



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

GRENE北極気候変動研究事業 2011-2016 成果報告書

情報・システム研究機構国 立 極 地 研 究 所所長 白石 和行

文部科学省は、2010年6月に閣議決定された新成長戦略や同年10月の総合科学技術会議による答申に基づ いて、2011年度から大学発グリーンイノベーション創出事業「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス」 (GRENE)を開始しました。そこには北極気候変動、環境情報、植物化学、先進環境材料の四分野を設置し、 研究機関が戦略的に連携して世界水準の研究と人材育成を推進することを目指して公募を実施しました。北極 気候変動分野では、本事業「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」研究計画が同年 7月に採択され事業がスタートしました。

本事業では北極域における温暖化増幅メカニズムの解明、全球の気候変動及び将来予測における北極域の役 割の解明、北極域における環境変動が日本周辺の気象や水産資源等に及ぼす影響の評価、そして北極海航路の 利用可能性評価につながる海氷分布の将来予測という、4つの戦略研究目標が与えられました。これに対して 研究者からの提案による7つの研究課題に分かれて研究を進めてきましたが、その実施には、「観測とモデル の連携」、「分野間の連携」が不可欠でした。これは研究者にとっては新たな挑戦であり、その過程では多く の議論がありました。しかし、これまでと違う成果を出すにはアプローチの仕方、考え方など新しい発想が必 要です。連携を意識してやってきたこの5年を振り返ると、研究チーム間の対話も深まり、成果に結びついた と言えます。

これまで日本の北極研究は個々の研究者の努力により小規模な範囲で行われてきたものが多く、研究者や機関が一丸となって組織的に研究を進めようという大きな動きまでには至っていませんでしたが、本事業が始ま る直前には北極環境研究コンソーシアムが創設され、ようやく研究者の連携体制が整備されました。このよう に研究者コミュニティーがまとまりを見せてきた中、国立極地研究所は本事業の代表機関として、国内の主要 な研究所・大学に在籍する北極研究最前線の研究者を束ねる役割を担いましたが、このような事業形態は極地 研としてもいまだかつて経験したことがないものでした。運営面で十分な準備をもって事業を開始できたわけ ではなく、関係する研究者や機関の方々には大変ご迷惑をお掛けしたことと思います。また運営会議委員には 研究面で多くの助言を頂き、研究者、事務局と三位一体で事業に臨むことができました。この5年間に研究者 間の結びつきが強まり、連携が当たり前のようになったことに達成感を感じます。そしてこの結びつきが次の 北極研究を生み出したことも見逃すことはできません。

北極を巡る国際的な協力関係は年を追うごとに緊密なものとなり、そのスピードは加速していると言えます。 事業期間中にASSW (Arctic Science Summit Week) 2015 を富山市で成功裏に開催できたことは、日本の北 極研究がまとまってきたことが評価されたからこそと考えています。また、5年間にわたった本事業の予算が、 厳しい財政状況のなかでなんとか維持できたことは、北極研究に対する期待の表れと言えます。本事業を機に 日本の北極研究は新しいステージに導かれ、日本の北極研究に残した足跡は時とともに大きい存在となるに違 いありません。

最後に、本事業を熱心に支援し推進してくださった文部科学省をはじめ関係省庁、研究機関の担当者、また、 多くの研究者の方々に深く感謝申し上げるとともに、今後も北極研究のさらなる発展を支えてまいる所存です。

2016年8月

3

目 次

前書き GRENE 北極気候変動研究事業を終えて	3
第1章 序論	7
GRENE 北極気候変動研究事業について	
1. 本事業の構成	
2. 本事業の成立の経緯	
3. 本報告書の構成	
第2章	15
	16
インドロメリンヨン	10
	19
Σ. 画がフィードハラフの時間 Π. 戦略研究日標 2. 全球の気候変動及び将来予測における北極域の役割の解明・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	29
	20
3 北極域一中緯度帯間の熱輸送	
4. 北極域の氷河・氷床融解による海水準変動	
Ⅲ. 戦略研究目標 3a. 北極域における環境変動が日本周辺の気象に及ぼす影響の評価·······	38
1. 北極—中緯度気候リンク	
2. 日本における寒波、大雪と北極変動の関係	
戦略研究目標 3b. 北極域における環境変動が水産資源等に及ぼす影響の評価	43
3. 北極海・周辺海域の海洋酸性化の実態と基礎生産力の維持機構	
4. 温暖化・海氷減少に伴う北極海・周辺海域での優占グループの変化	
Ⅳ.戦略研究目標4 北極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の将来予測	48
1. 海洋熱循環と海氷集積効果による海氷分布変動	
2. 北極海熱収支の変動と海氷	
3. 海氷分布予測と航行支援情報	
Ⅴ.まとめと今後の課題・・・・・・	56
第2章 研究理题報告	61
おり早 切九杯超報口 T 北極気候再相性検証おとび北極気候変動・変化のメカニズム解析に其づく	01
全球気候モデルの高度化・精緻化 研究理題 1	62
	02
3. 要素モデルの開発・改良および感度実験	
Ⅱ.環北極陸域システムの変動と気候への影響 研究課題 2	79
1. 温暖化と環北極陸域生態系の変化	
2. 長期観測サイトにおける生態系の変動	
3. GRENE-TEA 観測とモデルの連携研究	
Ⅲ.北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響:大気プロセスの包括的研究 研究課題3	98
1. 北極域におけるブラックカーボン観測	
2. 北極域における雲の広域観測	
3. 北半球中高緯度における対流圏ー成層圏結合とそのインパクト	
Ⅳ.地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割 研究課題 4	113
1. 研究実施概要	
2. 北極積雪の変容	
3. 積雪中不純物の空間分布	
4. 氷河表面の微生物由来不純物とその融解への効果	
5. 北極圏山岳氷河の変動	
6. グリーンランドにおける氷損失とそのメカニズム	40-
V.北 / 2010年の10日本の10日本の10日本の10日本の10日本の10日本の10日本の10日本	127
2. 温至効果気体の境北極総合観測	
3. 水床コア・ノイルン空気分析による過去 100 年间の温室効果気体の推定 4. 2. 次二十年ル尚絵学エゴルセトが味した能変エゴルを用いた限定が思想になった地方。 思想法の推定	
4. 3 火元へ丸化子制达モナルおよい座工生態糸モナルを用いた温至効朱丸体の放出源・吸収源の推定	

Ⅵ.北	極海環境変動研究:海氷減少と海洋生態系の変化 研究課題 6	145
1.	研究実施概要(観測実施・国際連携など)	
2.	物理・化学環境の変化	
3.	海洋酸性化への影響	
4.	基礎生産の変化	
5.	動物プランクトンへの影響	
6.	高次生態系への影響	
Ⅷ.北柞	極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の将来予測 研究課題 7	167
1.	海氷変動をもたらす基礎メカニズム	
2.	海氷生産量マッピングと沿岸現場観測	
3.	北極海の循環と物理過程のモデリング	
4.	長期海氷予測システムの開発	
5.	短期・中期海氷分布予測	
6.	海氷厚モニタリング	
7.	航行支援モデル	
8.	経済性評価および輸送シナリオ	
0.		
第4章 6	研究基盤、他	183
研究	宏基盤・JCAR事務局・国際連携推進について	
1.	全体概要	
2.	海洋地球研究船「みらい」	
3	外国砕氷船・係留系	
4		
5	エレーション 北極域データアーカイブ (ADS)	
6	計算機資源について	
7	北海環境研究コンソーシアム(JCAR)事務局	
8	国際連進推進	
0.		
第5章 約	ま語・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	215
全(~~~ 体まとめと今後の展望	
研究業績		219
1.	原著論文(査読有)	
2.	投稿中論文(査読有、submitted) 苯弗	
3. 1	者書 註上烝主(本註無」論立 ——如姓註記車 笙)	
4. 5	認工先役(且認無し調火、 阪祖認記事、寺) その他(学会での招待講演、受賞、引用学位取得論文)	
0.		
参考資料		略
巻末資料		261
1.	北極研究検討作業部会報告書—中間とりまとめ—	
2.	中間評価票(北極気候変動分野)	
数字で見る	5 GRENE 北極気候変動研究事業 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	269

表紙:グリーンランド。雪氷微生物で暗色化した氷と融解水(写真:杉山 慎/北海道大学) 裏表紙:GRENE 北極気候変動研究事業の観測・活動が行われた地域

引用文献の記載について

*本事業の業績を本文中で引用した場合は0000 et al.,20xx で表示しています。該当資料の詳細については巻末の研究業績のページをご 参照ください。研究業績の1. 原著論文(査読有)、2. 投稿中論文(査読有、submitted)、3. 著書、4. 誌上発表(査読無し論文、一 般雑誌記事、等)のいずれかに含まれています。

*本事業以外の論文等を参照している場合は右肩に引用番号を各節毎に振り、節の文末に引用文献を示しました。

参考資料についてはWEB版では省略していることをご了承ください。

第 第1章

序論



GRENE 北極気候変動研究事業について

プロジェクトマネージャ:山内 恭

本事業の構成

目的

文部科学省では、「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセ レンス」(GRENE)事業^{*1}北極気候変動分野のもと、下記の 目的を達成するために公募が行われた。即ち:

(公募要領)

北極は、地球温暖化による平均気温の上昇が最も大きく、地 球上において気候変動による影響が最も顕著に表れると予想さ れる地域の一つです。また、北極における変化は、大気・海洋 循環の変化や雪氷圏変化などを通して、全球的な気候システム にも大きな影響をもたらす可能性があることから、気候変動の メカニズムの解明のため、北極における継続的な地球観測を実 施することは非常に重要です。

他方、我が国への影響という観点からは、特に最近の北極振動の振舞いに伴う異常気象の発生などによりその重要性が改め て認識されるとともに、海氷減少に伴う北極航路の活用など経 済活動の面からの関心も高まっています。また北半球に位置し、 しかも気候・環境的にも北極域・高緯度の影響を強く受けてい る日本としてはより組織的な北極圏研究が必要です。

本事業は、上記のような我が国にとって重要な研究課題の解 明に、分野横断的かつ総合的に取り組むことを目的とします。

科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会、地球観測推 進部会、北極研究戦略小委員会*2は、公募に当たって、達成す べき4つの戦略研究目標と運用基本方針を以下の通り示した。 (戦略研究目標)

- 1. 北極域における温暖化増幅メカニズムの解明
- 全球の気候変動及び将来予測における北極域の役割の解明
- 3. 北極域における環境変動が日本周辺の気象や水産資源等 に及ぼす影響の評価
- 北極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の将来 予測

(運用基本方針)

・事業内容:本事業において北極研究を強力に牽引するため定められた中核研究機関は、以下の事業を実施する。

- 公募による共同研究の実施
- ② 研究設備等の提供
- ③ 「北極環境研究コンソーシアム(仮称)」の運営
- 「北極環境研究コンソーシアム(仮称)」の運営:中核研 究機関は、「北極環境研究コンソーシアム(仮称)」にお いて自主的に行う以下の検討等に関し、効率的かつ効果的 な活動となるよう支援する。
 - ・ 北極域に関する研究課題の検討
 - 人材育成や国際協力の在り方などの重要事項に係る 検討及び推進
 - 北極環境研究のプラットフォーム保有研究機関等に
 対する当該プラットフォーム活用に関する提言
 - 国際シンポジウムの開催などの研究成果の広報
 - 観測データの統合・相互利用の検討(衛星観測デー タなど)
 - IASC 等の国際的な北極研究の枠組みへの参画等に 関する検討
- 戦略研究目標(ただし、「運用基本方針」には研究課題と 表記されている):本事業においては、複数の分野の研究 者が協同で我が国の将来ビジョンにも深く関わるような研 究課題の解明を目指す。また、中核研究機関は、広く異な る分野の研究者を参画させるため、公募を行う。公募にあ たっては、日本国民への貢献について具体的かつ明確な説 明を求めることとする。
 - 北極域における温暖化増幅メカニズムの解明: 北極域は、地球温暖化による平均気温の上昇が最も大 きく、地球上において気候変動による影響が最も顕著 に表れる地域の1つとされていることから、温暖化増 幅(Polar Amplification)に関するメカニズムについ ての研究を実施する。
 - 2. 全球の気候変動及び将来予測における北極域の役割 の解明:

北極域における環境変化は、大気・海洋循環の変化や 雪氷圏変化などを通して、全球の気候変動及び将来予 測における北極域の役割を解明し、気候モデルの改良 ・高度化につなげる研究を実施する。

3. 北極域における環境変動が日本周辺の気象や水産資源等に及ぼす影響の評価: 近年、日本においても北極振動が原因と考えられる大雪などの異常気象が発生しており、冬期の気象への影響が注目されている。このような北極域の環境変化が日本周辺の環境変動や生態系の変化が周辺諸国の陸 域や海洋に与える影響の評価を通じて、水産資源等に 及ぼす影響の解明につなげる。

 北極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の 将来予測:

北極海の海氷面積の減少に伴い、経済活動の面から北 極海航路の利用に対する期待が高まっている。そのた め、北極海の海氷分布を予測するなど北極海航路の利 用にあたって必要な研究を実施する。

- 研究設備等の提供:本事業において提供すべき研究設備等
 を以下とし、中核研究機関により提供する。
 - 耐氷性能を有する海洋研究開発機構の海洋地球研究 船「みらい」
 - 海氷域の変化を捉える観測を機動的に行う砕氷船
 - 雲の3次元構造を観測する雲レーダー及び北極域デー タアーカイブ

本公募に対して、情報・システム研究機構国立極地研究所が 代表機関(プロジェクトマネージャ、山内 恭)となり、海洋 研究開発機構を参画機関(サブプロジェクトマネージャ、深澤 理郎)として、事業計画「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」を提案応募、文部科学省研究開発 局より承認された。これに基づき、2011年7月22日、文部科 学大臣より平成23年度環境技術等研究開発推進事業補助金と して、656百万円の交付が決定された。

研究課題

これを受けて、国立極地研究所では、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」 の研究課題公募を行った。研究コミュニティーからは、8月29 日の締め切りまでに延べ23課題の応募があり、国立極地研究 所に設置した北極気候変動研究事業運営会議の議を経て、一部 課題の組替え等を行い、7課題が採択決定された。

7研究課題(Research Theme)は以下の通りである。 ①北極気候再現性検証および北極気候変動・変化のメカニズ

ム解析に基づく全球気候モデルの高度化・精緻化

- (代表:国立環境研究所=当時、野沢徹)
- ②環北極陸域システムの変動と気候への影響
 - (代表:北海道大学、杉本敦子)
- ③北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響:大気プロセ スの包括的研究(代表:新潟大学、浮田甚郎)
- ④地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割(代表:国立極地研究所、榎本浩之)
- ⑤北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明 (代表:東北大学、青木周司)

⑥北極海環境変動研究:海氷減少と海洋生態系の変化

(代表:海洋研究開発機構、菊地隆)

⑦北極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の将来予

測(代表:東京海洋大学、島田浩二)

こうして、研究プロジェクト「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」は、2011~2015 年度の5 カ年にわたって実施された、わが国初の、分野横断、観測・モ デル融合、オールジャパンによる北極気候研究となった。国内 39 の研究機関が参加し 360 人以上の研究者が関係するネット ワーク型共同研究を実施した。その他、研究基盤を整備構築し 提供するとともに、北極環境研究コンソーシアム (JCAR)の 事務局を運営することで、新しいわが国北極研究者のとりまと め推進を支援した。

研究基盤

研究基盤としては、プロジェクト開始以前から、国立極地研 究所が運営してきたスパールバル・ニーオルスン観測所の整 備・提供がある。1990年に国立極地研究所に北極圏環境研究セ ンターが設置されたのを受けて、北極圏内に観測機器を設置し て観測継続するとともに(大気、雪氷、海洋、陸上生物観測)、 共同利用に供する拠点として1991年、ノルウェー極地研究所 の協力により(協力協定締結)観測所を整備した。ニーオルス ンは元炭坑のあった集落で、ノルウェーが国際観測村として発 展させようと企画している所であった。我が国からも、東京大 学の宙空観測機器が置かれていたが、組織的に観測を開始した のはスウェーデン、ストックホルム大学とドイツ、アルフレッ ド・ウェーゲナー極地海洋研究所(AWI)で、その後、イギリ ス、フランス、イタリア等ヨーロッパ諸国が、そして中国、韓 国、インド等アジア諸国も続いている。

本事業として整備した研究基盤は、海洋地球研究船「みらい」 (耐氷船)、砕氷船・係留系、雲レーダー、そして北極データ アーカイブである。「みらい」は1998年以来ほぼ毎年夏期に 北極海航海を実施してきていたが、2012年航海(MR12-E03; 9月3日~10月17日)を本事業の研究基盤として運用し、多 くの分野の観測を実施した。我が国には北極で使える砕氷船が 無いため、カナダの砕氷船(カナダ沿岸警備隊所有のルイ・サ ン=ローラン号及びローリエ号)の航海の一部を傭船契約し、 海氷域での係留系観測ほか海洋観測に供した。北極気候に大き な懸案であった雲の鉛直内部構造や微物理を明らかにすること が期待される高精度の雲レーダーを整備し、2013年9月、ニ ーオルスン観測所に設置した。以後、無人観測が継続されてデ ータが蓄積されているとともに、大気・エアロゾル・雲の集中 観測にも使用され、今後の活用も期待されている。 観測データを集積、公開する目的で、北極域データアーカイ ブ(ADS)が整備され、観測終了後すみやかにデータの登録が された(データポリシーに基づく)。現場観測データだけでは なく、衛星観測データ(JAXAとの協力)やモデル・シュミレ ーション結果も保存され、有効利用促進に寄与した。プロジェ クト内での、そしてコミュニティーでのデータの利用を円滑に し、さらにはより多くの人々が多種多様な目的に応じて科学デ ータを利用することが可能となる、オープン・サイエンスの流 れにも貢献することとなる。

観測網の展開

プロジェクトでは、2011 年開始以来、北極を周る様々な場 所、スパールバルから、ロシア・シベリア、アラスカ、カナ ダ、グリーンランドに北極海と、多岐にわたる場所で観測が行 われてきた(図 1.1)。特に、スパールバル・ニーオルスンに は、高精度の雲レーダー(95 GHz)を設置し、大気の集中観測 を行ってきた。また、北極海では「みらい」航海を基盤として 運用したほか、砕氷船の航海が行われ、係留系の観測も進めら れた。取得したデータは北極域データアーカイブ(ADS)に蓄 積され、解析用のインターフェースとともに供されている。ま た、原理的な物理モデルから大循環モデルまで、様々なモデル 研究が進められて来た。

GRENE北極気候変動研究事業の観測・活動が行われた地域



図1.1 本事業における観測点の展開(5年間の総計)。 裏表紙に拡大版掲載

2. 本事業の成立の経緯

我が国の北極探検・観測は長い歴史を有している。欧米諸国 を中心とした北極探検が1909年のアメリカ人ロバート・ピア リーの北極点到達で一段落した後、ほどなく、我が国も、1920 年初の北極海進航に続き、1923年には農商務省水産局の白鳳丸 によって武富栄一船長は北氷洋航海をなし、まさにちょうど北 極圏、北緯 66°30' に到達している。引き続き、1936 年からは 同じく武富船長が快鳳丸(図1.2)により北極海航海を行い、 チャクチ海北緯 67°に、1937 年には最北は北緯 71°23'、西経 175°40'、最西は北緯 69°58'、東経 164°05'、コリマ川河口まで 到達し、気象・海洋観測、漁業調査を行っている。さらに 1939 年にはアラスカ沖北緯 68°27'、西経 167°18' まで到達、シベリ ア沖までの横断海洋観測を実施している。そして、極め付きは、 1941年の北南極洋周航調査計画で、ベーリング海峡を通過し北 極海を横断しドイツ・ハンブルグに至り、さらに航海を続け大 西洋を南下しケープタウンから南大洋ロス海に至り、ウェリン トン、シドニー経由で帰国するという、南北両極を巡る壮大な 計画であった。特に、北極海の通過は困難が予想されたため、 越冬の準備まで整えていた(1878年のノルデンショルドのヴ ェガ号や1919年のアムンセンのモード号の例に習い)。気象 庁の前身、中央気象台からも技師2名が乗船し気象観測を担う

> という高度な観測計画を有していた。1941年6月 16日東京港を出港し一路北上するが、ドイツがソ連 へ侵攻した第二次大戦の勃発により、北極海に入る 前に航海は中止の止むなきに至った。これら武富船 長の一連の北極海航海は、白瀬矗の南極探検に匹敵 する北極における壮挙であると評価したい。これま で、あまり一般に知られてこなかった歴史である(永 延・小野、2013)。



図 1.2 武富栄一船長の快鳳丸、1930 年代の北極海 氷域での活躍の様子を描いた絵画、一等航海士をつ とめた山口芳男による。1976 年。

未だ北極探検が盛んであった頃、探検は国家のナショナリズ ムに基づくもので、科学観測は国家を越えた協同が必要である と、オーストリア人カール・ワイプレヒトにより国際極年が提 唱された。1882/83年に第1回目の国際極年(IPY)が12カ国 の参加でもたれ、北極を中心に13カ所の環北極観測点が展開 された。50年後の1932/33年には第2回目の国際極年(IPY-2) が実施され、我が国も北極圏からは外れるものの、樺太や富士 山頂での観測を開始した。その後、北極海に観測点を設けるた め、ソ連は海氷を基地とする漂流観測基地(North Pole: NP) を開始、NP-1~41と、最近まで連綿として続いていた。その 後、第二次大戦後、IPY-2から25年、1957/58年には第3回 目として「国際地球観測年(IGY)」という名称で国際協同観 測が提唱され、南極観測や人工衛星の観測で話題となったが、 北極観測にも再び力が入れられた。我が国からも、「雪は天か らの手紙」の言葉とともに雪結晶の研究で有名な、北海道大学 教授中谷宇吉郎がグリーンランド氷床氷の研究で参加した。引 き続き、中谷グループにより北極海に浮かぶ氷山を利用した氷 島 T-3 で、1959 年から 61 年まで連続して海洋・海氷観測が行 われ、これが、本格的な我が国北極研究の始まりである。その 後、細々とした活動が続いた。この間に、北海道大学水産学部 の練習船「おしょろ丸Ⅲ世」は1972年、北洋航海にてチャク チ海北緯 72°西経 173°11'に達し、日本船としての最北限点を更 新した。冷戦終結以後になると、国際北極科学委員会(IASC) の創設等に伴って、研究は活発化したものの、研究機関毎が主 であり、どうしても個別・小規模にとどまりがちであった。

こういう中で、より組織的、継続的な北極観測・研究体制を 整備し、北極研究の推進をはかり、国際的なプレゼンスも向上 させようとの問題意識から、2010年度、文部科学省内、科学技 術・学術審議会、研究計画・評価分科会、地球観測推進部会の 下に北極研究検討作業部会*3が設置され(5月10日;研究開発 局環境エネルギー課所掌)、我が国のあるべき北極研究の方向 性が議論された。その結果が、「北極研究検討作業部会報告書 一中間とりまとめ―」(巻末資料)としてまとめられ、今後の 北極研究における重要課題、国内の研究推進体制、国際協力の ありかた等が提言された。特に、「行政に対して適切な対応を 要請するとともに、我が国における北極研究の飛躍をもたらす 研究コミュニティーの奮起を促したい」との結語を忘れてはな らない。これを受けて、文部科学省で予算要求がなされ、大学 発グリーンイノベーション創出事業「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が平 成23(2011)年度予算として認められた。11月17日の第4 回本作業部会では、

- 研究計画の策定はコンソーシアム、共同研究の推進は極地 研(事務局)が行う、
- 研究計画は、コンソーシアム運営委員会で策定、国の戦略
 会議(仮称)で了承、
- ・作業部会委員は、コンソーシアム暫定メンバーになる、

が定められた。なお、この背景には、2000年代中頃からのボラ ンタリーな活動、北極域研究検討委員会があったことを忘れて はならない。以前からわが国北極研究の糾合を目指していた筑 波大学講師(当時、以下同様)田中博、北海道大学低温科学研 究所教授大畑哲夫、国立極地研究所北極観測センター長神田啓 史らが中心となり、北極研究を実際に担っているメンバーを集 め、日本地球惑星科学連合大会での「北極域の科学」セッショ ンの開催、そして国際的にもオールジャパンの集まりとして国 際北極科学シンポジウム ISAR-1 (2008)、ISAR-2 (2010)の 実行があった。

この流れに則って、計画検討の各種会合が重ねられた。2011 年1月18–19日、国立極地研究所・研究集会「北極環境研究の 課題と展望」(参加140名)が開催され、今後の研究提案が行 われた。1月28日、国立極地研究所「北極環境研究計画に関す る所内検討会」開催(参加20名)、2月18日、北極環境研究 コンソーシアム暫定メンバー会合が海洋研究開発機構東京事務 所で開催され、旧北極研究検討作業部会メンバー16名が出席し、 同メンバーに国際会議日本代表等を加えてコンソーシアム設立 発起人となること、コンソーシアム運営委員は安成哲三旧作業 部会主査が有識者と相談して決定すること、そして今後の検討 の流れを了解した。さらに4月11–12日、北極環境研究関係者 30数名が集まり、今後の北極環境研究計画を検討・取りまとめ (代表:安成旧作業部会主査)が行われ、この結果が下記の第

1回北極研究戦略小委員会にて16pに及ぶ机上配布資料「北極 環境研究の重点課題・研究基盤およびコンソーシアム」として 提示された。

北極気候変動事業の予算化の決定等を受け、「こうした状況 を踏まえ、我が国における一体的・戦略的な北極研究を一層推 進していく必要があることから、「『北極研究検討作業部会報 告書一中間とりまとめ一』に示された我が国における北極研究 に関する基本方針を具体化し更に発展していく場として、地球 観測部会の下に北極研究戦略小委員会*2を設置する。なお小委 員会は、北極研究者のみならずより広い分野における知見を有 する有識者をもって構成するものとする。」こととなった(2011 年2月28日、科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会、 地球観測推進部会「北極研究戦略小委員会の設置について」)。 そして、プロジェクトには目的を定め、戦略的に研究を進めて 欲しいと言うのが予算当局の文部科学省および北極研究戦略研 究小委員会の意向であった。先の北極研究検討作業部会での議 論や報告—「中間とりまとめ」を元に、戦略研究小委員会およ び作業部会の主査、幹事役の文部科学省研究開発局環境エネル ギー課および海洋地球課の意向で4つの戦略研究目標の案が定 まったわけである。

2011年4月19日、第1回北極研究戦略小委員会が開催され、 「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス事業(北極気 候変動分野)運用基本方針」が審議了承された。その内容は1 の前項に記した通りである。これに従い、5月、大学発グリー ンイノベーション創出事業「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(環境技術 等研究開発推進事業補助金)公募要領が策定され、6月9日締 め切りとする公募が5月19日に発出された(文部科学省研究 開発局海洋地球課が担当)。6月9日、国立極地研究所から28p にわたる応募書類が提出された。「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外部 評価委員会が組織され、4月22日策定の「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 野審査要項及び同評価項目及び審査基準に基づいて審査が行わ れた。その結果、6月24日、藤井理行国立極地研究所長宛に藤 木完治文部科学省研究開発局長より採択が通知され、国立極地 研究所から外部評価委員への回答が7月5日になされた上、7 月 22 日高木美明文部科学大臣より北川源四郎情報・システム 研究機構長宛、平成23年度環境技術等研究開発推進事業補助 金交付決定通知がなされた。

代表機関となった国立極地研究所では、GRENE 北極気候変

戦略研究目標と研究課題の対応

戦略研究目標1 研究課題名 戦略研究目標2 北極気候再現性検証および北極気候変動・変化のメカニズム 解析に基づく全球気候モデルの高度化・精緻化 全球の気候変動 北極域における 環北極陸域システムの変動と気候への影響 及び将来予測に 温暖化増幅メカ おける北極域の 北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響: ニズムの解明 大気プロセスの包括的研究 役割の解明 地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割 北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明 戦略研究目標4 戦略研究目標 3 北極海環境変動研究:海氷減少と海洋生態系の変化 北極域における 北極海航路の利 環境変動が日本 北極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の将 用可能性評価に 来予測 周辺の気象や水 サブ研究課題 つながる海氷分 産資源等に及ぼ 北極航路利用のための海氷予測および航行支援シス 布の将来予測 す影響の評価 テムの構築 北極海氷海洋システムの基本構造と変動に関する 観測モデリング融合研究 北極海における海洋変動と急激な海氷減少メカニ ズムの解明

> 図 1.3 GRENE 北極気候変動研究事業実施のしくみ 7 研究課題と4 戦略研究目標の関係。

動研究事業推進等のために北極気候変動研究事業運営会議を設 置した。第1回会合は2011年7月11日に開催し、国立極地研 究所から研究コミュニティーに対する研究課題の公募案を決定、 8月29日締め切りで7月29日に募集を開始した。この間、合 計23件の研究課題の応募があった。9月8日、第2回の北極 気候変動研究事業運営会議にて、一部課題のヒアリングを含め 審査を行った。以後引き続き、運営会議委員間での書面・メー ル審議を進め、研究課題の調整・修正を経た上で、7件の研究 課題について10月14日、国立極地研究所(研究所会議)にて 採択を決定、同日各研究代表者宛通知した。多くの関心を呼ん だため、多数の応募があったが、研究分野がかなり外れるもの、 あるいは急ごしらえでくみ上げたプロジェクトで計画がずさん なものなどもあり、採択にそれほど難しさは無かった。

10月20日、第3回北極気候変動研究事業運営会議を開催し、 採択された研究課題の概要発表を行い、プロジェクトのキック オフミーティングとした。こうして、トップダウンで示された 目標に向けてボトムアップで構想された課題を進めるという大 変ユニークな構成のプロジェクト(図1.3)を開始した。

なお、7月11日の第1回運営会議において、遡って本運営会 議規則を定めるにあたり(7月22日制定、7月11日から適用)、 運営会議の役割について議論され、本運営会議が本事業を推進 するステアリング・コミッティーの役割を担うことが、強く確 認された。そのことは、同運営会議で審議されたプロジェクト の運営基本方針の中に運営会議の役割として記述されていると ともに、さらに第2回運営会議の「GRENE 北極気候変動研究 事業 北極気候変動研究事業運営会議、戦略研究目標代表者及

> び研究代表者(PI)の役割及び権限について」に 再確認されている。

○運営会議の役割・権限

- 戦略研究目標の達成に結びつく研究課題を 審査・採択する(研究費の配分を含む)。
- (2) 審査過程において、戦略研究目標達成の観 点から、PI に対して研究計画の修正を指示 することができる。
- (3)研究の実施段階にあっては、各研究課題の 進捗状況(経費の執行状況を含む)を管理 し、必要に応じて指導・助言を行う。
- (4)戦略研究目標のロードマップを審議・承認 する。戦略研究目標達成の観点から、代表 者に対してロードマップの修正を求めるこ とができる。
- (5)研究課題の年度計画を審議・承認する。戦 略研究目標達成の観点から、PI に対して研

究計画の修正を求めることができる。

- (6) 代表者及び PI に対し、研究課題間の連携を促し、プロジェクト全体での目標達成を実現する。
- 代表者の役割・権限
- PI が実施する研究課題間の連携を図り、担当する戦略研究目標の達成を実現する。
- (2) 各戦略研究目標を達成するためのロードマップを作成する。
- (3) ロードマップに沿って研究が進展しているか進捗管理を 行い、必要に応じて PI に対して、助言・指導を行う。
- (4) 各研究課題の PI が作成する年度計画がロードマップに沿ったものになるよう、必要に応じて指導・助言を行う。
- PI の役割・権限

戦略研究目標の達成のため、運営会議及び代表者と連携し、 各研究課題を実施する。

○ 運営会議・代表者・PIの関係

戦略研究目標の達成に向け、運営会議は研究費の配分、執 行状況の確認、ロードマップ及び年度計画の承認権を含む 強い権限を有し、そのステアリングのもと、代表者が戦略 研究目標毎の研究課題間の連携を図りながら、PI が研究 を実施する。

とされた。

具体的研究はネットワーク型にて行われたため、代表機関、 参画機関及び各参加機関の間で、共同研究協定を締結して進め た。協定書では、基本合意、研究担当者・協力者、年度計画、 年度報告書、経費負担、経理、施設・設備の提供、知財、研究 成果の取り扱い・公表等について定めた。その協定締結機関は 参考資料に掲げる。

こうして、研究は分野ごとに推進されるとともに、分野をま たがる研究が積極的に進められた。特に、分野間の連携を促進 するために「連携コーディネーター」の役をおいたことも、本 プロジェクトの特徴としている。

プロジェクトとしては終了したが、多くの成果を得たととも に、これからの観測・研究のための基盤を整備する事ができ、 また研究グループ作りも進展した。北極域研究推進プロジェク ト (ArCS) を含め、さらなる今後の研究に期待したい。

3. 本報告書の構成

本報告書は本文の5つの章と研究業績一覧、そして参考資料 からなる。第1章では本事業の構成、設立の経緯、報告書の構 成を述べた。第2章では、戦略研究目標に対する科学的成果を 目標毎に記し、最後にまとめを行った。本報告書の中心となっ ている。第3章では、第2章に入らなかった成果、即ち、戦略 研究目標には直接には貢献しにくかったが、科学的に価値の高 い成果を得ており、研究課題毎に記述した。最終的な科学的成 果に到達しなかった研究活動についても、記録を残した。科学 においては、往々にして、目的に沿った研究成果以外にも貴重 な成果があり、これが埋もれてしまわないように留意した。第 4章では、整備した研究基盤や、本プロジェクトのもう一つの 課題であった北極研究コンソーシアムについても記している。 第5章に全体のまとめと今後の展望を簡単に記した。今後の研 究に参考にしていただきたい。学術論文はじめ多くの成果が得 られているので、その一覧を上げた。さらに、その他事業推進 上の様々な記録を参考資料に残した。

