskiy, E. A., 2016. Arctic Frontiers: Four things to know about Arctic politics, business, and science. 北極環境研究コンソーシアムニュースレター, 4, 10-12. [T2]
- Podolskiy, E. A., 杉山 慎, 2016. Press Release: グリーンランドで海洋の潮汐によって発生する氷河地震を発見. 低温研ニュース, 41, 23. [T2]
- Sellheim, N., 2017b. Book review: The scramble for the poles. The geopolitics of the Arctic and Antarctic. Klaus Dodds and Mark Nuttall. 2016. Cambridge: Polity Press. Polar Record, 53, 635-636. doi: 10.1017/S0032247417000420. [T7]
- 柴田 明穂, 2018b. 注目され始めた北極科学協力協定~日本のロシア海域科学調査への示唆~. Ocean Newsletter, 421. [T7]
- 杉江 恒二, 2017. CO₂による海水の酸性化と藻類への影響 -最近の研究動向と課題-. 海の森づくりニュースレター, 16号, 3. [T4] [T6]
- 杉山 慎, 2016a. Report: 国際ワークショップ “Greenland ice sheet mass loss and its impact on global climate change”. 低温研ニュース, 41, 16-17. [T2]
- 杉山 慎, 2016b. グリーンランド イルリサット氷河から流れ出た氷山 (表紙写真でめぐる旅 27). 高等学校 地理・地図資料 (2015年度3学期号), 帝国書院, 2. [T2]
- 杉山 慎, 2018. 北極と南極における近年の氷河氷床変動. 極地, 54. [T2]
- 田畑 伸一郎, 2019a. ロシア北極域の経済状況. Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 112, 4-9. [T7]
- 田畑 伸一郎, 2019b. ロシア北極域の経済発展を考える. 日本極地研究振興会メールマガジン, 第16号. [T7]
- 高橋 晃周, 2018b. ハシブトウミガラスと海の環境変化 (パイオロギング 鳥の背から見える景色 #05). BIRDER, 8月号. [T6]
- 高橋 美野梨, 2015. クジラへの視線 (連載・北の献立/第7回グリーンランドの献立). Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 97. [T2] [T7]

- 高橋 美野梨, 2016. 政治空間としての海域を歩く: 社会科学から見るグリーンランド, 北大西洋. アークトス, 48, 1-5. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2018c. UArctic Congress 2018 に参加して. スラブ・ユーラシア研究センターニュース, 155 号, 10-13. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2018d. グリーンランドとカラフトシシャモ (北の旅日記). Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 108. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2018e. 書評 屋良朝博、川名晋史、齊藤孝祐、野添文彬、山本章子著『沖縄と海兵隊: 駐留の歴史的展開』. 境界研究, 151-156. doi: 10.14943/jbr.8.151. [T2] [T7]
- 高橋 美野梨, 2018f. 絶海に浮かぶ北の孤島 フェロー諸島 (写真とめぐる旅 35). 高等学校 地理・地図資料 (2017 年度 3 学期号), 帝国書院, 3. [T2] [T7]
- 高倉 浩樹, 千葉 義人, 2015. シベリアからの声: 民俗写真展示のメイキングと調査地から日本へ向けたメッセージ. 東北アジア研究センター報告. [T7]
- 高倉 浩樹, 2016. シベリア・北極圏と二つのコンソーシアム. 地域研究コンソーシアムニューズレター, 20, 7. [T7]
- 高倉 浩樹, 2018. 気候変動とシベリアー永久凍土と文化の相互作用からわかること. 永山 ゆかり, 吉田 睦 (編), アジアとしてのシベリア, 勉誠出版. ISBN: 978-4-585-22693-2. [T7]
- 高瀬 克範, 2019. 北極圏の牙と角. Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 112. [T7]
- 田邊 優貴子, 2017. 森羅万象エッセイ「POLAR NIGHT」. SINRA, 新潮社, 2017 年 11 月号 20 号. [T6]
- 田邊 優貴子, 2018. A Window to Ancient Earth. PROMINENCE English Communication II (平成 30 年度改訂 文部科学省検定教科書), 東京書籍, 33-47. ISBN: 978-4487165650. [T6]
- 田中 利和, 2019. 寒冷地サハ共和国に暮らす人びとのフィールドワーク. Arctic Circle: 北方民族博物館友の会季刊誌, 111, 14-17. [T7]
- 渡邊 英嗣 (訳), 2018. 随想: 気候変動が北極域で加速. 物理科学雑誌 パリティ, 丸善出版, 33, 44-48. ISBN: 0911-4815. [T4] [T6]
- 渡辺 佑基, 2015. 日本のエクスプローラー: バイオロギングで海洋動物の真の姿に迫る (連載). ナショナルジオグラフィック web 版. [T6]
- 渡辺 佑基, 2016a. ずいひつ「波音」. 月刊「潮」, 潮出版社, 6 月号, 27-28. [T6]
- 渡辺 佑基, 2016b. 日本のエクスプローラー: バイオロギングで海洋動物の真の姿に迫る (連載). ナショナルジオグラフィック web 版. [T6]
- 山口 一, 2018. 北極における温暖化の現状と北極航路 (地理の研究 (199) 特集 両極). 歴史と地理, 山川出版社, 718, 47-61. ISBN: 1343-5957. [T1]
- 山口 一, 2019. 北極の海氷減少と北極海航路. アークトス, 54, 4-8. [T1]
- 吉森 正和, 2018. 北極域の温暖化とそのしくみ (特集 北極・南極から迫る地球温暖化). 極地, 日本極地研究振興会, 54, 8-11. [T5]

2-3 書籍出版

- ・本プロジェクトの研究者が、執筆、編集等を担当した書籍出版の一覧。
- ・2019 年 9 月 30 日時点で出版済みの書籍を対象とする (出版準備中 (in press 等) のものも含む)。

- Bertelsen, R., Noori, N., Rickli, J.-M. (Eds.), 2018b. Strategies of Knowledge Transfer for Economic Diversification in the Arab States of the Gulf. Gerlach Press. ISBN: 9783959940146. [T7]
- 林 健太郎, 2017. 薫風のトゥーレ. 幻冬舎. ISBN: 978-4344912595. [T6]
- 稲垣 治, 柴田 明徳 (編), 2018. 北極国際法秩序の展望 科学・環境・海洋. 東信堂. ISBN: 978-4798915081. [T7]
- 的場 澄人, 2016b. 女も男もフィールドへ (FENICS 100 万人のフィールドワーカーシリーズ 12). 古今書院. ISBN: 978-4772271332. [T2]
- 森 章, 2018. 生物多様性の多様性 (共立スマートセレクション 23). 共立出版. ISBN: 978-4320009226. [T6]
- 中村 尚, 2015. 「日本の四季」がなくなる日 連鎖する異常気象 (小学館新書). 小学館. ISBN: 9784098252534. [T3] [T5]
- Ohta, T., Hiyama, T., Iijima, Y., Kotani, A., Maximov, T. C. (Eds.), 2019b. Water-Carbon Dynamics in Eastern Siberia. Springer Singapore. ISBN: 978-981-13-6316-0. [T3] [T4] [T7]
- 大園 享司, 2018a. 生き物はどのように土にかえるのか. ベレ出版. ISBN: 978-4860645335. [T6]
- 大園 享司, 2018b. 基礎から学べる菌類生態学. 共立出版. ISBN: 978-4320057876. [T6]
- 小澤 実, 中丸 禎子, 高橋 美野梨 (編), 2016. アイスランド・グリーンランド・北極を知るための 65 章. 明石書店. ISBN: 9784750343082. [T2] [T7]
- Saunavaara, J., Ipatti, L. (Eds.), 2019. Suomi ja Japani: Kaukaiset mutta läheiset (Finland and Japan: Distant but close). Edita Publishing Oy. ISBN: 978-951-37-7485-1. [T7]
- Saunavaara, J., 鈴木 大路郎 (編), 2019. 日本とフィンランドの出会いとつながり. 大学教育出版. ISBN: 9784866920351. [T7]
- Shibata, A., Zou, L., Sellheim, N., Scopelliti, M. (Eds.), 2019b. Emerging Legal Orders in the Arctic: The Role of Non-Arctic Actors. Routledge. ISBN: 9781138618510. [T7]
- 田畑 伸一郎, 後藤 正憲 (編), 2020. 北極の人間と社会: 持続的発展の可能性. 北海道大学出版会. [T7]
- Takahashi, M. (Ed.) 2019g. The Influence of Sub-state Actors on National Security. Springer Polar Sciences. ISBN: 978-3-030-01677-0. [T2] [T7]
- Tynkynen, V. P., Tabata, S., Gritsenko, D., Goto, M. (Eds.), 2018. Russia's Far North: The Contested Energy Frontier. Routledge. ISBN: 978-1138307544. [T7]
- 植竹 淳, 2016. 雪と氷の世界を旅して: 氷河の微生物から環境変動を探る (フィールドの生物学 19). 東海大学出版部. ISBN: 978-4486020004. [T6]
- うつみのりこ, 田邊 優貴子, 2016. ゆきとこおりのせかいほつきよく (サンチャイルド・ビッグサイエンス). チャイルド本社. ISBN: 978-4805443651. [T6]
- 渡辺 佑基, 2019. 進化の法則は北極のサメが知っていた (河出新書). 河出書房新社. ISBN: 978-4309631042. [T6]
- 綿貫 豊, 高橋 晃周, 2016. 海鳥のモニタリング調査法 (生態学フィールド調査法シリーズ 7). 共立出版. ISBN: 978-4320057555. [T2] [T6]
- 山口 一 (編), 2016. 北極海航路ハンドブック 実務編 上巻. 北極海航路ハンドブック検討委員会 (委員長: 山口 一), 日本海難防止協会. [T1]