なお、全体のエッセンスについては、別途要約版を用意して いるので、併せて参照されたい。

本報告書は、国立極地研究所のホームページに公開される予 定である(www.nipr.ac.jp/grene/)。 注

*1 「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス」 (GRENE) 事 業概要(文部科学省、公募要領):

平成22年6月に閣議決定された新成長戦略では「環境・エネル ギー」を成長分野として掲げ、グリーンイノベーションによる成長 を目指すこととしております。また、平成22年12月に総合科学技 術会議がとりまとめた諮問第11号「科学技術に関する基本政策に ついて」に対する答申では、グイーンイノベーションを大きな成長 の柱の一つと位置づけ、科学技術イノベーション政策を戦略的に展 開することとしています。

新成長戦略及び諮問第11号「科学技術に関する基本政策につい て」に対する答申が掲げるイノベーションによる成長を加速するた めには、大学等の「知」を結集し、研究開発及び人材育成のための 体制と活動を強化することが不可欠です。そのため、「グリーン・ ネットワーク・オブ・エクセレンス」(GRENE)事業では、環境 エネルギーに関する重要研究分野毎に、国内の有力大学等が戦略的 に連携し、研究目標や研究リソースを共有しながら当該分野におけ る世界最高水準の研究と人材育成を総合的に推進するネットワー ク・オブ・エクセレンスの構築を目指します。

なお、本年度の事業実施にあたっては、科学技術・学術審議会、 研究計画・評価分科会、環境エネルギー科学技術委員会における審 議を踏まえ、先進環境材料分野、植物科学分野、環境情報分野、北 極気候変動分野の4分野を実施することとしております。本公募要 領は北極気候変動分野の公募を行うものです。

*2	第6期科学技	術・学術審議会、研究計画・評価分科会、地球観測推					
	進部会、北極研	开究戦略小委員会 名簿(平成23年4月4日現在):					
浮田甚郎 新潟大学理学部自然環境学科物質循環科学教授							
	浦塚敏彦	株式会社商船三井営業調査室室長代理					
◎小池敷夫 琉球大学監事							
	高村ゆかり	名古屋大学大学院環境学研究科教授					
	科学ジャーナリスト						
	深澤理郎	独立行政法人海洋研究開発機構地球環境変動領					
		城長					
	福田正己	福山市立大学都市経営学部都市経営学科教授					
	堀川 康	独立行政法人宇宙航空研究開発機構技術参与					
	安岡善文	情報・システム研究機構監事					
	安成哲三	名古屋大学地球水循環研究センター教授					
(つ山内 恭	情報・システム研究機構国立極地研究所副所長					
	若土正曉	北海道大学低温科学研究所名誉教授					
	和気洋子	慶応義塾大学商学部教授					
	◎:主査、(○:主査代理					
	・オブザーノ	べとして議論に加わる関係各省庁					
	文部科学省、	外務省、環境省、内閣官房(総合海洋政策本部)、					
		国土交通省、農林水産省等					
*3	第6期科学技	術・字術番議会、研究計画・評価分科会、地塚観測推					
	進部会、北極的	卅光検討作業部会 名薄(平成 22 年 7 月 6 日現仕): 「「「「「「」」」					
	育 小 輝 大 車 カ 羊 フ	ス家研先所物理ス家研先部界二研先至長 国立振興研究部の変換支援長は関切究 ばい プルサ					
	果人美士	国立極地研究所研究教育糸気水圏研究クルーノ准教授					
	阿部彩子	東京大学大気海洋研究所准教授					
	五十嵐 保	独立行政法人宇宙航空研究開発機構地球観測研究セ ンター研究領域リーダー					
	石川 守	北海道大学地球環境科学研究院准教授					
	榎本浩之	北見工業大学社会環境工学科教授					
	大畑哲夫	独立行政法人海洋研究開発機構地球環境変動領域プ					
		ログラムディレクター					
	島田浩二	東京海洋大学海洋科学部准教授					
	杉本敦子	北海道大学地球環境科学研究院教授					
	野沢 徹	独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター					
		大気圏環境研究領域大気物理研究室長					
	原 登志彦	北海道大学低温科学研究所教授(寒冷陸域科学部門)					
	原田尚美	独立行政法人海洋研究開発機構地球環境変動領域物					
		質循環研究プログラム古海洋環境研究チームチーム					
		リーダー					
	福田正己	福山市立大学教授(前アラスカ大学教授)					
	藤谷徳之助	地球温暖化観測推進事務局長					
	松浦陽次郎	独立行政法人森林総合研究所立地環境研究領域土壤					
		資源研究室長					

- ◎安成哲三 名古屋大学地球水循環研究センター教授
- ○山内 恭 国立極地研究所副所長、北極観測センター長
 ◎:主査、○:主査代理

第2章

戦略研究目標に向けた 科学的成果



イントロダクション

プロジェクトマネージャ:山内 恭 連携コーディネーター:高田久美子

戦略研究目標に向けた科学的成果が、以下、目標毎に報告されるが、それに先立って、導入および全体状況を記す。

背景



図 2.0.1 1890 年以来の観測された地上気温偏差(1880-1890 年を基準)、緯度帯毎の9年間移動平均。橙色が全球平均、緑 が北極域¹⁾

今、北極では強い温暖化が起こっている。図 2.0.1 に示すよう に1)、地球温暖化が進む世界の中で、北極は特に気温上昇が激 しい。この100年でも、地球全体の平均(オレンジ)でわずか に温暖化しているのに比べ北極(緑)は大きく温暖化している。 1970年代以降のこの40年余では、全球平均の2倍以上の昇温 が現れている。これを「温暖化増幅」 (Polar amplification, Arctic amplification)と呼んで、なぜそのような現象が起こる のか、解明が目指されている。強い温暖化の北極で最も顕著な 現象は海氷域の減少だろう。もともと北極海氷は大きな季節変 化を示している。すなわち、冬(冬の終わり)は北極海全域を 覆った上、さらに大西洋側グリーンランドに沿って拡大、太平 洋側では日本の北海道にまで及ぶ、広い範囲に分布する。とこ ろが、夏(夏の終わり)には海氷は融解し、流れ出し、狭義の 北極海の内部にとどまる分布を示す。温暖化に伴って、北極海 氷域面積も徐々に減少していることが人工衛星の観測が始まっ て以来把握されてきたし、気候モデルによっても海氷域面積の 減少が次第に大きくなって行くことが予測されていた。ところ が、2000年代以降、現実の海氷域面積の減少は急激になり、モ デル予測よりかなり急激な減少であり、これまでの極小を示し た 2012 年 9 月には、1980 年頃に比べ半分の面積に減った(図 2.0.2)。なぜ、このように海氷が減少したのか、その仕組みは 未だ不明であった。

AMSR2 Sea Ice Concentration 20120916

図 2.0.2 2012 年 9 月夏季の海氷最小の広がり。桃色の線は 1980 年代の海氷域

北極の強い温暖化に伴って、その他にも数々の変化が起こっ ている。積雪域の縮小、積雪期間の減少などが言われて久しい。 氷河・氷床の融解、崩壊も進んでいる。北極は中心は海だが、 周辺には氷河や氷帽が分布し、またグリーンランドに氷床が存 在する。これらの消長は北極気候に影響するだけでなく、海水 準の変動を通して地球規模に影響を及ぼす。また、北極圏内に は広い陸域も含まれており、陸域の凍土や生態系の変動も記録 されており、その変動は北極温暖化の影響であるとともに、こ れら陸域環境の変化がさらに温暖化にも影響するフィードバッ クの働きも予想される。

さらには、これら北極の変化が海洋環境に変化をもたらし、 海洋の生態系にも影響する可能性が指摘されており、また北極 の変化が中緯度の気象にも影響するのではないかという議論も 進んでいる。

今問題になることと、わが国でやれること、得意とすること

このような北極を巡る状況の中で、何を解明しなければいけ ないか、優先的に取り組むべき課題は何であろうか。そして、 わが国の北極研究コミュニティーとして得意とする分野は何で あろうか。北極は、既に北極を領土とする北極圏の8か国があ るし、北極圏国以外でもヨーロッパ諸国は古くから北極に関心 を持って研究を続けてきており実績を有する。そういう中で、 わが国としてすべきことは何か?こういう観点から、戦略研究 目標が定められている。プロジェクトには目的を定め、戦略的 に研究を進めて欲しいと言うのが予算当局の文部科学省および 北極研究戦略小委員会の意向であり、4つの戦略研究目標が決められて研究が開始(公募)された。そのいきさつは第1章に 詳述した。

4つの戦略研究目標

北極研究戦略小委員会により示された戦略研究目標は以下の 4つである:

- 1. 北極域における温暖化増幅メカニズムの解明
- 全球の気候変動及び将来予測における北極域の役割の解明
- 3. 北極域における環境変動が日本周辺の気象や水産資源等 に及ぼす影響の評価
- 4. 北極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の将来 予測

今、最も焦点になっているのは北極での強い温暖化で、この メカニズムの解明が求められていることから、戦略研究目標1 が設定されている。北極域は、地球温暖化による平均気温の上 昇が最も大きく、地球上において気候変動が最も顕著にあらわ れる地域のひとつとされていることから、温暖化増幅(Polar Amplification)に関するメカニズムについての研究を実施した。 本事業の最も中心となるテーマである。この目標に向けては、 1.モデル課題が主導しつつ、2.陸域課題、3.大気課題、4.雪氷課 題を併せて、4 つの研究課題が主に対応した。その他の5 から 7 の研究課題も密接に関係している。

この北極温暖化は、北極域にのみ働いているのではなく、全 球に広がっている。北極域における環境変化は、大気・海洋循 環の変化や雪氷圏の変化などを通じて、全球の気候変動につな がるとともに、生態系の変化を及ぼし、それが再び気候変化に 影響をもたらす。戦略研究目標2では、全球の気候変動及び将 来予測における北極域の役割を解明し、気候モデルの改良・高 度化につなげる研究を実施した。この目標に向けては、研究課 題1~4に5.温室効果気体課題を併せて共同して答えを求めた。 最も内容が重層的でまとめに苦労した目標である。

戦略研究目標3は、北極の変化が、さらに遠い日本周辺の気 象に及ぼす影響や海洋環境の変化を通じて水産資源などに及ぼ す影響を探るものである。近年、日本においても北極が原因と 考えられる大雪などの異常気象が発生しており、冬期の気象へ の影響が注目されている。このような北極域の環境変化が、日 本周辺の環境変動や生態系の変化、周辺諸国の陸域や海洋に与 える影響の評価を通じて、水産資源等に及ぼす影響の解明につ なげる。なお、研究課題が輻輳するので、3aと3bの2つの目 標に分けて取り組むこととした。3aに対しては研究課題3.大 気課題が、3bに対しては研究課題 6. 海洋生態系課題が対応したので、ここでは単純に1対1の対応となった

最後は北極海氷の急減に伴う問題で、海氷分布がどうなって いるのか、北極海の循環や熱収支とどう関連しているのか、そ して今後海氷が減ることで北極海航路の利用可能性がどうなる かを左右する海氷分布の予測を明らかにする必要がある。北極 海の海氷面積の減少に伴い、経済活動の面から北極海航路の利 用に対する期待が高まっている。そのため、北極海の海氷分布 を予測するなど北極海航路の利用にあたって必要な研究を実施 するものが戦略研究目標4である。研究課題7.海洋・海氷課 題が対応した。形式的には1対1の対応と見えるが、研究課題 の方が、3つの研究サブ課題から構成されていたため、その面 ではやはり重層的な目標となった。

研究を進めるにあたっての基本的立場

地球環境研究、特に気候変動の研究といっても、実は極めて 幅広い取り組み方がある。地域的には、「北極」が冠せられて いることから、それほど大きな幅は無いと思われようが、北極 の定義でも実は様々ではある。北緯 66.5°以北(一般に北極圏 というのはこの範囲を言うことが多い)、70°以北、60°以北、 50°以北、さらには45°以北という定義もある。主に扱う分野に よって異なっており、気象学や海洋学関係では比較的高緯度に 限定しがちだが、雪氷学や生態学関係ではより低緯度まで連続 性があることから広い範囲を扱っている。本事業では、この点 に関しては一律には決めかね、分野毎に必要に応じた「北極」 の定義を使うこととなった。基本的には60°以北とするが、場 合によっては45°以北までを採用するという緩い基準とした。 時間スケールは大きな幅がある。1週間から数ヶ月という季節 までの短い変化から始まり、年から数十年、数千年から十万年、 百万年から数億年と時間スケールからいっても数限りない。し かし、本事業では、議論があまりに発散しすぎることを避け、 極めて限定的に100年スケールまでの現象を議論することとし た。従って、極域で大きな話題となる、深層氷床掘削コア解析 に基づく数千年から数十万年の議論は課題外とした。

また、「いつのことを語っているのか」、研究が所掌する時 間についても、100年スケールまでの現象を扱うからと言って、 100年後の予測を中心にする訳ではない。モデル研究において は、現在と100年後との比較という手段を多用するために、100 年後の描像がたびたび登場するが、最終的な論点は「近年の状 況」、「今起こりつつある変化」である。北極温暖化が中緯度 の冬の寒冷化に影響しているとの議論があるが、これも現状の 北極の温暖化状況の基での論議で、このまま100年後まで適用 できるとは限らない。 温暖化の考え方にもいろいろある。この100年の全球平均の 温暖化は人為起源二酸化炭素の大気中濃度増大によるものとの

「地球温暖化」論²⁾ (IPCC, 2013 など) に準拠するが、だから といって、北極温暖化増幅が、また北極域での強い温暖化が、 全て人為起源の温暖化だと主張しているわけではない。北極域 には様々な気候変動の仕組みがあり、温暖化を強めているとと もに、人為起源変動や太陽活動の変動のように外力の変化(放 射強制力の変化)が無くとも、気候システムの中の自然な内部 変動の傾向があるものである。大気や海洋の持つ特有な変動と も言われている。図 2.0.1 に掲げた北極の気温変動でも、1940 年にかけての大きな温暖化が見られ、特に北半球高緯度に限定 的で、これは様々な研究がなされてきたが、確固たる外力の変 化とは認められず、地球の気候システム内部の自然変動が原因 ではないかと言われている。「20世紀前半温暖化」と言って、 依然大きな課題である³⁾。現在の強い温暖化の中にも、この自 然変動の要素も含まれている可能性がある。

社会への影響については、昨今大きな話題になっている。特 に北極における研究は、単に自然科学的に真理の探求がなされ れば良いという段階を超え、北極に生活する先住民の問題から 始め社会に貢献するものでなくてはならないという声が強い。 新しく始まっている次期の北極域研究推進プロジェクト

(ArCS) では特にそういう点に重きを置いて計画が作られて いる。しかし、本事業は、最終的には社会的にどういう影響が あるか、日本社会への影響もあるか、経済活動にも影響がある かに言及はするが、研究内容はほぼ自然科学的な範囲に止まる ことを了解いただきたい。影響を見据えているが、影響の中に は立ち入らない。北極海航路実現可能性評価のための海氷分布 予測は行い、また航路決定システムの改良は行うが、航路予測 までは至らない。

以上が、本事業を進めるにあたって留意した基本的立場であ る。この点をご理解の上で、読み進めていただきたい。 引用文献

- Shindell, D. and Faluvegi, G. 2009. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. Nature Geosci., 2, 294-299, doi: 10.1038/NGEO0473.
- 2) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 3) Yamanouchi, T. 2011. Early 20th century warming in the Arctic: A review. Polar Science, 5 (1) 53-71, doi: 10.1016/j.polar. 2010.10.002.

I.戦略研究目標1

北極域における温暖化増幅メカニズムの解明

戦略研究目標代表者:野沢 徹

北極域における近年の気候変化は深刻かつ急激であり、北極 気候システムのさまざまな要素にその影響が現れている。最新 の観測事実によれば、北半球夏季における北極海氷面積は急速 に減少しており、2012 年 9 月には観測史上最小を更新した。 地球全体の年平均地上気温は20世紀初頭から現在までに0.8℃ 以上も上昇しているが、北極域では地球平均の約2倍の速さで 温暖化が進行している。これらの変化に呼応するように、グリ ーンランド氷床は後退し、永久凍土も融解し始めており、必然 的に北極域の水循環や生態系などにも影響を及ぼす。

北極域は気候変動に対する感度が大きく、地球上の他の地域 と比較して地球温暖化の影響が顕著に現れると考えられる。北 極域の温暖化はいわゆるアイス・アルベドフィードバックによ り増幅され、大気・海洋・陸面のさらなる温暖化や積雪・海氷・ 氷床・氷河のさらなる後退をもたらすことは、ほぼ疑いようが ない。しかしながら、高緯度域では地表面日射量に大きな季節 変化が存在し、地表面温度などの季節振幅も大きいことから、 アイス・アルベドフィードバックをはじめとするさまざまなプ ロセスの季節性についても留意しなければならない。また、北 極気候システムは高度に複雑であり、太陽活動や成層圏オゾン、 対流圏エアロゾル、雲・水蒸気、炭素循環、陸面過程など、さ まざまな要素・要因が複雑に絡み合っている。このため、北極 温暖化増幅 (polar/Arctic amplification) のメカニズムやその 全球的な影響をアイス・アルベドフィードバックのみで語るこ とは難しく、大気・海洋の熱輸送変化や植生・炭素循環のフィ ードバックなど、上述したさまざまな要素・要因を含めて総合 的に理解することが必要である。

このような観点から、戦略研究目標 1 では、モデル、陸域、 大気、雪氷、炭素循環の課題が連携して、北極域における温暖 化増幅メカニズムの解明に向けた研究を推進してきた。ここで は、北極温暖化増幅に寄与するさまざまなプロセスの季節性に 着目した、全球気候モデル出力結果の診断的な解析結果を「1. 北極温暖化増幅メカニズムの総合解析」として、また、北極温 暖化増幅をもたらすいくつかの重要なプロセスに着目した解析 結果と、観測的研究とモデリング研究との比較・解析に基づく 今後の課題と展望を「2. 個別フィードバックの解析」として、 それぞれまとめた。

1.北極温暖化増幅メカニズムの総合解析

執筆者:吉森正和 Laine Alexandre 阿部彩子

気候システムは、地球が吸収する太陽放射エネルギーと放出 する地球放射エネルギーが釣り合うことによって長期に安定し た状態を保つ。ところが、産業革命以降の人間活動による温室 効果ガスの排出はその均衡を壊し、21 世紀末までにはさらに 多くの温室効果ガスが排出されようとしている。こうしてもた らされる地球の温暖化はどこでも同じようには起きず、北極域 で急速かつ大きく現れることが現在までに観測され、将来につ いても気候モデルで予測されている。一方で、気候モデルの予 測には、大きな幅がある(表 2.1.1)。将来予測の不確実性を低 減することを念頭に、本研究では、多数モデルで共通して見ら れる将来の北極温暖化の支配的要因を特定するとともに、得ら れた結果のモデル間の整合性やばらつき具合などについても確 認した。

表 2.1.1 北極温暖化予測の不確実性(気候変動に関する政府間パネル 第1作業部会第5次評価報告書¹⁾のTable 12.2より抜粋)。 21世紀約100年間の気温上昇(℃)。ここでは、北緯67.5度以北を北 極と定義。幅は90%信頼区間を示す。RCPは最新の気候変動予測に用 いられている社会経済シナリオである代表的濃度経路シナリオ (Representative Concentrations Pathways)の種類を表す。

	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
地球平均	0.3-1.7	1.1-2.6	1.4-3.1	2.6 - 4.8
北極平均	-0.5-5.0	1.6-6.9	2.1 - 8.3	5.2-11.4

研究を進めるにあたり、まず先行研究に関する文献レビュー を行い、吉森(2014)にまとめた。先行研究では、個別の北極 温暖化増幅プロセスに関する指摘は数多くあるものの、それら の相対的評価、あるいは系統的評価が欠けており、それが北極 温暖化増幅メカニズムの全体像の理解を妨げていた。そこで本 研究では、系統的な解析手法の検討を次に行った。

第一に、世界中の気候モデルに共通して見られる「メカニズ ム」を抽出するために、個々の気候モデルのプログラムを直接 必要とせず、限られた出力変数からでも診断できる方法を適用 した。具体的には、大気上端でのエネルギー収支解析に使用さ れていた放射カーネル法を地表面でのエネルギー収支解析に応 用した。そして、領域ごとの解析や季節ごとの解析においても 耐えうる精度が保てるように改良や精度確認を行った。詳細に ついては、Laine et al. (2016)の Appendix を参照されたい。 第二に、第一の方法では分解できないが、寄与の大きな項(気 温上昇の寄与)について、詳細に診断する方法(Climate Feedback-Response Analysis Method(CFRAM)、以下では CFRAM法と表記する)を適用した。地表面エネルギー収支に 基づく解析では、地表の昇温が気温の上昇をもたらし、気温の 上昇が地表の昇温をもたらすという循環した解釈に陥るが、エ ネルギー収支式を地表と大気で同時に解くことにより、この問 題が解消される(Yoshimori et al., 2014a)。ただし、この方 法では気候モデルのプログラムの一部(放射伝達部分)を直接 使用する必要があるため、解析は日本の気候モデル Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC)に限られる。 また、異なるバージョンの MIROC モデルに適用するため、放 射カーネル法を大気全層にわたって適用する方法を導入し、精 度を確認した(Yoshimori et al., 2014b)。さらに、雲と雪氷 アルベドの同時変化が引き起こす非線型な放射効果による誤差 を改善した(Yoshimori et al., 2016, in prep.)。

図 2.1.1 は、世界中の気候モデルにおける全球平均と北極平 均(北緯 60 度以北、年平均)の地上気温の関係を表したもの である。この図から、北極域の温暖化は全球平均の約 2.6 倍の 大きさで増幅されることがわかる。一方、北極域の面積は小さ いため、北極温暖化増幅は地上気温上昇の全球平均値を約 10% 大きくするだけである(図 2.1.2)。同様に、全球エネルギー収 支への寄与も同程度である。したがって、全球平均気温変化の 大きさが北極域の温暖化に規定されるのではなく、北極域の温 暖化の大きさが全球平均気温で強く規定されていることがわか る。



図 2.1.1 RCP4.5 シナリオにおける 21 世紀 100 年間の気温上昇。 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) に参加した 40 の気候モデルによる各世紀末の 20 年平均の差から計算。



図 2.1.2 図 2.1.1 と同じ。ただし、横軸は北極域を除く全球平均気温。 縦軸は北極域を含む全球平均気温。点線は1対1の関係を表す。

以下では、全球平均に比べて大きな温暖化を引き起こす北極 域の増幅プロセスに注目する。図 2.1.3 に、代表的な北極温暖 化増幅プロセスの模式図を示す。図 2.1.3a~2.1.3dのプロセス は一般によく知られている。図 2.1.3e は、ステファン・ボルツ マンの放射則の数学的非線型性に由来するもので、たとえば、 同じ熱エネルギーの増加に対して赤外放射でバランスするため の温度上昇は、0℃において 25℃よりも 30%程度大きくなる²。 図 2.1.3f では、地表付近の逆転層に代表される北極域の強い大 気成層の下で、過剰な熱エネルギーが大気下層に閉じ込められ、 地表付近を強く加熱する。熱帯では、その逆に対流圏上層がよ り昇温し、地球の外へエネルギーが放出されやすくなる。



図 2.1.3 地表面のエネルギー収支に影響を与える代表的なプロセス。 (a) 雪氷の太陽光反射効果、(b) 海氷の断熱効果、(c) 雲の太陽光反射効 果、(d) 雲の赤外放射の吸収と再射出効果、(e) ステファン・ボルツマ ンの放射則の非線型性、(f) 大気成層の効果。

北緯 60 度以北の北極域の海洋と陸上における地表面エネル ギー収支解析の結果をマルチモデル平均して示す。まず、図 2.1.4 では、アイス・アルベドフィードバック、海洋熱吸収-放 出の効果、その他の三つの成分に分けて示す。海と陸のどちら でも、11月に最も大きく温度が上昇している(黒線)。そして それは、三つの要因を足し合わせた結果として理解される。こ の図から、季節性を含め、海と陸では、温暖化プロセスが大き く異なることがわかる。海では、海氷の融解によるアルベドフ ィードバック(赤色)が日射の多い7月に最も強く影響してい るものの、そのエネルギーの大部分が海に吸収あるいは雪氷の 融解に消費される(青色)ことによって地表付近の大気の温度 上昇はかなり抑えられている。しかし海に吸収されたエネルギ ーは秋から冬にかけて放出され(青色)、温度上昇に大きく寄 与する。一方、陸では、北極海に比べて緯度が低いこともあり、 融解の効果(赤色:アイス・アルベドフィードバック)は5月 に最も強く現れ、盛夏となる7月には小さくなっている。陸で は海のような熱の吸収・放出の遅れ効果がほとんどないため、 温度上昇の振幅は1年を通じて比較的平坦かつ小さくなってい る。



図 2.1.4 アイス・アルベドフィードバック(赤色)、海洋熱吸収-放出 (青色)、その他のプロセス(緑色)の北極温暖化への寄与(℃)。 CMIP5の32モデル平均。(a)グリーンランド海、アイスランド海、ノ ルウェー海を除く北極域の海洋、(b)グリーンランドを除く北極域の陸 上。黒線はシミュレーション結果を表す。(a)と(b)の縦軸の違いに注意。 Laine et al. (2016)のデータを基に作成。

図 2.1.5 では、図 2.1.4 のアイス・アルベドフィードバックと 海洋熱吸収-放出の効果を一つにまとめ(赤色)、その他の効果 を詳細に表示している。なお、図 2.1.5 における地表蒸発と潜 熱フラックスは、海洋からの熱放出と深く関わっているハズで あるが、本解析では、数値モデル中での取り扱いに従って切り 分けられているため、一部の効果が重複して計上されている心 配はない。図 2.1.5a によれば、海では、強い大気成層の影響で 温度上昇が地表付近に閉じ込められ(黄土色:non-barotropic)、 さらに雲による温室効果(灰色)が10~1月の温度上昇をもた らすことで大きな温暖化が生じることがわかった。陸でも、海 と共通して、10月以降の秋から冬にかけては、大気成層の影響 や雲の温室効果が温度上昇に対して比較的大きく関わっている ことがわかった(図 2.1.5b)。図 2.1.5 の緑色(Warming sensitivity)は、各プロセスの寄与が全球一様と仮定した場合 に、図 2.1.3e の放射則の特性(温暖化感度)が北極温暖化に寄 与する量を表している。また、図 2.1.5 の紫色 (Synergies) は、 各プロセスと温暖化感度における北極域の全球平均値からのず れの相乗効果を表す。したがって、秋から冬にかけて、北極域 でフィードバックが全球平均よりも正に大きく、かつ温暖化感 度が高いことが、大きな昇温に寄与していることが分かる。厳 密な計算方法については、Laine et al. (2016) を参照されたい。

21

結果については、各プロセスの寄与についてモデル間での符号 の整合性を統計的に検定し、主な結果についてその有意性を確 認した(Laine et al., 2016)。また、マルチモデル平均におけ る寄与の大きな項がマルチモデルのばらつきにも大きく寄与し ていることが確認された。さらに、熱帯についても同様に解析 して比較を行った。その結果、大気成層の効果や雲の温室効果、 放射則の特性などのプロセスが北極温暖化増幅に寄与している ことを確認した(Laine et al., 2016)。



図 2.1.5 個別のプロセスの北極温暖化への寄与 (°C)。 CMIP5 の 32 モデル平均。(a) グリーンランド海、アイスランド海、ノルウェー海を 除く北極域の海洋、(b) グリーンランドを除く北極域の陸上。黒線はシ ミュレーション結果を表す。(a)と(b)の縦軸の違いに注意。Laine et al. (2016) のデータを基に作成。"Albedo+Uptake": 雪氷-アルベドと海洋 熱吸収-放出効果の合計、"Clouds": 雲、"Sfc. Evap. + Sens.": 地表蒸発 と顕熱フラックス、"Small terms": 微小項の合計、"Warming sensitivity"、"Synergies"、"Non-barotropic"、"Barotropic"については 本文参照。

図 2.1.6 に、Laine et al. (2016, in prep.)の解析結果も含め、 北極海における温暖化増幅メカニズムに関するまとめを模式的 に示す。温暖化によって海氷の融解が促進すると、アルベドフ ィードバックを介して、夏に海洋に吸収される熱エネルギーが 増加する。これによって、海氷のさらなる融解を促進するが、 地上気温の上昇は緩和される。海水の大きな熱容量により、少 し遅れて秋に、温暖化前に比べ海洋混合層の温度上昇が最大と なる。冬にかけて、温暖化時には冷たい海氷のかわりに暖かい 海水面が露出するため、地表面温度は高くなる。また、冬にか けて温暖化前に比べ海洋混合層の温度偏差は下降するが、その 際に大量の熱を大気に放出し、その熱が地表付近に閉じ込めら れて海面温度を上昇させるため、地表面温度はさらに高くなる。 この際、雲の温室効果や強い大気成層により地表付近の気温が 特に高くなること、北極において温暖化感度が高いことが重要 である。以上の過程は、地表面エネルギー収支解析において、 秋から冬にかけて海洋の熱が放出され、地表付近(および地表 面)が暖まることに相当する。



図 2.1.6 北極海における北極温暖化増幅の季節性を表す模式図。

図 2.1.5 に示されているように、Laine et al. (2016)の診断 には大気温度が鉛直一様に上昇した効果(barotropic)と下層 側でより強く昇温した効果 (non-barotropic)の2項が現れる。 この分割自体、Laine et al. (2016)によって新たに導入された ものであるが、これらの項に寄与する物理プロセスの詳細は不 明である。後者については、まとめて大気成層の影響として解 釈される。一方、CFRAM 法では、大気温度の上昇に寄与する プロセスも特定することができる。

図 2.1.7 にその一例を示す。図 2.1.4 や図 2.1.5 と同様に、個 別の要因の効果を足し合わせた結果としてシミュレーション結 果(灰色)が理解される。ここでは、表示の都合上、放射効果 (図 2.1.7a)と放射以外の効果(図 2.1.7b)に分けている。こ の結果からは、地表面エネルギー収支解析と同様に、秋から冬 にかけては海洋の熱放出の効果(図 2.1.7b 黒色)が支配的なこ とや、北極温暖化増幅にともなう低緯度側からの熱(乾燥静的 エネルギー)輸送の減少が温暖化を抑制していること(図 2.1.7b 青色)、下層雲が長波放射を地表に射出し、850 hPa 付近の気 温を低下させるとともに地表付近の温度を上昇させていること (図 2.1.7a 青色)、冷却をともなう地表からの蒸発の増加が対 流圏中層において凝結熱を放出し大気の成層化に寄与している ことなど(図 2.1.7b オレンジ色)、さまざまな情報が読み取れ る。



図 2.1.7 MIROC5 気候モデルの RCP4.5 実験における北極域(北緯 70 度以北の主に海洋)の大気温度の上昇(灰色)に寄与する個々のプ ロセス(21世紀末と20世紀末の差)。季節は10~12月平均。Yoshimori et al. (2014b)と同様の方法で解析。(a)放射効果、(b)放射以外の効果。 EXT: CO2、WVP:水蒸気、ALB:雪氷アルベド、CLD:雲、EVP:地 表蒸発、LSC:大規模凝結+対流、SH:地表顕熱フラックス、VDF:鉛 直拡散、DYN:移流、RES:海洋の熱吸収-放出など、SIM:シミュレ ーション結果。

以上の「北極温暖化増幅メカニズムの総合解析」における一 連の研究結果は、気候モデルの不確実性について、次のことを 示唆する。気候モデルにおいて、海氷のアルベドは非常に簡略 化して表現されており、しばしば「チューニング」によって決 定される。特に海氷上のメルトポンドのようなアルベドが時間 の経過とともに変化する過程はきちんと表現されていない。ア ルベドフィードバックは年平均でみた場合に北極域のエネルギ ー収支変化の最も重要な項であることからも(Yoshimori et al., 2014a,b、Laine et al., 2016)、アルベドの定式化の改善が重 要と考えられる。また、夏と秋から冬にかけての海洋の熱吸収 や放出においては、海洋の混合層深度を正確に表現する必要が ある(Yoshimori et al., 2014b、Laine et al., 2016)。鉛直解 像度の検討も含め、現在気候における再現性の改善が重要と考 えられる。同時に、海洋から放出された熱エネルギーの鉛直分 配や大気成層の強さに関しては、大気境界層の表現が重要とな る。また、放射則の非線型性に起因する温暖化感度は、背景場、 すなわち現在気候の寒暖バイアスの影響を受けるため、現在気 候再現性におけるバイアスの低減も重要と考えられる。さらに、 海氷融解にともなう雲の増減や混合相雲の表現についてもさら なる検証が必要と考えられる。

本事業で行った系統的なエネルギー収支解析は、他のプロセ スが一定と仮定した場合に、そのプロセスがもたらす温暖化を 定量的に診断したものである。したがって、プロセス、あるい はフィードバック間の相互作用についての知見は得られない。 この点については、感度実験と系統的エネルギー収支解析を組 み合わせることでさらなる発展が期待され、Yoshimori et al. (2016, in prep.)においてその一例がまとめられつつある。ま た、同様の解析は、原理的には観測(特に再解析)データにも 適用可能であるが、現在のところいくつかの問題のため、実用 には至っていない。むしろ、本研究で明らかになった重要なプ ロセスに注目し、その素過程を検証していくことが気候モデル の改善や将来予測の不確実性低減につながると考えられる。本 プロジェクトから得られたこうした考察は、北極環境研究の長 期構想³⁾の作成に大きな貢献をした。