参考資料

- I 関係者
 - I-1 メンバー
 - I-2 委員
- II 研究機関
- III 海外連携機関・国際プロジェクト等
- IV 活動実績
 - IV-1 会議開催実績
 - IV-2 予算推移
 - IV-3 「若手研究者派遣による人材育成及び国際連携」メニューの派遣実績
 - IV-4 「AC等北極関連会合への専門家の派遣」メニューの派遣実績
- V 略語表

I 関係者

I-1 メンバー

本プロジェクトに参加し、活動を推進したメンバーの氏名および所属を以下に示す(敬称略)。

所属は、基本的に2019年9月30日時点。ただし、プロジェクト期間中に活動から離脱した場合は、離脱時点の所属を記載する。

■プロジェクトディレクター (PD)

深澤 理郎 国立極地研究所 / JAMSTEC

■サブプロジェクトディレクター (SPD)

榎本 浩之 国立極地研究所

河野 健 JAMSTEC

菊地 隆 JAMSTEC (代理)

齊藤 誠一 北海道大学

■コーディネーター (CDN)

末吉 哲雄 国立極地研究所

■メニュー / テーマへの参加研究者

・各メニュー / テーマについて実施責任者、実施担当者、研究協力者で区分し、区分ごとに漢字氏名の場合は50音順、英字氏名の場合はそれに続いてアルファベット順で記載する。

・複数のメニュー / テーマに参加する研究者は、それぞれのメニュー / テーマに記載する。

「国際連携拠点の整備」メニュー

実施責任者 (PI)

榎本 浩之 国立極地研究所

実施担当者

東 久美子 国立極地研究所

末吉 哲雄 国立極地研究所

内田 雅己 国立極地研究所

鈴木 力英 JAMSTEC

兒玉 裕二 国立極地研究所

宮岡 宏 国立極地研究所

小林 秀樹 JAMSTEC

「若手研究者派遣による人材育成及び国際連携」メニュー

実施責任者 (PI)

齊藤 誠一 北海道大学

実施担当者

東 久美子 国立極地研究所

杉本 敦子 北海道大学

大西 富士夫 北海道大学

杉山 慎 北海道大学

加藤 博文 北海道大学

田畑 伸一郎 北海道大学

菊地 隆 JAMSTEC

深町 康 北海道大学

小室 芳樹 JAMSTEC

宮岡 宏 国立極地研究所

三瓶 真 北海道大学

「国際共同研究の推進」メニュー

<テーマ1>

実施責任者 (PI)

猪上 淳 国立極地研究所

実施担当者

小平 翼	東京大学	松枝 未遠	筑波大学
小山 朋子	国立極地研究所	山上 晃央	筑波大学
田村 岳史	国立極地研究所	山口 一	東京大学
野瀬 毅彦	東京大学	早稲田 卓爾	東京大学
堀 正岳	国立極地研究所	Liyandarachchi Waruna Arampath De Silva 東京大学	

研究協力者

安達 聖	防災科学技術研究所	高木 敏幸	釧路工業高等専門学校
大塚 夏彦	北海道大学	館山 一孝	北見工業大学
尾関 俊浩	北海道教育大学札幌校	中野渡 拓也	北海道区水産研究所
小野 純	JAMSTEC	野村 大樹	北海道大学
木村 詞明	東京大学	松沢 孝俊	海上技術安全研究所
木藪 千紗	東京海洋大学	松信 匠	筑波大学
金野 祥久	工学院大学	真矢 梨央	東京海洋大学
佐川 玄輝	株式会社ウェザーニューズ	山本 純平	東京海洋大学
佐藤 和敏	北見工業大学	吉澤 枝里	KOPRI
澤村 淳司	大阪大学	Adrean Webb	京都大学
島田 浩二	東京海洋大学	Amin Chabchoub	シドニー大学

<テーマ2>

実施責任者 (PI)

東 久美子 国立極地研究所

実施担当者

青木 輝夫	国立極地研究所	館山 一孝	北見工業大学
東 信彦	長岡技術科学大学	中澤 文男	国立極地研究所
安藤 卓人	北海道大学	永塚 尚子	国立極地研究所
飯塚 芳徳	北海道大学	平林 幹啓	国立極地研究所
大藪 幾美	国立極地研究所	藤田 秀二	国立極地研究所
奥野 淳一	国立極地研究所	古屋 正人	北海道大学
川村 賢二	国立極地研究所	本間 智之	長岡技術科学大学
漢那 直也	北海道大学	的場 澄人	北海道大学
小室 悠紀	国立極地研究所	本山 秀明	国立極地研究所
榊原 大貴	北海道大学	渡邊 達也	北見工業大学
猿谷 友孝	長岡技術科学大学	Evgeny Podolskiy	北海道大学
杉山 慎	北海道大学	Ralf Greve	北海道大学
高田 守昌	長岡技術科学大学		

研究協力者

青木 茂	北海道大学	深町 康	北海道大学
阿部 彩子	東京大学	福田 かおり	国立極地研究所
尾形 純	国立極地研究所	古崎 睦	旭川工業高等専門学校
北村 享太郎	国立極地研究所	松村 義正	東京大学
齋藤 匠真	長岡技術科学大学	山口 篤	北海道大学
齋藤 冬樹	JAMSTEC	山崎 新太郎	京都大学
繁山 航	総合研究大学院大学	綿貫 豊	北海道大学
高橋 美野梨	北海道大学	Anders Bjork	コペンハーゲン大学
塚川 佳美	国立極地研究所	Dorthe Dahl-Jensen	コペンハーゲン大学
中島 甲葵	長岡技術科学大学	Guillaume Jouvét	スイス連邦工科大学
西岡 純	北海道大学	Hubertus Fischer	ベルン大学
西澤 文吾	国立極地研究所	Ilka Weikusat	AWI
庭野 匡思	気象研究所	Lene Kielsen	GINR
野村 大樹	北海道大学	Martin Funk	スイス連邦工科大学
林 直孝	カルガリー大学	Paul Vallelonga	コペンハーゲン大学
		Sergio Faria	バスク気候変動センター

<テーマ3>

実施責任者 (PI)

小池 真 国立極地研究所 / 東京大学

実施担当者

青木 周司	東北大学	滝川 雅之	JAMSTEC
石島 健太郎	JAMSTEC	竹谷 文一	JAMSTEC
稲飯 洋一	東北大学	朱 春茂	JAMSTEC
植山 雅仁	大阪府立大学	當房 豊	国立極地研究所
太田 岳史	名古屋大学	永井 信	JAMSTEC
大野 浩	北見工業大学	原藪 芳信	大阪府立大学
岡本 創	九州大学	檜山 哲哉	名古屋大学
金森 大成	名古屋大学	松井 仁志	名古屋大学
金谷 有剛	JAMSTEC	宮川 拓真	JAMSTEC
小谷 亜由美	名古屋大学	宮崎 和幸	JAMSTEC
後藤 大輔	国立極地研究所	村田 浩太郎	国立極地研究所
小林 秀樹	JAMSTEC	茂木 信宏	東京大学
近藤 豊	国立極地研究所	森本 真司	東北大学
紺屋 恵子	JAMSTEC	山口 将大	JAMSTEC
斉藤 和之	JAMSTEC	山地 一代	神戸大学
佐藤 可織	九州大学	山田 恭平	国立極地研究所
佐藤 永	JAMSTEC	Petr Mordovskoi	JAMSTEC
塩原 匡貴	国立極地研究所	Prabir K. Patra	JAMSTEC
杉浦 幸之助	富山大学	Wei Yang	JAMSTEC
鈴木 力英	JAMSTEC		

研究協力者

青木 輝夫	国立極地研究所	伊藤 昭彦	国立環境研究所
東 久美子	国立極地研究所	岩田 拓記	信州大学
五十嵐 康記	福島大学	岩花 剛	UAF
石戸谷 重之	産業技術総合研究所	浮田 甚郎	新潟大学

大島 長	気象研究所	西澤 智明	国立環境研究所
佐伯 田鶴	JAMSTEC	端野 典平	高知工科大学
佐藤 正樹	東京大学	平沼 成基	ウエスト・テキサス A&M 大学
鷹野 敏明	千葉大学	藤田 遼	インペリアル・カレッジ・ロンドン
竹川 暢之	首都大学東京	町田 敏暢	国立環境研究所
遠嶋 康德	国立環境研究所	松枝 秀和	気象研究所
中井 太郎	国立台湾大学	村山 昌平	産業技術総合研究所
中村 尚	東京大学	Shamil Maksyutov	国立環境研究所

<テーマ4>

実施責任者 (PI)

菊地 隆 JAMSTEC

実施担当者

石原 靖久	JAMSTEC	西野 茂人	JAMSTEC
伊東 素代	JAMSTEC	野口 真希	JAMSTEC
大島 慶一郎	北海道大学	朴 昊澤	JAMSTEC
小野寺 丈尚太郎	JAMSTEC	馬場 尚一郎	JAMSTEC
亀山 宗彦	北海道大学	濱名 実	JAMSTEC
川合 美千代	東京海洋大学	原田 尚美	JAMSTEC
喜多村 稔	JAMSTEC	平野 大輔	北海道大学
木村 仁	JAMSTEC	深町 康	北海道大学
木村 元	JAMSTEC	藤原 周	JAMSTEC
木元 克典	JAMSTEC	溝端 浩平	東京海洋大学
塩崎 拓平	JAMSTEC	村田 昌彦	JAMSTEC
杉江 恒二	JAMSTEC	安中 さやか	JAMSTEC
杉本 文孝	JAMSTEC	渡邊 英嗣	JAMSTEC
高塚 徹	北海道大学	渡 健介	JAMSTEC

研究協力者

飯島 慈裕	三重大学	川口 悠介	東京大学
池上 隆仁	海洋生物環境研究所	小杉 如央	気象研究所
石井 雅男	気象研究所	笹野 大輔	気象研究所
石田 明生	常葉大学	遠嶋 康德	国立環境研究所
石戸谷 重之	産業技術総合研究所	遠山 勝也	気象研究所
伊藤 優人	北海道大学	堀 正岳	国立極地研究所
大島 和裕	環境科学技術研究所		

<テーマ5>

実施責任者 (PI)

羽角 博康 JAMSTEC / 東京大学

実施担当者

相澤 拓郎	東京大学	浮田 甚郎	新潟大学
阿部 彩子	東京大学	大石 龍太	東京大学
阿部 学	JAMSTEC	小野 純	JAMSTEC

川崎 高雄	東京大学	富川 喜弘	国立極地研究所
木村 詞明	東京大学	中村 哲	北海道大学
草原 和弥	JAMSTEC	中村 尚	東京大学
久保川 陽呂鎮	東京大学	本田 明治	新潟大学
小坂 優	東京大学	松村 義正	東京大学
小室 芳樹	JAMSTEC	森 正人	東京大学
齋藤 冬樹	JAMSTEC	安成 哲平	北海道大学
佐藤 友徳	北海道大学	山崎 孝治	北海道大学
佐藤 正樹	東京大学	山田 朋人	北海道大学
高橋 邦生	JAMSTEC	吉森 正和	東京大学
田口 文明	東京大学	Enkhbat Erdenebat	北海道大学
建部 洋晶	JAMSTEC		

研究協力者

石井 正好	気象研究所	西井 和晃	三重大学
河本 和明	長崎大学	野沢 徹	岡山大学
高谷 康太郎	京都産業大学	万田 敦昌	三重大学
立花 義裕	三重大学	三好 勉信	九州大学
豊田 隆寛	気象研究所	芳村 圭	東京大学

<テーマ6>

実施責任者 (PI)

平譚 享	北海道大学
------	-------

実施担当者

阿部 泰人	北海道大学	野村 大樹	北海道大学
阿部 義之	北海道大学	平田 貴文	北海道大学
伊村 智	国立極地研究所	堀 雅裕	宇宙航空研究開発機構
植竹 淳	国立極地研究所	増田 良帆	北海道大学
上野 洋路	北海道大学	増本 翔太	横浜国立大学
内田 雅己	国立極地研究所	松野 孝平	北海道大学
大木 淳之	北海道大学	村上 浩	宇宙航空研究開発機構
北川 涼	森林総合研究所	森 章	横浜国立大学
國分 互彦	国立極地研究所	山口 篤	北海道大学
佐藤 恵子	北海道大学	山下 洋平	北海道大学
三瓶 真	北海道大学	山村 織生	北海道大学
高橋 晃周	国立極地研究所	和賀 久朋	北海道大学
高橋 幸弘	北海道大学	渡辺 佑基	国立極地研究所
立澤 史郎	北海道大学	綿貫 豊	北海道大学
田邊 優貴子	国立極地研究所	Alexis Will	国立極地研究所
津滝 俊	宇宙航空研究開発機構	Irene Alabia	北海道大学
仲岡 雅裕	北海道大学	Jean-Baptiste Thiebot	国立極地研究所
西岡 純	北海道大学	Jorge Garcia Molinos	北海道大学

研究協力者

荒木田 葉月	理化学研究所	大園 享司	同志社大学
飯村 康夫	滋賀県立大学	金子 亮	テンタムス・ジャパン合同会社
池内 俊雄	雁の里親友の会	澤 祐介	バードライフ・インターナショナル東京

杉江 恒二	JAMSTEC	樋口 正信	国立科学博物館
高田 秀重	東京農工大学	廣瀬 大	日本大学
辻 雅晴	旭川工業高等専門学校	廣田 充	筑波大学
土居 秀幸	兵庫県立大学	藤嶽 暢英	神戸大学
東條 元昭	大阪府立大学	藤原 周	JAMSTEC
中坪 孝之	広島大学	星野 保	八戸工業大学
長沼 毅	広島大学	牧野 光琢	水産研究・教育機構
西澤 文吾	国立極地研究所	松岡 俊将	兵庫県立大学
西野 茂人	JAMSTEC	村岡 裕由	岐阜大学
長谷川 元洋	同志社大学	本岡 毅	宇宙航空研究開発機構
林 健太郎	農業・食品産業技術総合研究機構	吉竹 晋平	早稲田大学
原田 英美子	滋賀県立大学	渡邊 英嗣	JAMSTEC

<テーマ7>

実施責任者 (PI)

田畑 伸一郎 北海道大学

実施担当者

稲垣 治	神戸大学	池 ヒョンジュウ 直美	北海道大学
大塚 夏彦	北海道大学	西谷 真規子	神戸大学
大西 富士夫	北海道大学	藤井 賢彦	北海道大学
岡田 陽平	神戸大学	本田 悠介	神戸大学
後藤 正憲	北海道大学	町野 和夫	北海道大学
近藤 祉秋	北海道大学	山地 一代	神戸大学
柴田 明穂	神戸大学	李 肖陽	北海道大学
白岩 孝行	北海道大学	Alejandra Mancilla	神戸大学
瀬戸口 剛	北海道大学	Christoph Humrich	神戸大学
高倉 浩樹	東北大学	Juha Saunavaara	北海道大学
高瀬 克範	北海道大学	Leilei Zou	神戸大学
高橋 美野梨	北海道大学	Romain Chuffart	神戸大学
田中 利和	東北大学	Yelena Yermakova	神戸大学

研究協力者

飯島 慈裕	三重大学	森下 丈二	東京海洋大学
池島 大策	早稲田大学	Dale Sambo Dorough	イヌイット極域評議会
大石 侑香	国立民族学博物館	David VanderZwaag	ダルハウジー大学
加藤 博文	北海道大学	Egill Thor Nielson	中国北極北極研究センター
立澤 史郎	北海道大学	Erik Molenaar	ユトレヒト大学
田村 亨	北海商科大学	Małgorzata Śmieszek	ラップランド大学
礪波 亜希	筑波大学	Marzia Scopelliti	欧州委員会
中田 篤	北海道立北方民族博物館	Nigel Bankes	カルガリー大学
成田 大樹	東京大学	Nikolas Sellheim	ヘルシンキ大学
西本 健太郎	東北大学	Rachael Lorna Johnstone	アクレイリ大学
檜山 哲哉	名古屋大学	Rasmus Gjedssø Bertelsen	ノルウェー北極大学
平田 貴文	北海道大学	Sebastian Knecht	ベルリン自由大学
藤岡 悠一郎	九州大学	Timo Koivuurova	ラップランド大学
本多 俊和	元放送大学	Tore Henriksen	ノルウェー北極大学
本村 眞澄	北海道大学		

<テーマ 8 >

実施責任者 (PI)

矢吹 裕伯 国立極地研究所

実施担当者

杉村 剛 国立極地研究所

照井 健志 国立極地研究所

研究協力者

飯野 啓子 国立極地研究所

萩原 茂 国立極地研究所

「AC 等北極関連会合への専門家の派遣」メニュー

実施責任者

榎本 浩之 国立極地研究所

実施担当者

宮岡 宏 国立極地研究所

■共同事務局

渡部 康一	国立極地研究所	赤根 英介	JAMSTEC	渡辺 康正	北海道大学
末広 峰政	国立極地研究所	平野 雅樹	JAMSTEC	田中 晋吾	北海道大学
柿本 晃治郎	国立極地研究所	高橋 可江	JAMSTEC	小俣 友輝	北海道大学
熊谷 宏靖	国立極地研究所	山田 亜紀子	JAMSTEC	小木 雅世	北海道大学
辻 勇氣	国立極地研究所	肥田 慎司	JAMSTEC	鈴木 大路郎	北海道大学
春木 野子	国立極地研究所	野田澤 篤人	JAMSTEC	増田 悠子	北海道大学
櫻井 道仁	国立極地研究所	有村 卓	JAMSTEC	津村 麗里	北海道大学
山田 礼二	国立極地研究所	牧 武志	JAMSTEC	吉村 牧子	北海道大学
上野 弥生	国立極地研究所	二村 智之	JAMSTEC	渡辺 久美子	北海道大学
		笠原 敬弘	JAMSTEC		
		松田 沙織	JAMSTEC		

I -2 委員

評議会委員、国際助言委員会 (IAB) 委員の氏名および所属を以下に示す (敬称略)。

所属は、基本的に 2019 年 9 月 30 日時点。ただし、プロジェクト期間中に交代した場合は、交代時点の所属を記載する。

■評議会委員 (50 音順)