2. 個別フィードバックの解析

執筆者:阿部 学 野沢 徹 小倉知夫 高田久美子 浮田甚郎 榎本浩之 堀 雅裕 杉本敦子 青木周司

(1) 海氷-雲フィードバック

執筆者:阿部学、野沢徹、小倉知夫

はじめに

北極域温暖化増幅(Arctic Amplification: AA)の原因とし て、海氷や積雪の減少に伴うアイス・アルベドフィードバック がよく知られている。この他に、北極域で太陽入射量の少ない 秋季から春季においては、温暖化に伴い北極域の雲が増加する ことで下向き長波放射が増加することもAAの要因として考え られている。近年、地球温暖化の影響により9月を中心に北極 の海氷が著しく減少しており、それにともなって低層雲が増え ていることが、人工衛星データを使った研究によって報告され ている⁴。このような雲の増加による下向き長波放射量の増加 が、太陽入射量の小さい、あるいはほとんどない北極域の秋季 から春季にも気温上昇や海氷減少へ寄与する可能性があること から、北極海の雲量変化メカニズムや雲量変化による放射収支 への影響を解明することがAAのメカニズム解明のための一つ の課題となっている。 北極海域での観測データの不足から、鉛直構造を含めた雲変 化の実態の把握やメカニズムの検証はまだ難しい。一方、数値 モデルによる北極域の気候・気象のモデルの再現性が高くない ことも信頼性のあるメカニズム理解を難しくしている原因の一 つでもあるが、激しい温暖化を生じる将来見通し実験の結果か ら、北極海の急激な海氷減少と雲量増加が秋季を中心に顕著に



図 2.1.8 気候モデル MIROC5.0 の 20 世紀再現実験における a) 北極海氷面積と c) 北極海域で平均した全雲量と低層雲量の 季節変化(青線:1976–1985年平均値、赤線:1996–2005年平 均値)。それらに関する両期間の差、b) 海氷面積、d) 雲量(黒: 全雲量、橙:低層雲量)。エラーバーは5本のアンサンブルメ ンバー間の標準偏差幅。単位:海氷面積[×10⁶ km²]。雲量:次 元なし。

起こることが確認されている⁹。それに対して、気候モデルが 再現する20世紀後半からの近年の温暖化期のような、現実的 な条件を与えた実験での海氷変化と雲の変化の関係を調べ検証 した研究はみられない。そこで本研究では、気候モデルを用い た過去再現実験における近年の雲変化の再現性を検証するとと もに、そのメカニズムや放射収支への影響の理解を通して、近 年の気候変動における北極海の海氷減少と雲量変化のフィード バックを考察すべく、全球気候モデルで起こっている海氷減少 による気温や水蒸気の鉛直構造や雲量の変化、雲変化による放 射量への影響を調べた(Abe et al., 2015)。

モデルと実験

本研究では、全球気候モデル MIROC5.0⁶ による CMIP5 の 20 世紀再現実験のデータから 1976-2005 年の月平均データを 用いて、海氷減少と雲量変化を中心に統計的解析を行った。20 世紀気候再現実験では、1850 年から 2005 年までの自然の外的 要因(太陽活動の変動や火山噴火)、温室効果ガス濃度やエア ロゾル排出量、土地利用変化のような人為的な気候変動要因を 条件として与え、現実的であると考える過去の気候変動を再現 する実験を行っている。また、解析には、初期値の異なるアン サンブルメンバー5本分の実験結果を用いている。

結果と考察

MIROC5.0 による 20 世紀気候再現実験において、全球平均 地表気温はそれまで長周期では緩やかに変動していたが、1980 年から 2005 年に急激に上昇する温暖化が起こるという、現実 に近年起こっている地球温暖化を再現している。ここで、図 2.1.8 に 20 世紀再現気候実験の終りに起こった、北極海の海氷 面積と雲量の変化に関する図を示す。観測結果と若干違う点が あるが、図 2.1.8a に示すように、MIROC5.0 においても夏に 海氷が減少し、秋季から冬季に海氷が増加するという現実的な 季節変化を示している。北極海氷面積の1980年前後の10年平 均(1976-1985 年平均値)と 2000 年前後の 10 年平均 (1996-2005年平均値)を比較すると、海氷面積が減少してい ることがわかる。北極海氷面積は9月を中心に減少しており、 人工衛星による観測結果と類似する(図 2.1.8b)。一方で、図 2.1.8c と図 2.1.8d が示すように、北極海の雲量も顕著ではない が増加している。北極海の雲量の変動はほぼ下層雲の変動によ って説明されるが、この雲量の変化トレンドは秋季に増加傾向 を示し、海氷減少量が最大となる9月ではなく、10月に最大で 有意に増加する傾向がある(図 2.1.8d)。



図 2.1.9 気候モデル MIROC5.0 の 20 世紀再現実験 1976–2005 年期 間での a) 9 月、b) 10 月の全雲量と海氷密接度の線形トレンド。単位: [/10 年]。

図 2.1.9 に 1976-2005 年の期間での海氷密接度と全雲量の変 化トレンドの北極を中心にした地理分布を示す。図 2.1.8 で示 したように、9 月において、東シベリア海を中心に広く海氷減 少がみられるが、雲量の顕著な増加がみられない(図 2.1.9a)。 一方、10 月において、海氷が顕著に減少している領域は9 月に 比べると狭くなったが、海氷減少が顕著なところを中心に雲量 が増加していることがわかる(図 2.1.9b)。この 10 月の海氷 減少域での雲量増加は衛星データの結果と類似する。9 月に比 べ 10 月に雲量が増加する理由は、海氷減少により増えた暖か い海面の領域では、夏から秋への季節変化に伴って冷え込む大 気と海面との間の温度と水蒸気の差が大きくなり、海面から大 気に運ばれる熱と水蒸気量がより増加するからである。

10月の海氷減少が顕著な地点を平均した雲量、気温、比湿の 鉛直プロファイルを解析した結果、海面に近い低い層(およそ 標高450m以下)では強い気温上昇を受けて相対湿度が低下し 雲量が低下する傾向、その上の層では相対湿度の増加とともに、 雲量が増加する傾向がみられた。この雲量の増加に関しては、 対流性の雲と大規模凝結による雲がともに増加する傾向にあった。

海氷減少トレンドが顕著であった場合とそうでない場合の地 表面での下向き長波放射量の変化について図 2.1.10 に示す。図 2.1.10a では晴天下向き長波放射量 (ΔCSsDLR) と下向き長波放 射量の雲放射強制力(ΔCRF_{SDLR})の期間前後の差に関して、 海氷変化トレンドが-0.1 /decade より小さいグリッドと大きい グリッドにわけ、それぞれの平均値を各月ごとに示している。 海氷の変化トレンドは各月ごとに計算した値に従うため、各月 で平均するグリッド数は異なる。図 2.1.10b では、図 2.1.10a で示した値の比 (ΔCRF_{SDLR}/ΔCS_{SDLR}) を示している。ここで は、ACSsDLRは温暖化に関係する気温上昇や水蒸気増加が要因 となる変化量、ΔCRFsDLR は雲量変化が要因となる変化量と考 える。つまり、地表面の下向き長波放射量変化に与える雲の放 射強制力の影響を、温暖化による気温上昇や水蒸気増加による 変化量を基準とした場合の大きさとして評価し、雲量変化が放 射場に与える影響を考察する。海氷減少が顕著なグリッドでは、 秋季に ΔCSsDLR が増加する (冬季から春季には不確定性が大き いために議論から除く)。これは、秋季に下向き長波放射量が



図 2.1.10 a) 気候モデル MIROC5.0 の 20 世紀再現実験における、 北極域 (66–90°N) の地表面での下向き長波放射量に関して、晴天時 (×: ΔCRF_{SDLR}/ΔCS_{SDLR}) と雲の放射強制力 (•: ΔCRF_{SDLR}/ΔCS_{SDLR}) の変 化量の各月の変化。変化量は 1976–1985 年平均値と 1996–2005 年平均 値の差として示す。赤線: 1976–2005 年の海氷密接度の線形トレンド (Δai) < -0.1 [/decade]であるグリッドの平均値。黒線: Δai > -0.1 であ るグリッドの平均値。誤差バーと陰影によって、アンサンブルメンバー 間の標準偏差を示す。b) a)で示した値の比 (ΔCRF_{SDLR}/ΔCS_{SDLR})。

増加し、海氷減少を促進させるという正のフィードバックが気 温上昇と水蒸気増加によって起こっていることを示す。それに 加えて、雲の放射強制力も正の値を示しており、雲量増加によ り地表面での下向き長波放射量が増加し(図 2.1.10a)、その 量は気温上昇や水蒸気増加によって生じたとされる量の約4割 -6割である(図 2.1.10b)。海氷減少が顕著でないグリッドで も下向き長波放射量の増加が確認されるが、海氷減少が顕著な グリッドに比べると平均的に小さい。また、雲の放射強制力に ついても、海氷減少が顕著なグリッドの方が正に大きいことが 分かる。このことは、秋季を中心に海氷減少に伴い増加した雲 の効果により正のフィードバックが強化されている可能性を示 唆する。

これらの結果は、一つの気候モデル実験データの解析結果で あり、今後は多くの気候モデルの実験データを利用することで 不確定性の大きさも考慮し、利用可能な観測データとの比較検 証を行うことが課題である。これによって、北極海の雲と海氷 のフィードバックプロセスの理解をさらに高め、将来の気候変 化予測の信頼性を向上させることが期待される。

(2) 大気子午面循環の変化と北極温暖化増幅

執筆者:浮田甚郎

Nakamura et al. (2015b) では、大気大循環モデルを用いて 海氷減少実験を行う事で、近年約30年間における北極の海氷 減少に伴って、大気の循環場がどの様に変調され、その結果、 日本を含む中緯度の気象、気候にどう影響を与えているかを調 べた。その結果をまとめると、北極海の海氷減少に伴いバレン ツ・カラ海域からの熱的・力学的強制によって生じた波動擾乱 により惑星波が変調を被り、その上方伝播が強化され、さらに 成層圏-対流圏上下結合を介して北極振動が負の位相にシフト、 さらにシベリア陸面での低温傾向、中緯度の広い地域での極端 現象の頻度増加に繋がるという一連のプロセスを明らかにした。 ここで、惑星波の上方伝播の強化は即ち惑星波に伴う極向きの 熱輸送(渦熱フラックス)の増加を意味する。この事は大気の 力学理論が明らかにするように、平均場の惑星波が駆動するラ グランジェ的な子午面循環(残差平均子午面循環)を強くする 働きをする。重要な事は、それに伴って中緯度では断熱冷却、 高緯度では断熱加熱が強化される事である。

この断熱加熱の強度を実験の結果から定量的に見積もった 所、元々の境界条件の違いとして与えた北極(北緯 70 度以北) 平均での乱流熱フラックスの違いの 3.6Wm⁻²に対して、2.7 Wm⁻²に達する事が判った。この事は、海氷が減る事により海 洋から大気への熱の供給が増加し大気が直接暖められる事の他 に、循環場の変調に伴う断熱加熱により、北極の大気が暖めら れる事を意味する。即ち力学的なフィードバック、それも気候 学的に重要なポジティブなフィードバックが働く事を新たな北 極温暖化のメカニズムとして示した(図 2.1.11)。



図 2.1.11 東西平均した子午面循環をあらわす。(左) モデルにより計 算された、少氷に伴う子午面残差循環(矢印)と流線関数(赤は時計回 り、青は反時計回り)。(右) ERA-Interium を用いて計算した、子午 面における E-P フラックスの収束・発散に伴う残差循環と流線関数。 それぞれ 11-12 月平均で基準化したバレンツ・カラ海海氷インデック スとの回帰係数。

その実態をさらに理解する為に、渦熱フラックスを長周期(月 平均)成分とそれよりも時間スケールが短い短周期成分とに分 解したものを図2.1.12で示す。前者は定常成分として、対して 後者は主に日々の擾乱成分として理解できる。図2.1.12でトー タル(左)と長周期成分(右)の描像が良く一致していること から、渦熱フラックスの増加、即ち力学的フィードバックに寄 与しているのは主に定常渦成分である事が判る。さらにこの事 は、第2章II-3で述べている、極域熱輸送における冬季の乾燥 静的熱フラックスの増加、またその季節内時間特性、成分別分 解の結果と極めて整合的で有る事が判った。

これらの結果は、北極の温暖化に伴う現在進行中のプロセス として理解すべきで、将来さらに温暖化が進んだ時にこのプロ セスがどの様に変化するのか、また別のプロセスが現れるのか など今後の研究が待たれる。



図 2.1.12 東西平均した子午面循環をあらわす。(左) モデルにより計 算された、少氷に伴う子午面残差循環(矢印)と流線関数(赤は時計回 り、青は反時計回り)。(中)、左図と同様、ただし短周期成分。(右) 左図と同様、ただし月スケールの長周期成分。

(3) 積雪-アルベドフィードバックの定量化に向けて 執筆者:野沢徹、高田久美子、榎本浩之、堀雅裕

北極温暖化増幅メカニズムの総合解析で示したように、全球 気候モデルの出力結果を解析することにより、さまざまなプロ セスそれぞれがどの程度の寄与をもたらしているのか、その季 節性も含めて詳細に知ることが可能となった。一方で、全球気 候モデルの出力結果に依存しているが故に、バイアスや不確実 性の存在により、得られた結果が自然界の"真実"を正しく捉 えているのか、という懸念が常に付きまとう。北極温暖化増幅 においては、特にアイス・アルベドフィードバックが直接的・ 間接的に大きな役割を果たしていることから、気候モデルによ る北極圏雪氷の再現性について、観測事実と比較・検証してお くことは大変重要である。

一方で、本事業の雪氷課題では、衛星観測データから、雪質 (乾雪/湿雪)の情報も含めた新しい積雪分布データを構築して いる。雪のアルベドは雪質によっても大きく異なることから、 雪質の違いによるアイス・アルベドフィードバックの定量的な 検証が可能となった。残念ながら、本事業期間内には詳細な解 析を行うまでには至らなかったが、その第一歩として、新たに 得られた湿雪被覆率の観測データを、陸面モデル MATSIRO⁷⁾ によるオフライン実験結果(Nitta et al., 2014)と比較した。 なお、ここで用いた陸面モデルには、最新の積雪モデルが組み 込まれており、従前のモデルと比較して、積雪被覆率の分布等 は大幅に改善されている。図 2.1.13 は融雪期(2007年5月前 半)における湿雪被覆率を示す。図 2.1.13 の左図は衛星観測に 基づく湿雪被覆率、右図は数値モデルにより再現された湿雪被 覆率であるが、両者は完全に同じ物理量を見ているとは言えな いものの、比較的良い一致を示していることが分かる。今後は、 平均的な季節進行はもちろん、長期的な変化傾向やアルベドな どの放射的な物理量も詳しく検証していくことで、北極域の積 雪変化によるアイス・アルベドフィードバックの更なる定量化 に大きく貢献することが期待される。



図 2.1.13 融雪期(2007 年 5 月前半)における湿雪被覆率の地理分布。 (左)衛星データから新たに推計したデータ、(右)陸面モデルによる オフライン実験結果。衛星データは被覆率 0.05以下は示していない。 オフラインモデルは各グリッドにおける融雪日の頻度で代用している。

(4) 炭素循環フィードバックの影響

執筆者:野沢徹、杉本敦子、青木周司

本節の冒頭でも述べたように、北極温暖化増幅メカニズムの 総合解析により、温暖化増幅をもたらし得るさまざまなプロセ スの寄与率を詳しく知ることが可能となった。しかしながら、 得られた結果は解析に用いた全球気候モデルに依存しているた め、当該モデルで考慮されていないフィードバックプロセスに ついては何も情報を得ることができない。そのようなフィード バックの最たるものが、動態植生や炭素循環である。次節で詳 しく述べられているように、北半球高緯度域は、現在では二酸 化炭素(CO₂)のシンクとなっているが、将来的にはCO₂のソ ースとなることが予想されており、これに伴って、北極温暖化 増幅が将来的に強化される可能性がある。気候変動に関する政 府間パネル第1作業部会第5次評価報告書 1)によれば、炭素循 環フィードバックにより、全球平均した今世紀末における地球 温暖化は約1℃ほど上昇すると言われており、必ずしも無視で きる大きさとは言い切れない。今なお、北極域高緯度における 炭素循環の観測事実には大きな不確実性が存在するのが現実で はあるが、より多くの観測的データを蓄積してこれらの不確実 性を少しでも低減するとともに、炭素循環なども考慮した地球 システム統合モデルによる解析を推進することにより、北極温 暖化増幅メカニズムの更なる定量的評価に繋げる必要がある。

引用文献

- IPCC,2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Ohmura, A., 2012. Enhanced temperature variability in high-altitude climate change. Theor. Appl. Climatol., 110, 499-508.
- 北極環境研究コンソーシアム (JCAR), 2014. 北極環境研究の長期 構想. 215pp.
- Liu, Y., Key, J.R., Liu, Z., Wang, X., Vavrus, S.J., 2012. A cloudier Arctic expected with diminishing sea ice. Geophys. Res. Lett. 39, L05705.
- Vavrus, S., Holland, M.M., Bailey, D.A., 2011. Changes in Arctic clouds during intervals of rapid sea ice loss. Climate Dynamics 36, 1475-1489.
- 6) Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., Kimoto, M., 2010. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. Journal of Climate 23, 6312-6335.
- Takata, K., Emori, S., Watanabe, T., 2003. Development of minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. Global Planet. Change 38, 209–222.

Ⅱ.戦略研究目標2 全球の気候変動及び将来予測における 北極域の役割の解明

戦略研究目標代表者:杉本敦子

北極・亜北極陸域は北方林が炭素吸収の重要な舞台となって いることから、CO2のシンクとして機能している。しかしなが ら、北極域の急激な温暖化により、陸上では植生や地表面状態 が変化しつつあることが明らかとなってきた。

北極域で進行するこれらの変化は、CO2シンクとしての北極の機能を変化させ、大気 CO2収支を変化させることにより全球の気候に変化をもたらす可能性が示された。

亜北極域に広がる北方林は、ツンドラ植生と比較すると、面 積の大きさ、そして生産性の高さの点から、CO2のシンクとし て重要であるが、植生・気候、そして永久凍土の状態は地域性 がある。現在、北極・亜北極域は、大気側からの観測、そして 陸域課題で実施した現場観測から、CO2のシンクとして機能し、 短期的には陸上の吸収が強まっていることが示された。しかし ながら、環北極域の約 600 地点の年輪データは、近年、樹木の 成長速度が上昇している地域と、低下している地域があること を示した。また、成長速度が低下している地域は、年輪幅と夏 の気温が負の相関を示す傾向があることも明らかとなった。

CO2の正味の吸収量は、植生による吸収と土壌からの放出のバ ランスで決まるが、土壌呼吸は地温とともに増加し、北極全域 で増加することが GTMIP Stage 2 から示された。一部の地域 で見られる成長速度の低下と、土壌呼吸量の上昇から考え、現 在の北極は CO2のシンクとし機能しているが、この機能がいつ までも続くわけではない。



図 2.2.1 本節「全球気候変動における北極域の役割」の構成

本節では目標2「全球の気候変動及び将来予測における北極 域の役割の解明」に対し、ここでは、北極域の役割を、1.炭 素循環、2.積雪、3.熱輸送、4.氷河・氷床融解による海水 準変化の四つに分けて(図2.2.1)、研究課題1から5の成果 をとりまとめる。本節では北極域の役割を便宜上このように4 つに分けて述べるが、目標1に対する節に述べられている温暖 化増幅過程も、全球の気候変動に対して北極システムが持つ重 要な役割である。

1.北極域の炭素循環

執筆者: 杉本敦子 青木周司 高田久美子

北極・亜北極域は現在は炭素のシンクとして機能し、高緯度陸 域全域では 2002–2010 年の期間 CO₂吸収が強まっている



図 2.2.2 両極(ニーオルスンと昭和基地)で観測した二酸 化炭素濃度とδ(O₂/N₂)比から推定した全球の海洋と陸域の CO₂吸収量の年々変動

図 2.2.2 はスバールバル・ニーオルスンと南極昭和基地で観 測した大気 CO₂ 濃度とδ(O₂/N₂)比を用いて推定した 2001– 2010 年の全球の海洋および陸域の CO₂吸収量である。全球で は、海洋と陸域それぞれに CO₂ は吸収されている。

課題5メンバーの5つの独立したインバージョンモデル

(ACTM、GELCA_NIES、GALCA_CAO、JMA、NICAM) により大気 CO₂濃度の観測データを用いて地上での CO₂フラ ックスを算出した。その結果、北米、北欧、北東ユーラシアの いずれの領域も陸域は CO₂のシンク、そして、北極海とその周 辺海域も CO₂のシンクとなっており、IPCC AR5¹⁾で示された 結果と同様、北極域は現在(2002–2010 年) CO₂のシンクとし て機能していることが示された(図 2.2.3a)。課題 2 及び本節 でも後述するように、北東ユーラシアの現場で実施したフラッ



図 2.2.3 5つのインバージョンモデル (ACTM、 GELCA_NIES、GALCA_CAO、JMA、 NICAM) による 2002–2010 年の CO₂フラックス (a) と CO₂フラックスの変化 トレンド (b) 、および、インバージョンモデルの計算を行った 領域を高緯度帯について示した地図 (c) 。高緯度帯のデータを 各領域の色の枠で囲った。フラックスは、大気から陸または海へ の CO₂の移動が負の値で示されている。



図 2.2.4 ポイントバロー(アラスカ)とマウナロア(ハワイ) の大気 CO₂季節変動振幅の変化トレンド(A)と位置(B)。 (Graven et al., 2013)

クス観測の結果でも、陸域生態系が CO₂を吸収していることが 示されている。また、インバージョンモデルの結果は、2002– 2010年の期間、北極陸域の CO₂シンクとしての機能が強まっ ていることを示しており(図 2.2.3b)、また、大気 CO₂濃度の 季節変化の振幅が高緯度域で大きくなっている(図 2.2.4)こと からも陸域での吸収が強まっていることが示唆されている。し かしながら、一方で、後述するように、年輪幅指数のデータか らは、1960年代と近年(ほとんどが 1990年代か 2000年代で あるが、一部 80年代までしかないものは 1980年代のデータを 利用)を比較すると、全ての地域で吸収が強まっているわけで はないことも示されている。

東シベリアタイガ林の樹木は過去も温暖な期間は成長が悪か った

東シベリアタイガ林の観測サイト YAK (ヤクーツク)と UST (ウスチマヤ) (第3章研究課題2表3.2.1参照)のカラマツ の年輪幅は、この地域の温暖な期間(1931-60年、1991-2011 年)に成長が悪かったことを示している(図 2.2.5)。また、こ れらの年輪炭素同位体比は、高温による水ストレスにより気孔 コンダクタンスが低下したことを示していた (Tei et al., 2014)。 東シベリアは、年輪幅と夏の気温の間に負の相関が見られる地 域で(研究課題2図3.2.8)、1960年以降の年輪幅の減少は、 温暖化に伴いこの年輪幅-夏期気温の間の負の相関が顕著に現 れたと見ることができる。また、UST は YAK よりわずかに降 水量が多く、成長速度の低下は、1931-60年の期間は顕著では ないが、1991-2011年の期間は顕著である。これは、UST で は、温暖化の年輪幅減少への影響が、20世紀半ばの30年間の 弱い温暖化の程度では顕著に現れなかったが、近年の21年間 の強い温暖化では顕著に現れたと言える。このことは、樹木の 成長と気温との負の相関が現れる地域が、温暖化の進行に伴い、 さらに広がる可能性があることを示唆している。



図 2.2.5 東シベリアタイガ林観測サイト YAK と UST の 2 地点の 過去 100 年間のカラマツ年輪幅の変化。(Tei et al., 2014)

環北極域の樹木の成長トレンドは地域ごとに異なり 60 年代と 比較すると近年成長が悪くなっている地域がある

国際年輪データベース(ITRDB)から環北極・亜北極域の年 輪幅データを取り出し、1960年代と1990年代(2000年代ま たは1980年代の比較も含む)を比較した(図2.2.6)。多くの 地点で近年の成長量が増大している(緑〇で示されている)。 一方で、東シベリアの乾燥帯の森林域、アラスカ・カナダの内 陸部では近年の成長量が低下(小さい赤〇)している。前述の YAKとUSTの成長量の低下はそれらの地点だけの現象ではなく、地域的な広がりをもつ現象であることがわかる。

環北極域の7地点の1961–1970年の期間と近年(1996–2005 年)の年輪幅指数、加えて1951–2010年の年輪幅指数と気象 データ(月平均降水量と月平均気温)から重回帰モデルを作成 し、GTMIP(陸域課題GRENE-TEA Model Intercomparison Project) Stage 2(研究課題2参照)の将来予測のためのデー タセットを用いて2091–2100年の期間の年輪幅指数を予測し



図 2.2.7 ITRDB の年輪幅指数と夏の気温の相関(中央)と、各地点の年輪幅指数の変化と重回帰モデルによる将来予測(左側棒グラフ)、 SEIB-DGVM による樹木 NPP の変化(右側棒グラフ)。中央の年輪幅指数と夏の気温の相関は、大きな緑〇が正の相関を表し、小さな赤 〇は負の相関を意味する。年輪幅と NPP の棒グラフは、青は過去(1961-1970年)、緑は近年(1996-2005年)、赤は将来(2091-2100 年)を表している。年輪幅と夏の気温が正の相関を示す地点(上側の INU, KAL, CHO の 3 地点)は、年輪幅も生態系モデルによる NPP も上昇が予測されるが、夏の気温と負の相関を示す地点(下側に示した地点)は、年輪幅指数は年代とともに減少するが、生態系モデルで は NPP は低下せず、全ての地点で NPP は上昇するという結果となった。地点の詳細、年輪幅指数の解析は第3章研究課題2の「1.温暖化 と環北極陸域生態系の変化」に記載されている。

たものを図 2.2.7 (各地点の棒グラフ左側の 3本) に示した。 近年、成長が良くなっている地点では重回帰モデルでも成長が 良くなる予想となっている。一方、東シベリアなど、成長が悪 くなっている地点では、重回帰モデルによる予測も将来の成長 速度は低下する結果となった。東シベリアのような内陸性の乾 燥気候帯では、樹木の成長は降水量とも強い正の相関を示す。 このようなモデルの予測は、気象データを外挿して計算するた め、樹木の応答が現在と変わらないという仮定に基づく予測で あることに留意する必要があるが、この結果は、東シベリアの ように将来降水量の増加が予測される状況でも、気温上昇によ る成長速度の低下の方がより強く植生の純一次生産(NPP) に 影響を及ぼし、NPP を低下させている状況を反映した結果であ ると言える。

生態系モデルが予測する将来の環北極域の樹木の成長

図 2.2.7 の環北極域の7地点のそれぞれの右側の棒グラフ3 本は、植生動態モデル SEIB-DGVM (研究課題2に詳細を記載) を用いて、年輪幅指数の計算と同様、1961–1970年、1996–2005 年、2091–2100年の期間を対象として、樹木の NPPを計算し た結果である。全ての地点で、モデルの計算結果は、現在もそ して将来も NPP (純一次生産)は増大するという結果となった。 このモデルで計算される NPP と気象パラメータ間の相関を調 べると、東シベリアでは、降水量と正の相関、気温と負の相関 が得られ、これらは年輪幅データ解析から得られた結果と一致 する。それにも関わらずモデルで計算された将来予測が年輪解 析からの予測と異なるのは、モデルの将来予測に用いた入力デ ータが GTMIP Stage 2 と同様のもので、環北極域の広い範囲 で降水量が増加するデータとなっており、モデルで計算された 結果は、NPP と気温との負の相関よりも降水量増加の影響をよ り強く反映したためである。

モデルの現状と課題

GTMIP に参加した 7 つの生態系モデルのヤクーツクに対す る生態系の CO₂収支(NEP:生態系純生産)の計算結果と7 つの大気インバージョンモデルのヤクーツクを含むグリッドの CO₂収支の計算結果、およびヤクーツク近郊のスパスカヤパッ ドにおける渦相関法による CO₂フラックス観測結果を 2004– 2007 年の平均値で比較した(図 2.2.8)。符号を合わせるため、 大気から生態系への CO₂の吸収量をプラスの値として表示し ている。年積算値では観測および全てのモデルで CO₂は吸収と なり、この地点(グリッド)の生態系が CO₂のシンクとして機 能していることを示している。また、月別の値を見ると、CO₂ が夏期 6-8 月に吸収され、その他の月には放出される季節変動 が観測され、生態系モデルでも再現されているが、生態系モデ ル、インバージョンモデルともに、モデルごとに相当大きなば らつきがあることがわかる。

CO₂フラックスの各生態系モデルの出力と観測結果につい て、植生の光合成が卓越する 6-8 月と土壌呼吸の寄与が大きい 9 月に分けて、その年々変動を比較した(図 2.2.9)。植生動態 に重点を置くモデルはフラックスをよく再現しているが、土壌 呼吸の寄与が大きい9月は、土壌有機物分解に着目して開発さ



図 2.2.8 東シベリアヤクーツク近郊・スパスカヤパッドに おけるタワーフラックス観測結果と GTMIP、およびインバ ージョンモデルの NEP(生態系純一次生産)の 3-11 月と夏 季(6-8月)および冬季(12-2月)の比較。



図 2.2.9 東シベリアヤクーツク近郊・スパスカヤパッドにおけ るタワーフラックス観測結果と GTMIP の計算結果。成長期間 (6-8 月)の NEP(上)と 9 月の NEP(下)。

れたモデルのほうが現実的な値となっている。NEP(つまり収 支としての正味の CO₂の吸収量)を再現し予測していくために は、植生の光合成、土壌呼吸の両方をうまく計算する必要があ る。また、前述のように、現在の NEP を良く再現し、東シベ リアの植生の NPP に対して、降水量と正相関、気温と負相関 を再現できる優れたモデルでも、年輪幅の解析で明らかとなっ た 1960 年代から近年の成長速度の低下を再現できないのが現 状である。

図 2.2.10 は GTMIP Stage 2 に参加した三つの生態系モデル の NPP と土壌呼吸の現在 (1981–2010 年) と将来 (2071–2100 年)の計算結果である。モデルの NPP の計算結果は、前述の 図 2.2.7 で示した結果と同様、ほぼ全域で増加と計算されてい る。また、土壌呼吸も同様に全域で増加が予測された。NPP が 将来増大するかどうかは、これまで述べたように、上昇が予想 される地域と低下が予想される地域があるが、土壌呼吸は地温 上昇に伴い上昇することが予想され、低下を示す証拠やデータ はない。

以上をまとめると、現在、北極・亜北極陸域は全域で CO₂ シンクとなっているが、温暖化の進行により比較的乾燥した森 林帯では温暖化に伴う NPP の低下がすでにはじまっており、 将来の水分環境によってはこの低下がさらに拡大する可能性が ある。加えて、土壌呼吸は増大が予想され、その結果、今後 NEP は低下し、北極域の CO₂のシンクとしての機能は弱まる 可能性が示された。

今後、将来予測の精度を高めていくためには、まず気候変動 そのものについて正確な予測が不可欠である。北極域の CO₂



図 2.2.10 GTMIP Stage2 に参加した 3 つの生態系モデルの NPP の現在 (1981–2010 年) (a)と将来 (2071–2100 年 (b) 、 および土壌呼吸の現在 (c) と将来 (d) の比較。

吸収の重要な舞台である森林帯では、乾燥によって NPP は低 下し、加えて気温の上昇がさらなる乾燥ストレスを招く地域が あり、気温とともに降水量の予測値も正しくなければならない。 加えて、北極域・亜北極域には、降水量が少ない地域にも森林 帯が成立している。これは夏期の気温が低いことや地下に永久 凍土が存在することによって利用できる水分が確保できるため であると考えられる。将来予測のためには、このような環境に 成立する森林帯の樹木の応答を再現できるモデルが必要である。

大気メタン濃度の上昇

大気メタン濃度の上昇は、2000年から2005年にかけていっ たんほぼ止まっていたが^{2),3}、図2.2.11に示したようにその後 再び濃度の上昇が観測された。このような、大気メタン濃度の 再上昇にともなって、メタンの炭素同位体比は低下したことが ニーオルスンでの観測から明らかになった。地表面から大気に 放出されるメタンのうち、湿地など微生物起源のメタンはその 同位体比が低いことが知られている。従って、これらの観測結 果は、メタン濃度の上昇が地表面からの放出量の増大に依ると すると、湿地からなどの微生物起源のメタンフラックスが原因 であることが示唆された。



図 2.2.11 スバールバル・ニーオルスンにおける大気メタン 濃度とメタン炭素同位体比(a)、およびそれらの季節変動成分 を除いた変化トレンド(b)

OH ラジカル濃度:大気メタン濃度を支配するもう一つの要因 OH ラジカルは対流圏における主要なメタンのシンクで、大 気メタン濃度を決めている主要な要因の一つである。OH ラジ カル濃度の直接観測は非常に困難であるため、対流圏ではOH ラジカルとのみ反応するメチルクロロホルムの濃度を観測する ことによって推定されてきた。メチルクロロホルムは自然界で は生成されず、もっぱら人為起源の物質であり、その放出量は 既知である。図 2.2.12 は、OH ラジカル濃度の南北半球の比を 変えて大気化学輸送モデルで計算したメチルクロロホルム濃度 の南北半球間の差をプロットした図である。これとメチルクロ ロホルムの観測結果を比較することにより、OH ラジカル濃度 の南北半球間の比を求めると、南北間でほぼ同じ(0.99)であ ると見積もられた。これまでの見積もりではOH ラジカル濃度 は北半球の方が高いと見積もられていた。今回の研究で得られ た 0.99の推定値を用いれば、北半球のメタンソースはこれまで 考えられてきた値より小さく、南半球では大きいことを示唆し ている。