安部 大介	株式会社ウェザーニューズ	※ 2018 年 4 月から
井上 智広	日本放送協会	
大村 纂 (議長)	スイス連邦工科大学	
岸上 伸啓	人間文化研究機構 / 国立民族学博物館	
下田 高明	株式会社ロイヤルグリーンランドジャパン	※ 2016 年 10 月から
角南 篤	笹川平和財団 海洋政策研究所 / 政策研究大学院大学	
長谷川 雅世	NPO 法人国際環境経済研究所 / フューチャー・アース	

福西 浩 公益財団法人日本極地研究振興会
 宮部 二郎 株式会社ウェザーニューズ
 山内 豊 ジャパン マリンユナイテッド株式会社
 山内 恭 (副議長) 国立極地研究所 / 総合研究大学院大学

※ 2018 年 3 月まで

■ IAB 委員 (アルファベット順)

Gail Fondahl University of Northern British Columbia
 Jeremy Wilkinson British Antarctic Survey (BAS)
 Klaus Dethloff Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI)
 Larry Hinzman University of Alaska Fairbanks (UAF)
 Stein Sandven Nansen Environmental and Remote Sensing Center (NERSC)

II 研究機関

本プロジェクトの代表機関、副代表機関、および参画機関は以下のとおり。

		参画機関
代表機関	国立極地研究所	北見工業大学 東北大学 大学院理学研究科 筑波大学 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 東京大学 大学院理学系研究科 長岡技術科学大学 名古屋大学 大学院環境学研究科 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 富山大学 大阪府立大学 神戸大学 大学院海事科学研究科 九州大学
副代表機関	海洋研究開発機構	東京大学 大気海洋研究所 東京大学 先端科学技術研究センター 東京海洋大学 新潟大学
	北海道大学	東北大学 東北アジア研究センター 宇宙航空研究開発機構 横浜国立大学 神戸大学 大学院国際協力研究科

III 海外連携機関・国際プロジェクト等

本プロジェクトでは、特に「国際共同研究の推進」メニューの各研究テーマにおいて、海外機関と連携、また、国際的なプロジェクト・プログラム・枠組み等と関与しながら活動を進めた。以下に、海外連携機関や国際プロジェクト等、およびそれぞれと関連する研究テーマを示す。

■海外連携機関（機関名のアルファベット順）

機関名 和名	国名 所在地	関連する研究テーマ							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Alfred-Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI) アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所	ドイツ ブレーマーハーフェン	●	●	●	●		●		
Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) ロシア北極南極研究所	ロシア サンクトペテルブルク	●		●					
Arctic Centre, University of Lapland ラップランド大学 北極センター	フィンランド ロバニエミ							●	
Arctic Economic Council (AEC) 北極経済評議会	ノルウェー トロムソ								●
Canadian High Arctic Research Station (CHARS) カナダ極北研究ステーション	カナダ ケンブリッジベイ				●		●		
Central Aerological Observatory (CAO) 高層気象観測センター	ロシア モスクワ			●					
Central Marine Research and Design Institute (CNIIMF) 中央船舶海洋設計研究所	ロシア サンクトペテルブルク								●
Centre d'études nordiques (CEN) 北方研究センター	カナダ ケベックシティ						●		
Centre for East Asian Studies (CEAS), University of Turku トゥルク大学 東アジア研究センター	フィンランド トゥルク								●
Danish Meteorological Institute (DMI) デンマーク気象研究所	デンマーク コペンハーゲン		●						
Eidgenössische Technische Hochschule スイス連邦工科大学	スイス チューリッヒ		●						
Environment and Climate Change Canada (ECCC) カナダ環境・気候変動省	カナダ ガティノー	●							
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 欧州中期予報センター	英国 レディング	●							
Far Eastern Federal University (FEFU) 極東連邦大学	ロシア ウラジオストク						●		
Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute (FERHRI) ロシア極東水文気象研究所	ロシア ウラジオストク						●		
Fisheries and Oceans Canada (DFO) カナダ水産海洋省	カナダ オタワ				●		●		
Greenland Institute of Natural Resources (GINR) グリーンランド天然資源研究所	デンマーク ヌーク		●						
Institute for Biological Problems of Cryolithozone (IBPC), Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS) ロシア科学アカデミー シベリア支部 寒冷圏生物問題研究所	ロシア ヤクーツク			●			●		
Institute for Humanities Research and Indigenous Studies of the North (IHRISN), Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS) ロシア科学アカデミー シベリア支部 北方少数民族人文科学研究所	ロシア ヤクーツク								●
Institute of Atmospheric Optics (IAO) トムスク大気光学研究所	ロシア トムスク			●					
Institute of Atmospheric Sciences and Climate, National Research Council of Italy (CNR-ISAC) イタリア学術会議 大気科学・気候研究所	イタリア ボローニャ			●					
Institute of Marine Research (IMR) ノルウェー海洋研究所	ノルウェー ベルゲン				●		●		
Institute of Ocean Sciences (IOS) カナダ海洋研究所	カナダ シドニー				●				

機関名 和名	国名 所在地	関連する研究テーマ							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
International Arctic Research Center (IARC), University of Alaska Fairbanks (UAF) アラスカ大学フェアバンクス校 国際北極圏研究センター	米国 フェアバンクス			●	●				
Korea Polar Research Institute (KOPRI) 韓国極地研究所	韓国 仁川	●			●		●		
Laval University ラバル大学	カナダ ケベックシティ				●		●		
Melnikov Permafrost Institute (MPI), Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS) ロシア科学アカデミー シベリア支部 メルニコフ永久凍土研究所	ロシア ヤクーツク			●	●				
Meteorological Service of Canada (MSC) カナダ気象庁	カナダ トロント			●					
Moscow State University モスクワ大学	ロシア モスクワ			●					
Nansen Environmental and Remote Sensing Center (NERSC) ナンセン環境リモートセンシングセンター	ノルウェー ベルゲン	●							
National Aeronautics and Space Administration (NASA) 米国航空宇宙局	米国 ワシントン D.C.						●		
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 米国海洋大気庁	米国 ワシントン D.C.			●	●		●		
North Pacific Marine Science Organization (PICES) 北太平洋海洋科学機関	カナダ シドニー						●		
North-Eastern Federal University (NEFU) 北東連邦大学	ロシア ヤクーツク						●	●	
Northern (Arctic) Federal University (NArFU) 北方(北極)連邦大学	ロシア アルハンゲリスク							●	
Norwegian Barents Secretariat (NBS) バレンツ事務局	ノルウェー キルケネス							●	
Norwegian Centre for the Law of the Sea (NCLOS), UiT The Arctic University of Norway (UiT) ノルウェー北極大学(トロムソ大学)	ノルウェー トロムソ							●	
Norwegian Institute for Air Research (NILU) ノルウェー大気研究所	ノルウェー シェラー			●					
Norwegian Polar Institute (NPI) ノルウェー極地研究所	ノルウェー トロムソ	●		●	●				
Pan-European Institute (PEI), University of Turku トゥルク大学 欧州研究所	フィンランド トゥルク							●	
Polar Law Institute, University of Akureyri アクレイリ大学 極域法研究所	アイスランド アクレイリ							●	
Pusan National University 釜山大学校	韓国 釜山						●		
Scripps Institution of Oceanography (SIO) スクリップス海洋研究所	米国 サンディエゴ				●		●		
St Petersburg University サンクトペテルブルク大学	ロシア サンクトペテルブルク							●	
Stockholm University (SU) ストックホルム大学	スウェーデン ストックホルム			●					
UiT The Arctic University of Norway (UiT) ノルウェー北極大学(トロムソ大学)	ノルウェー トロムソ						●	●	
Università degli Studi di Firenze フィレンツェ大学	イタリア フィレンツェ		●	●					
Université du Québec à Rimouski ケベック大学リモースキー校	カナダ リモースキー						●		
Université du Québec à Trois-Rivières ケベック大学トロワ・リヴィエール校	カナダ トロワ・リヴィエール						●		
University of Alaska Fairbanks (UAF) アラスカ大学フェアバンクス校	米国 フェアバンクス			●	●		●		
University of Bern ベルン大学	スイス ベルン	●							

機関名 和名	国名 所在地	関連する研究テーマ							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
University of Calgary カルガリー大学	カナダ カルガリー		●						
University of Copenhagen コペンハーゲン大学	デンマーク コペンハーゲン		●						
University of East Anglia イーストアングリア大学	英国 ノリッジ			●					
University of Helsinki ヘルシンキ大学	フィンランド ヘルシンキ							●	
University of Washington ワシントン大学	米国 シアトル				●		●		
University of Windsor ウィンザー大学	カナダ ウィンザー						●		
Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) ウッズホール海洋研究所	米国 ウッズホール				●		●		
World Meteorological Organization (WMO) 世界気象機関	スイス ジュネーブ	●							●
Yakutsk Research Center (YRC), Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS) ロシア科学アカデミー シベリア支部 ヤクーツク科学センター	ロシア ヤクーツク							●	

■国際プロジェクト・プログラム・枠組み等 (プロジェクト等名のアルファベット順)