図 2.2.12 大気化学輸送モデルで計算された OH ラジカル 濃度の北半球/南半球の比とメチルクロロホルムの北半球 と南半球の濃度差の関係

2. 北極広域雪氷変動

執筆者:榎本浩之 杉浦幸之助 掘 雅裕 東久美子

北極域の融雪期間は短くなってきている

北極陸域の積雪期間は春の顕著な気温上昇に伴い短くなっ ていることが指摘されている。本事業の雪氷課題では、現地観 測及び衛星観測により、積雪変動の実態と陸面モデルの再現性 を検証する際に必要となる積雪期間や消雪時期のデータの取得 を行なった。北半球積雪域面積の30年超のトレンドを解析した 結果、全ての季節において減少傾向を示すことを明らかにした (図2.2.13)。また、乾雪・湿雪の判別を近赤外域反射率と熱 赤外域輝度温度の閾値処理にて行う手法を開発して衛星データ に応用し、乾雪・湿雪それぞれの分布域を表すデータセットを 作成した(Hori et al., in preparation)。その結果、湿雪域の 割合が、春季、夏季に増加傾向にあり、同時期の積雪域の融解 が進行していることが明らかになった。 積雪被覆期間の経年変化を解析したところ、ユーラシア大陸 の東西方向に非対称なコントラスト(西側で大幅な短縮化が進 行している様子)を確認した(図 2.2.14)。北極温暖化に伴う



図 2.2.13 季節ごとの積雪面積の長期変動(1978-2015)。 全期間において積雪面積の縮小が起きている。



図 2.2.14 過去 30 年間の北半球積雪に関する(a) 被覆期間の平均 値(日)、(b) 積雪被覆期間のトレンド(日/30 年)、(c)積雪消失日 のトレンド(日/30 年)、(d) 積雪開始日のトレンド(日/30 年)。 北極域の積雪期間の気候値および過去 30 年間の変動傾向。ほぼ全 域での積雪期間の短期化が起きている。変化が大きなところでは1 か月以上の短縮化に及ぶ。ユーラシア大陸では北緯 66.5 度以上の地 域では積雪期間が長い。一方ユーラシア西部では積雪期間が短く、 それがさらに短期化していることがわかる。 積雪域の応答に地域差があり、北欧では積雪期間が1ヶ月程度 も短くなっていることがわかった。

それぞれの地域で積雪の変動は土壌水分と植生に影響を及 ぼし、炭素収支を変化させる可能性がある。羽島ら(2015,私 信)は、動態植生モデルの入った地球システムモデルを用いて、 植生と気候のフィードバックを考慮すると、気温-積雪-植生量 の相互作用によってこれらの変化が増幅することを示した。

国際年輪データベースの年輪データの解析結果では、北極・ 亜北極域の年輪幅指数は春(3月-5月)の気温と正の相関が見 られるサイトが多い。一方で、年輪幅指数は夏の降水量への依 存性が非常に強いため、春の融雪時期の変化の影響は明確では ない場合も多い。生態系モデルの出力も同様で、4月と5月の 気温との相関が一部に見られるが、降水量との相関が非常に高 いため、全体としては春の融雪のタイミングの影響ははっきり しない地域が多い。一方で積雪期間が1ヶ月程度も短くなって いることが示された北欧について、春の気温と年輪幅指数の関 係を調べたところ、近年樹木の成長が良くなっている場所で は春の気温と年輪幅指数の間に有意な正の相関が見られた。こ れに対して、成長が悪くなっている場所では、春の気温と年輪 幅の間の相関ははっきりしなかった。このことは、成長期間中 に充分な水分が利用できる地域(つまり温暖化にともない成長 が良くなっている地域)では春の気温が高く成長期間が早く始 まるほどその年の成長量は大きくなるが、乾燥によって成長が 制限される環境の場所では成長期間が早く始まっても成長量が 増大するとは限らないということを示している可能性がある。

北極域で観測される顕著な環境変化の一つである積雪期間 の減少は、生態系の NPP や NEP に影響をおよぼす可能性があ る。春の融雪の早まりと秋の積雪の遅延は、成長期間が長くな る可能性があることを意味しており、それぞれの地域で、その 影響を把握していく必要がある。 フラックスが相対的に乾燥静的(顕熱+位置)エネルギーフラ ックスより重要であると考えられている⁴⁾。

研究課題3では、1979年以降について、再解析データ用い て、近年の大気による極向き熱輸送に長期変化があるかどうか を調べた。その結果、北緯70度で評価すると、1980年代から 2000年代にかけて潜熱フラックより乾燥静的エネルギーフラ ックスが増加していたこと、また変動の時間スケールでみると 短周期成分(1ヶ月より短い周期成分)ではなく、準定常(1 ヶ月以上の長周期)成分が主に寄与して熱輸送が増加していた ことが分かった(図2.2.15)。さらにこの結果を用いて、乾燥 静的かつ準定常な熱輸送成分と全熱輸送を比較すると、北緯70 度における全熱輸送の経年変動・トレンドに対して乾燥静的か つ準定常な熱輸送成分が卓越して寄与している事が示された (図2.2.16)。

ただし、中緯度帯から北極域への熱輸送が長期に変化してい るかどうかの解析では、再解析データの中で質量保存則が成立 しておらず、精度良く長期変動・変化を評価することができな いという問題を抱えている。現在、この問題を解決するために 新たなる解析手法を試行中である。



図 2.2.15 成分ごとに分解した、1979-1988 年と 2001-2010 年の二 つの期間における大気による極向き熱輸送の差。



図 2.2.16 乾燥静的かつ長周期成分の熱輸送と全熱輸送 量の関係。各点は年平均した値を 1979-2010 年の期間で 示す。特に赤は 2000 年代を示す。

力学的要因による熱輸送の長期変化

予備段階ではあるが、北緯 70 度における熱輸送の長期変化 を考えるとき、温度の変化に比較して熱輸送を担う南北風の変

3. 北極域-中緯度帯間の熱輸送

執筆者:浮田甚郎

中緯度帯から北極域への極向き熱輸送の変化傾向

従来、北半球中高緯度における大気による極向き熱輸送(以下、熱輸送と言う)については、これまでレーウィンゾンデ観 測、もしくは再解析データを用いた気候値の解析結果しかなく、 熱輸送が現在どのように変化しつつあるのかについての知見は ほぼ存在しない状況と言える。また、現在進行している温暖化 の時間スケールでは、世界気候研究計画第3次結合モデル相互 比較プロジェクト(CMIP3)のデータを用いた解析から、潜熱
化が重要であることが分かってきた。このことは、少なくとも この緯度帯では温暖化そのものの影響よりも、温暖化による大 気循環場の変調が大気熱輸送の長期変化・変動にとって重要で あるという事を示唆している。

熱輸送と大気循環場の変化が全球に及ぼす影響

さらに解析を進めると、乾燥静的エネルギーフラックスの中 でも、とくに、冬季の顕熱フラックスの変動が重要である事が わかった。冬季の北極域は、中緯度からの熱輸送が宇宙への長 波放射によってバランスし冷源として機能している。従って、 冬季の熱輸送の増大は、地球温暖化によって北極域の冷源とし ての機能が強化されている事を示唆している。さらには地球の 熱収支全体の構造変化は、熱的要因(昇温)だけによって決ま るのではなく、力学的な大気循環場の変化が極めて重要である ことを示している。

大気熱輸送の変化は、戦略研究目標1の北極域の温暖化増幅 の原因でもあり、また戦略研究目標3aで述べるように、特に シベリアを含む中高緯度の陸域における極端現象を引きおこす 要因の一つでもある。これらの変化は、すでに述べたとおり、 陸域生態系に大きな影響を及ぼし、炭素循環の変化を通して全 球の気候へも影響を及ぼすことが考えられる。

4. 北極域の氷河・氷床融解による海水準変動

執筆者:榎本浩之 杉山慎 大畑哲夫 斉藤冬樹 竹内望

強い温暖化シナリオが現実となれば小型氷河は消滅しグリ−ン ランド氷床の融解が進行して海水準を上昇させ全球に影響を 及ぼす可能性がある

全球の環境変化につながる北極圏からの影響として、氷床の 質量減少と海洋への淡水流入が海水準を上昇させることがあげ られる。特にグリーンランド氷床の質量減少は近年加速してお り、なぜ加速しているか、今後どのように変化するかは、北極 のみならず、海水準上昇を危惧する多くの地域にとっても重大 な課題である。個々のスケールは小さいものの多数ある北極域 の氷河群ではいちはやく質量減少が始まり、それに近年のグリ ーンランド氷床の変化が加わっている。

北極域の氷河での現地調査による融解過程の観測、および長 期変化データの収集によりモデル計算の検証を行なった。また グリーンランドにおける現地調査から、氷床変化の力学過程と して未知の様相が多く残されている氷河末端の海洋へのカービ ングについて観測データの収集とモデルの精度改良を行なった。 また、氷河融解域を覆う汚れをもたらす不純物や微生物の観測 も行われた。

北極域の氷河変動に関しては、国際氷河インベントリーに登録されている全北極氷河群の変化に対し気候予測モデルを用いた将来変化の推定を行なった。氷河・気候データの揃っている環北極地域・アルタイ山脈を対象として、領域モデル(RCM)によるデータを用いて HYOGA モデルの検証を行うとともに、計算方法を改善し、質量収支の変動予測を行なった(図 2.2.17)。



図 2.2.17 国際氷河インベントリーによる北半球氷河群の気 候データを用いた将来予測

その結果、温暖化シナリオ RCP4.5 では、21 世紀中の地域氷 河質量収支の値は、小型氷河が消滅するため、全体として頭打 ちになる一方、強い温暖化のシナリオ RCP8.5 では、気温上昇 の影響が顕在化して、全北極氷河群の質量は減少する一方とな ることが分かった(Zhang et al., 2016a)。

グリーンランド氷床においても IPCC, AR5¹に向けた氷床モ デル比較実験に参加し、変動予測を提出した。海洋と接した地 域では、海水に接触することによる融解、および潮汐によって 浮力が変化することによる流動変化が末端部の質量変化に重要 であることが明らかとなった。また、これらの効果を加えるこ とにより質量収支に関するモデル再現が向上し、海水準変動の 予測精度も向上した(図 2.2.18)。

グリーンランド氷床の質量変化に関して、国際氷床モデルプ ロジェクト SeaRISE (Bindschadler et al., 2013)を含むさま ざまな将来予測実験(百年スケールの温暖化応答実験)を行っ た。気候などの境界条件、氷床力学過程、モデル構成などさま ざまな要素の不確定性に起因するグリーンランド氷床変動の不 確定性を評価し、モデル間のばらつきは氷床力学過程より、表 面質量収支の計算過程の違いと初期条件(モデルで仮定した現 在の氷床の質量収支)に強く影響されることが明らかとなった。

SeaRISE のモデル間のばらつきについての解析は Saito et

al. (2016a) としてまとめられた。氷床力学モデル (IcIES) に基づいて構築されたグリーンランド氷床変動史を入力値とし て、固体地球モデリング (アイソスタシーを考慮にいれて、氷 床体積の増減により地殻が浮き沈みする現象を再現するモデル) によるグリーンランド沿岸域の完新世海水準変動を再現した。 当該地域の地殻変動に対する地球内部粘性構造の依存性を検証 した結果、従来の地球内部粘性構造モデルを用いた海水準変動 は、地形地質学的観測値を十分説明可能であり、氷床力学モデ ルにより構築された氷床変動史は、グリーンランド沿岸域にお ける約1万年の時間スケールの固体地球変動に対しても、十分 適用可能であることを示した。

Future ice mass loss computed with refined models



図 2.2.18 グリーンランド氷床変動モデルの比較。日本から三つの モデルが参加し、氷床融解量、海水準上昇を計算した。



図2.2.19 SeaRISE (Bindschadler et al.,2013) によるグリーン ランド氷床の温暖化実験結果。A1B シナリオ下での500年の体積 変動を示したもの。SICOPOLIS、 Elmer/ICE、 IcIES が日本 から参加したモデル。

引用文献

- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.doi:10.1017/CBO9781107415324
- 2) Dlugokencky, E. J., Bruhwiler, L., White, J. W. C., Emmons, L. K., Novelli, P. C., Montzka, S. A., Masarie, K. A., Lang, P. M., Crotwell, A. M., Miller, J. B., Gatti, L. V., 2009. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH4 burden, Geophys. Res. Lett., 36, doi:10.1029/2009GL039780.
- 3) Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T., Yamanouchi, T., 2006. Temporal variations of the carbon isotopic ratio of atmospheric methane observed at Ny Ålesund, Svalbard from 1996 to 2004, Geophys. Res. Lett., 33, L01807.
- 4) Hwang, Y-T., Frierson, D. M. W., Kay, J. E., 2011. Coupling between Arctic feedbacks and changes in poleward energy transport. Geophs. Res. Lett., 38, doi:10.1029/2011GL048546.

Ⅲ.戦略研究目標3

a.北極域における環境変動が日本周辺の気象に及ぼ す影響の評価

戦略研究目標代表者:浮田甚郎

1. 北極-中緯度気候リンク

執筆者:山﨑孝治 浮田甚郎

はじめに

北極-中緯度気候リンクに関して日本のグループの研究によ り、本事業開始以前に海氷の変動が大気循環に対して充分に大 きなインパクトを持ちうる事が報告されていた¹⁾。この研究で は、オホーツク海の海氷変動を対象にしていたが、その拡張と して北極海の海氷、とくにバレンツ-カラ海の海氷変動とシベリ ア高気圧との間に力学的関係が存在すること、またその結果と して北極の海氷変動と極東の寒気の強弱に関して関係があるこ とが指摘されていた²⁾。本事業では、これらの研究結果をふま えて、「北極域における環境変動が日本周辺の気象に及ぼす影 響の評価」として戦略研究目標 3a の設定が行われた。本節で は、それをより地域的に広げた、北極・中緯度間の気候、特に冬 の気候に関わる関係について本研究で分かったことを以下述べ る事とする。

上記のバレンツーカラ海の海氷とシベリア高気圧との間にあ る力学的関係に関しては、惑星スケールのロスビー波(以下、 惑星波と呼ぶ)の伝播が重要な支配要因であることが既に分か っており、それに加えて、惑星波の伝播の強化は成層圏の極渦 を弱化する事、また成層圏極渦の変動のシグナルは北極振動

(Arctic Oscillation, AO) として下方伝播する事が既往研究で 指摘されていた^{3),4)}。これらの知見をふまえ、本研究では、特 に成層圏-対流圏結合に注目して、北極の海氷変動が日本さらに は北半球中緯度の気象・気候にたいしてどの様な影響を及ぼす かについて、大気大循環モデル(AGCM)による感応実験およ び再解析データを用いた解析を行った。

実験設定とデータ

本研究で実施した数値シミュレーションでは、AGCM として 地球シミュレータの AFES ver.4.1.の T79L56(水平解像度約 1.5 度、鉛直 56 層で上端を約 60km)の仕様を用いた。AFES ver.4.1 は Honda et al., 2009²⁾でも用いられたモデルであるが、 本研究では、モデル水平分解能をより高く、成層圏-対流圏結 合を陽に見るためにモデル上端を高度約 30 km までから高度 約 60km まで引き上げた。数値実験は 1979–1983 年の 5 年間 を平均した境界条件 (海面水温 (SST) 及び海氷密接度 (SIC)) を与えたものを control (CNTL 多氷) 実験とした。さらに、 近年の海氷減少をふまえて北半球の海氷だけを 2005-2009 年 の5 年間で平均した条件を与えた NICE 小氷実験を行った。こ の二つの実験では1年間のスピンアップ後、各々60 年間積分し た結果を平均して、さらにそれらの差を見る事で海氷減少の影 響評価を行った (今昔実験)。境界条件として用いた SST 及び SIC の観測データは the Merged Hadley NOAA/OI SST and SIC⁵⁾ である。大気データは ECMWF の ERA- Interim⁶⁾と JRA-55⁷⁾の両方を用いた。AO index や NAO (北大西洋振動) index は NOAA-CPC のデータを用いた。期間はいずれも 1979-2011 年の 33 年間である。尚、以下述べる今昔実験の結 果の詳細は Nakamura et al. (2015b, 2016)、Jaiser et al. (2016)、Hoshi et al. (2016) にまとめられたものでそれら を是非参照していただきたい。

結果のまとめ

図 2.3.1 (上段) は 850 hPa 面における気温偏差モデル結果 を示す。ここで偏差とは、二つの実験のそれぞれの 60 年平均 の差として定義され、多氷年に対する少氷年への変化をあらわ す。



図 2.3.1 (a) 冬 (12、1、2月) 平均の AFES 今昔実験による海氷減少 による 850hPa における気温変化(少氷-多氷)。片シェイド(/)は 95%、 両シェイド(X)は 99%で差が有意な所。単位は℃。(b) 東西平均した 850hPa 気温変化。薄水色は陸地のみ、黒色は全体。(c) 11 月の北極の デトレンドした海氷面積変動に回帰した冬(11、12、1月)平均の 850hPa 気温の偏差。海氷の 1 σ減少に対応する値。ERA- Interim 再解析デー タによる。(d) (b)と同じ。ただし、ERA-Interim 再解析データによる北 極の海氷面積の減少に対応する気温の偏差。

図 2.3.1 (上段) より、数値シミュレーションにより北極の海 氷が減少する事に伴って、冬季に、中緯度陸域とくにシベリア 域で低温化の変化が見える。これは統計的にみても有意で、東 西平均するとその緯度依存性がよりはっきりとする(図 2.3.1 右図)。高緯度(>60度)では高温変化が強く出ているが、こ れはそもそも実験の設定として境界条件の海氷を減らした事を 反映している。次に、観測事実を図 2.3.1 (下段) に示す。ここ では、11月の北極の海氷面積変動から長期トレンドを抜いて基 準化した海氷時系列に線形的に回帰した同じ冬(11、12、1月) 平均の850hPaでの気温の偏差を示す。これを見るとモデルの 計算結果と非常に整合的であることが分かる。低温偏差の応答 が現れる地域は、主にシベリア、ヨーロッパ、北米であるが、 それぞれの地域について、小氷実験の60冬に関して多氷実験 の気候値と比較した冬(12-2月)平均の850hPa気温偏差のヒ ストグラムを図 2.3.2 で示す。これを見ても、取り上げた3地 域全てで低温方向に確率密度関数がシフトしており、またその 程度はシベリアが最も顕著であること(青線と四角で示す)、 即ち確率密度関数のシフトに地域特性がある事が言える。



図 2.3.2 冬(12、1、2月) 平均の AFES 今昔実験による海氷減少に よる 850hPa 気温の変化(少氷-多氷)。ここでは少氷実験 60 年分に 関して多氷実験の平均からの変化を、シベリア、北米、ヨーロッパ地域 で平均した値をヒストグラムで表した。

次に海氷の減少に対して大気循環場がどの様に応答したかを 見た。まず多氷・小氷実験の 60 冬に関して、それぞれの北極 振動(Arctic Oscillation, AO)を計算した。ここで北極振動と は、北緯 30 度以北の 500hPa における高度場に対して主成分

(EOF)解析を行ったときに計算された第1モード(分散の寄 与が最大となる卓越する空間パターン)のことで、その指標が 負の時(負の位相)には北緯60度を含めた中緯度・亜寒帯域 の上空の西風が通常より弱い状態(東風偏差)となる。図2.3.3 は多氷実験と少氷実験における北極振動指標の確率密度関数を 比較したものである。これを見ると、明らかに小氷実験では、 北極振動が負の位相の向き(左向き)にシフトしている事が見 て取れる。一般に北極振動が負の位相になる事に対応して、上 空の西風が弱まる事だけではなく、ストームトラックが低緯度 側にシフトする事、また中緯度での極端現象の発現頻度が増え る事が報告されており、図 2.3.1~2.3.3 の結果は極めて整合的 と言える。



図 2.3.3 北極振動指標のヒストグラム(棒:左目盛り)と推定した確率密 度関数(線:右目盛り)。横軸は基準化した指標値。赤は CNTL(多氷) 実験、青は NICE(少氷)実験。



図 2.3.4 (左上) 60°N における東西平均東西風偏差 (m/s) の時間・高 度断面図と(左下) 40–90°N、100hPa における渦熱フラックス(K m/s) の時系列。それぞれ 11–12 月平均で基準化したバレンツーカラ海海氷 指標との回帰係数。(右上) 60°N における東西平均東西風偏差の時間・ 高度断面図 (少氷ラン-多氷ラン)。マイナスの値は、少氷ランにおい て、上空の西風が弱まったことを示す。単位は m/s。(右下) 40–90°N, 100hPa における渦熱フラックスの時系列 (NICE-CNTL)。単位は K m/s。

背景で述べたように、北極振動の極性と成層圏の循環には密 接な関係があるが、上で述べた北極振動の負の位相へのシフト がどの様にしてもたらされたかを示すのが図 2.3.4 である。右 上に極渦の強さを表すのに代表的な北緯 60 度における東西平 均東西風の時間-高度断面図を示す。これを見ると、12月から 1月にかけて成層圏上部に負の偏差(即ち冬季成層圏を特徴付 ける西風、極渦、の弱化)が現れ、そのシグナルが2月にかけ て下方に伝播し対流圏に達する様子が見える。右下の図では、 この成層圏上部の負偏差に先立って、100hPaにおける惑星波 に伴う極向きの熱輸送(40°以北の平均)が増加している期間 が続いていたことが分かる。即ち、図2.3.3で示された対流圏 における北極振動の負の位相へのシフトが、成層圏での波-平 均流の相互作用およびその下方へのシグナルの伝播で起きてい る事を強く示唆している。実際に、これを観測と比べたのが図 2.3.4 左図になるが、1月に極渦が弱化する事、またそれに先立 って極向きの熱輸送が増加していることなど、図2.3.1 同様、 数値実験の結果と極めて整合的な描像を示す。

ここで鍵となっているのは惑星波に伴う極向きの熱輸送であ るが、その時空間の変化は、子午面におけるラグランジェ的循 環の変化を伴う事が知られている⁸⁾。ここで詳細は割愛するが、 シミュレーションの結果から、中緯度から高緯度にかけての残 差子午面循環が強化されていることが分かった。この循環の変 化をもたらしたのは、数値実験の設定より海氷面積の減少であ る。実験設定として、海氷の境界条件を1979–1983年の多氷 時期より2005–2009年の少氷時期に変化させたことで、70°以 北の平均値として3.6 Wm²の熱が大気下層を暖める。その結 果として起きる大気の応答として残差子午面循環が変化される が、この子午面循環は高緯度域では下降流となり断熱圧縮によ り大気柱を加熱する。量的に見積もると、850–300 hPa の層に 対して加熱(2.7 Wm²)する事が分かった。また、これまで見 てきたように、この海氷の減少に伴う残差子午面循環の強化に 関しても観測事実と数値実験の結果が極めて良く対応していた。

これまでに、北極の気候システムにかんして海氷・アルベド フィードバック(ice-albedo feedback)等の様々なフィードバ ック過程が提唱されてきたが、今回の我々の研究で、新たに子 午面の大気循環を介した力学的フィードバック過程が存在して いることが分かった。ここで興味深い事実はこの力学的フィー ドバック過程が海氷・アルベドフィードバック過程と同様に、 正の向き、即ち北極の大気-海氷 - 海洋結合系において温暖化 をより進める方向に働く事である。

まとめ

ここ数年の間の我々の研究により、海氷に関係する北極と中 緯度間における気候に関する力学的関係の描像がかなり明らか となってきた。世界的に見ると、複数のグループがこのテーマ に積極的に取り組んでおり、モデル実験の結果と観測事実の積 み重ねで成層圏の関与が徐々に明らかにしている^{9,10)}。また、 ドイツの Alfred Wegener Institute のグループとは今昔実験の 結果を共有し解析を進めている (Jaiser et al., 2016、 Hoshi et al., 2016)。その他、北極と中緯度間における気候に関する力 学的関係に関する AMIP もしくは CMIP 的手法を用いた研究 計画 (Belmont Forum など)が国際共同研究の枠組みの中で 準備されている。今後、気候の予測可能性の分野と融合してこ の分野はますます研究が盛んになる事が予想される。今回の本 事業の中で戦略研究目標 3a として日本が率先して研究成果を 発表した事で、日本がこの分野で世界的にも主導的な役割を果 たす事が出来る土台を構築する事が出来たと言える。

最後にここで述べた結果は、今まさに起きている北極での環 境変動、とくに海氷減少に伴う大気循環の変化を理解しようと したものである。今後、温暖化がより進み北極の海氷がさらに 減少していった場合、同じ結果を伴うとは限らない。今後の北 極環境変動がどの様に大気場に影響を与え、さらには中低緯度 の陸域、海の変化を引き起こし、ひいては北極-低緯度間でど の様に気候システムが変化するのか、今後の研究による詳細な 現象のメカニズムの理解と、それに根ざす気候予測の発展が強 く望まれる。

2.日本における寒波、大雪と北極変動の関係

執筆者:浮田甚郎 本田明治 岩本勉之

はじめに

前項では、北極-中緯度間の気候リンクの結果についてまと めたが、それでは北極の環境変動の影響がどれだけ、どの様に 日本の気象、気候に影響を及ぼすのであろうか?本項では、本 研究で明らかに成った事、またこれからの課題等について述べ る事とする。それにはまず、北極海氷変動とシベリアの温度環 境との関係、さらに、シベリアの寒気と日本の積雪の関係とい う2段構えで見ていく事とする。

北極海氷変動とシベリアの気温変動

図 2.3.5 は北極海の海氷のなかで、特に中緯度との気候リン クに関して重要であるバレンツーカラ海の海氷時系列と気温と の関係を示している。例えば、図 2.3.5 左で示されているユー ラシア東部の青い領域は、前節でも述べたように近年バレンツ ーカラ海の海氷が少ない夏・秋以降の冬季に極東シベリア域で 低温偏差が起きていた事が分かる。例えば、シグナルの強い極 東シベリア域を平均した時系列(指標)を計算すると、右図の ように極東シベリア域の気温偏差に対して似たような経年変動 をすることが分かる。例えばこれら二つの時系列の相関係数は 長期のトレンドを抜いて計算しても0.45であった。



図 2.3.5 (左) 11 月のバレンツーカラ海(15–90E, 70–85N)の海氷面 積に回帰した 12–1 月平均した 925hPa における気温偏差(海氷の1標 準偏差の減少に対応)。(右)黒線は、規格化した 11 月のバレンツー カラ海の海氷面積偏差の時系列。青線は規格化した極東シベリア域 (100–130E, 40–60N)で空間平均した 12–1 月の上空 925hPa 気温偏 差の時系列。

シベリアの寒気と日本の積雪

次に日本の積雪との関係を見るために、国内13箇所(稚内、 羽幌、小樽、江差、青森、秋田、新庄、新潟、高田、富山、福 井、舞鶴、鳥取)の1986/1987年から2012/2013年の27冬の 冬季(12-1月)で積算した積雪データを地点ごとに規格化した 上でそれら13地点の平均を取った積雪指標を作成した。さら に、この日本の広い領域の積雪の状況を表す指標と図2.3.5 で 用いた極東シベリア域の上空(925hPa)の気温、即ちシベリ アの寒気の強さの気温を表す指標とを比較したのが図2.3.6 で ある。これを見ると、東シベリア寒気の変動と主に日本海側の 広い地域における積雪量の変動との間に有意な負(-0.72、強い 寒気と正の積雪)の相関関係があることが見て取れる。

ただし、北極の海氷変動と日本における積雪もしくは寒波と の直接の関係は、ここで2段階に分けて別々に評価したほどに は強くはない。例えば、北極の海氷変動と東シベリア寒気変動 の間の相関係数が0.45、東シベリア寒気変動と日本の積雪変動 の間の相関係数が-0.72であるのに対して、バレンツーカラ海 の海氷変動と日本の積雪変動の間の直接の相関係数は0.17で あり有意とは言えない。これは、極東シベリアの寒気がバレン ツーカラ海の海氷以外の要因でも変動する事、また日本の積雪 に関しても、シベリア寒気の強弱の他に別の要因、例えば日本 海の海面水温、熱帯の影響などを受ける事、さらにはそれぞれ が内部変動を持つ事などが原因である。



図 2.3.6 横軸は図 2.3.5 で用いた規格化した極東シベリア域 (100-130E, 40-60N) で空間平均した 12-1 月の上空 925hPa 気温偏 差の時系列、縦軸は国内 13 ヶ所の 12-1 月で積算した積雪指標。



図 2.3.7 (左) 12-2 月で積算した降雪量をもとにした積雪インデックス を国内 185 ヶ所で計算し、その空間分布に関して主成分(EOF)解析 を行って作成した PC1で線形回帰した冬(12-2 月)平均した海面気圧 場。(右)同様にして計算した 850hPa の気温場。いずれも赤は正偏差、 青は負偏差をしめす。解析期間は 1986/1987 から 2012/2013 の 27 冬で ある。

以上の結果をふまえて、日本の積雪に関する情報から総観規 模での大気擾乱の空間パターンを評価しようと試みたのが図 2.3.7 である。ここでは、先ほど述べた積雪データと比較してよ り広範囲・高密度の AMeDAS データを用いた(詳細は、

Iwamoto et al., in prep.)。これは、日本の国内の積雪変動に は強い地域性がある事が分かっており、その地域特性の影響を 加味した積雪変動をまず理解するために、冬季日本の積雪に卓 越して現れる空間パターン(前項で述べた主成分解析を積雪デ ータに施しそこで得られた EOF 第1モード)に対応する指標 をまず作成して、この新たな積雪変動指標に線形的に関係した 大気場偏差を求めたものである。この図 2.3.7 を見ると、日本 の積雪が多いときには、シベリア高気圧が強いだけではなく、 北西太平洋域が低気圧偏差であること(一部はアリューシャン 低気圧の変動と重なる)が分かる。またこの西高東低のパター ンが強いときには極東シベリアの 850hPa の気温も低温偏差で ある事が分かり、図 2.3.5~2.3.6 と整合的である。さらに図 2.3.7 左図では、等圧線がバレンツ海上で南西の北大西洋から暖 気移流するパターンを示しており、日本の積雪変動がこの地域 的に限定された変動ではなく、北大西洋域の大気変動、さらに はおそらく海洋の変動をも含む広い地域における現象と係って いることが示唆される。

まとめ

以上をまとめると、本研究により海氷変動を介して北極の環 境変動が冬の日本の気象に影響を与えている事が分かってきた。 また、そこに至る力学的プロセスも徐々に明らかになりつつあ る。前項で述べた様に、近年 30 年余りの海氷分布、またはそ の減少傾向に伴って、冬季、極東シベリアの寒気が強くなる傾 向はかなり強い応答のようである。一方、100 年スケールでは、 シベリアを含む陸域で温暖化が予測されている。この 20-50 年 ぐらいの時間スケールでどの様に北極それも大気 - 海洋間の熱 物質の交換に直接関係する海氷が変化し、さらにその変化に伴 って日本を含む中緯度の気候がどの様に変化していくのか、ま たそこに双方向の結合があるのか、その根底にあるプロセスを 正確に理解することが、我々に課せられた危急の課題であると 言えよう。 引用文献

- Honda, M., Yamazaki, K., Nakamura, H., Takeuchi, K.,1999. Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk. J. Clim., 12, 3347–3358.
- Honda, M., Inoue, J., Yamane, S., 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. Geophys. Res. Lett., 36, L08707.
- Baldwin, M. P., Dunkerton, T. J., 2001. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. Science, 294, 581–584.
- Polvani, L. M., Waugh, D. W., 2004. Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes. J. Clim., 17, 3548–3554.
- 5) Hurrell, J., Hack, J., Shea, D., Caron, J., Rosinski, J., 2008. A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the Community Atmosphere Model. J. Clim. 21, 5145-5133.
- 6) Dee, D. P., and 35 co-authors, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q. J. R. Meteorol. *Soc.*, 137, 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- 7) Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebita, A., Moriyama, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., Takahashi, K., 2015. The JRA-55 Reanalysis: general specifications and basic characteristics. J. Meteor. Soc. Japan, 93, 5–48.
- 8) Andrews, D. G., McIntyre, M. E., 1976. Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration. J. Atmos. Sci., 33, 2031–2048.
- 9) Sun, L., Deser, C., Tomas, R. A., 2015. Mechanisms of stratospheric and tropospheric circulation response to projected Arctic sea ice loss. J. Clim., 28, 7824–7845.
- 10) King, M. P., Hell, M., Keenlyside, N., 2015. Investigation of the atmospheric mechanisms related to the autumn sea ice and winter circulation link in the Northern Hemisphere. Clim. Dyn., doi:10.1007/s00382-015-2639-5.