プロジェクト等名 和名	関連する研究テーマ							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
air Pollution in the Arctic: Climate, Environment and Societies (PACES) 温暖化や汚染に関する大気物質に関する調査			●					
Arctic Amplification: Climate Relevant Atmospheric and Surface Processes and Feedback Mechanisms (AC) ³			●					
Arctic Predictability and Prediction on Seasonal to Interannual Timescales (APPOSITE)					●			
C budget of Ecosystems, Cities and Villages on Permafrost in the eastern Russian Arctic (COPERA) 東部ロシア北極域永久凍土上の生態系と都市と村落の炭素収支							●	
CliC Arctic Sea Ice Working Group (CASIWG)				●				
Climate and Clean Air Coalition (CCAC) 気候と大気浄化の国際パートナーシップ			●					
Climate and Cryosphere (CliC) 気候と雪氷圏計画	●			●				
Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) 結合モデル相互比較プロジェクト					●			
Distributed Biological Observatory (DBO) 北極海生態系観測網プログラム				●		●		
East Greenland Ice core Project (EGRIP) 東グリーンランド深層氷床掘削プロジェクト		●						
Ecosystem Studies of Sub-Arctic and Arctic Seas (ESSAS) 亜寒帯海洋生態系プログラム				●		●		
Forum for Arctic Ocean Modeling and Observational Synthesis (FAMOS) 北極海モデル観測統合フォーラム				●				
GreenEdge project						●		
GReenland Ice Sheet-Ocean interactions (GRISO)		●						
Group on Earth Observations (GEO) 地球観測に関する政府間会合								●
Ice Sheet Model Intercomparison Project (ISMIP) 氷床モデル相互比較プロジェクト		●			●			
Ice, Climate, Economics – Arctic Research on Change (ICE-ARC)			●					
Impact of Initialized Land Temperature and Snowpack on Sub-seasonal to Seasonal Prediction (LS4P)					●			
Integrated Arctic Observation System (INTAROS)	●							

プロジェクト等名 和名	関連する研究テーマ							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
International Arctic Buoy Programme (IABP) 国際北極ブイ計画	●			●				
International Arctic Science Committee (IASC) 国際北極科学委員会	●		●					●
International Arctic Social Sciences Association (IASSA) 国際北極社会科学連合							●	
International Arctic Systems for Observing the Atmosphere (IASOA) 国際北極大気観測システム	●			●				
International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) 地球大気化学国際協同研究計画			●					
International Permafrost Association (IPA) 国際永久凍土学会				●			●	
Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAIC) 北極気候研究のための学際的漂流観測プロジェクト	●			●				
Nansen and Amundsen Basins Observational System (NABOS)				●		●		
Pacific Arctic Group (PAG) 太平洋北極グループ	●			●				
Pacific Marine Arctic Regional Synthesis (PacMARS)						●		
Partnership between Norway and Japan for Excellent Education and Research in Weather and Climate Dynamics (NORPAN)	●				●			
Polar Climate Predictability Initiative (PCPI) 極域気候予測プロジェクト					●			
Polar Prediction Project (PPP) 極域予測プロジェクト	●							
Potential of Seasonal-to-Decadal-Scale Inter-Regional Linkages to Advance Climate Predictions (InterDec) 季節～10年規模の地域間連関が気候予測の改善へ向けて持つ潜在的可能性					●			
Resilience and adaptive capacity of arctic marine systems under a changing climate (RACArctic) 気候変動下における北極海洋システムの回復力と適応力				●		●	●	
Russian-American Long-term Census of the Arctic (RUSALCA)				●		●		
Sustaining Arctic Observing Networks (SAON) 持続的北極観測ネットワーク								●
Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System (SIOS) スバルバル統合観測システム								●
Svalbard Science Forum (SSF) スバルバル・サイエンス・フォーラム						●		
Synoptic Arctic Survey (SAS) 北極海総観測				●				
Working Group on Integrated Ecosystem Assessment for the Central Arctic Ocean (WGICA) 北極海中央部における海洋生態系ワーキンググループ				●		●		
World Glacier Monitoring Service (WGMS) 世界氷河モニタリングサービス		●						
Year of Polar Prediction (YOPP) 極域予測年	●							●

IV 活動実績

IV-1 会議開催実績

本プロジェクト全体に関わる主な会議体の開催実績は以下のとおり。各会議体の位置付けなどについては、本報告書の1.2に記載した。

運営委員会

第1回運営委員会	2015年9月9日(水)	北海道大学構内「エンレイソウ」会議室1(交付決定前)
第2回運営委員会	2015年10月27日(火)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第3回運営委員会	2015年11月20日(金)	海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂
第4回運営委員会	2015年12月24日(木)	国立極地研究所 中会議室
第5回運営委員会	2016年1月20日(水)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第6回運営委員会	2016年2月24日(水)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第7回運営委員会	2016年3月30日(水)	国立極地研究所 中会議室
第8回運営委員会	2016年4月20日(水)	国立極地研究所 中会議室
第9回運営委員会	2016年5月16日(月)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第10回運営委員会	2016年6月20日(月)	国立極地研究所 中会議室
第11回運営委員会	2016年7月21日(木)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第12回運営委員会	2016年9月26日(月)	北海道大学 創成研究機構 大会議室
第13回運営委員会	2016年10月24日(月)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第14回運営委員会	2016年11月28日(月)	国立極地研究所 中会議室
第15回運営委員会	2016年12月26日(月)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第16回運営委員会	2017年1月20日(金)	国立極地研究所 中会議室
第17回運営委員会	2017年2月27日(月)	国立極地研究所 中会議室
第18回運営委員会	2017年3月27日(月)	国立極地研究所 中会議室
第19・20回運営委員会	2017年5月18日(木)	国立極地研究所 中会議室
第21回運営委員会	2017年7月27日(木)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第22回運営委員会	2017年9月19日(火)	北海道大学 創成研究機構 大会議室
第23回運営委員会	2017年11月30日(木)	国立極地研究所 中会議室
第24回運営委員会	2018年1月19日(金)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第25回運営委員会	2018年2月28日(水)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第26回運営委員会	2018年3月30日(金)	国立極地研究所 中会議室
第27回運営委員会	2018年5月15日(火)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第28回運営委員会	2018年7月31日(火)	北海道大学 創成研究機構 大会議室
第29回運営委員会	2018年9月13日(木)	国立極地研究所 中会議室
第30回運営委員会	2018年11月19日(月)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第31回運営委員会	2019年1月18日(金)	国立極地研究所 中会議室
第32回運営委員会	2019年2月26日(火)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第33回運営委員会	2019年3月25日(月)	国立極地研究所 中会議室
第34回運営委員会	2019年5月16日(木)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A
第35回運営委員会	2019年7月25日(木)	北海道大学 創成研究機構セミナー室 C
第36回運営委員会	2019年9月17日(火)	国立極地研究所 中会議室
第37回運営委員会	2019年11月25日(月)	国立極地研究所 中会議室
第38回運営委員会	2020年1月20日(月)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第39回運営委員会	2020年3月24日(火)	国立極地研究所 中会議室(予定)

プロジェクト全体会合

キックオフ全体会合	2015年11月25日(水)	海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂
プロジェクト全体会合	2016年6月23日(木)	海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂
プロジェクト全体会合	2017年3月7日(火)	海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂

プロジェクト全体会合	2017年5月30日(火)・31日(水)	海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂
プロジェクト全体会合	2018年5月9日(水)・10日(木)	海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂
プロジェクト全体会合	2019年4月22日(月)・23日(火)	海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂

評議会

第1回評議会	2016年3月24日(木)	JPタワー ホール&カンファレンス
第2回評議会	2016年12月5日(月)	国立極地研究所 多目的会議室
第3回評議会	2017年12月4日(月)	海洋研究開発機構 東京事務所 共用会議室 A・B
第4回評議会	2018年11月26日(月)	国立極地研究所 セミナー室1(統計数理研究所内)

IAB

キックオフ会議	2017年4月2日(日)	The Clarion Hotel Prague
第1回IAB(書面)	2017年5～6月	
第2回IAB	2019年2月5日(火)・6日(水)	国立極地研究所 大会議室

IV-2 予算推移

本プロジェクトの予算推移は下の表のとおり。初年度は、年度途中の9月から約2.6億円で開始した。活動が本格化した2016年度は約7.6億円、中間期の2017年度、2018年度は約8.2億円が交付され、最終年度は2年度目と同程度の約7.6億円となった。5年度合計は約34.2億円であった。

単位：千円

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
国際連携拠点の整備	10,000	30,000	43,536	41,668	31,630	156,834
若手研究者派遣による人材育成及び国際連携	2,000	10,000	15,000	15,550	11,300	53,850
国際共同研究の推進	227,141	656,500	703,187	700,215	644,320	2,931,363
テーマ1	15,000	44,000	42,000	44,530	43,260	188,790
テーマ2	39,540	79,000	85,000	82,750	76,995	363,285
テーマ3	54,800	126,000	136,000	127,700	121,830	566,330
テーマ4	36,500	36,600	38,600	36,672	34,000	182,372
テーマ5	27,000	64,000	70,600	68,840	63,555	293,995
テーマ6	30,580	89,000	95,000	86,300	78,091	378,971
テーマ7	21,161	31,900	36,537	35,083	35,200	159,881
テーマ8	2,560	30,000	37,000	35,540	32,586	137,686
「みらい」とそれに代わる船舶による観測	0	156,000	162,450	182,800	158,803	660,053
AC等北極関連会合への専門家の派遣	6,000	7,500	9,650	11,035	10,344	44,529
管理運営費	14,150	54,181	50,464	53,655	57,968	230,418
国立極地研究所	7,591	33,181	30,000	38,645	39,443	148,860
海洋研究開発機構	2,809	8,500	7,964	3,810	3,255	26,338
北海道大学	3,750	12,500	12,500	11,200	15,270	55,220
合計	259,291	758,181	821,837	822,123	755,562	3,416,994

※「国際共同研究の推進」の2015年度予算は、当時の14研究課題に配分された。上の表では、その後の再編による8研究テーマに合わせて再計算した額を記載した。

IV-3「若手研究者派遣による人材育成及び国際連携」メニューの派遣実績

「若手研究者派遣による人材育成及び国際連携」メニューの5年間の派遣実績は以下のとおり。当該メニューの成果は本報告書の第3章に記載した。なお、所属機関は派遣当時のものである。

募集回	氏名	所属機関	派遣先	プログラム
2015年度 第1回	稲垣 治	神戸大学	International Arctic Research Center (IARC), University of Alaska Fairbanks (UAF) (米国)	中・長期派遣
2016年度 第1回	阿部 義之	北海道大学	Alfred-Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI) (ドイツ)	中・長期派遣
	喜岡 新	東京大学	Moscow State University (ロシア)	中・長期派遣
	鈴木 健太	北海道大学	The Ohio State University (米国)	中・長期派遣
	田原 成美	大阪府立大学	International Arctic Research Center (IARC), University of Alaska Fairbanks (UAF) (米国)	中・長期派遣
2016年度 第2回	星 一平	新潟大学	University of Toronto (カナダ)	中・長期派遣
	高橋 美野梨	北海道大学	Aalborg University Centre for Innovation and Research in Culture and Living in the Arctic (AAU-CIRCLA) (デンマーク)	中・長期派遣
	森井 悠太	北海道大学	University of Groningen (オランダ)	中・長期派遣
	神保 美渚	北海道大学	Institute for Biological Problems of Cryolithozone (IBPC), Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS) (ドイツ)	中・長期派遣
	中野渡 拓也	国立極地研究所	University of Bergen (ノルウェー)	中・長期派遣
	大島 亮造	株式会社商船三井	Tschudi Shipping (ノルウェー)、Arctia Ltd. (フィンランド)、Aalto University (フィンランド)	中・長期派遣
2017年度 第1回	宮本 裕美子	北海道大学	Institute for Biological Problems of Cryolithozone (IBPC), Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS) (ドイツ)	中・長期派遣
	箕輪 昌紘	北海道大学	International Arctic Research Center (IARC), University of Alaska Fairbanks (UAF) (米国)	中・長期派遣
2017年度 第2回	山中 遼	北海道大学	North-Eastern Federal University (NEFU) (ロシア)	中・長期派遣
2017年度 第3回	漢那 直也	北海道大学	Scripps Institution of Oceanography (SIO) (米国)	中・長期派遣
	徳弘 航季	北海道大学	Alfred-Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI) (ドイツ)	中・長期派遣
	是澤 櫻子	東北大学	Novosibirsk State University (ロシア)	中・長期派遣
	蠣崎 友美	苫小牧港管理組合	Arctic Frontiers 2018 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
	前田 尋夫	室蘭市	Arctic Frontiers 2018 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
	川尻 規貴	株式会社商船三井	Arctic Frontiers 2018 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
2018年度 第1回	西澤 啓太	横浜国立大学	Université du Québec à Rimouski (カナダ)	中・長期派遣
	藤田 啓介	日本郵船株式会社	Arctic Shipping Forum (フィンランド)	短期派遣 (実務者)
	岡部 善尚	北海道庁	Arctic Circle 2018 Assembly (アイスランド)	短期派遣 (実務者)
2018年度 第1回 (追加)	石田 悠貴	新潟大学	Max-Planck Institute for Meteorology (ドイツ)	中・長期派遣
	渡邊 茜	千葉大学	Aberystwyth University (英国)	中・長期派遣
	繁山 航	総合研究大学院大学	Ice Core Analysis Techniques (ICAT) PhD school-2018(デンマーク)	短期派遣 (大学院生)
	坂本 春樹	東京大学	American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (米国)	短期派遣 (大学院生)
	幡谷 咲子	神戸大学	The 11th Polar Symposium (ノルウェー)、UiT The Arctic University of Norway (ノルウェー)	短期派遣 (大学院生)
	杉山 瑛美	三菱電機株式会社	Arctic Circle 2018 Assembly (アイスランド)	短期派遣 (実務者)
2018年度 第2回	竹室 祐貴	北海道大学	Alaska Fisheries Science Center, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (米国)	短期派遣 (大学院生)

2018年度 第3回	深井 悠里	北海道大学	Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) (米国)	中・長期派遣
	神保 美渚	北海道大学	Institute for Biological Problems of Cryolithozone (IBPC), Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS) (ロシア)	中・長期派遣
	安部 智貴	一般財団法人函館国際水産・海洋都市推進機構	Arctic Frontiers 2019 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
	小林 創	株式会社ウェザーニューズ	Arctic Frontiers 2019 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
	深谷 静	株式会社商船三井	Arctic Frontiers 2019 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
	夫津木 亮介	株式会社パスコ	Arctic Frontiers 2019 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
	前野 泰孝	株式会社函館国際貿易センター	Arctic Frontiers 2019 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
	山崎 真梨	ESRI ジャパン株式会社	Arctic Frontiers 2019 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
2019年度 第1回	安藤 卓人	北海道大学	Oceanography, Institute of Environmental Physics, University of Bremen (MARUM) (ドイツ)	中・長期派遣
	伊藤 優人	北海道大学	International Arctic Research Center (IARC), University of Alaska Fairbanks (UAF) (米国)	中・長期派遣
	小林 真	北海道大学	Climate Impact Research Center, Umeå University (スウェーデン)	中・長期派遣
	佐藤 和敏	北見工業大学	Alfred-Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI) (ドイツ)	中・長期派遣
	Naya Ifigenia Gomes Correia Sena	北海道大学	Institute of Seabird Research and Conservation (米国)	中・長期派遣
	和賀 久朋	北海道大学	International Arctic Research Center (IARC), University of Alaska Fairbanks (UAF) (米国)	中・長期派遣
2019年度 第2回	小野 誠仁	千葉大学	Adam Mickiewicz University (ポーランド)	中・長期派遣
	木暮 優	国立極地研究所	Goddard Space Flight Center (GSFC), National Aeronautics and Space Administration (NASA) (米国)	中・長期派遣
	井上 峻	総合研究大学院大学	Ice Core Analysis Techniques (ICAT) PhD school-2019(デンマーク)	短期派遣 (大学院生)
	古巻 史穂	北海道大学	2019 World Marine Mammal Conference (スペイン)	短期派遣 (大学院生)
	柳谷 一輝	北海道大学	The first Southern Hemisphere Conference on Permafrost (South-COP) (ニュージーランド)	短期派遣 (大学院生)
	米倉 綾香	総合研究大学院大学	Ice Core Analysis Techniques (ICAT) PhD school-2019(デンマーク)	短期派遣 (大学院生)
	高原 英生	一般財団法人函館国際水産・海洋都市推進機構	Arctic Frontiers 2020 (ノルウェー)	短期派遣 (実務者)
	福井 智一	国立研究開発法人科学技術振興機構 日本科学未来館	Arctic Circle 2019 Assembly (アイスランド)	短期派遣 (実務者)

※ 2015年度の募集は1回のみ。

IV-4 「AC 等北極関連会合への専門家の派遣」メニューの派遣実績

「AC 等北極関連会合への専門家の派遣」メニューの5年間の派遣実績は以下のとおり。当該メニューの成果は本報告書の第5章に記載した。なお、当該メニューによる派遣者のみを記しているが、会合によってはその他のプロジェクト研究者も参加している。

2015 年度

会合名	派遣者	会合期間	派遣先
AMAP 29th meeting	菊地 隆、榎本 浩之、齊藤 誠一	2015 年 9 月 13 ~ 15 日	トロムソ (ノルウェー)
CAFF board meeting	内田 雅己	2015 年 9 月 15 ~ 17 日	トロムソ (ノルウェー)
Arctic Circle General Assembly 2015	深澤 理郎	2015 年 10 月 16 ~ 18 日	レイキャビク (アイスランド)
EGBCM 1st meeting	近藤 豊	2016 年 1 月 27 ~ 28 日	レイキャビク (アイスランド)
SCTF 8th meeting	柴田 明徳	2016 年 3 月 3 ~ 4 日	アーリントン (米国)
ASSW2016, AOS	深澤 理郎	2016 年 3 月 12 ~ 18 日	フェアバンクス (米国)