Ⅲ. 戦略研究目標 3

b.北極域における環境変動が水産資源等に及ぼす 影響の評価

戦略研究目標代表者: 菊地 隆

北極海・周辺海域の海洋酸性化の実態と基礎生産力の 維持機構

執筆者: 菊地 隆 西野茂人 川合美千代 平譯 享

地球温暖化の兆候が最も顕著に現れる現象の一つとして、北 極海で急速に海氷が減少していることが挙げられる。この海氷 の減少は予測を上回る速さで進行しており、早ければ今世紀中 頃までに北極海は夏季に海氷が存在しない海域になると推測さ れている。その中で、例えば太平洋側の海域(チャクチ海・ボ ーフォト海など)は、既に夏季にほぼ海氷が存在しない季節海 氷域となっており、様々な環境変化とその生態系への影響が観 測され始めている。戦略研究目標 3b(本項・次項)は、その環 境変化の実態を明らかにし、水産資源への影響評価に資する海 洋生態系の変化を明らかにすることが目的であった。これに関 して、本研究事業で得られた成果をとりまとめて示す。本項で は、全球の中で最も早く進行しており現在の北極環境問題の中 で最も注目されているものの一つである北極海の海洋酸性化の 実態と温暖化が海洋酸性化にもたらす影響について、そして海 洋生態系を支える基礎生産の維持機構及び近年の変化について まとめて記す。なおこれと関連する物理化学環境の変化や海洋 酸性化、基礎生産力の変化にかかる詳細な研究成果については、 第3章VI.「北極海環境変動研究:海氷減少と海洋生態系の変化 研究課題6」に記載したので参照してもらいたい。

海洋酸性化への影響

産業革命以降、大気中の CO2 濃度が増加している。この人為 起源の CO2が海水中に溶けることで、海水の pH が低下してい る (アルカリ性の海水が酸性側に近づく)。これが海洋酸性化 である。海洋酸性化が進むと、海水中の炭酸カルシウムの飽和 度が低下するため、炭酸カルシウムの殻や骨格をもつ石灰化生 物にとってその形成・維持が困難になる。

北極海は世界の中で最も早く海洋酸性化が進んでいる海域 として知られている。特に、河川水や海氷融解水の影響が大き い沿岸域やカナダ海盆の表層低塩分水、そして有機物分解に起 因して CO2 濃度が高い大陸棚底層水に関して、アラゴナイト

(炭酸カルシウム結晶形の一つで比較的溶けやすい)が既に未 飽和の状態になっていることが観測されている。しかしながら、 観測されている時期・海域が限られているため、炭酸カルシウ ム飽和度の時空間変動(特に冬季の状態)については分かって いなかった。本研究事業では、係留系を用いた時系列観測の結 果を用いて炭酸カルシウム飽和度の季節変動の推定を行った

(Yamamoto-Kawai et al., 2016) $_{\circ}$

係留系観測は、太平洋側北極海の中の代表的な生物学的ホッ トスポットであるチャクチ海南部ホープ海底谷で行った。これ までの研究結果から、同海域は高い基礎生産力・生物活動が見 られることが知られている。同海域における現場観測からは、 2012年9月(「みらい」北極航海の結果)には同海域の底層 水はアラゴナイト未飽和の状態になっていた。一方で2013年7 月のおしょろ丸航海の際には未飽和の水塊は見つからなかった。 これは、秋季には表層で生産された有機物が海底に沈降し CO2 に分解されていたのに対して、春季には有機物の分解よりも光 合成が盛んで海水中の CO2 が多く消費されていたためと考え られる。また現場観測の結果からは、水温・塩分・溶存酸素の データからアラゴナイト及びカルサイト(炭酸カルシウムの結 晶形の一つで、比較的溶けにくい)の飽和度を推定する経験式 を算出した。これを係留系による通年観測の結果に適用するこ とで、これまで不明であった通年での炭酸カルシウム(アラゴ ナイト・カルサイト)飽和度の季節変化の推定を行った。

その結果、春のブルームに伴う光合成により炭酸カルシウム 飽和度は一旦上昇するが、夏から秋にかけて有機物の分解によ る CO₂の増加により大きく低下して、アラゴナイト・カルサイ ト未飽和に達することが明らかになった。また冬季の間もアラ ゴナイトに対しては未飽和の状態が継続していた。これは冬季 も溶存酸素濃度が未飽和であることに起因しており、有機物の 分解や呼吸の維持が低い炭酸カルシウム飽和度を継続させてい ることが考えられる。年間を通じてみると、チャクチ海南部の 底層水がアラゴナイトについては9月から翌年5月までの年間 約 66%の期間が未飽和、カルサイトについては秋季の年間約 16%の期間が未飽和の状態になっていることが示された。

得られた炭酸カルシウム飽和度について、大気中の CO2濃度 増加の影響を調べた。人為起源による CO2放出がなかった頃の 大気中 CO2濃度(280 ppm)を仮定して今回の観測結果を元に チャクチ海南部の底層の炭酸カルシウム飽和度を推定した結果、 現在に比べて飽和度は高くなり、アラゴナイトに対して未飽和 な期間は約 1/3(年間約 24%)となった。これらの値は生物生 産量や有機物分解量に依存するが、温暖化に伴うこれらの変化 を考慮したとしても、生物生産と有機物分解が盛んな生物学的 ホットスポットでは産業革命以前からアラゴナイト未飽和の状 態が起きていたことを示唆している。一方、今後も CO2濃度が 増加して例えば 650 ppm(50年後に起こり得る推定値)に達 したと仮定すると、アラゴナイト未飽和の時期は年間の 82%に も達することが推定された。光合成が盛んな一部の季節を除き、 ほぼ未飽和の状態になると言える。カルサイトについても年間 約57%が未飽和になると見積もられた。このことは、人為起源 CO2の増加は炭酸カルシウム未飽和の時期(と海域)を大きく 拡大することを示唆している。そしてチャクチ海における主要 な底生生物や海鳥・セイウチなどの餌である二枚貝などの石灰 華生物に大きな影響が及ぶことが考えられる。

今回の調査では、炭酸カルシウム飽和度の変化について調べ ることで、海洋酸性化の影響の時間的な範囲とその変化を推定 した。今後は、実際に炭酸カルシウム未飽和の状態に対して、 生物がどのように応答しているのかを調べることが急務である。 特に今回調査を行ったような生物学的ホットスポットは、海洋 酸性化に対する生物の脆弱性・耐久性や、さらには物質循環・ 海洋生態系全体への影響を明らかにするうえで極めて重要な海 域と考えられる。今後も継続的な調査が必要とされている。

基礎生産の維持機構とその変化

北極海及びその周辺海域では、春季から夏季にかけて海氷後 退に伴ってケイ藻類を主とする大型の植物プランクトンが大規 模な氷縁ブルームを起こす。また十分な栄養塩供給があれば、 夏季から秋季にかけてもブルームを起こす場合がある。我々が 対象としている近年海氷減少の影響が顕著に出ている北部ベー リング海からチャクチ海にかけての太平洋側北極海域(特に陸 棚域)では、海底深度が浅く、植物プランクトンに対する動物 プランクトンの捕食圧が低いために、ブルームで生産された有 機物の多くは海底に沈降し、底生生物に大量の餌を供給するこ とになる。さらにその底生生物を利用する大型の海生哺乳類も 多く存在しており、生産性そして生物多様性が高い海域となっ ている。

特に海氷の減少は、海氷後退の早期化という形で、春季から 夏季にかけての氷縁ブルームに影響を及ぼす。図2.3.8は、氷 縁ブルームの模式図と、その海氷減少による影響を簡単にまと めたものである。海氷の後退(融解)が進むことで光合成に必 要な入射光量が増加する。加えて太陽からの熱で暖かくなった 海は植物プランクトンの成長を促す。つまりブルームの活発化 ・基礎生産力の増加に繋がる。一方で、夏季から秋季になると 海氷融解は海洋表層に多量の淡水(融解水)を供給する。この 融解水は栄養塩が乏しく、且つ海洋の成層を強化することで下 層からの栄養塩供給を阻害する。結果として、たとえ十分な光 が利用できても植物プランクトンが成長しづらい環境となり、 基礎生産力が増えない、もしくは減少することが考えられる。 このように海氷減少に伴う環境変化は海洋生態系を支える基礎 生産に対して正と負の影響がある。海氷減少が基礎生産に与え る影響を明らかにするためには、このような物理・化学環境の 変化を踏まえた上で、植物プランクトンのサイズ・群集組成な



図 2.3.8 海氷減少に伴う基礎生産への影響(模式図)。 (上) 氷縁ブルームのメカニズム、

(中)海氷減少による光環境の改善(好影響)、

(下)海氷減少による淡水の蓄積(悪影響)

(「)「海小威少による次小り軍損(芯影者

どの変化を季節や海域ごとに調べ、総合的な理解を深める必要 がある。

基礎生産および植物プランクトンのサイズを時空間的に広 く観測(モニタリング)するには、現場観測のみではなく衛星 観測を利用することが有用である。本研究事業の中で、北極海 用の基礎生産および植物プランクトン推定アルゴリズムを開発 した。基礎生産については、同海域の高い CDOM(有色溶存 物質)の影響を避けるためにクロロフィル a 濃度を使用せずに、 植物プランクトンの光吸収を用いて純基礎生産力を推定した。 このアルゴリズムを適用して 2002 年から 2012 年にかけてのベ ーリング海からチャクチ海にかけて基礎生産力の変化を調べた ところ、有意な増加傾向があることが明らかになった (Hirawake et al., 2012)。近年の海氷減少に伴って、北部ベーリング海からチャクチ海にかけての陸棚域では基礎生産力が 増加している可能性がある。

このアルゴリズムを利用して、春季ブルーム期の植物プラン クトンのサイズ組成の変化を評価し、海氷変動との関係を調べ た。16年間の衛星観測データを用いて調べた結果、海氷融解の タイミングが早い年ほど、春季ブルーム期に大型の植物プラン クトンが増加することが示された。そしてこの大型植物プラン クトンの存在比率が、この海域の年間基礎生産量を決める主要 因であることが明らかになった(Fujiwara et al., 2016)。

陸棚域に比べて、北極海の海盆域の基礎生産力は弱い。特に カナダ海盆では海氷融解水のみならず河川水などを含めた貯淡 水量が増加しており、その影響で小型の植物プランクトンが優 占する(基礎生産力が弱い)環境になっていることが分かって きた。このようなカナダ海盆域において、2008-2010年の「み らい」による現場観測と衛星観測の解析から、海氷減少に対す る植物プランクトンの群集構造の応答を調べた。この3年間で は、2008年の海氷後退が他の2年よりも1-2か月早く、海盆 域の海水温も高くなっていた。これと対応して、2008年には暖 かい環境を好むハプト藻類が優占していたのに対して、2009・ 2010年は冷水域を好むプラシノ藻類が優占していた。今後さら に海氷減少が進み開水面となる期間が長くなると、植物プラン クトンの群集構造に変化が生じることが示唆される。そして、 このような変化は食物連鎖や生物地球化学過程に影響を与える ことが考えられる(Fujiwara et al., 2014)。

近年の海氷減少に伴って、北部ベーリング海を含む太平洋側 北極海の陸棚域では基礎生産が増加していることが分かった。 特に海氷の早期後退が大型の植物プランクトンが優占しやすい 環境を作ることで基礎生産量の増加に繋がることが明らかにさ れた。基礎生産の変化は CO2の海洋への吸収とも関係している ことが分かった。海氷減少に伴って基礎生産力が増加する海域 では生物過程による CO2 吸収能力の増加が見られたが、融解水 による成層化が進むと CO2の吸収が妨げられていた(夫津木 修士論文,2014)。このように衛星観測や現場観測から海氷減 少に伴う植物プランクトンの応答を部分的に明らかにすること ができたが、海氷直下の付着藻類(アイスアルジー)について は観測が難しいために十分な知見が得られていない。現在数値 モデルを用いた推定などを行っているが、今後はモデル・観測 の両面で調べていく必要がある。この他にも、海氷減少に伴っ て注目されるようになってきた現象として秋季ブルームが挙げ られる。春季から夏季にかけての氷縁ブルームに比べてその基 礎生産量はまだ大きくないが、特に生物学的ホットスポットで は、物質循環や食物連鎖を通じた生態系に対して影響が及ぶこ とが考えられる。将来予測される更なる海氷減少とそれによる 海洋物理・化学環境の変化に対して、基礎生産力・植物プラン クトン群集構造などの応答を調査しつづけるとともに、食物網 を介した高次生物との関係を調べていく必要がある。このよう な知見を蓄積することで、将来の北極海における基礎生産や海 洋生態系の予測が可能になると考えられる。

4. 温暖化・海氷減少に伴う北極海・周辺海域での優占 グループの変化

執筆者: 菊地 隆 山口 篤 綿貫 豊

海氷の減少に代表される急速な環境変化が進行している北極 海域では、既にその影響が海洋生物に及んでいることが報告さ れ始めている。例えばホッキョククマやセイウチなど海氷とと もに生活をしてきた生物は、海氷減少が進むにつれてその狩り の場そして生活の場がなくなり始めている。一方で季節的に移 流・回遊している生物(例えばクジラ・サケなど)にとっては、 海氷減少は活動の場の拡大を意味している。それぞれの生物に は生きていく上での好適な環境があることを考えると、海氷分 布や水温の変化など環境の変化はそれぞれの海域における優占 グループの変化を起こすことが容易に想像できる。本項では、 本事業の期間を含めて近年の観測から分かってきた北極海およ びその周辺海域での優占グループの変化とその影響をまとめて 記す。

これまでのおしょろ丸の航海から、北部ベーリング海からチ ャクチ海にかけての太平洋側北極海では、動物プランクトンで はカイアシ類が、底生生物・魚類の中ではホッキョクタラが、 生存量や食物連鎖などの観点から鍵となる種(鍵種)であるこ とが示されている。そこで、ここでは特にカイアシ類とホッキ ョクタラに注目して、近年の観測された変化をまとめて記す。 合わせて高次捕食者である海鳥・海生哺乳類の調査から分かっ たこと、今後についての考察を取りまとめた。

なお個別の研究成果の詳細については、前項と同様に、第3 章VI.研究課題6を参照してもらいたい。

動物プランクトン群集の変化

動物プランクトンは、海洋生態系において基礎生産を高次生 物に受け渡すエネルギー転送者としての役割を持つ。その中で カイアシ類は最も数的(abundance)・重量的(biomass)に 多く、北極海における鍵種として知られている。カイアシ類は 大西洋・北極海・太平洋と大洋毎に分布する種が異なっており、 その中では太平洋産種に大型種が多い。「みらい」やおしょろ 丸、カナダ砕氷船などの航海においてプランクトンネット採集 により試料を採取・解析するとともに、ホルマリン固定され保 存されていた過去の試料を合わせて解析することで、近年の変 化を明らかにした。

おしょろ丸では、近年の観測(2007、2008、2013年)以前 に1991年と1992年にも夏季チャクチ海での観測を行っていた。 これらの観測で得られた試料を用いて動物プランクトン群集の 水平分布を調べた(Matsuno et al., 2011)。群集構造のグルー プ分けにはクラスター解析を用いた。またそれぞれの年につい て得られた動物プランクトン群集構造の水平分布を比較した。 これらの解析の結果から、1991/1992年に比べて2007/2008年 の方が出現個体数・重量ともに多いことが明らかになった。ま た群集構造の水平分布については、1991/1992年に比べて 2007/2008年は分布が北側にシフトしていることが分かった。 特に2007年にはチャクチ海南部に太平洋産種が優占する群集 が見られた。2007/2008年は太平洋水の流入や海氷減少の影響 が顕著に現れていた年であったことから、分布のシフトが起こ されたことが推測される。また、チャクチ海の北にあたる北極 海カナダ海盆西部で行ったセジメントトラップ係留系で時系列 的に得られた試料を解析した結果から、太平洋産種の出現は、 海氷がなくなり開放水面になる8-9月に多く見られることが分 かった(Matsuno et al., 2014b)。近年、ベーリング海峡から 北極海に流入する太平洋水の量が増えていることが報告されて いる。このことからも、夏季の太平洋産種の北極海への流入が 増加傾向にあることが裏付けられる。

このようにチャクチ海での動物プランクトンの群集構造に ついては、その水平分布の北側へのシフト、そして太平洋産種 の流入が明らかになってきた。では流入した太平洋産種は北極 海に定着することが可能なのであろうか。この定着可能性を評 価するために、「みらい」航海において採取されたカイアシ類 の船上飼育実験を行った。北極海で採取された太平洋産種の雌 成体を現場の水温条件下で飼育し、産卵・孵化を観察した

(Matsuno et al., 2015 b)。現場実験の結果から、太平洋産種 の雌成体が北極海の現場環境で太平洋と同じように産卵を行う ことが確認された。しかしながら孵化率が太平洋と北極海で大 きく異なっていた。太平洋では93%の孵化率があったと報告さ れていたが、今回の北極海での実験では7.5%と極めて低い孵 化率であった。これは元来の生息域である北太平洋では本種の 成熟・受精・産卵が水深1000 m 前後の深海で行われるのに対 して、チャクチ海のように浅い(水深50 m 程度)環境に輸送 されて正常な受精が行えなかったことを示唆している。同海域 での試料採取において、雄成体が1 個体も出現しなかったこと も未授精のため孵化率が極めて低くなったことを支持している。

海氷減少に伴う北極海の環境変化は、動物プランクトンの群 集構造の分布を北側にシフトさせていることが明らかになった。 しかしながら、流入した太平洋産種が現時点で北極海に定着す ることが困難であることも明らかになった。今回の調査ではカ イアシ類に注目したが、最近の観測からこれまであまり見られ なかった動物プランクトン(オキアミなど)が増え始めている との報告もある。今後の群集構造の変化や、環境変化が流入し た太平洋産種にどのような影響を及ぼすかなど、注意深く観 測・調査を継続する必要がある。

ホッキョクタラ

これまでのおしょろ丸の調査結果から、ベーリング海陸棚域 ではスケトウダラが、北部ベーリング海からチャクチ海にかけ てはホッキョクタラが、その食物連鎖におけるエネルギー転送 者としての最も重要な鍵種であることが示されていた。カイア シ類・ヨコエビ類などの動物プランクトンを餌とし、海鳥・ク ジラなどのより高次の捕食者の餌となっている。ホッキョクタ ラは、氷縁・海氷下で産卵をして、卵の状態で冬を越し、海氷 が融解する時期になると孵化すると考えられている。おしょろ 丸の航海において、ホッキョクタラの仔魚のサイズ・密度を調 べたところ、海氷融解からの日数が短い地点で密度が高く、サ イズが小さいことが分かった。このことからも、ホッキョクタ ラが海氷縁で産卵・孵化していることが示唆される。

このホッキョクタラの北部ベーリング海およびチャクチ海 における密度の経年変化を調べたところ、1990年代の観測と 2007/2008年および 2013年の観測結果との間に統計的に有意 な違いは見られなかった(わずかな増加傾向は見られた)

(Kono et al., 2016) $_{\circ}$

2013年の調査において、底引きトロールで採取されたホッキ ョクタラの食性・胃充満度・肥満度などを調べることで、その 生態・分布に与える餌生物の影響を調べた(Nakano et al., 2015)。氷縁に近いチャクチ海中央部ではカイアシ類を始め 様々な動物プランクトンを食べていたのに対して、北部ベーリ ング海やチャクチ海南部ではゼラチン質プランクトン(尾虫類) を食べていた。両海域での胃充満度は、チャクチ海中央部は低 く、北部ベーリング海やチャクチ海南部は高かった。しかしな がら肥満度は両海域でほぼ同じであった。北部ベーリング海や チャクチ海南部で胃充満度が高いにも関わらず肥満度が高くな かった原因としては、脂分が極めて低いゼラチン質プランクト ンが主な餌になっていたためと考えられる。チャクチ海南部か らベーリング海峡北部にかけて行われた ROV 観測の結果から も、同海域にゼラチン質プランクトンが極めて多く分布してい ることが確認された。2014年の「みらい」での観測などでも、 ゼラチン質プランクトンが分布していることが確認されている。 もし海氷減少や海水温の上昇がゼラチン質プランクトンにとっ てより好適な環境であるならば、ホッキョクタラの生態に影響 を及ぼす可能性があることを示唆している。言い換えれば、水 温・流れ・基礎生産量などの環境変化から直接受ける影響のみ

ならず、環境変化がまず餌生物に影響を及ぼしてそこから更に 高次捕食者の生態に影響を及ぼし得ることを、考えていかなけ ればならないと言える。

海鳥・海生哺乳類の調査から分かること

北極海の生態系において、底生生物や魚類を捕食する海鳥や 海生哺乳類を調査することはそれ自体の生態を明らかにするこ とに加えて、例えばその分布・回遊状況の調査結果から餌生物 (動物プランクトンや底生生物・魚類など)の分布を推定でき るなどの点で有益である。

南半球のタスマニア島で繁殖し、5-9月の非繁殖期をベーリ ング海やチャクチ海などで過ごすハシボソミズナギドリについ て、ジオロケーター(光記録によりその緯度・経度を推定する 装置)を用いた移動追跡調査を2年間行った(Yamamoto et al., 2014)。その結果ハシボソミズナギドリは、夏(5-8月)はベ ーリング海南部で過ごし、秋(9月)には多くの個体がベーリ ング海峡からチャクチ海南部を利用していることが分かった。 また2010年と2011年の結果を比較したところ、水温が高かっ た2011年のほうがチャクチ海の利用度が高かった。ハシボソ ミズナギドリはオキアミを主たる餌としている。このことから、 オキアミがその適水温を求めて北に分布を移すのに応じて、ハ シボソミズナギドリも北に移動していると推測できる。「みら い」やおしょろ丸による船舶による現場観測からも、オキアミ の大型個体が多い秋にハシボソミズナギドリが多く観測されて いることも分かった。

これまではカイアシ類-ホッキョクダラを軸とする食物網 が太平洋側北極海の海洋生態系で重要な役割の担っているとさ れてきた。ところが今回の研究成果から、ゼラチン質プランク トンやオキアミの流入とそれに伴う捕食者の移動・回遊が起き ていることなどが示唆されるようになってきた。海氷減少に伴 う環境変化は、単に群集構造の北へのシフトを示すだけでなく、 鍵種の変化、より上位の食物網の構造を変える可能性があるこ とが示された。

今後についての考察

本戦略研究目標では、北極海における環境変動が水産資源に 与える影響として、太平洋側北極海の海洋生態系で鍵となる種 (カイアシ類・ホッキョクタラ)を中心に研究を進め、その影 響を評価してきた。その影響として、当初から考えられていた ような群集構造の極側へのシフトが明らかにされた。しかしな がら、例えば北極海に流入した太平洋産種のカイアシ類はまだ チャクチ海で越冬できないことや、温暖化に伴う餌生物の変化 が必ずしもホッキョクタラの成長にプラスに働かないこと(ゼ ラチン質プランクトンの増加のため)など、その変化は単純で はないことも明らかにされてきた。今後は、本事業で行ってき たような学際的な環境変動モニタリングを継続して行うと共に、 環境変化に対する生物の種としての応答や、生物の種としての 生活史の理解、生物間の相互作用の理解が、北極海海洋生態系 そして北極海の水産資源の可能性や保護のために必要不可欠で ある。

現在の北極海(特に陸棚域)の海洋生態系は、春季ブルーム (氷縁ブルーム)による高い基礎生産力があるのが特徴の一つ である。しかしながら現時点ではこの春季ブルームの際にまだ 海水温が高くないためにこれを捕食する動物プランクトンが十 分に活動していない。その結果、多くの有機物が海底に沈降し、 底生生物の餌となる環境(Pelagic-Benthic scheme)が作られ ている。今後、温暖化が進行して海氷融解の早期化が更に進む と、春季ブルーム期に動物プランクトンの活動が十分に活発化 し、さらにはこれを捕食する浮遊性の魚類が多く現れる状態

(Pelagic-Pelagic scheme) になり得ると言われている(図 2.3.9)。今回の我々の成果からは、まだそのような大きな変化 は起きていないと言える。今後起こることが予想されている更 なる海氷減少が、どのような過程を経て Pelagic-Pelagic scheme になり得るのか(ならないのか)、注目していく必要 がある。



図 2.3.9 北極海海洋生態系の模式図(左)現在の状況(Pelagic-Benthic scheme)、(右)将来起こり得る状況(Pelagic-Pelagic scheme)

 Ⅳ. 戦略研究目標 4
 北極海航路の利用可能性評価につながる 海氷分布の将来予測

戦略研究目標代表者:島田浩二

1. 海洋熱循環と海氷集積効果による海氷分布変動

執筆者:島田浩二 吉澤枝里

はじめに

2007年に起こった海氷激減までは、北極海の海氷変動は不連 続的な減少が特徴的であった。それ以降、9月の北極海の最小 面積値に減少トレンドは無く、急激な変化の時代は終わり、あ る平衡点の周りで変動するというステージにある。実際、海洋 の貯淡水量は2008年以降、それまでの増加は止まり、小さな 変動に留まっている。これは、北極海を支配する海氷が多年氷 から一年氷に変化したことに起因すると考えられる。特に、北 極海航路で利用される海域においては、カナダ海盆南部海域に 間欠的な多年氷の移動がみられる以外は、ほぼ一年氷に覆われ る状態であり、一年氷の厚さを知ることが、融解期における海 氷の寿命を知ることに繋がり、さらに、北極海航路上の海氷分 布を知るための鍵となると考えられる。一年氷の厚さを決定す る重要なプロセスは、冬の海氷形成による厚さ増大(熱力学的 成長)と海氷の積み重なりによる厚さ増大(機械的成長)の2 点である。これが、研究サブ課題 7-3 の着眼点であり、本事業 における主要研究課題の2軸である。



図 2.4.1 太平洋側北極海 (74–78°N、150–180°W) における、 海洋上層 (20–150m) の貯熱量と 7–8 月の海氷密接度の関係。

高精度なリアルタイム海氷速度ベクトル・データの重要性

北極海の寒冷な大気側からの冷却であれば、海氷形成の条件

は十分満たされており、形成量に変動をもたらす主要因は、上 層海洋熱の変動にあると考えられる。上層海洋熱の変動は、① 海洋循環による水平熱輸送、②開放水面での日射による表層混 合層加熱による。第3章にて後述するが、上記②については、 秋の海氷形成遅延には影響を与えるものの、次年度以降の海氷 分布に与える影響は小さい。これは、海氷成長率は厚さととも に著しく低下するためであり、数週間から1カ月程度の海氷形 成遅延による影響は大きくないためである。上記①については、 亜表層の太平洋夏季水層に蓄えられた熱が、冬の間、長期に渡 って影響を与えるため、積算形成量に影響を与えるものと思わ れる。実際、本事業期間に渡り、太平洋夏季水の影響を受けた 海氷減少がみられる太平洋側北極海での上層海洋貯熱量(太平 洋水層: 20-150m深) と夏の海氷密接度には有意な関係がある (図 2.4.1)。この太平洋水層の貯熱量変動は、日射による加熱 によるものではなく、上層海洋循環による熱輸送量変動による ため、上層海洋循環の形成メカニズムとその予測法を確立する ことが求められる。上層海洋循環は海面応力により駆動される ため、精緻でかつリアルタイムに得られる海氷速度ベクトルの モニタリング・データが必要となる。

海氷の積み重なりが生じないのであれば、一年氷の寿命や残 存可否の鍵となる海氷厚は、熱力学的な成長量によってほぼ決 まるが、海氷が積み重なり厚さを増大する場合には、その効果 を考慮せねばならない。海氷の積み重なりは、海氷速度ベクト ルが収束し、収束により海氷密接度が1を越える場合に起こる もので、その時間スケールは数時間から数日のスケールが卓越 する。海氷速度ベクトル・データは公開されているものもある が、漂流ブイの軌跡との比較を行い、ラグランジュ的な精度評 価が行われているものが主である。例えば、雲や表面融解など の影響により、衛星データから求めた海氷速度にスパイク的な ノイズが混入したとしても、長期に渡るラグランジュ的な精度 評価では統計的にこのようなノイズは除去されてしまう。また、 ノイズ除去のため時間的なフィルタを施すと、短時間で起こる 収束発散に追従できない。また、例えば、NSIDC で公開され ている海氷速度ベクトルデータは融解期の誤差が非常に大きく、 研究利用に資する精度が確保されていない。また、微分値であ る収束発散にはさらに大きなエラーが生まれる。さらに、メル トポンドが拡大する場合には、非現実的な海氷速度の発散等が 起こる。我々は、AMSR-E データに対し基礎を構築した時間・ 空間に依存しないアルゴリズム(GCOM-W: 2008-2011)を 基に、本事業期間に運用が開始された AMSR-2 を用いた海氷速 度ベクトル計算アルゴリズムの高度化を行った。アルゴリズム の開発は、アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究セン

して認定された。

ターー宇宙航空研究開発機構(IARC-JAXA) Information
 System (IJIS) プロジェクト(2011年11月–2015年3月)
 によってなされたものであるが、アルゴリズム開発に必要な現場観測データの取得は本事業による係留系観測で行われた。

海氷速度ベクトル算出のアルゴリズムを簡潔に述べる。我々 は、L1R輝度温度データに対して、独自のマッピングを行い、 3つの周波数の垂直および水平偏波輝度温度データに対し、 6.25km×6.25km と 2.08km×2.08km の一日平均のマッピン グデータを作成している。次の3つのウィンドウサイズ、50km ×50 km、100 km×100 km、150 km×150 km、に対し隣接 する時刻のデータに対する面相関を計算し、相関係数上位3位 までを海氷速度ベクトル候補とする。つまり、54の速度ベクト ル候補(6つの輝度温度マッピングデータ、3つの面相関ウィ ンドウ、相関係数上位3位)をまず求めている。海氷速度の上 限閾値を越える速度ベクトルや、エクマンドリフト方向を考慮 し、風向的にあり得ないものを候補から外すというスクリーニ ングを行う。その後、候補として残った速度ベクトルの平均値 を求める。この平均値と整合性が取れない個々の速度ベクトル 候補を除外する。このような一連のスクリーニングの後、高周 波データ、小さい面相関ウインドウサイズ、高相関係数である ものを優先し、6.25km×6.25kmマッピングデータベースの海 氷速度ベクトルデータとしている。このベクトルデータから、 面相関をサーチするエリアは同定できているので、そのエリア のみ 2.08 km×2.08km のマッピングデータに置き換えて、同 様の方法で海氷速度ベクトルを算出し、最終データとしている。 この方法では、2.08 k m// Δt (Δt :時間的に隣接するマッピン グデータの間隔、約24時間)が計算手法に起因する速度ベク トル誤差になる。これはおおよそ、2.4cm/sとなる。係留系に よる現場海氷速度データとの比較から、11月~4月の結氷期に おいては、海氷速度誤差は2.54cm/s、5月~10月の融解期にお いては、3.38cm/s であった。但し、比較に用いた係留系は夏に は開放水面になる陸棚域近くの海域であり、最も厳しい条件で の精度評価結果である。海盆域の通年に渡って海氷に覆われて いる海域では、さらに精度は向上する。マッピングデータのさ らなる高分解能化も行ったが、元データの geolocation エラー (1km 程度)の存在により、精度は大きく変化しなかった。日 平均の海氷速度ベクトルデータを求めるに際し、上述した方法 が、精度的にも、リアルタイム・モニタのための必要計算時間 的にも最適であることが分かった。本アルゴリズムによる速度 ベクトルデータは、JAXAのGCOM-W1の研究プロダクトと

海洋循環の変動

海氷分布変動は特に太平洋側北極海で顕著であり、同海域で の海氷減少は海洋上層循環の強化に伴う陸棚域から海盆域への 海洋熱輸送量の増加が引き起こす、冬の海氷形成量の低下に起 因している¹⁾。したがって、海洋上層循環流量を定量的に把握 することは、海洋熱が海氷分布に与える影響を理解する上で不 可欠である。しかしながら、北極海での船舶による海洋現場観 測は夏に限定されており、海洋上層循環の卓越する変動時間ス ケールを現場観測データから同定することは困難であった。本 事業では、海洋上層循環の東西断面構造を観測するために2系 の基盤係留系(GAM-1、GAM-2)を設置し、得られた水温・ 塩分プロファイルデータを使って同海域における地衡流速の変 動を求めた。その結果、同海域での地衡流速の季節変動は約 1cm/s であり、平均流および経年変動振幅よりも小さかったこ とから、数年以上の時間スケールの変動については、夏の船舶 による現場観測データをその年の代表値として使えることが確 認された。また、循環中心が常にノースウィンド海嶺のすぐ東 に位置し、循環東部の力学高度偏差が無視できるほど小さいこ とから(図2.4.2)、循環中心での力学高度偏差を循環流量の代 替指標として利用できる。以上のことから、スベルドラップ・ バランスに基づいて、同緯度帯で空間平均した海氷運動の回転 成分から海洋上層循環流量を推定できるという方針が立った。



図 2.4.2 100dbar 等圧面における夏(7-9月)の力学高度偏差分布 (800dbar 等圧面を無流面と設定)。 **ベクトルは直前の冬(11-4 月)の海氷速度ベクトル[cm s¹]。

衛星観測データから計算される海氷運動の回転成分の時間 変動(図2.4.3 上)に対して、力学高度偏差(図2.4.3 下)の 時間変動は遅れて変動しており、海洋上層循環が表面応力に対 して遅延応答していることが分かる。このような海洋の遅延応 答、言い換えると、現在の力学高度偏差が過去の何年分の表面 応力の合成で推定できるかを調べるために重回帰モデルを導入 し、その係数から過去の表面応力の相対寄与を調べた。その結 果、過去約5年以内の表面応力の寄与率が高いことが分かった。



図 2.4.3 (上) 東西バンド帯 (74.4–77 °N,130–160°W) における海氷 速度の回転成分の平均値[s⁻¹]、(下) 循環中心 (74.4–77 °N,150–160°W) における力学高度偏差平均値 (=循環流量) [dynamic cm]。Yoshizawa et al. (2015) より引用、改編。

そこで、過去5年分のデータのみを用いて重回帰モデルを構築 したところ、循環中心の力学高度偏差(=循環流量)の推定値 は観測値とよく一致した(図2.4.4 上)。2006~2012年の力 学高度偏差の変動振幅が約11dynamic cm であるのに対して、 推定値の誤差は約0.2 dynamic cm であり、海洋現場観測デー タを使わずに、変動振幅の約2%未満の精度で循環流量をモニ ターすることが可能であることが示された(図2.4.4下実線)。



図 2.4.4 (上) 循環中心における力学高度偏差[dynamic cm] (実線: 観測値、点線:推定値)、(下)観測値と推定値とのずれ(実線:再 解析海上風速データで推定した場合、点線:衛星観測データから計算 される海氷速度データで推定した場合)。Yoshizawa et al. (2015) より引用。

海氷の集積による海氷分布変動

太平洋側北極海で海盆域までおよぶ海氷後退が観測されてい る一方で、同海域の沿岸付近では、晩夏においても厚い氷が残 存する場合があり、その持続期間を予測することは北極海航路 利用に際し極めて重要である。この海氷残存メカニズムは、海 氷の積み重なりによる厚さの増大によるものであるものとし、 以下の研究を行った。海氷をラグランジュ的に追跡した軌跡に

沿って、海氷運動の収束・発散による海氷密接度の時間変動を 計算し、収束によって密接度が100%を超え、かつ、輝度温度 の関数により多年氷や比較的厚い一年氷と判別された場合のみ、 密接度が100%を超過した分が厚さに転化されるとし、そのラ グランジュ積分を積み重なりの指標(以下、有効収束積算値) として導入した。その結果、北極海航路上で頻繁に海氷が残存 するアラスカ・シベリア沿岸域で積み重なりによる海氷厚増大 が起こる傾向にあった(図 2.4.5)。航路利用の可否判断におい ては、9月の海氷面積最小値ではなく、沿岸域での海氷残存期 間が重要な情報となるため、7~9月の海氷密接度と直前の11 ~4月の有効収束積算値の相関を求めたところ、北極海北西航 路のチョーク・ポイントとして知られるアラスカ沿岸バロー沖 や北極航路上にあたる東シベリア海等で有意な相関関係が見い だされ(図 2.4.6)、海氷厚増大が起こる海氷運動の収束のみを 積算する手法を用いることにより、沿岸域の局所的な海氷分布 予測の抜本的な改善が行えることが示された。



図 2.4.5 5月1日の有効収束積算値の空間分布(2003-2011年)



図 2.4.6 5月1日の有効収束積算値と 7-9月の海氷密接度の相関係数 (r)。(緑色の線で囲まれた海域は有意水準10%で有意[r>0.58])

2. 北極海熱収支の変動と海氷

執筆者:羽角博康

海氷分布を決める要素として海面熱フラックスは最も重要で あるが、この両者は相互に依存する。厚い海氷は大気海洋間の 断熱材として働くため、ポリニヤをはじめとする開水域および 薄氷域は大きな海面熱フラックスを生じる領域として重要であ るとともに、大量の海氷を生産して他の領域の海氷分布に大き な影響を及ぼす。薄氷域での海面熱フラックスは海氷厚のわず かな違いに大きく左右されるため、薄氷域の海氷厚を正確に見 積ることは北極海熱収支及び海氷分布を考える上で欠かせない。

海面熱フラックスを北極海全域にわたって観測的に知るた めには人工衛星観測データを活用する必要があるが、海面高度 計等によって薄氷厚を十分な精度および時空間分解能で直接観 測することは現在のところ不可能である。本研究では、海氷面 放射輝度の水平偏波成分と垂直偏波成分の比が薄氷域では海氷 厚に大きく依存することを利用し、人工衛星搭載のマイクロ波 放射計 AMSR で観測される放射輝度から薄氷厚を推定するア ルゴリズムを開発した。開発されるアルゴリズムの検証のため には薄氷域の現場観測データが必須であるが、本研究ではチャ クチ海沿岸ポリニヤ域において係留観測を継続的に実施してお り、そこで取得された薄氷域の海氷特性に関するデータを活用 している(係留観測およびアルゴリズム検証の詳細については 第3章VII.研究課題7を参照)。

人工衛星観測に基づいて推定された海氷厚と気象場再解析 データセットを用いることにより、北極海全域に対する海面熱 フラックスおよび海氷生産量の時系列データセットを作成した。 このデータセットは後述する北極海モデルに対する重要な検証 材料となることに加えて、北極海氷分布の予測システムにおい て同化するデータとして活用することもできる。また、このデ ータを利用して近年の北極海氷変動におけるアイス・アルベド フィードバックの役割を解明した(詳細な定量的解析について は第3章を参照)。近年海氷量の大きな経年変動が観測されて いる北極海太平洋側 (図 2.4.7 右上、黒枠内) について、海氷 融解量(図 2.4.7 上、黒線)の経年変動から長期トレンドを除 いたもののうち殆どの部分は開水面における海洋熱吸収(図 2.4.7 上、赤線)によって説明される。一方、海氷融解が主に生 じる夏季の海氷融解量(図 2.4.7 下、黒線)はその直前である 初夏の海氷流動収束量(図 2.4.7 下、青線)と高い相関を持っ て経年変動している。すなわち、初夏の海氷流動収束が大きい (小さい)年には、その収束によって開水面が増加する(減少 する)ために海洋が大気から吸収する熱が増え(減り)、それ

Ice-ocean albedo feedback on summer ice retreat in the Pacific Arctic Sector



図 2.4.7 北極海太平洋側の熱収支と海氷変動の関係 (詳細は本文を参照)。

が北極海太平洋側の海氷量の経年変動を支配していることが示 される。

海氷分布を決める要素としては、北極海亜表層から海面に向 かって供給される熱も重要であり、ひいては太平洋および大西 洋から北極海に輸送される熱の働きが重要である。事実、近年 観測されている北極海太平洋側の顕著な海氷減少は、海洋循環 の変化に伴って太平洋側陸棚域から海盆域へ輸送される熱が増 加したことに起因することが指摘されている(前項参照)。一 方、大西洋側からは太平洋側からよりも高温かつ大量の海水が 北極海に流入するが、現在までのところその熱のほとんどは北 極海の深度 300 m 付近 (大西洋水層) にとどまり、乱流混合に よる弱い上方輸送を除いては直接的に海氷分布に影響を及ぼし ていないと考えられている²⁾。しかしながら 2000 年代の継続 的な北極海係留観測によって北極海大西洋水層の水温が顕著に 上昇していることが示されている³⁾。また、北極海では海氷減 少に伴って乱流混合が強化されつつあることも指摘されており、 将来的には大西洋からの流入水が北極海氷分布に大きな影響を 及ぼす可能性がある。特に、海氷分布の長期将来予測という観 点からは大西洋からの流入水の振舞を正しく表現できる数値モ デルが必要とされるが、従来の気候モデルでは、大西洋水流入 経路の解像度不足により、流入そのものがほとんど表現されて ない。

本研究では北極海氷の長期変動予測を信頼性高く行うこと ができる気候モデルの開発という観点から、大西洋から北極海 に流入する高温水を適切に表現することを主眼とした高解像度 海氷海洋モデルの構築を行った(モデルの詳細については第3 章を参照)。

北極海大西洋水層を形成する高温水はフラム海峡の東側を

通って北極海に流入する(図2.4.8右上:モデルでシミュレート された大西洋水層密度面上の水温分布)。フラム海峡では長期 にわたって海洋を横断する密な係留観測が実施されており、温 度・塩分・流速の面的な時系列データが得られている。構築し た高解像度海氷海洋モデルに再解析気象場データを境界条件と して与えた数値実験を実施し、その結果をフラム海峡の係留観 測データで検証したところ、このモデルは大西洋から北極海へ の熱輸送およびその経年変動を現実的に再現することが示され た。モデルで得られたフラム海峡における北向き熱輸送量(図 2.4.8 左上、赤線)の時系列に対して冬季海面気圧を回帰させた ところ、その空間パターンは北大西洋振動 (NAO) に近いもの となった(図 2.4.8 左下)。実際、北向き熱輸送の時系列と NAO 指標の時系列は95%以上の有意性で相関している。一方、フラ ム海峡を通過した後にユーラシア大陸棚縁に沿って西に向かう 熱輸送量(図 2.4.8 左上、緑線)の時系列はフラム海峡を北向 きに通過する熱輸送量とは有意に相関しない。この時系列に対 して冬季海面気圧を回帰させたところ、その空間パターンはシ ベリア高気圧の強弱に対応するものになった(図2.4.8右下)。 すなわち、大西洋から北極海に流入する熱量は総観規模の大気 変動モードと連動していることが示された。この結果はまた、 本研究で構築された高解像度海氷海洋モデルが、10年規模気候 変動に関連した海氷分布の長期予測に必要な要件を備えている ことを示す。



図 2.4.8 大西洋からの熱流入の時系列とそれに相関する大気変動パターン(詳細は本文を参照)。

北極海氷分布の長期予測を実際に行うためには、上述のよう な海洋長期変動を適切に表現できる気候モデルが必要とされる ことに加え、観測データに基づいて気候モデルを適切に初期値 化する手法が必要である。本研究ではアンサンブルカルマンフ ィルター(EnKF) 手法によるデータ同化を気候モデルの初期 値化および北極域気候の予測に適用するための開発を行った。 EnKF は様々な種類の観測データを容易に気候モデルに同化で きるという特徴があり、データ取得やプロセス理解の面で多く の課題が残る北極域研究では有効性が高いものと考えられる。 その中でも特に海氷データを同化する手法の開発に取り組み、 これを実現した。この新しく開発された手法を適用して実証的 予測実験や予測可能性研究を実施するまでには至らなかったが、 本事業開始以前に開発済みであった旧来のデータ同化手法を用 いてそれらの実験・研究を実施した(データ同化手法および予 測実験の詳細については第3章VII.研究課題7を参照)。

2000年時点、すなわち気候温暖化がある程度進行した時点に モデルを初期化した上で、2000年の気候外力(大気中温室効果 気体濃度、エアロゾル分布、太陽入射量等)を一定に与え続け て長期間の気候モデル実験を行ったところ、海氷面積は大きな 経年変動を示し、2007年に観測されたものと同程度の海氷激減 が100年に1~2度の頻度で生じた(図2.4.9)。現実の2007 年の海氷激減には海洋亜表層からの熱供給の影響が支配的であ るが、この気候モデル実験でそれは表現されていない。しかし ながらそのことから逆に、温暖化が進行して北極海氷量が減少 している状況下では、気候の自然変動のみによっても大きな海 氷分布変動が生じ得ること、および北極海内熱輸送の変動がな くてもそれが生じることが示された。



図 2.4.9 気候内部変動による北極海水面積の変動 (詳細は本文を参照)。



図 2.4.10 課題 7-1 の構成と連携

夏季北極海の海氷面積の減少に伴い、北極海を航路として利 用することが現実的になってきた。実際、近年では年間数十隻 の貨物船がロシア側の北東航路を通過航行しているし、200 隻 以上の作業船、貨物船が開発のためこの海域に入っている。北 極航路の安全で効率的な利用のためには、現在および未来の海 氷状況の把握、海氷が船舶に及ぼす影響の把握、さらにそれを 踏まえた航路の選定手法の開発が必要である。それぞれについ て研究を行い、それらを統合して北極海航行を支援するための システムの開発をすすめた。この研究は図 2.4.10 に示す様に、 北極航路の安全かつ効率的な利用を目指し、理学、工学、経済 学等非常に幅広い分野を連携融合したものであるが、相互理解 に基づく目標設定と緊密な協力により、当初予定通りの成果を 得たと言える。詳細は第3章VII.研究課題7に記すので、ここで は氷況のモニタリングと予測、航行支援システムのプラットホ ーム候補となる最適航路探索システムのプロトタイプ開発を中 心に記載する。

海氷厚のモニタリング

1970年代以降、人工衛星によって毎日の海氷分布が観測可能 になってきた。ただし、海氷の分布だけでは船舶の航行支援の ための情報として不十分である。とくに、海氷の厚さは氷海の 航行のためにもっとも重要な情報の一つである。ここでは人工 衛星データから、毎日の海氷厚分布を導出する手法の開発に取 り組んだ。そのために、北極域で他国の砕氷船を用いて、電磁 誘導式氷厚計やマイクロ波放射計、前方カメラ、さらに目視に よる観測を行い、カナダ海盆を中心とする海域で海氷の種類や 厚さ、マイクロ波特性等を観測した。こうして得られた観測結 果をもとに、人工衛星搭載のマイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer – EOS (AMSR-E) および AMSR2による観測データから海氷の厚さを推定するためのア ルゴリズムの開発をすすめた (Krishfield et al., 2014)。その 結果、厚さ1m以下の海氷については誤差20から30 cm で海 氷の厚さ分布を毎日推定することが可能になった。得られた厚 さ情報は後述の海氷中期予測にも利用され、予測精度の向上に 貢献した。

海氷短期予測

北極海の船舶航行支援のためには幾つかの時間スケールの海 氷予測が必要である。まず、北極を航行中の船舶の針路決定の ためには数日から一週間の時間スケールの短期予報が欠かせな い。そのために、北極海全体をカバーする全域モデル(分解能 25 km)と航路周辺の高解像度モデル(分解能 2.5 km)を用い て海氷分布の数値計算を行った。高解像度モデルを用いた計算 の結果、氷縁域での海洋-海氷相互作用を現実的に再現できる ようになり、海氷域の後退・前進の様子を再現できるようにな った(De Silva et al., 2015a,b)。この数値モデルを用いて、 複数の気象機関の気象予測を用いた海氷分布予測を試行した。 その結果、5日後の氷縁位置を、12 km 程度の精度で予測でき ることがわかった。

海氷中期予測

北極航路の利用計画の立案のためには、春の時点で夏季の海 氷分布を知るための中期予報が必要である。我々は春季の海氷 の厚さ分布に注目することにより、夏季の海氷分布の予測を試 みた(Kimura et al., 2013)。春季の海氷厚の正確な推定のた め、AMSR-EおよびAMSR2による観測データから独自に導出 した海氷の動き、さらに前述の海氷モニタリングにより開発さ れた手法による海氷厚を用いた4月末までの観測データをもと に解析を行い、7月から9月までの海氷分布を統計的に予測し た。予測結果は毎年5月に英語版と日本語版をウェブ上で公開 した(図 2.4.11)。本格的な予測は2011年から行い、その後 も手法の改良をすすめた結果、海氷域の後退の様子、航路の開 通時期*1、最小面積などを高精度で予測できるようになった。 2015年の予測では9月の最小面積を誤差2%で予測することに 成功し、航路の開通時期も誤差10日以内、最少時の海氷分布 についてもほぼ正確に予測できた。これによって、この予測を 夏季の北極航路利用計画の立案に役立てることが現実的になっ たと言える。人工衛星のデータを用いて統計的手法によって行 うこの予測は世界にも類を見ない独自のものであり、2015年の 予測結果は世界で最も優れたものであった。また、2015年の手 法を用いて過去の予測の再計算をしたところ、とくに極方向か らの厚い海氷の流入の影響を受けやすいカナダーアラスカ側の 海域で予測精度が改善した。



図 2.4.11 海氷中期予測の公開ウェブサイト

航行支援システム

船舶の航行支援のためには、海氷と寒冷域の海が船舶に及ぼ す影響を把握する必要がある。そこで、氷盤との衝突時に船舶 が受ける衝撃などについての水槽実験と数値モデリングを行っ た。また、現場観測と実験室実験により船体着氷の条件と特性 の把握および着氷を低減する方法の検討をすすめた。

さらに、輸送コストの考慮も必要であることから、貨物船の タイプごとに氷況に応じた北極海航路の航行時間とコストの試 算を行った。

海氷の状況とそれにもとづく安全性とコストを踏まえた上で、 客観的な最適航路が示されれば、実航行の航路選択に非常に有 用である。そこで、船の近傍スケールの最適航路探索手法と、 北極海全体スケールの海氷分布をもとにした最適航路探索手法 を開発した。船の近傍スケールでの航路選択は船舶に搭載され たレーダーを用い、海氷を識別したのち、船の旋回能力を考慮 しながら海氷を避ける最適ルートを選択する手法を開発した。 北極海全域スケールでは前述の海氷短期予測で用いた数値モデ ルによる計算結果をもとに、距離、所要時間、安全性の優先度 を任意に変えて最適な航路を計算する手法を開発することがで きた(図 2.4.12)。

以上の成果としての人工衛星による海氷厚の推定値、海氷漂

流速度の計算値、海氷中期予測の結果、北極全域規模の最適航 路探索を北極域データアーカイブ (ADS) で閲覧可能にした(図 2.4.13)。

これらの取り組みを通じて、北極海航路の利用可能性を検討 し、安全で効率的な航行を支援するための海氷現況のモニタリ ング、海氷予測が可能になった。さらに、船舶が北極海を航行 するために必要な安全とコストに関する知見を得て、それらを 踏まえた航行支援システムの雛形を作成することができた。



図 2.4.12 北極海全域スケールでの最適航路の選択例



図 2.4.13 ADS での海氷厚の表示例

注

*1 本研究では、全航路において海氷密接度15%以上の海域に入ること なく航行できることを「航路の開通」と定義した。実際には、砕氷船 支援により、より長い期間の航行が行われている。

引用文献

- Shimada, K., Kamoshida, T., Itoh, M., Nishino, S., Carmack, E., McLaughlin, F., Zimmerman, S., Proshutinsky, A., 2006. Pacific Ocean Inflow: influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. Geophys. Res. Lett., Vol. 33, L08605, doi:10.1029/2005GL025624.
- Padman, L., 1995. Small-scale physical processes in the Arctic Ocean. In Arctic Oceanography: Marginal Ice Zones and Continental Shelves. Eds. W. O. Smith Jr. and J. M. Grebmeir. Americal Geophysical Union, New York. 287 pp.
- 3) Dmitrenko, I. A., et al., 2008. Toward a warmer Arctic Ocean: Spreading of the early 21st century Atlantic Water warm anomaly along the Eurasian Basin margins. J. Geophys. Res., 113, C05023. doi: 10.1029/2007JC004158.

Ⅴ. まとめと今後の課題

プロジェクトマネージャ:山内 恭 連携コーディネーター:高田久美子

以上、2~4節を通して、戦略研究目標毎の報告を記した。各 研究課題で、また研究課題をまたがって進められた研究を通じ て得られた科学的成果の集約、それぞれの目標に対する「答」 が記されている。基本的にはこれで本事業の目的は果たしたこ



図 2.5.1.戦略研究目標1 ピラミッド図



図 2.5.2 戦略研究目標 2 ピラミッド図

とになるが、「研究プロジェクト」としては、やはり「全体で は何が言えたのか」「急変する北極気候システム及びその全球 的な影響の解明」の答えが最終的には求められる。往々にして、 特にわが国では、プロジェクトの最終まとめが行われないこと が散見されてきた。しかし、プロジェクトである以上、それな しに終わることは片手落ちである。研究を代表する者、今回は プロジェクト・マネージャの役割として、プロジェクトの最終 まとめ作成を試みた。特に問題が多岐にわたるため、本事業で は連携コーディネータ役を導入したので、共に併せてこの任に 当たった。

ピラミッド議論について

4つの戦略研究目標に対して7つの研究課題で の研究成果から「答え」を提示するという本事業 の構成については、第1章で詳細に述べた。戦略 研究目標を達成するために、分野ごとの研究推進 とともに、分野をまたがる連携研究や、観測とモ デルの連携研究の推進が強く推奨され、中間評価 における今後の留意点としても挙げられた。

そこで、まず戦略研究目標ごとに、関係する研 究課題での研究項目(Task)、各研究項目から論 文などとしてまとめられた研究成果(Output)、 個々の研究成果を総合して戦略研究目標に対する

「答え」となる科学的成果(Outcome)をピラミ ッド図として整理した。この手法は、深澤運営会 議委員の発案により、GEO (Group on Earth Observation)のGEOSS (Global Earth Observation System of Systems) 評価で採用さ れた Triangle 手法¹⁾を参考にしたものである。こ れによって、事業全体にわたって共通のアプロー チで、研究項目から研究成果、さらに研究成果を 総合した戦略研究目標に対する「答え」としての 知見を見渡すことが可能になった。このようなピ ラミッド図による研究成果の整理を行うことを通 して、連携研究が必要な箇所の洗い出しを行い、 目標に対する「答え」に向けて研究成果を集約す る道筋の検討を行った。

本章 2~4 節で戦略研究目標毎の報告を述べた が、これに対応するピラミッド図を図 2.5.1~図 2.5.4 に示す。全事業期間で進められた複数の分野 にまたがる Task が Output を生み出し、総合さ

(a)

目標3a:北極域における環境変動が日本付近の気象に及ぼす影響の評価 関係する研究課題:[3]大気



※ 点線は今後の課題

(b)

目標3b:北極域における環境変動が水産資源等に及ぼす影響の評価 関係する研究課題:[6]海洋生態系 Tasks



 $\boxtimes 2.5.3$ 戦略研究目標3ピラミッド図



図 2.5.4 戦略研究目標 4 ピラミッド図

れて戦略研究目標にたいする科学的成果 (Outcome)を導き出していることが一目瞭然となる。当 然のことながら、すべての研究テーマについて答え が得られたわけでは無く、今後の取り組みや発展が 期待されるものについては点線で示した。

全体まとめについて

このように、ピラミッド議論を通じて、各目標内 での科学的成果 Outcomes の位置づけ、関連付けを 進めたので、その結果を受けて最後に全体でのまと めに進もう。

プロジェクト全体でのまとめということは、戦略 研究目標毎の関係を定める必要がある。目標がばら ばらで、個別の目標が答えを得られたという段階に はとどまりたくない。まず第一に、戦略研究目標1. 「北極域における温暖化増幅メカニズムの解明」が 上がってこよう。本事業では、様々な現象の中で、 北極温暖化増幅が中心にあるという立場で研究を進 めてきた。北極温暖化増幅があって、そのため海氷 が減少したり積雪域の変化が起こったりしてアルベ ドの変化をもたらし、雲量の増減・分布の変化が起 こり、南北熱輸送に変化が起こり、これらがフィー ドバックしてさらに北極温暖化増幅を強める。そこ には、温度の非線形性の寄与や温度分布の影響、ブ ラックカーボンの影響等も加わる。こうした、北極 温暖化増幅をもたらす各要素の働き方、特に季節進 行に伴う各要素の役割の変転が極めて詳細に明らか にされた。さらに、個別フィードバックについても 検討がなされたが、観測結果からその考察を深める までには至らなかった。いずれにしても、この課題 が、北極変化の中心に位置している。

続いて、これら北極の変化が、北極に止まらず、 全球に影響しているということである。そこをきち んと理解してはじめて将来予測も可能になるという ことで、戦略研究目標2.「全球の気候変動および将 来予測における北極域の役割の解明」に繋がる。北 極温暖化増幅に端を発して、全球規模での大気循環 の強化やそれに伴う熱輸送の変化、ひいては異常気 象の増加が引き起こされる。また積雪期間の短縮や 地域の縮小など広域の積雪変動が起こる。氷河・氷 床の融解・崩壊が引き起こされ、それに伴う全球の 海水準変動への寄与が評価された。生態系の変化が 起こることで、炭素循環の変化をもたらし、大気中

CO2吸収の変化を生じる。大気の観測・解析からは近年の明瞭 な CO2 吸収の増加、即ち CO2 シンクとしての機能強化が示さ れたが、一方地上の生態系観測からは、温暖化により、生長が 良くなっている場所と悪くなっている場所があり、湿度や水に も規定され、一概には言えないことが明らかになった。将来的 には生物生産は低下し CO2 シンク機能は弱まる可能性が示唆 された。さらには、海氷の融解による淡水の増加から全球の海 洋熱塩循環の抑制にも繋がる。このように多くの全球をめぐる 変化が起こり、これらを正確に把握しないと気候の将来予測は 困難である。

最も顕著な北極域の変化は海氷の減少である。これは戦略研 究目標 4.「北極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の 将来予測」の課題であるが、基本的に北極の強い温暖化の結果 であると位置づけられ、戦略研究目標1から繋がっている。温 暖化による海氷の融解から海氷の分布変動、海洋の力学・熱循 環の変動が同時現象的に起こり、さらに広域の北極海の熱循環 や熱収支の変化をもたらしている。これらを基に海氷の分布予 測が高精度でなされ、航行支援システムの開発を併せ、北極海 航路の可能性が評価された。海氷分布や循環の変化は、さらに は北極温暖化増幅にもフィードバックし、また全球気候に対し ても影響している。特に、北極海から大西洋への淡水の流出が 全球熱塩循環を弱める可能性があるとのモデル結果も得られて いる。

これらの他、北極温暖化増幅はさらなる影響をもち、それが 戦略研究目標3.「北極域における環境変動が日本周辺の気象や 水産資源等に及ぼす影響の評価」になっている。一つは(3a)

北極温暖化の中緯度への影響、「中緯度リンク」と呼んでいる が、特に日本周辺の気象への影響である。既に、わが国の研究 を嚆矢に以前から言われてきた関係であるが20、あらためてそ の連関が成層圏を通じて引き起こされる成層圏・対流圏結合に よるものであることが明確化された。即ち、晩秋のバレンツ海・ カラ海の海氷減少に伴うプラネタリー波の強化が成層圏の極渦 を弱め、その影響が再び対流圏に及び偏西風ジェットの南下、 蛇行を伴う北極振動(AO;北半球環状モード NAM)負の状態 をもたらし、北極の寒気のシベリアから日本への吹き出しをも たらし、寒冬・豪雪を引き起こすという筋である。もう一つは、 水産資源への影響(3b)で、北極温暖化に伴う海洋環境変化が 基礎生産の変化をもたらし、同時に海洋酸性化を強め、プラン クトン種や分布に変化をきたし、ひいては優占する魚類種等の 変化まで及ぶということである。

こうして、個別に上げられた戦略研究目標は有機的に繋がっ ており、得られた科学的成果も密接なつながりがある。その全 体像を図 2.5.5 に示した。

今後の課題

既に多くの成果が得られたが、まだ道半ばのものや今後に期 待するところの大きい課題も残っている。観測ーモデル連携の体 制を構築したはずではあるが、最大の課題、北極温暖化増幅に ついての各プロセスの寄与について、実際の観測的事実からの 裏付けまでには至っていない。特に、温暖化に伴う雲の振る舞 いについて、昔から北極気候の大きな話題であり、今回の解析 でも極めて大きなフィードバックの一つであると評価はされた



実態には迫りきれなかった。 研究基盤として高精度の雲レ ーダーを開発・設置し、ライ ダーとともに雲の遠隔探査機 器として整備し、その他の観 測手法とともに同時観測によ り雲のマクロな鉛直構造、内 部微物理(粒径分布や雲・氷 水量)の取得を可能にする所 までは到達したが、長期観測 に基づく雲の特性把握までに は至っていない。同じく、衛 星による広域の雲特性把握手 法は確立されたが、気候学的 な解明には至っていない。

北極温暖化の中緯度リンク

について、その仕組みの解明、現象の説明はモデル、観測を基 にした解析ともどもなされたが、ではどういう気象条件になっ たら現実に発生するのか、その高精度な予測については未だ達 成されていない。そのためには、高層気象観測ゾンデの観測点 の充実から観測の高頻度化、モデルの高精度化など課題は多く、 国際的にも WMO を中心にプロジェクト(極域予測プロジェク ト PPP)が進んでおり、2017-19年には集中観測「極域予測年」 YOPPが計画されている。積極的な関与が期待される。同時に、 中緯度リンクが近年の北極温暖化=海氷減少=の状況の下での 単なる過渡的な現象なのか、より長期的に続く現象であるのか、 これも明らかにされる必要がある。

特に、成層圏-対流圏結合を通したつながりについては、現象 は説明されているがその力学的な因果関係が明確になったわけ ではない。さらなる高度な研究が求められる。併せて、成層圏 状態の貴重な指標でもある、成層圏オゾンについても、本事業 では取り上げることはできなかったが、今後まだ研究が求めら れている。2011年初春に続いて去る2015/16年冬季も北極で オゾンホールの発達がみられたもので、オゾン破壊物質の減少 に伴うオゾンホール回復過程の行く末と併せて、詳細な解明が 求められる。

広域積雪変動については、一応の傾向は得られたものの、そ の生態系への影響を通じた総合評価、水循環の観点からの評価 も未だ不明確である。また、気候影響にしても、積雪域変動が アイス・アルベドフィードバックを通じて北極温暖化増幅に寄 与しているわけだが、その定量的理解は不十分である。同じく、 降水・降雪や河川流出、海面蒸発などを含む水循環について、 北極域では大きな課題で古くから研究対象になってきたが、本 事業ではあまり取り組むことができなかった。今後の取り組み を期待したい。

さらに、永久凍土融解や海洋底からのメタン発生について、 国際的にも大きな話題となっており、本事業でも研究に取りか かるまでにはなったが、本格的結論を得るまでには至ることが できなかった。大気加熱や雪氷面熱収支に大きく寄与し得るブ ラックカーボンについても、高精度な観測が実現はしたものの、 同じくそのトレンド、気候変動に対する評価、将来予測には至 ってはいない。

海氷についても、将来の見通しについては本事業でも共通の 理解に達したわけではない。2000年代に入っての海氷急減はス テップライクな変化であり、そのままの勢いで減少を続けるの ではなく、再び安定化し緩い減少が続くという解釈もあるが、 将来、2100年以前にも夏の海氷は全て無くなり、北極は季節海 氷域に覆われることになってしまうのか、その行く末は定かで はない。同時に、基本的な要素である海氷厚のモニタリングに ついても、1m以上の厚さの氷については未だ道半ばである。 将来的に厚い多年氷は無くなるという解釈であれば、必要度は 低くなるのかもしれないが。併せて、海氷の変化に伴う北極海 環境の変化が、究極的に生態系に、ひいては高次の生態系、水 産資源まで、どのような影響を与えることになるかは、海洋酸 性化の問題とともに不明な点が多い。また、海洋・海氷のモデ ル研究成果では大西洋水の流入路を再現しつつあり、これを拡 張して北極海表層の将来像を予測できるとの期待がある。北極 海から大西洋に流出する水塊の温度・塩分を変えることも考え られ、グリーンランド海の鉛直混合、さらに全球コンベアベル トの流量と温度・塩分に影響を与えるなら、100年を越える時 間スケールで気候変化の予測にも必用な要素となる。

最初に提示したように、少なくとも現状でどうなっているの か、今起こりつつある変化は捉えられたものと思っているが、 より遠い将来の予測については、今後の解明に待たれる。

最後に

以上、戦略研究目標毎の成果のつながりを議論してきた。7 つの研究課題で取り組んできた成果のエッセンスである。しか し、戦略研究目標に直接には貢献しにくかったが、目標達成の 基礎固めに貢献した研究成果も多く得られた。本章ではそこま で含むことができなかったため、これは第3章に記した。第3 章は、7つの研究課題毎に、研究課題の立場からどういう研究 を進め、どういう成果が得られたかを記述した。現段階では戦 略研究目標には至らなかったものでも、科学的に高度で貴重な 成果も多く得られている。所期の目的外のところに重要な成果 が出るのも科学の通例である。これらを漏らすこと無く記録を 残すことを目指した。これらを基礎にして発展させることで、 また組み合わせることで、さらに新しい北極域の科学が進展す ることが期待される。

引用文献

- GEO, 2014. Final documents 'Assessment of progress Target and Task', Plenary Documents. Tenth Plenary Session of GEO (GEO-X), 15-16 January, 2014, Geneva, Switzerland.
- Honda, M., Inoue, J., Yamane, S., 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. Geophys. Res. Lett., 36, L08707. doi: 10.1029/2008GL037079.

第3章

研究課題報告



I.北極気候再現性検証および北極気候変動・変化のメ カニズム解析に基づく全球気候モデルの高度化・ 精緻化 研究課題1 研究代表者:野沢 徹

全球気候モデルによる北極気候の将来予測精度の信頼性向 上を目指し、研究課題1では、以下の三つのサブテーマに関す る研究を推進してきた。一つ目は、全球気候モデルによるシミ ュレーション結果をさまざまな観測データと比較解析すること による「気候モデルによる北極気候再現性の検証」で、北極域 陸上におけるモデルの高温バイアスが主には雲と陸面過程に起 因すること、などを確認した。二つ目は「北極気候変動・変化 の原因特定・メカニズム解明」で、北極域における温暖化増幅 メカニズムのより良い理解を得るため、海上および陸上それぞ れにおけるさまざまなフィードバック(アイス・アルベドフィ ードバック、海氷-雲フィードバック、など)の相対的な寄与 率の季節性に着目して解析を行った。また、個別のフィードバ ックに関する詳細な解析や、北極域における長期気候変化の要 因分析なども実施した。三つ目は北極において重要となる「要 素モデルの開発・改良および感度実験」で、一つ目の「気候モ デルによる北極気候再現性の検証」により指摘された問題点の 一つである、積雪や湿地などの陸面過程を改良することにより、 全球気候モデルを高度化・精緻化した。また、同位体モデルの 導入や海洋・海氷モデルの改良なども行った。以下では、これ ら3項目それぞれについて、主要な研究成果を報告する。

1. 気候モデルによる北極気候再現性の検証 執筆者:野沢 徹 阿部 学 廣田渚郎 高薮 縁 高田久美子

(1) 北半球高緯度陸域における地表気温変化トレンドの再現性 評価

執筆者:阿部学、野沢徹

気候モデルによる過去の気候場の再現性は、将来の気候変化 予測の信頼性を判断する上で大変重要である。多くの再現性検 証では時間平均場の空間分布を対象としているが、地球温暖化 は20世紀後半にも顕著に表れており、地表気温の上昇傾向の 再現性も重要な検証項目である。そこで本研究では、MIROC5 を中心に、第5期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5) の複数の気候モデルにおける北半球高緯度陸域の地表気温上昇 に関する再現性を検証した。使用したデータは CMIP5でデザ インされた、観測の海水面温度を与えて行った大気大循環相互 比較プロジェクト(AMIP)タイプ実験(1980–2008年)の月 平均値である。観測された地表面気温データとして英国 East Angrea 大学が取りまとめているデータ(CRUTEM4¹⁰)を用 いた。モデルデータは観測データの水平解像度に変換して季節 平均値を作成後、最小二乗法を用いて各格子点での地表面気温 の線形トレンドを計算した。

MIROC5の北半球高緯度陸域の地表面気温のトレンドは、す べての季節において、一部を除くほぼすべての地域で正であり、 20世紀後半の温暖化を示している。季節間でトレンドの大きさ は異なり、特に冬季はその他の季節と比べると大きい。観測と の違いを見ると、モデルは観測に比べて、気温の上昇トレンド が、冬季には、ヨーロッパや北米において過小である一方、そ れ以外の高緯度陸域では過大となっている。その他の季節には、 ヨーロッパや北米において過大である一方、シベリアやカナダ の北極海に近い領域では過小傾向にある。

図 3.1.1 は、40°N~80°N の陸域で平均した各モデルの季節 平均地表面気温トレンドを、観測との差として表している。い ずれの季節についても、地表面気温トレンドはいずれのモデル でも観測に比べ小さいことが分かる。特に、春の温暖化トレン ドの過小評価が顕著である。なお、他のモデルと比較して、 MIROC5 の地表面気温トレンドと観測との差は小さい方であ る。また、大気海洋結合モデルによる 20 世紀再現実験結果で も同様の解析を行った結果、バイアスの大きさはやや小さくな るものの、どのモデルも概ね同様の傾向を示すことが分かった。



図 3.1.1 40-80°Nの陸域で季節平均した地表面気温トレンドのモデルと観測(CRUTEM4)との差。 単位: [K/decade]。青:冬、赤:春、緑:夏、紫:秋。

(2) CMIP5 気候モデルにおける 高緯度陸上降水の再現性評価 執筆者:廣田渚郎、高薮縁

北極域の気候に高緯度陸上降水 は大変重要な役割を果たしている。 例えば、ユーラシア高緯度の降水 は、河川を通り北極海に流れ込む。 その淡水は海氷成長・変動に大き く影響する。高緯度域における雪 や海氷によるアイス・アルベドフ ィードバックは、地球温暖化の重 要な増幅メカニズムであると考え られている。

世界中の研究機関で開発されて いる気候モデルによる数値実験デ $-\beta$ (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; CMIP5) を解析し、気候モデルに おける夏季(6-8月)の北ユーラ シア (0-180E、45-90N) の降水 再現性を調べる。この CMIP5 数 値実験データは、気候変動に関す る政府間パネル (IPCC) の第1 作業部会第5次評価報告書(AR5) で述べられている将来予測の科学 的根拠としても用いられているも のである。モデルデータとの比較 のために、Global Precipitation Climatology Project version 2 (GPCP2), AsianPrecipitation-Highly-Resolved Observational **Data Integration Towards** Evaluation (APHRODITE) など の地上観測データ、

Global Satellite Mapping of Precipitation version 5

(GSMaP) [♣] Clouds and the

Earth's Radiant Energy System (CERES) などの衛星観測データ、Japanese Reanalysis 55 (JRA55) や ERA-interim などの再解析データを用いた。

まず、観測データ、再解析データ、及び22個のCMIP5モデ ルにおける夏季降水量を図3.1.2に示す。北ユーラシアの東西 に降水域が広がり、東側沿岸では、アジアモンスーンの影響を

Climatological Precipitation (Jun-Aug)



図 3.1.2 観測 (GPCP2、GPCP1DD、CMAP、APHRO)、再解析(JRA25、JRA55、ERA40、ERAI、 NCEP、NCEP2)、CMIP5の北ユーラシアの夏季気候平均降水量(mm day¹)。



図 3.1.3 北ユーラシアの夏季気候平均降水量の GPCP2 観測からのバイアス(mm dav¹)。

受けた降水域が見られる。これらの降水の水平分布は、モデル でもおおよそ再現されている。GPCP2 観測をレファレンスと して、そこからのずれ(バイアス)を図 3.1.3 に示す。CMIP5 モデルには共通して、西部に負、東部に正の降水バイアスが見 られる。CMIP5 モデルのバイアスに共通性が見られるため、 まずは、22 個の CMIP5 モデルを単純に平均したマルチモデル アンサンブルミーン (MME) を議論する。モデル間の違いに ついては、あとで議論する。

CMIP5 MME の観測データからの降水、海面気圧、地表気温 などのバイアスを図 3.1.4 に示す。前述の様に、モデル降水は、 西部で過少・東部で過多である。水収支解析を行うと、これは 大陸スケールの低気圧循環バイアスに伴い、大陸東部で湿った 南風、西部で乾いた北風バイアスになることと対応することが 分かる(図 3.1.4b)。この低気圧循環バイアスは、ユーラシア



図 3.1.4 CMIP5 マルチモデル平均(MME)の(a)降水、(b)海面更正気 圧と 850hPa 水蒸気フラックス、(c)地表温度、(d)雲の短波放射強制 力、(e)降水・蒸発インデックスのバイアス。レファレンスはそれぞ れ GPCP 観測、ERA 再解析、CRU 観測、CERES 衛星観測、ERAI 再解析。

大陸上に存在する高温バイアスに起因する熱低気圧として理解 できる(図 3.1.4c)。なお、北極海上に存在する高気圧循環バ イアスの影響もあり、ユーラシア大陸北部の北極海沿岸では上 空まで西風が弱く、ストームトラック活動が弱いというバイア スが存在することも知られている(Nishii et al., 2015)²⁾。

次に、地表面熱収支解析を行い、高温バイアスの原因を調べ る。図 3.1.4d に、全天と晴天時の短波放射加熱の差で定義され る短波放射雲強制力(SCRF)の CERES 衛星観測からのバイ アスを示す。大陸の大部分で正バイアスであり、MME は雲量 を過小評価し、太陽光が大陸を温めすぎていることが分かる。

降水バイアスは、蒸発—降水による水蒸気のリサイクリング によって増幅されている可能性が考えられる。リサイクリング



図 3.1.5 CMIP5 モデルにおける北ユーラシア地表気温(横軸)と(a) 西部と東部の降水量の差(b) 短波雲放射強制力(c) 蒸発--降水リサイクリングインデックス(縦軸)の関係。

強度を Zeng et. al. (2010) ³⁰のインデックスを用いて評価する と、図 3.1.4e に見られる様に、大陸の全域で過大であり、MME では ERAI 再解析に比ベリサイクリングがより活発である。つ まりモデルでは、西(東) ユーラシアで降水が過少(多)にな ると、蒸発による大気への水蒸気供給も過小(大)になり、更に 降水が減る(増える)という正のフィードバックがより強く働く。

ここまで22個の CMIP5 モデルの平均(MME)のバイアス を議論してきた。前述の様に、降水が西部で過少・東部で過多 のバイアスは全モデルに共通するが、その大きさはモデル間で 異なる。図 3.1.5aに、縦軸をユーラシア西部(15-60E、45-70N) と東部(105-150E、45-70N)の降水量の差をとり、横軸に北 ユーラシアの地表気温をとり、各モデルをプロットする。する と地面気温が高いモデル(図中右のモデル)ほど、西部の降水 が東部の降水より小さいこと(図中下)が分かる

(相関係数-0.66)。つまり、高温バイアスが大き いモデルほど、降水が西部で過少・東部で過多の バイアスが大きい。また、前述の短波雲放射強制 力 SCRF と蒸発一降水リサイクリングインデッ クスとの関係を調べると、それぞれが大きいモデ ルほど、地面気温が高いことが分かる(図 3.1.5b,c; それぞれの相関係数は 0.62 と 0.54)。つまり、 降水バイアスの大きさは、雲量の大きさ及び蒸発 一降水リサイクリング強度で、ある程度決まって いることが分かる。

これらの気候モデルにおける雲量や水蒸気のリ サイクリング強度の問題は、先行研究で指摘され ているものとも整合的である(Trenberth et al., 2003)⁴。例えば、雲スキームにおける雲の寿命 を延ばすことや、陸面モデルにおける蒸発効率を 下げることなどの修正で、夏季北ユーラシアの降 水を改善できると考えられる。

次に、降水の日変動の再現性を調べた。夏季北 ユーラシアにおける降水量を時間別に平均した気 候平均的な降水量の日変動を図 3.1.6 に示す。 NCDC データにおいて、降水量の日変動する成分 は、全降水量の 22%程度であり、降水のピークは 18時頃に見られる。一方、GSMaP では、日変動 の寄与 29%程度で、降水ピークは 16時頃である。 二つのデータに違いがあり、降水日変動について は観測データにも大きな不確定性があることがわ かる。

CMIP5 モデルの日変動は、モデルごとに大き く異なっている。IPSL などの非常に日変動の寄 与が大きいモデルがある一方、FGOALS-g2やbcc-csm1モデ ルなど、日変動がほとんど見られないモデルもある。全モデル のマルチモデルアンサンブル平均(MME)では、降水日変動 の寄与が35%程度で、日変動のピークは13時頃である。どち らの観測と比べても、日変動の寄与が大きく、降水ピークが早 い。図3.1.7に観測と各モデルの降水日変動の寄与と降水ピー クの時間をプロットした。日変動の寄与が大きいモデルほど、 降水ピークが早い傾向があることがわかる。そのマルチモデル 間の相関係数は-0.65 であり、統計的に有意である。

モデルにおける降水は、主に対流不安定を解消する対流スキ ームと、各グリッドの水蒸気分布に基づき飽和水蒸気を凝結さ せる大規模凝結スキームによって計算されている。この対流ス キーム降水と大規模凝結降水の寄与を切り分けて調べると、日



図 3.1.6 夏季(6-8 月)北ユーラシア(0-180E,45-90N)における、NCDC9813(黒実 線)、GSMaP(黒点線)、CMIP5 マルチモデルの降水日変動(mm day¹)。横軸はロー カルタイム。



図 3.1.7 夏季(6-8月)北ユーラシア(0-180E、45-90N)における、NCDC9813、 GSMaP、CMIP5マルチモデルの降水日変動のピーク時間(縦軸)と全降水量に対す る寄与。

変動成分のおおよそ8割から9割は対流パラメタリゼーション による降水であることがわかる。また、対流降水の地面温度と 自由大気水蒸気に対する感度を調べると、地面温度に対する感 度が強く、自由大気水蒸気に対する感度が弱いモデルほど、降 水ピークが早いことが分かった。現実の対流活動は、地面が温 められても、大気が十分に湿っていないと抑制されることが知 られているが、その対流の湿度依存性がモデルで十分に表現さ れていないことが原因である可能性が考えられる。例えば、対 流が環境場の空気を取り込むエントレインメントプロセスの効 き方を調整することで、日変動の寄与、降水ピークの位置を調 整することができると考えられる。

(3) 気候湿潤度による地表面熱水収支の再現性評価

執筆者:高田久美子

全球気候モデルの地表面熱水収支について広域的な再現性 を評価する手段が少ないことから、可能蒸発散量(Ep)による 気候湿潤度(WI=Pr/Ep、Pr:降水量)の有効性を調べた。可能 蒸発散量は熱収支式から、下向き長/短波放射フラックス、気温、 風速、湿度を用いて、最も高効率で蒸発が起こる状態(植生が 短く突き出た水面=田植え直後の水田)における蒸発散量とし て算定する。まず、全球再解析データ(ERA interim)と全球 陸域降水データ(GPCC)を用いて1980-2010年の年間の気候 湿潤度を算定し、その特性について調べたところ、気候区分等 で示されている乾湿の分布とよく一致した(図 3.1.8)。また、 気候値の分布や年々変動について ERA interimの表層土壌水 分との関係を調べたところ、降水量よりも相関が高かった(図 3.1.9)。気候湿潤度はその定義から気象条件に基づく地表付近 の湿潤度を示す指標であるが、表層土壌水分の気候値や年々変 動をよく反映することが示された。



図 3.1.8 気候湿潤度(年間値)の気候値分布.0~0.1 は乾燥地、0.1~0.3 は半乾燥地、0.3~1 は半湿潤地、1 以上は湿潤地に相当する.水文年を 考慮して、北半球は 11~10 月、南半球は 5~4 月で年間値を算定した。



図3.1.9(左図)土壌水分・降水量の相関係数(横軸)と土壌水分・気候湿潤度の相関係数(縦軸)の関係。いずれも年間値。。は気候値について地域別に相関係数を算定。×は地域別の年々変動偏差について相関係数を算定。 □(赤)が高い正相関、(黄)が中程度の正相関、□(緑)が低い正相関。(右図)地域の区分け。

次に、気温、可能蒸発散量、降水量、気候湿潤度の全期間の トレンドを地域ごとに線形回帰で算定した。北半球中高緯度で は北極温暖化による気温の増大トレンドが大きいのに対して可 能蒸発散量の増大トレンドは中程度であること、北半球中高緯 度の多くの地域で可能蒸発散量の増大トレンドは降水量の増大 トレンドと相殺し、気候湿潤度のトレンドは小さいことが示さ れた(図 3.1.10)。さらに、気候湿潤度の定義式の一次偏微分 式から気候湿潤度のトレンドに対する降水量や可能蒸発散量の トレンドの寄与率を算定したところ、図 3.1.10 で示されたよう に北半球中高緯度で降水量と可能蒸発散量のトレンドが相殺す る傾向が確認されたほか、アラスカでは降水量トレンドの寄与 が大きく(約70%)、モンスーンアジアでは可能蒸発散量のト レンドの寄与が大きいこと(約99%)が示された(図3.1.11)。 このことから、気候湿潤度の定義式の一次偏微分式からその偏 差を降水量の偏差と可能蒸発散量の偏差の寄与に分けて解釈で き、トレンドが顕著な地域では定量的な寄与率が推定できる可 能性が示された。



図 3.1.10 1980-2010 年の各地域における年間値の線形トレンド(棒)とトレンドに対する標準偏差(エラーバー)。左上が地上気温(T2)、右上が可能 蒸発散量(Ep)、右下が気候湿潤度(WI)、左下が降水量(Pr)。棒グラフは左から右へ、北半球高緯度~低緯度~南半球高緯度。



図 3.1.11 気候湿潤度 WI の定義式の一次偏微分式から算定した、各地域での WI トレンドに対する降水量 Prのトレンドの寄与(青)と可能蒸発散量 Epのトレンド の寄与(赤)。

全球気候モデルの地表面熱水収支の再現性を評価するため に、CMIP5 参加モデルのうち8モデル(MIROC5、MIROC-ESM-CHEM、MIROC4h、GFDL-CM3、GFDL_ESM2M、 bcc-csm1-1、CNRM-CM5、NorESM1-M)の出力を用いて、 地上気象要素及び可能蒸発散量(Ep)、気候湿潤度(WI)の 気候値の再現性を、全球土壌水分プロジェクト第2期(GSWP2) による値と比較した(1984–1995年)。年間の気候湿潤度の気 候値分布を見ると(図 3.1.12)、乾燥域と半湿潤域、湿潤域の 大まかな分布はどのモデルでも表現できているが、特に北半球 中高緯度で湿潤域と半湿潤域の分布にばらつきが見られた。そ の中で、NorESM1-M(右列下)やMIROC5(中列上)は比較 的 GSWP2(左列上)に近い分布になっていた。



図 3.1.12 GSWP2 と CMIP5 のうち 8 モデルの気候湿潤度の年間値。

夏季(7月)の気温、降水量、気候湿潤度について、GSWP2 の気候値と、各モデルのGSWP2との差を図 3.1.13 に示す。高 緯度での気温の差(図 3.1.13a)は NorESM1-M(右列下)で 小さく、MIROC 系の三つのモデル (中列) や CNRM-CM5 (左 列下)では高温バイアス、他モデルでは低温バイアスが見られ た。降水量 (Pr) の差 (図 3.1.13b) も NorESM1-M (右列下) で小さく、他モデルではユーラシア東部やアラスカで過大、ユ ーラシア西部で過小となる傾向があった。可能蒸発散量(Ep) の差(図は省略)は NorESM1-M と MIROC5 でやや小さく、 他モデルでは全体的に過小評価されていた。Pr/Ep で表される 気候湿潤度の差(図 3.1.13c)は NorESM1-M (右列下)が全 体的に小さく、ほかのモデルでは降水量が過大となるユーラシ ア東部とアラスカで過大となり、西ユーラシアでは過小となっ ていた。気候湿潤度の変動は多くの地域で降水量の変動の影響 が大きいことが、これまでに示されているが、モデルのバイア ス評価においても降水量のバイアスの影響が大きいことが確認 された。

ここに示された結果から、気候湿潤度を用いることにより地 表面熱水収支とその要因(降水、気温=可能蒸発散量) が定量 的に評価できることが示された。全球再解析データからは北半 球高緯度では大部分の地域で気温の上昇傾向と降水の上昇傾向 が相殺して湿潤度には大きな変化が生じていないが、アラスカ では降水量の減少によって乾燥化していること、モンスーンア ジア域では気温の上昇傾向によって乾燥化していることが示さ れた。





図 3.1.13 (a)GSWP2 の7月の地上気温の気候値と CMIP5 のうち8モ デルの7月の地上気温のGSWP2との差、 (b)(a)に同じ、但し降水量, (c)(a)に同じ、但し気候湿潤度。

2. 北極気候変動・変化の原因特定・メカニズム解明

執筆者:阿部彩子 吉森正和 Laine Alexandre 阿部 学野沢 徹 小倉知夫 高田久美子 大石龍太 新田友子

(1) 北極域温暖化増幅プロセスの診断

執筆者:吉森正和、Laine Alexandre、阿部彩子、野沢徹

北極の平均気温は過去100年間で全球平均の約2倍の速さで 上昇しているが、そのメカニズムは必ずしも明らかではない。 このような北極域における温暖化増幅メカニズムを解明するこ とは、北極気候の将来予測の精緻化だけでなく、国内外におけ る温暖化影響評価の不確実性低減にも大きく貢献する。このよ うな観点から、本研究では、北極温暖化増幅プロセスの系統的 評価をすべく、複数の気候モデルによる温暖化シミュレーショ ン結果を地表面エネルギー収支に基づいて解析し、多数モデル で共通して見られる将来の北極温暖化の支配的要因を特定する とともに、モデル間の相違性についても確認した。詳細につい ては第2章「戦略研究目標1」の「1. 北極温暖化増幅メカニズ ムの総合解析」として記載しているため、ここではその概要の みを示す。

北極温暖化増幅は夏季よりも冬季に顕著であり、北極海上の アルベドフィードバックは夏季に最大となるが、過剰となった 熱量は海洋に吸収されるため、正味の温暖化増幅は小さい。秋 季から冬季には、夏季に海洋に吸収された熱量が大気中へ放出 されることに加え、雲の温室効果や大気温度の鉛直構造の変化 などにより、北極域の温暖化が増幅されている。北半球高緯度 陸域でのアルベドフィードバックは初夏に顕著で、一部は蒸発 冷却により放出されるものの、陸面による熱吸収は小さいため、 海上ほど季節振幅が大きくはない。陸域においても、秋季から 冬季にかけての温暖化増幅には雲の温室効果や大気温度構造の 変化などが影響している。これらの解析結果から、気候モデル において、現在気候のバイアス改善はもちろんのこと、雪氷の アルベドや海洋混合層、大気境界層、下層雲などの再現性向上 が、北極温暖化増幅メカニズムの定量的な理解においても大変 重要であることを示唆しており、今後もさまざまな観点からの 検証が必要と考えられる。

(2) MIROC における北極海の海氷減少による雲量変化への影響 執筆者:阿部学、野沢徹、小倉知夫、高田久美子

近年の地球温暖化により、9月を中心に北極海の海氷が顕著 に減少している。この海氷減少にともない、大気中の低層雲が 増加していることが、人工衛星による観測データの解析研究か ら明らかとなっている。このような、雲の増加にともなう下向 き長波放射量の増加が、太陽入射量の小さい、あるいはほとん どない北極域の秋季から春季においても、気温上昇や海氷減少 をもたらす可能性のあることが指摘されており、北極温暖化増 幅メカニズムの総合解析においても、重要なプロセスの一つと して認識されている(第2章「戦略研究目標1」の1.および 第3章「研究課題1」の2-(1)を参照)。このような背景か ら、本研究では、全球気候モデルで起こっている海氷減少によ る雲量の変化と、それにともなう放射量への影響について調べ た。詳細については第2章「戦略研究目標1」の「2.個別フィ ードバックの解析」の(1)海氷-雲フィードバックとして記 載しているため、ここではその概要のみを示す。

北極海の海氷減少にともなう雲量変化への影響を調べた結果、 10月に海氷減少と関連した雲量増加が見られ、この傾向は人工 衛星観測による結果と整合的であった。また、対流圏下層では 雲の増加がみられるが、地表面に近い層では減少傾向もみられ、 雲底高度が上昇していることが示唆された。雲の増加による地 表面での下向き長波放射量への効果を調べた結果、CO₂や水蒸 気の増加による晴天放射量の増加と考えられる量に対し、 40-60%程度の雲による放射量増加があることを確認した。こ れらは単体の気候モデルによる結果であるため、複数の気候モ デルによる解析や、利用可能な人工衛星観測データとの比較検 証を行うことが今後の課題である。

(3) 20世紀後半におけるユーラシア大陸上の春季降水量変化 のメカニズム

執筆者:野沢徹

人為起源の温室効果ガス(Greenhouse Gas: GHG)濃度の 増加による地球温暖化が進行しており、北極域では全球平均の 約2倍の速さで温暖化している。また、北極域では年平均降水 量も増加しており⁵⁾、その主たる要因は人間活動であることが 示唆されている⁶⁾。しかしながら、北極域での降水増加に対す るGHGや対流圏エアロゾルなど個別の人為要因の寄与や、そ の物理的なメカニズムに関しては必ずしも明確ではない。以上 のことから、本研究では、大気海洋結合モデルによる20世紀 気候再現実験データを解析し、GHGとエアロゾルの変化が北 極における陸域降水増加に及ぼす影響を調べた。特に、観測さ れた北極陸域降水量の増加トレンドが明瞭であり、モデルの再 現性も比較的良好である春季のユーラシア大陸上に着目して解 析を行った。

解析に用いたモデルデータは第3次結合モデル相互比較プロ ジェクトに参画した Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) による 20 世紀気候再現実験である η 。大 気側の水平解像度は約 280 km であり、対流圏エアロゾルモデ ルの簡略化版が含まれている。解析には初期値の異なる 10 メ ンバーのアンサンブル平均を用いた。また、温室効果ガスのみ、 エアロゾルのみなど、個別要因のみを考慮した場合の数値実験 結果も部分的に援用している。

ユーラシア大陸東部の一部を除き、モデルは観測された降水 量変化をおおむねよく再現していた。大気中の水収支式に基づ く解析により、ユーラシア大陸西部では地表面蒸発量の増加が、 ユーラシア大陸東部では大気中の水蒸気収束が、それぞれ降水 量増加を引き起こしていると推測された(図3.1.14上段)。地 表面での熱エネルギー収支式に基づく解析により、ヨーロッパ 域においては下向き短波放射の増加が、ユーラシア大陸中部で は上向き短波放射の減少が、それぞれ地表面蒸発量の増加に寄 与していることが分かった(図 3.1.14 下段)。ヨーロッパでは、 20 世紀中盤以降に人為起源エアロゾル排出量が減少しており、 これにともなって地表面に到達する太陽放射が増加しているこ とが原因と考えられる。一方、ユーラシア大陸中部では、温暖 化にともない積雪面積が後退して地表面アルベドが低下したこ と (いわゆるアイス・アルベドフィードバック) が原因と考え られる。



図 3.1.14. 1959~2008 年の 50 年間におけるユーラシア大陸の春季平均降水量(左上)、蒸発量(中央上)、鉛直積算水蒸気収束量(右上)の変化 [mm/day/50years] および地表面での正味短波放射(左下)、下向き短波放射(中央下)、上向き短波放射(右下)の変化 [W/m²/50years]。 放射量の変化は下向きを正としている。

(4) 改良型積雪被覆スキーム SSNOWD 導入による北極温暖化増幅への影響評価

執筆者:大石龍太、新田友子、阿部彩子

はじめに

本事業の一環として、Nitta et al. (2014) では大気海洋大循 環モデル MIROC の陸面サブモデル MATSIRO にサブグリッ ド積雪被覆スキーム SSNOWD (Liston, 2004) ⁸⁾を導入した。 Nitta et al. (2014) では MATSIRO 単体でのオフライン実験 によって SSNOWD 導入による積雪過程が改善されることを示 した。

MATSIROはMIROCの大気および海洋と結合した状態での 数値実験にも用いられるため、SSNOWD 導入によりどのよう な影響が出るのかを予め把握しておくことは MIROC の開発・ 改良においては重要である。特に MIROC は将来の温暖化予測 や古気候実験などの現在と異なる状況に対して用いられること が常であるため、その点について改善を行った。SSNOWD で 用いられる積雪のグリッド内深度分布のばらつきをつかさどる パラメタ (CV) は、地形・風速・気温の 3 要素から決定され る。本研究では、MIROC への SSNOWD 導入に際して地形と 風速は Nitta et al. (2014)を踏襲するが、気温については直 近 30 年分の年平均気温を近似的に保持することで、平衡応答 実験のみならず温暖化シナリオ実験のように実験中に平均気温 が変化する場合などにも適用可能とした。

結果

本研究では、まず標準実験として SSNOWD を導入した MIROC を用いて産業革命前実験を行った。積雪分布を既存の MIROC を用いた標準実験と比較した結果、SSNOWD 導入に よって観測値に近づくことが示された(図 3.1.15)。また、 SSNOWD 導入によって標準実験で見られた中高緯度の高温バ イアスが積雪期には低減された。



 0.05
 0.25
 0.5
 0.75

 図 3.1.15
 11 月の平均積雪被覆率。(a)衛星観測(MODIS)、(b)本研究 (SSNOWD)、(c)既存の MIROC。

また、本研究では大気二酸化炭素濃度を標準実験の4倍に増加して行う典型的な感度実験も行い、既存 MIROC で行った4倍実験とあわせて温暖化時のSSNOWDの挙動と、SSNOWD 導入が温暖化に与える影響についても調べた。まず、全球平均した温暖化はSSNOWD導入 MIROC と既存 MIROCの双方で約4.2℃となり、大きな違いは見られなかった。大循環モデルの気候感度を測定する標準的な手順である Gregory plot も行ったが、やはり大きな違いは見られなかった。従って、 SSNOWD 導入による全球平均した温暖化への影響はきわめて小さいと考えられる。温暖化の地理分布を見ると、基本的には低緯度の温暖化が小さく高緯度の温暖化が大きいという、いわゆる Polar amplification (極域増幅)の特徴が見て取れる(図3.1.16 a、b)。ところが、両者には違いが現れており、これを抽出したのが図3.1.16 cである。



図 3.1.16 大気二酸化炭素 4 倍増時の年平均した地表気温変化の地理 分布。(a)は本研究、(b)は既存 MIROC の結果、(c)は両者の差。

SSNOWD 導入によって、大気二酸化炭素 4 倍増時の温暖化 は中低緯度の陸上で強められ、高緯度の海上で弱められている のがわかる(図 3.1.16 c)。これらの違いは全球平均すると上 で述べたように非常に小さな値になるが、それぞれ異なった物 理的な解釈が可能な独立した応答である。



図 3.1.17 図 3.1.16 c に対応する地表面アルベド変化の分布。
図 3.1.16c に対応したアルベド変化を見ると、気温の変化は ほぼアルベドの変化に対応している(図 3.1.17)。中低緯度の 陸上では、SSNOWD 導入によって温暖化時のアルベド低下が 強化されており、これが温暖化の強化に寄与している。本研究 と既存 MIROC の両方で、温暖化によって積雪量は減少するた め、4倍実験では標準実験と比べて積雪被覆が減少し、アルベ ドは低下する。SSNOWD の導入によって標準実験での積雪被 覆が大きくなるため(図 3.1.15 b, c)、温暖化時の被覆率減少 幅が拡大していると考えられる。一方で高緯度の温暖化抑制も アルベドの変化に対応しているが、これは北極海を中心とした 海上にその応答のほとんどが集中している。これは、SSNOWD 導入による北極海の海氷分布への影響に起因すると考えられる。



図 3.1.18: SSNOWD 導入による温暖化時の冬の海氷被覆率の変化

海氷被覆率に注目すると、標準実験では海氷の総量が多いた め、SSNOWD 導入による北極海の海氷被覆率への影響は非常 に小さい。ところが、海氷の総量が減少する温暖な4倍実験に おいては、SSNOWD の導入による影響で海氷の被覆率が増加 する。図 3.1.18 は4倍実験において SSNOWD を導入したこと による冬の海氷被覆率の増加である。この海氷被覆の増加は、 積雪初期の積雪被覆率が SSNOWD によって増加するために陸 域の気温が低下し、北極海沿岸部での海氷生成が早期化するた めである。この海氷増加の影響は融雪期を越えて夏まで続き、 表面アルベドの増加により高緯度を寒冷化する。

まとめ

本研究では、サブグリッド積雪スキーム SSNOWD の大気海 洋大循環モデル MIROC への導入によって、標準実験設定での 積雪被覆率と地表面気温が改善し、現実に近づいた。温暖化実 験を行ったところ、SSNOWD の導入による全球平均した温暖 化に増減は見られなかった。ところが、SSNOWDを導入した 大気二酸化炭素濃度4倍実験では、北半球中低緯度の陸上で温 暖化が強化され、北極海で温暖化が抑制された。そのため、 SSNOWDの導入によりMIROCで起こる極域増幅は低減され ることが示された。本研究の成果は、大気海洋大循環モデル MIROCの次期バージョンの標準積雪スキームとして採用され、 IPCC第6次評価報告書に提出する温暖化予測実験等に貢献す る予定である。

3. 要素モデルの開発・改良および感度実験

執筆者:保坂征宏 新田友子 芳村圭 高田久美子 阿部彩子 辻野博之 豊田隆寛 小室芳樹

(1) 陸面モデルにおける積雪被覆率の改良および簡易湿地モ デル開発

執筆者:新田友子、芳村圭、高田久美子、阿部彩子

MIROC の陸面過程モデル Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff (MATSIRO) に組み込ま れている標準の積雪被覆率パラメタリゼーションは、積雪量の 関数として積雪被覆率を計算するが、単純すぎて再現性がよく ないことが分かっていた。そこで、Liston (2004) ® によって 開発された Subgrid SNOW Distribution (SSNOWD) という パラメタリゼーションを新たに MATSIRO に組み込み、陸面オ フライン実験による検証を行った。SSNOWD は、サブグリッ ドの積雪水当量分布が対数正規分布に従うと仮定して、そのパ ラメータは、サブグリッドの積雪水当量の変化を生み出す物理 過程を考慮して決定する。積雪期間を堆積期と融雪期に分け、 堆積期は積雪被覆率を1とし、融雪期はグリッド一様に融雪す ると仮定する。これにより、これまでの MATSIRO の標準パラ メタリゼーションでは考慮できなかった、積雪水当量と積雪被 覆率のヒステリシス的な関係を表現できるようになる。

積雪被覆率パラメタリゼーションの検証のために、全球1度 ×1度の解像度で、1979年から2007年までの29年間の陸面 オフライン実験を行った。実験は、標準のMATSIRO(MAT5 実験)と、SSNOWDを組み込んだMATSIRO(SSNOWD実 験)を用いた2種類である。気象強制力として再解析データと 観測降水量を組み合わせて作成された気象データセット(Kim et al., 2009)⁹⁰を用い、境界条件とオフライン実験の手法は Global Soil Wetness Project 2(GSWP2)に則った。

上記 2 種類の数値実験による計算結果を、Niu and Yang (2007)¹⁰⁾による観測積雪深と積雪被覆率の関係についての 解析、人工衛星 MODIS 観測による積雪被覆プロダクト(Hall et al., 2006)¹¹⁾、Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) の積雪解析値 (National Ice Center, 2008)¹²⁾、GLOBal SNOW monitoring for climate research

(GLOBSNOW)の積雪水当量(Takala et al., 2011)¹³⁾と比較した。Niu and Yang (2007)¹⁰⁾は、北アメリカの主要流域において積雪水当量と積雪被覆率の関係を季節ごとに検討し、



図 3.1.19: 北アメリカ主要流域における積雪深と積雪被覆率の関係。 黒線は Niu and Yang (2007)¹⁰ による観測の解析より。SSNOWD の CV カテゴリーごとにプロットしてある。上段は MAT5 実験、下段は SSNOWD 実験の結果で、左から、11 月、2 月、5 月を示している。

秋から春に季節が進むにつれて、積雪被覆率が1に近づくと積 雪水当量が大きくなることを示している。図 3.1.19 に、同じ領 域における計算結果を示しているが、SSNOWD を組み込むこ とで、積雪深と積雪被覆率の関係が季節的に変化することを表 現できるようになり、観測の解析から得られた関係に近づくこ とが示された。図 3.1.20 に 2001 年から 2007 年までの 11 月、 2月、5月の月平均積雪被覆率の空間分布を検証した結果を示 す。積雪被覆率は、特に堆積期である 11 月と、東シベリア等 の降雪量の少ない地域で改善していることがわかった。融雪期 の5月に関しては、どちらの実験でも積雪域の南端で積雪被覆 率を過大評価していた。GLOBSNOW を用いた積雪水当量の検 証結果から、春に融け残るバイアスがあることが示されたため、 積雪被覆率についてもその影響を受けていると考えられる。次 に、日単位北半球積雪面積を IMS の解析値と比較した。その結 果、SSNOWD を組み込むことで、IMS と計算結果の差、また ピークのタイミング、季節内の短周期の変動に関しても、改善 することが示された。以上のように、SSNOWD を組み込んだ シミュレーションの結果では、標準実験よりも改善する場合が 多いことがわかった。上記の結果は、Journal of Climate に出 版された(Nitta et al., 2014)。