2016 年度

会合名	派遣者	会合期間	派遣先
EGBCM 2nd meeting	近藤 豊	2016 年 6 月 8 ~ 9 日	ヘルシンキ (フィンランド)
SCTF 9th meeting	柴田 明徳	2016 年 7 月 6 ~ 8 日	オタワ (カナダ)
CAFF board meeting	内田 雅己	2016 年 9 月 7 ~ 8 日	ロングイヤービン (ノルウェー)
PAME II-2016	大塚 夏彦	2016 年 9 月 18 ~ 21 日	ポートランド (米国)
Arctic Circle General Assembly 2016	深澤 理郎、杉山 慎、後藤 正憲、大塚 夏彦	2016 年 10 月 7 ~ 9 日	レイキャビク (アイスランド)
EGBCM 3rd meeting	近藤 豊	2016 年 10 月 25 ~ 26 日	ワシントン D.C. (米国)
AMAP 30th meeting	菊地 隆	2016 年 11 月 28 ~ 12 月 1 日	ヘルシンキ (フィンランド)
Arctic Frontiers 2017	深澤 理郎	2017 年 1 月 22 ~ 26 日	トロムソ (ノルウェー)
CAFF board meeting	内田 雅己	2017 年 2 月 1 ~ 2 日	カウトケイノ (ノルウェー)
SDWG regular meeting	大西 富士夫	2017 年 2 月 7 ~ 8 日	コツビュー (米国)
CBird regular meeting	高橋 晃周	2017 年 3 月 7 ~ 9 日	フェロー諸島 (デンマーク)
ASSW2017	深澤 理郎、榎本 浩之	2017 年 3 月 31 ~ 4 月 7 日	プラハ (チェコ)

2017 年度

会合名	派遣者	会合期間	派遣先
ASSW2017	深澤 理郎、榎本 浩之	2017 年 3 月 31 ~ 4 月 7 日	プラハ (チェコ)
AMAP conference	大西 富士夫	2017 年 4 月 24 ~ 27 日	レストン (米国)
AMAP SLCF EG 1st meeting	近藤 豊	2017 年 6 月 27 ~ 30 日	ヴィクトリア (カナダ)
AMAP 31st meeting	菊地 隆	2017 年 9 月 12 ~ 14 日	レイキャビク (アイスランド)
PAME II-2017	大塚 夏彦	2017 年 9 月 18 ~ 20 日	ヘルシンキ (フィンランド)
SDWG regular meeting	大西 富士夫	2017 年 9 月 21 ~ 22 日	イナリ (フィンランド)
CAFF board meeting	内田 雅己	2017 年 9 月 6 ~ 7 日	ベセル (米国)
EGBCM 4th meeting	近藤 豊	2017 年 10 月 3 ~ 4 日	ヘルシンキ (フィンランド)
Arctic Circle General Assembly 2017	深澤 理郎、高倉 浩樹、大塚 夏彦	2017 年 10 月 13 ~ 15 日	レイキャビク (アイスランド)
GEO Week 2017	深澤 理郎	2017 年 10 月 24 ~ 26 日	ワシントン D.C. (米国)
6th EA workshop	山村 織生	2018 年 1 月 9 ~ 11 日	シアトル (米国)
Arctic Frontiers 2018	深澤 理郎	2018 年 1 月 21 ~ 26 日	トロムソ (ノルウェー)
AMAP SLCF EG 2nd meeting	近藤 豊	2018 年 1 月 29 ~ 31 日	ヘルシンキ (フィンランド)
CAFF board meeting	内田 雅己	2018 年 2 月 6 ~ 8 日	フェアバンクス (米国)
PAME I-2018	大塚 夏彦	2018 年 2 月 12 ~ 14 日	ケベックシティ (カナダ)
CBird regular meeting	Alexis Will	2018 年 3 月 12 ~ 15 日	ケンブリッジ (英国)
SDWG regular meeting	大西 富士夫	2018 年 3 月 19 ~ 20 日	キッティラ (フィンランド)
SAO plenary meeting	大西 富士夫	2018 年 3 月 22 ~ 23 日	キッティラ (フィンランド)

2018 年度

会合名	派遣者	会合期間	派遣先
Polar2018 (ASSW2018, AOS)	深澤 理郎、榎本 浩之、猪上 淳	2018 年 6 月 15 ~ 27 日	ダボス (スイス)
CAFF board meeting	Alexis Will	2018 年 9 月 4 ~ 5 日	ダッチハーバー (米国)
EGBCM 5th meeting	近藤 豊	2018 年 9 月 20 ~ 21 日	ヘルシンキ (フィンランド)
AMAP 32nd meeting	菊地 隆	2018 年 9 月 25 ~ 27 日	キルナ (スウェーデン)
PAME II-2018	大塚 夏彦	2018 年 10 月 1 ~ 4 日	ウラジオストク (ロシア)
AMBI Phase 2 Planning Meeting	立澤 史郎	2018 年 10 月 7 ~ 8 日	ロバニエミ (フィンランド)
ABC 2nd congress	立澤 史郎	2018 年 10 月 9 ~ 11 日	ロバニエミ (フィンランド)
Arctic Circle General Assembly 2018	深澤 理郎、大塚 夏彦、藤岡 悠一郎	2018 年 10 月 19 ~ 21 日	レイキャピク (アイスランド)
ASM 2	榎本 浩之、東 久美子、大塚 夏彦	2018 年 10 月 24 ~ 26 日	ベルリン (ドイツ)
SDWG regular meeting	大西 富士夫	2018 年 10 月 29 ~ 30 日	ロバニエミ (フィンランド)
GEO Week 2018	深澤 理郎、榎本 浩之	2018 年 10 月 31 ~ 11 月 1 日	京都 (日本)
Arctic meteorological and climate workshop 2nd congress	浮田 甚郎	2018 年 11 月 6 ~ 8 日	コペンハーゲン (デンマーク)
AMAP SLCF EG 3rd meeting	近藤 豊	2018 年 11 月 13 ~ 15 日	ボローニャ (イタリア)
EGBCM 6th meeting	近藤 豊	2019 年 1 月 16 ~ 17 日	ヘルシンキ (フィンランド)
Arctic Frontiers 2019	深澤 理郎	2019 年 1 月 20 ~ 24 日	トロンソ (ノルウェー)
CAFF board meeting	内田 雅己	2019 年 2 月 4 ~ 6 日	アンカレッジ (米国)
PAME I-2019	大塚 夏彦	2019 年 2 月 4 ~ 7 日	マルメ (スウェーデン)
CBird regular meeting	Alexis Will	2018 年 3 月 26 ~ 28 日	アクレイリ (アイスランド)

2019 年度

会合名	派遣者	会合期間	派遣先
ASSW2019	深澤 理郎、榎本 浩之、兒玉 裕二	2019 年 5 月 22 ~ 30 日	アルハンゲリク (ロシア)
CAFF board meeting	内田 雅己	2019 年 9 月 5 ~ 6 日	ストックホルム (スウェーデン)
PAME II-2019	大塚 夏彦	2019 年 9 月 9 ~ 12 日	レイキャピク (アイスランド)
SDWG regular meeting	大西 富士夫	2019 年 9 月 11 ~ 12 日	イーサフィヨルズウル (アイスランド)
Arctic Circle General Assembly 2019	深澤 理郎、大塚 夏彦、藤岡 悠一郎、立澤 史郎	2019 年 10 月 10 ~ 13 日	レイキャピク (アイスランド)
AMAP 33rd meeting	木村 元	2019 年 10 月 28 ~ 30 日	トロンソ (ノルウェー)
GEO Week 2019	深澤 理郎	2019 年 11 月 4 ~ 11 月 9 日	キャンベラ (オーストラリア)
AMAP SLCF EG 4th meeting	近藤 豊	2019 年 11 月 5 ~ 11 月 7 日	アナーバー (米国)
CAFF board meeting (予定)	内田 雅己	2020 年 2 月 3 ~ 5 日	イエリバレ (スウェーデン)
PAME I-2020 (予定)	大塚 夏彦	2020 年 2 月 3 ~ 7 日	オスロ (ノルウェー)
SDWG regular meeting (予定)	大西 富士夫	2020 年 3 月 22 ~ 23 日	アクレイリ (アイスランド)

- ABC Arctic Biodiversity Congress
- AMAP 北極圏監視評価プログラム作業部会 (Arctic Monitoring and Assessment Programme)
- AMBI 北極渡り鳥イニシアティブ (Arctic Migratory Birds Initiative)
- ASM 北極科学大臣会合 (Arctic Science Ministerial)
- ASSW 北極科学サミット週間 (Arctic Science Summit Week)
- CAFF 北極圏植物相・動物相保存作業部会 (Conservation of Arctic Flora and Fauna)
- CBird 北極圏海鳥専門家グループ (Circumpolar seabird Expert Group)
- EA workshop Ecosystem Approach workshop
- EGBCM Expert Group on Black Carbon and Methane
- GEO 地球観測に関する政府間会合 (Group on Earth Observations)
- PAME 北極圏海洋環境保護作業部会 (Protection of the Arctic Marine Environment)
- SAO meeting 高級北極実務者会合 (Senior Arctic Officials meeting)
- SDWG 持続可能な開発作業部会 (Sustainable Development Working Groups)
- SLCF EG Short-lived Climate Forcers Expert Group
- SCTF Scientific Cooperation Task Force

V 略語表

本報告書の第1～7章に記載のある機関名、プロジェクト名、データ名等の略語および正式名称を以下に示す(略語のアルファベット順)。以下の表に掲載される語について、本報告書中では基本的に略語を記載する。