図 3.1.20 積雪被覆率の検証。2001-2007年の月平均値で、a) MODIS 11月、b) MODIS 2月、c) MODIS 5月、d) MAT5 実験 11月、e) MAT5 実験 2月、f) MAT5 実験 5月、g) SSNOWD 実験 11月、h) SSNOWD 実験 2月、i) SSNOWD 実験 5月を示している。



図 3.1.21 簡易湿地モデルの計算フロー。融雪時の表面流出のうち、貯水されずに流出する割合を α 、一時的に貯水される割合を $1 \cdot \alpha$ 、貯水された水が流出する際の時定数を τ としている。

北極圏の陸域には数多くの湖や湿地が存在する。これらは融 雪水の一部を貯留する効果を持ち、地表面の水・熱収支や河川 流量に影響を及ぼしている。しかしながら、広域を対象とした 陸面モデルでは、これまで、このような湿地の効果が表現され ることは少なく、高緯度陸域水循環の改善に向けた課題の一つ だと考えられる。そこで本研究では、簡易的な湿地スキームを 陸面モデルに組み込んで、陸面オフライン実験と AGCM 実験 による感度実験を行い、湿地の持つ貯水効果が、陸域水循環や 地表面の熱収支、気候モデルの高温バイアス低減に与える影響 の評価を行った。図 3.1.21 に計算のフローを示す。融雪時の表 面流出の一部を一時的に貯留するタンクによって、簡易的に湿 地の効果を表現した。なお、融雪時の表面流出のうち、貯留さ れずに流出する割合を α 、一時的に貯留される割合を $1-\alpha$ とお く。また、タンクから流出する時定数 τ はサブグリッドの標高 の標準偏差の関数として地理分布を与えた。陸面オフライン実 験の気象強制データとして、再解析をもとに、降水量は観測月 データで補正を行ったデータセット (Kim et al., 2009) 9) を用 いた。対象は1979-2007年の29年間とし、空間解像度1度× 1度で、コントロール実験(CTL実験)と簡易湿地スキームを 組み込んだ実験(WET 実験)の2 種類の全球シミュレーショ ンを行った。また、AGCM 実験は、気候モデル MIROC を用 いて、空間解像度は T42 で 30 年間の実験を行った。海面水温 と海氷分布は月単位の気候値を用い、最初の 10 年はスピンア ップとして解析から除外した。

陸面オフライン実験で計算された表面貯水量は、融雪と同時 に増加し、少しずつ流出して、秋にはほとんどの場所で5 mm 以下まで減少した(図 3.1.22b)。スキームの検証には、Global Lakes and Wetlands Database (GLWD; Lehner and Döll, 2004)¹⁴⁾から計算した1度×1度解像度の湿地面積率を用いた(図 3.1.22 a)。開発したスキームは湿地面積率を計算できないため、定性的なスキームの検証として、タンクに貯留された水の量の比較を行い、湿地面積率の高い場所とタンクの水量が多い場所がある程度対応していることを確認した(図 3.1.22 a、b)。



図 3.1.22 a) 湿地面積率 [%]とb) WET 実験の平均表面貯水量 [mm]。

図 3.1.23 に、2001 年 6-8 月の北緯 30 度以北の蒸発散量を 示す。a) は、LandFlux-EVAL (Mueller et al., 2013)¹⁵⁾の Diagnostic data の平均値、b)はa)と上述のコントロール(CTL) 実験の差、c) は二つの実験(CTL 実験とWET 実験)の差、d) はメトリックで、青色の方が、湿地スキームを組み込んだ実験 の結果が推定値に近づいていることを示している。コントロー ル実験は、高緯度域で蒸発散を過小評価している場所が多い。 簡易湿地スキームを組み込むことで、夏期の蒸発散が増加し、 これらの過小評価が改善する傾向となることがわかる。顕熱フ ラックスは、蒸発散に対応して減少していた。また、北極圏の 主な河川の下流域で河川流量の日平均値を検証した結果、 RMSD、相関ともに改善する結果となった。これは、コントロ ール実験における、ピーク流量のタイミングが早く、その値が 大きすぎる傾向が、一時的に貯水する効果により改善されたか らだと考えられる。 また、AGCM 実験の結果、蒸発散を増加 させ顕熱フラックスを減少させる効果により、ユーラシア大 陸・北アメリカの北部で夏期の地表面気温が約1度低下した。 しかしながら、その影響はモデルの持つバイアスに比べて小さ いこともわかった。



図 3.1.23 2001 年 6-8 月の北緯 30 度以北の蒸発散量。a) 観測値、b) CTL 実験と観測の差、c) 二つの実験(CTL 実験と WET 実験)の差、 d) バイアスの差を示している。

(2) 同位体大循環モデルの構築と検証

執筆者:芳村圭

水の安定同位体(HDO、H2¹⁸O)を大循環モデル(GCM) に導入した水同位体GCMは、水循環や古気候の研究において 有用なツールとして広く利用されている。本事業の対象である 北極域の気候変動はアイスコアの同位体比に記録されており、 この記録をシミュレーションにより再現し、解析することで北 極域の温暖化増幅メカニズム解明に資する事ができると考えら れる。

本研究では大気海洋結合 GCM である MIROC5 の大気部お よび陸面部に水同位体を導入し、検証を行った。大気部への水 同位体の導入手法は Jouzel et al. (1987)¹⁶⁾を基本とし、雲微 物理過程については Blossey et al. (2010)¹⁷⁾を参考にした。 また陸面部については Yoshimura et al. (2006)¹⁸⁾を参考にし た。検証に用いた結果は、観測された海水温および海水密接度 を与えて 1949 年から 2008 年までの 60 年間シミュレーション を行った結果である。現実の内部変動をモデルに伝えるため NCEP 再解析データを用いてモデルの水平風をナッジングし た。なお空間解像度は T42、鉛直層数は 40 層である。

図 3.1.24 に降水同位体比年平均値の空間分布を示す。観測か ら、同位体比が低緯度において高く高緯度で低い、いわゆる「緯 度効果」が見て取れる。また、高度の高い場所で同位体比が低 下する「高度効果」もチベットやアンデス山脈、ロッキー山脈 等で見て取れる。モデルはおおまかにこれらの特徴を再現して いる。しかし観測とモデルを比較すると、北半球の高緯度帯、 チベット、アンデス山脈北部において観測との差が大きい。こ れらの地域に共通するのは、いずれも寒冷地であるということ であるが、地表平均気温 15℃以下の地域について気温と降水同 位体比の関係(温度効果)を調べると、その傾きは 0.58℃/‰と 観測に近い値(0.53℃/‰)を示しており、全体としては温度と 降水同位体比の関係は再現できていた。降水量の再現性をみる と、アンデス北部、チベットにおいて降水量をそれぞれ過小、 過大評価しており、これによって降水同位体比の再現性が悪く なっていると考えられる。一方で観測とシミュレーションの空 間相関係数は 0.84 であり、同位体 GCM 相互比較プロジェクト Stable Water Isotope Intercomparison Group に参加している モデルの成績(0.77-0.87)と比較可能な範囲であった。

続いてアイスコア同位体比の代表的な時間解像度である 年々スケールを対象とし、モデルの検証を行った。表 3.1.1 は 各モデルが降水同位体比年々変動を有意に再現した観測点数を 示している。全ての緯度帯において本モデルによって再現され る観測点数が最多であり、年々変動については本モデルが最高 の成績を示した。

最後に北半球高緯度における降水同位体比、アイスコア同位 体比の再現性を調べた。図 3.1.25 は観測値とモデルの年々変動 相関係数を示す。降水同位体比は 6 地点中 6 地点、アイスコア 同位体比は 21 地点中 10 地点の年々変動を再現した。アイスコ アの再現性は北グリーンランドで比較的低い。アイスコア同位 体比は、降水量が少ない地点では降水後の堆積過程によって影 響を受けやすいことが知られている。本研究においても相関係 数とアイスコア採掘点における降水量の間にはゆるやかな線形 関係が見られたことから、北グリーンランドで再現性が低いの は、本モデルで考慮していない降水後の堆積過程によって影響 を受けているためであることが示唆された。

本モデルを用いることにより、降水量の多い地域から採掘さ れたアイスコア同位体比の変動メカニズムの解析が可能になり、 北極域の気候変動メカニズム解明への貢献が期待できる。

表 3.1.1 年々変動が有意に再現された GNIP 観測点数。()内の数字は 全観測点数を示す。

	MIROC5	GISS-ModelE	IsoGSM
北半球 (205)	159	119	154
熱帯 (95)	71	53	57
南半球 (31)	15	11	14



図 3.1.24 (a) 観測、(b)シミュレーションの降水同位体比年平均値(‰)



図 3.1.25 (a) GNIP 降水同位体比、(b) アイスコア同位体比とモデル 降水同位体比の年々の相関係数。丸は有意な相関(p<0.05)を示し、 三角形は非有意であることを示す。

(3) 全球気候モデルにおける海洋・海氷モデルの改良

執筆者:辻野博之、豊田隆寛、保坂正宏、小室芳樹

はじめに

気象庁気象研究所では、季節から数百年規模の気候変動研究 に資する全球気候モデルの開発を行っている。ここでは、その 重要な構成要素である、海洋・海氷モデル、及び海洋・海氷の 状況をモデルに再現するためのデータ同化技術の高度化・精緻 化の成果について報告を行う。

海洋・海氷モデルの改良

第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)への貢献に使用した全球気候モデルにおいては、冬季に北大西洋で海氷が張り出しすぎるバイアスがみられた(図3.1.26a)。この問題は海洋・海氷モデルに対して以下の2点の変更を行うことによりほぼ解決した。

まず、ラブラドル海で表層海水の低塩分バイアスが海氷過多 の原因となっていることが示唆されたため、海洋モデルの混合 層スキームを表層と亜表層の混合層を促進するタイプのもの

(Umlauf and Burchard, 2003)¹⁹⁾に変更した。さらに、ノル ウェー海においては、海氷の漂流速度が小さく、北極海から運 ばれる海氷が十分に南方へ流去せず大量に融解するために、表 層が低塩分化し、海氷過多となっていることが示唆されたため、 海氷の運動の駆動力である大気からの風応力の計算手法を見直 し、より大きな風応力を海氷に与えることができるようにした。 これらの変更により、冬季の海氷面積過多の問題が大幅に改善 した(図 3.1.26b)。一方、夏季に海氷が融解し過ぎる傾向が あり、今後改善を継続的に検討する必要がある。



図 3.1.26 (左) 3 月、(中) 9 月の 1961 年–1980 年の平均海氷密接度分 布。(カラー) モデル、(赤線) 観測データセット HadISST 1981 年– 2000 年の平均に基づく氷縁(密接度 0.15 の等値線。参考値)、(右) 北 半球の月別平均海氷面積(黒:モデル(1961 年–1980 年の平均)、赤: HadISST (1981 年–2000 年の平均。参考値)。(a) CMIP5 実験、(b) CMIP6 へ向け準備中の実験。

海洋・海氷モデル相互比較実験

組織的海洋-海氷モデル参照実験(COREs)は、世界気候研 究計画(WCRP)のプロジェクト Climate and Ocean -Variability, Predictability, and Change (CLIVAR)の海洋モ デル開発パネルが推進する海洋-海氷モデル国際比較実験であ り、その第2フェーズ(CORE-II)が世界の18のモデルグル ープの参加により実施されている(Danabasoglu et al., 2014) ²⁰⁾。CORE-IIでは、共通の海面大気状態と海面フラックス計 算手法によりCMIP5と同等(同程度)の分解能を持つ全球海 洋-海氷モデルを300年間駆動し、モデル応答の相違等からプ ロセスの理解や各モデルの改良を進めることを目的としている。 CORE-IIの枠組みの中で北極域を対象とした詳細な比較が行 われたため(Wang et al., 2016a, b、Ilicak et al., 2016)、そ の結果の概要と、モデル改良へ向けた得られた指針について簡 潔にまとめる。

北極域の相互比較では、海氷、および海水に含まれる淡水、 および全般的水温・塩分分布や海水収支に着目した比較が行わ れた。気象研究所のモデルは全般的に参加したモデルの平均的 な挙動を示していた。これにより、モデルが大きな問題を孕ん でいないことを知ることができたが、これが必ずしも北極域の 再現に優れた性能を持つことを示しているわけではない。同種 類の設定のモデルに共通みられた、北極海中深層における海水 高温・高塩分バイアス、表中層の低温・低塩分バイアス、海氷 厚東西コントラストの過小評価、海水体積の近年の緩慢な減少 傾向などに対しては継続的に改良を図らなければならない。水 温バイアスについては、大西洋起源水の流入過程とシベリア沖 における低温水の形成と分布過程の正確な再現が必要である。

一方、他のモデルとの相違が大きかった問題として、海氷-海洋間淡水フラックスが海洋から海氷へ向かっていたことやベ ーリング海峡における海氷輸送が太平洋向きであったことに関 しては、海洋-海氷モデルで設定された、大気-海氷間運動量 交換係数が大きかったことが原因と考えられ(この交換係数は 前項で議論した、全球気候モデルで用いられる交換係数とは別 のものである)、今後の実験では小さい値を設定し、その影響 を評価する予定である。デービス海峡、フラム海峡からの流出 がそれぞれ過小、過大評価されている問題については、相互に 関連している可能性が指摘されている。よりデービス海峡に影 響の大きい、モデルにおけるカナダ多島海域の水路の表現に改 良が必要であり、モデル高解像度化を含めて検討を行うことと したい。

海洋・海氷データ同化システムの開発

北極気候の再現性と予測精度の向上のため、全球海洋・海氷 モデルの高度化とともに、データ同化により系統誤差を軽減さ せる取り組みを行った。

極域においては、水温は結氷点以下とならない、海氷密接度 は0から1の値、といった変数の制限からくる誤差の非等方性 があり、例えば、モデルに低塩分誤差がある際に結氷点付近の 水温観測を同化してもその水温はモデルでは実現できないため 齟齬が生じる。こういった極域の特性に応じた同化手法の開発 が必要である。

また、境界条件として用いる大気再解析データについて、極 域における顕著な誤差が報告されている(例えば、Inoue et al., 2012²¹⁾)。予備実験において、海氷の挙動は大気境界条件(例 えば、2m大気温度)に大きく影響されるため、海氷分布の誤 差を観測データをもとに修正すると他の変数に悪影響が及ぶこ とが確認された。この変数間の不整合は予報実験の際に大きな ショックを生じうるものであり、またプロセス研究のためにも 変数間の整合的な解析が求められる。

Toyoda et al. (2016) では、海氷密接度観測データを海洋・ 海氷モデルに同化する際に、密接度だけでなく境界条件となる 大気温・比湿、海洋モデル混合層の水温と塩分を同時に修正す る実験を行い、その効果を調べた。水温・塩分についての既存 のデータ同化スキーム (Toyoda et al., 2011)²²⁾と同様に、海 氷密接度の観測データをもとに観測・モデル誤差を考慮して3 次元変分法により最適値を推定し、解析インクリメントに Incremental Analysis Updates 法(Bloom et al., 1996)²³⁾を 用いてモデルに挿入した。この密接度の修正に際して、海氷の 鉛直温度構造は変化させないという条件のもとにグリッド平均 表面温度(海氷もしくは積雪の上面温度と開氷域の海面水温の 面積平均)の修正量を計算し、これをフォーシングの2m気温 に反映させた。同様に、海洋モデル1層目の水温が、海氷下の 結氷点水温と開氷域の水温との面積平均であるとして、密接度 修正量から混合層水温の修正量を推定した。ここで、海洋・海 氷系の水、塩の総量は保存するように修正を行っている。

図 3.1.27 は結果の一例で、北極海における冬季の分布である。 基本実験では、水温・塩分のみの同化を行っているが同化しな い実験にも見られる氷縁部での海氷密接度の過大評価が見られ る(図 3.1.27a)。このバイアスは、海氷密接度データ(図 3.1.27c) を同化し、またそれに整合するように2m気温を修正(図 3.1.27d) することで大きく低減した(図 3.1.27b)。後者を行 わない実験の結果は基本実験に近いことから、この修正には後 者の影響が支配的である。



図 3.1.27 3 月の平均値(2001-2010 年)。(a) 既存のシステムによる 水温・塩分のみ同化する実験における海氷密接度のバイアス。(b) 加え て密接度を同化し、その際に境界条件を修正する実験における海氷密接 度のバイアス。(c) 海氷密接度の観測データ(MGDSST)。(d) (b) の 密接度同化実験における 2 m 気温の修正量。

一方、夏季においては氷縁部の修正に加えて、北極海中央部 において密接度の過小評価が修正され、これには2m気温を下 げるような修正が効果的であった。これらの大気温の修正は、 冬季・夏季ともに、過去の研究で報告されている大気再解析デ ータのバイアスを修正する方向に働いており、境界条件に起因 する海氷の誤差を効果的に修正していることが分かる。

この研究により、これまで行われてこなかった海氷に対する 境界条件の修正の重要性を示す結果が得られた。今後、4次元 変分法など最適理論に基づくより整合的な修正手法を確立する ことが求められる。

引用文献

- Jones, P. D., Lister, D. H., Osborn, T. J., Harpham, C., Salmon, M., Morice, C. P., 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010, J. Geophys. Res. Atmos., 117, D05127, 10.1029/2011JD017139.
- Nishii, K., Nakamura,H., Orsolini, Y.J., 2015, Arctic summer storm track in CMIP3/5 climate models. Clim. Dyn., 44, 1311-1327.
- 3) Zeng, X., Barlage, M., Castro, C., Fling, K., 2010. Comparison of land-precipitation coupling strength using observations and models. Journal of Hydrometeorology 11(4), 979–994.
- 4) Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., Parsons, D. B., 2003. The changing character of precipitation. Bull. Amer. Meteor. Soc. 84, 1205–1217.
- 5)Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C., Lambert, F.H., Gillett, N.P., Solomon, S., Stott, P.A., and Nozawa, T., 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. Nature, 448, 461-465.
- Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F.W., 2008. Human-induced Arctic moistening. Science, 320, 518-520.
- 7)Nozawa, T., Nagashima, T., Ogura, T., Yokohata, T., Okada, N., Shiogama, H., 2007. Climate change simulations with a coupled ocean-atmosphere GCM called the Model for Interdisciplinary Research on Climate[:] MIROC. CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT, 12, NIES, pp.79.
- Liston, G.E., 2004. Representing subgrid snow cover heterogeneities in regional and global models. J. Climate, 17, 1381–1397.
- 9) Kim, H., P. J.-F. Yeh, P.J.-F., Oki, T., Kanae, S., 2009. Role of rivers in the seasonal variations of terrestrial water storage over global basins. Geophys. Res. Lett., 36, L17402, doi:10.1029/2009GL039006.
- 10) Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., 2007. An observation-based formulation of snow cover fraction and its evaluation over large North American river basins. J. Geophys. Res., 112, D21101, doi:10.1029/2007JD008674.
- 11) Hall, D.K., Salomonson, V.V., Riggs, G.A., 2006. MODIS/Terra Snow Cover Monthly L3 Global 0.05Deg CMG version 5. MOD10CM, MYD10CM, National Snow and Ice Data Center. Digital media. [Available online at http://nsidc.org/data/mod10cm.]
- 12) National Ice Center, 2008. IMS daily Northern Hemisphere snow and ice analysis at 4 km and 24 km resolution. National Snow and Ice Data Center. Digital media. [Available online at http://nsidc.org/data/g02156.]
- 13) Takala, M., Luojus, K., Pulliainen, J., Derksen, C., Lemmetyinen, J., Kärnä, J.-P., Koskinen, J., Bojkov, B., 2011. Estimating Northern Hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements. Remote Sens.

Environ., 115, 3517-3529.

- 14) Lehner, B., Döll, P., 2004. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. J. Hydrology, 296, 1-22.
- 15) Mueller, B., Hirschi, M., Jimenez, C., Ciais, P., Dirmeyer, P.A., Dolman, A.J., Fisher, J.B., Jung, M., Ludwig, F., Maignan, F., Miralles, D.G., McCabe, M.F., Reichstein, M., Sheffield, J., Wang, K., Wood, E.F., Zhang, Y., Seneviratne, S.I., 2013. Benchmark products for land evapotranspiration: LandFlux-EVAL multi-data set synthesis. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 3707-3720.
- 16) Jouzel, J., Russell, G.L., Suozzo, R.J., Koster, D., J.W.C. White, J.W.C., Broecker, W.S., 1987. Simulations of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA GISS general circulation model: The seasonal cycle for present-day conditions. J. Geophys. Res., 92, 14739-14760.
- 17) Blossey, P.N., Kuang, Z., Romps, D.M., 2010. Isotopic composition of water in the tropical tropopause layer in cloud-resolving simulations of an idealized tropical circulation, J. Geophys. Res., 115, D24309, doi:10.1029/2010JD014554.
- 18) Yoshimura, K., Miyazaki, S., Kanae, S., Oki, T., 2006. Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes, Glob. Planet. Change, 51, 90-107.
- Umlauf, L., Burchard, H., 2003. A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. J. Mar. Res., 61, 235-265.
- 20) Danabasoglu, G., Yeager, S.G., Bailey, D., Behrens, E., Bentsen, M., Bi, D., Biastoch, A., Böning, C., Bozec, A., Canuto, V.M., Cassou, C., Chassignet, E., Coward, A.C., Danilov, S., Diansky, N., Drange, H., Farneti, R., Fernandez, E., Fogli, P.G., Forget, G., Fujii, Y., Griffies, S.M., Gusev, A., Heimbach, P., Howard, A., Jung, T., Kelley, M., Large, W.G., Leboissetier, A., J. Lu, Madec, G., Marsland, S.J., Masina, S., Navarra, A., Nurser, A.J.G., Pirani, A., Salas y Mélia, D., Samuels, B.L., Scheinert, M., Sidorenko, D., Treguier, A.-M., Tsujino, H., Uotila, P., Valcke, S., Voldoire, A., Wangi, Q., 2014. North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part I: Mean states. Ocean Model., 73, 76-107, doi:10.1016/j.ocemod.2013.10.005.
- 21) Inoue, J., Hori, M.E., Enomoto, T., Kikuchi, T., 2011. Intercomparison of surface heat transfer near the Arctic marginal ice zone for multiple reanalyses: a case study of September 2009. SOLA, 7, 57-60, doi:10.2151/sola.2011-015.
- 22) Toyoda, T., Awaji, T., Sugiura, N., Masuda, S., Igarashi, H., Sasaki, Y., Hiyoshi, Y., Ishikawa, Y., Mochizuki, T., Sakamoto, T., Tatebe, H., Komuro, Y., Suzuki, T., Nishimura, T., Mori, M., Chikamoto, Y., Yasunaka, S., Kanamaru, Y., Arai, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Nozawa, T., Hasegawa, A., Ishii, M., Kimoto, M., 2011. Impact of the assimilation of sea ice concentration data on an atmosphere-ocean-sea ice coupled simulation of the Arctic Ocean climate. SOLA, 7, 37-40.
- 23) Bloom, S.C., Takacs, L., daSilva, A.M., Ledvina, D., 1996. Data assimilation using incremental analysis updates. Mon. Weather Rev., 124, 1256-1271.

Ⅱ.環北極陸域シ	マテムの変動	しと気候への影響
	研究課題 2	研究代表者:杉本敦子

1. 温暖化と環北極陸域生態系の変化

執筆者:杉本敦子 石川 守 吉川謙二 松浦陽次郎 大澤 晃 永井 信 鈴木力英 鄭 俊介

環北極陸域生態系は、全域が同じように変化しているのでは なく、気温の上昇率および気温上昇が見られる季節、上昇が顕 著な期間が地域ごとに異なる。また、気候、凍土、植生、土壌 有機物なども地域ごとに異なる。GRENE陸域課題(GRENE-TEA)では、北欧、シベリア、アラスカ、カナダの各地で環北 極陸域生態系の観測を実施した。表 3.2.1 は、本課題の主要な 観測地点である。本項では、環北極陸域全域での観測と地域間 の比較、およびリモートセンシングによる大陸スケールの観測 結果について述べる。また、次項では、環北極の各観測サイト からの成果をそれぞれの地域ごとに述べる。これらをあわせる ことにより、環北極陸域の各パーツを構成するそれぞれの地域 における水・熱・炭素などの循環や土壌有機物の蓄積などの特 徴を明らかにした。

環北極陸域生態系は、温暖化により植物の成長が促進されて いる地域がある一方で、東シベリア、カナダとアラスカの内陸 部などで近年樹木の成長や森林バイオマスの低下が明らかとな った。東シベリア内陸部での樹木の成長速度の低下は、高温に よる乾燥ストレスによる可能性が示されたが、生態系モデルは この現象をうまく再現できていない。また次節に示すように、 気温・地温の上昇に伴い、土壌有機物の分解量が増え、極砂漠 (スバールバル)では数度の温度上昇で生態系純生産量が負 (CO2放出)となることが示された。

温暖化に伴う土壌有機物の分解速度の上昇は、環北極陸域全

体で起こることが生態系モデルで予測されたが、炭素収支を正 確に予測するためには土壌水分の正確な予測に加え、新鮮有機 物の付加量(生態系一次生産)の正確な算出も必要である。現 在の生態系モデルでは生産と分解の両者を正確に再現すること は難しく、北極陸域の各地域の現象を再現し、将来予測につな げていくためにはモデルのさらなる改良が必要である。

これまで個別の研究プロジェクトで実施されてきた各サイトの観測を連携させ、比較し、環北極域陸域生態系の各地域の特徴を明らかにできたことは、GRENE-TEAの重要な成果である。また、第3項で述べるGTMIP(GRENE-TEAモデル間比較プロジェクト)は、課題2だけでなく、その他の課題のモデルも参加し、モデル間の連携とモデルー観測間の連携を開始することができた。

以上のように、環北極陸域生態系は、温暖化に対し地域ごと に異なる応答を示すことが課題2の研究から明らかとなった。 環北極陸域システムとしてとらえる場合、それぞれの地域の特 徴を踏まえて将来予測を行っていく必要がある。

(1) 環北極永久凍土

執筆者:石川守、吉川謙二

北極域の永久凍土帯の凍土温度と活動層把握のため、少数民 族を中心とした凍土地域の住民と協力し、広範囲観測ネットワ ークを構築し、サイエンスコミュニティーが保持している資料 を一般に対して公開した。

本ネットワークのゴールは既存の偏った凍土温度モニタリ ングを環北極域に拡大し、地域性を最小限に判断できるよう、 広範囲に空間分布を確認するための第一歩である。今までの研 究では極域全体の永久凍土が温暖化傾向にあることは指摘され てきたが、その観測点の空間的な分布には偏りがあり、極域の 集落では観測基盤の整備は十分ではなかった。本研究では、地 域住民が直接参加することにより、地方政府やエンジニアが基

表 3.2.1 G	RENE 陸域課題の主な観測サイ	ŀ

地名	サイト名	英語	北緯	経度	標高 (m)	永久凍土の有無	植生
スバールバル	ニールオールスン	Svalbard	78°92'	11°83'E	20	有(連続帯)	半極砂漠、ツンドラ
ケヴォ	ケヴォ	Kevo	69°46'	27°01'E	100	無(不連続帯~島状)	マツ、トウヒ、カンバ
カリナ	カリナ	Kalina	59°16'	27°18'E	30	無	アカマツ林
トゥラ	トゥラ	Tura	64°19'	100°14'E	330	有(連続帯)	カラマツ林
ティクシ	ティクシ	Tiksi	71°35'	128°46'E	40	有(連続帯)	ツンドラ
ヤクーツク	スパスカヤパッド	Spasskaya Pad	62°15'	129°14'E	220	有(連続帯)	カラマツ林
ウスチマヤ	エレゲイ	Elgeeii	60°00'	133°49'E	256	有(連続帯)	カラマツ林
チョクルダ	コダック	Kodac	70°33'	148°15'E	10	有(連続帯)	カラマツ、灌木ツンドラ
フェアバンクス	ポーカーフラット	Poker Flat	65°07'	147°29'W	210	有(不連続帯)	クロトウヒ林
イヌビック	イヌビック	Inuvik	68°15'	133°40'W	260	有(連続帯)	クロトウヒ、灌木ツンドラ
フォートスミス	フォートスミス	Fort Smith	60°02'	112°40'W	260	有(散在性)	マツ、トウヒ、ポプラ

盤整備や教育に貢献できるよう配慮した。入手したデータは The Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P)ま たは The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) network に配信することができるよう観測は同じプロトコー ルを用いた。

本研究によって設置されたサイトは 400 集落に及び(図 3.2.1)、そのほとんどが、少数民族の居住地で、彼らの生活も また永久凍土に密着している。極域の住民の永久凍土利用の一 つに地下貯蔵庫がある。また、貯蔵庫のサイズ、利用の目的、 年間温度の観測を行い、地域住民の凍土理解に役立てている。 本事業でもカナダ、シベリアを中心に観測を行ったが、データ をその解析の一部として用いた。長期的な観測成果が得られる までには時間がかかるものの、短期的なスナップショットデー タはサイエンスコミュニティーだけでなく参加した地域住民に 冊子として配布予定である。アラスカのデータに関してはすで に 2013 年に Permafrost in Our Time (Yoshikawa, 2013) のデータブックを配布したところで、現在ロシア版を作成中で ある。

カナダ、ユーコンテリトリーでの観測結果の一部を例として



図 3.2.1. 本研究で実施された環北極永久凍土観 測網(赤丸)。



図 3.2.2 ホワイトホースとロスリバーの地温プロファイル。両観測 地点とも永久凍土温度は、融解点よりわずかに低くなっている。こ こ数年間の顕著な温度変化は今のところ、認められない。

図3.2.2に示す。ホワイトホースでは際立った変化は見られず、 凍土は融解点近くを推移している。一方ロスリバーでは、タリ ク(永久凍土内に形成された地下水帯)内の温度上昇は見られ るが、凍土自体は寒冷傾向を示している。

(2) 環北極森林生態系

執筆者:松浦陽次郎、大澤晃

林分構造復元の結果と過去の気候要因との相関

現存する林分の毎木調査データと各林分 10 本程度の樹木個 体の樹幹解析データに基づいて林分構造と林分レベルの現存量 成長速度を推定する林分構造復元法 ^{1),2)}を用いて、周北極域亜 寒帯林の過去の林分現存量と成長量を推定した。さらに、推定 された林分現存量の年変化に一般的な成長曲線を当てはめ、あ てはめられた成長曲線から期待されるある年の林分現存量と、 林分復元法によって推定された現存量との差を「現存量偏差

(biomass anomaly)」と定義した。現存量偏差は、生物学的 に説明可能な林分の中・長期的な成長傾向に比して、気候の年々 変動により、実際の林分成長がどのくらい期待される値から外 れたかを表すと考えてよい。いくつかのサイトにおいて、各林 分での年ごとの現存量偏差が年平均気温または年最高気温と相 関があるかどうか解析した。

図 3.2.3 に示したように、カナダ北西準州のフォートスミス におけるクロトウヒ (black spruce, *Picea mariana*)の現存量 偏差は年平均気温と有意に負の相関があった (r=-0.63; p< 0.05)。これに対し、中央シベリア・トゥラのグメリンカラマ ツ (Gmelin larch; *Larix gmelinii*)の現存量偏差は年平均気温 との間に有意な相関を示さなかった (r=-0.07, p>0.05)。 同様の解析をフォートスミス地域のバンクスマツ (Jack



図 3.2.3 グメリンカラマツ(中央シベリア)とクロトウヒ(カ ナダ)の林分復元結果と気候要因の相関。

pine; *Pinus banksiana*) とポプラ (Quaking aspen; *Populus trmuloides*) についておこなったところ、バンクスマツでは気 温と現存量偏差は有意に正の相関があった ($\mathbf{r} = 0.65$ または $\mathbf{r} = 0.51$; $\mathbf{p} < 0.05$)。ポプラの反応は明確ではなかった (表 3.2.2)。

したがって、気温上昇に伴いクロナトウヒの現存量成長は減 少、バンクスマツの現存量成長は増加傾向を示していることに なる。一方、グメリンカラマツとポプラの現存量変化の傾向と 気温との関係は不明確だった。温暖化に伴う林分レベルの現存 量成長様式の変化は着目する種によって異なっており、混交林 の場合は林分の優占種の違いによって林分レベルの反応が異な る可能性を示唆している。周極域亜寒帯林の他の地域、また他 の樹種でのさらなる解析が望まれる。

表 3.2.2 フォートスミスにおける現存量偏差と気候変数の相関

	L SIII	ith, C	anada	a
	смі	Precip.	Max air temp.	Mean ai temp.
Black spruce (B44)	-	-	-	-0.63*
Black spruce (B42)	-	-		-0.45
Jack pine (P61)	-0,07	0.21	0.65*	-
Jack pine	-0.34	-0.04	0.51*	-
Quaking aspen (Q30)	-0.67	-0,40	0.51*	-
Quaking aspen	0.06	0.16	-0.36	-

北方林の土壌特性と凍土深ー現存量蓄積の関係

北方林は、一般的には常緑針葉樹林が優占し土壌はポドゾル とされているが、実際の周極域ではそのような一様な生態系で はない。永久凍土の分布と凍土の性質によって優占樹種が異な り、多くの地域は極端な大陸性気候のために寡雨である。

深さ1mまでの土壌有機炭素(SOC) 蓄積量を比較すると、 大陸レベルで大きく異なっていた。氷床が無かったために深く まで永久凍土が形成された地域(北東ユーラシア)で SOC は 大きく、氷床融解から1万年を経た北