略語	正式名称 和名
ACA	Adaptation Actions for a Changing Arctic 変化する北極への適応行動
AARI	Arctic and Antarctic Research Institute ロシア北極南極研究所
AC	Arctic Council 北極評議会
ACI	Aerosol Cloud Interaction
ADS	Arctic Data archive System 北極域データアーカイブシステム
AEC	Arctic Economic Council 北極経済評議会
AGCM	Atmospheric General Circulation Model 大気大循環モデル
AGU	American Geophysical Union 米国地球物理学連合
AIS	Automatic Identification System 自動船舶識別装置
ALEDAS2	AFES-LETKF ensemble data assimilation system ver. 2 AFES-LETKF アンサンブルデータ同化システム ver. 2
AMAP	Arctic Monitoring and Assessment Programme 北極圏監視評価プログラム作業部会
AMSR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer-2 高性能マイクロ波放射計 2
AO	Arctic Oscillation 北極振動
AOS	Arctic Observing Summit 北極観測サミット
APPOSITE	Arctic Predictability and Prediction on Seasonal to Interannual Timescales
ASM	Arctic Science Ministerial 北極科学大臣会合
ASSW	Arctic Science Summit Week 北極科学サミット週間
AWI	Alfred-Wegener Institute for Polar and Marine Research アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所
BC	black carbon ブラックカーボン
CAFF	Conservation of Arctic Flora and Fauna 北極圏植物相・動物相保存作業部会
CBird	Circumpolar seabird Expert Group 北極圏海鳥専門家グループ
CBMP	Circumpolar Biodiversity Monitoring Program
CEN	Centre d'études nordiques 北方研究センター
CHARS	Canadian High Arctic Research Station カナダ極北研究ステーション
CMA	China Meteorological Administration 中国気象局
CMC	Canadian Meteorological Centre カナダ気象センター

略語	正式名称 和名
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project 結合モデル相互比較プロジェクト
COSMOS	Continuous Soot Monitoring System 連続ブラックカーボン測定装置
CTD	Conductivity, Temperature, and Depth 電気伝導度(塩分)、水温、水深
d4PDF	database for Policy Decision making for Future climate change 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測 データベース
DFO	Fisheries and Oceans Canada カナダ水産海洋省
DTS	Distributed Temperature Sensing
EarthCARE	Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explore 雲エアロゾル放射ミッション
ECCC	Environment and Climate Change Canada カナダ環境・気候変動省
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 欧州中期予報センター
EGBCM	Expert Group on Black Carbon and Methane ブラックカーボンおよびメタン専門家グループ
EGRIP	East Greenland Ice core Project 東グリーンランド深層氷床掘削プロジェクト
EnKF	Ensemble Kalman Filter アンサンブルカルマンフィルター
ERA	ECMWF Re-Analysis
ESSAS	Ecosystem Studies of Sub-Arctic and Arctic Seas 亜寒帯海洋生態系プログラム
EU	European Union 欧州連合
FiSCAO	Fish Stocks in the Central Arctic Ocean
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy フーリエ変換赤外分光光度計
GCW	Global Cryosphere Watch 全球雪氷圏監視
GEO	Group on Earth Observations 地球観測に関する政府間会合
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems 全球地球観測システム
GIA	Glacial Isostatic Adjustment 氷河性地殻均衡
GINR	Greenland Institute of Natural Resources グリーンランド天然資源研究所
GNSS	Global Navigation Satellite System 全球測位衛星システム
GPCP	Global Precipitation Climatology Project

略語	正式名称 和名
GRENE 北極	Green Network of Excellence (GRENE) Program Arctic Climate Change Research Project “Rapid Change of the Arctic Climate System and its Global Influences” グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE) 事業北極気候変動分野「急変する北極気候システム及びその全球的な影響の総合的解明」
GRISO	Greenland Ice Sheet-Ocean interactions
IARC	International Arctic Research Center 国際北極圏研究センター
IASC	International Arctic Science Committee 国際北極科学委員会
IBPC	Institute for Biological Problems of Cryolithozone 寒冷圏生物問題研究所
ICES	International Council for the Exploration of the Sea 国際海洋開発理事会
IMBeR	Integrated Marine Biosphere Research
IMO	International Maritime Organization 国際海事機関
IMR	Institute of Marine Research ノルウェー海洋研究所
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
IPCC-AR5	IPCC Fifth Assessment Report IPCC 第5次評価報告書
IPCC-AR6	IPCC Sixth Assessment Report IPCC 第6次評価報告書
ISAR-6	6th International Symposium on Arctic Research 第6回国際北極研究シンポジウム
ISMIP	Ice Sheet Model Intercomparison Project 氷床モデル相互比較プロジェクト
JAMSTEC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 海洋研究開発機構
JMA	Japan Meteorological Agency 気象庁
JOIS	Joint Ocean Ice Studies
JpGU	Japan Geoscience Union 日本地球惑星科学連合
JRA-55	Japanese 55-year Reanalysis 気象庁 55年長期再解析
KOPRI	Korea Polar Research Institute 韓国極地研究所
LNG	Liquefied Natural Gas 液化天然ガス
METFR	Météo France フランス気象局
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate
MOSAIC	Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate
MPA	Marine Protected Area 海洋保護区
MXCT	Microfocus X-ray Computed Tomography マイクロフォーカス X 線 CT
NAO	North Atlantic Oscillation 北大西洋振動

略語	正式名称 和名
NASA	National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局
NCAR	National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター
NCEP	National Centers for Environmental Prediction 米国環境予測センター
NEEM	North Greenland Eemian Ice Drilling 北グリーンランド氷床深層掘削計画
NERSC	Nansen Environmental and Remote Sensing Center ナンセン環境リモートセンシングセンター
NICAM	Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model 非静力学正 20 面体格子大気モデル
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁
NPI	Norwegian Polar Institute ノルウェー極地研究所
NSIDC	National Snow and Ice Data Center 米国雪氷データセンター
NSR	Northern Sea Route 北極海航路
OCMIP	Ocean Carbon-Cycle Model Intercomparison Project
PacMARS	Pacific Marine Arctic Regional Synthesis
PAG	Pacific Arctic Group 太平洋北極グループ
PAME	Protection of the Arctic Marine Environment 北極圏海洋環境保護作業部会
PAR	Photosynthetically Active Radiation 光合成有効放射
PDO	Pacific Decadal Oscillation 太平洋十年規模振動
PDV	Pacific Decadal Variability 太平洋十年規模変動
PFRR	Poker Flat Research Range ポーカーフラットリサーチレンジ
PFRR スーパーサイト	Poker Flat Research Range Flux super site ポーカーフラットリサーチレンジフラックス観測スーパーサイト
PICES	North Pacific Marine Science Organization 北太平洋海洋科学機関
POC	Particulate Organic Carbon 粒子状有機炭素
POLAR	Polar Knowledge Canada カナダ極地知的基盤機構
PPP	Polar Prediction Project 極域予測プロジェクト
QBO	Quasi-Biennial Oscillation 成層圏準 2 年周期振動
RACArctic	Resilience and adaptive capacity of arctic marine systems under a changing climate 気候変動下における北極海洋システムの回復力と適応力
RAS	Russian Academy of Sciences ロシア科学アカデミー
SAON	Sustaining Arctic Observing Networks 持続的北極観測ネットワーク

略語	正式名称 和名
SCTF	Scientific Cooperation Task Force 科学協力タスクフォース
SDGs	Sustainable Development Goals 持続可能な開発目標
SDWG	Sustainable Development Working Group 持続可能な開発作業部会
SeaRISE	Sea-level Response to Ice Sheet Evolution
SGLI	Second generation GLobal Imager 多波長光学放射計
SIGMA	Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic 積雪汚染及び雪氷微生物が北極域の環境変動に及ぼす影響
SIOS	Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System スバルバル統合観測システム
SLCF	Short-lived Climate Forcers 短寿命気候影響物質
SOLAS	Surface Ocean - Lower Atmosphere Study 海洋大気間物質相互作用研究計画
SP2	Single-Particle Soot Photometer レーザー誘起白熱法
SST	Sea Surface Temperature 海面水温
SWIPA	Snow, Water, Ice, Permafrost in the Arctic
TOPAZ	Towards an Operational Prediction system for the North Atlantic European coastal Zones
UAF	University of Alaska Fairbanks アラスカ大学フェアバンクス校
UiT	UiT The Arctic University of Norway ノルウェー北極大学 (トロムソ大学)
UKMO	United Kingdom Met Office 英国気象局
UNIS	University Centre in Svalbard スバルバル大学
VENUS	VEssel Navigation Unit support System 船舶用衛星データ配信システム
WGICA	Working Group on Integrated Ecosystem Assessment for the Central Arctic Ocean 北極海中央部における海洋生態系ワーキンググループ
WGMS	World Glacier Monitoring Service 世界氷河モニタリングサービス
WMO	World Meteorological Organization 世界気象機関
YOPP	Year of Polar Prediction 極域予測年

『北極域研究推進プロジェクト（ArCS）2015-2020 研究成果報告書』

発行日：2020年2月29日

編集・発行：北極域研究推進プロジェクト事務局

〒190-8518 東京都立川市緑町10-3 国立極地研究所内

©Arctic Challenge for Sustainability, 2020 All rights reserved

ISBN 978-4-906651-07-8

プロジェクトの終了にともない、ウェブサイトのURLが変わります

2020年3月31日まで

<https://www.arcs-pro.jp/>

2020年4月1日以降

<https://www.nipr.ac.jp/arcs/>



国立極地研究所
大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構



JAMSTEC 国立研究開発法人
海洋研究開発機構
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology



北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY

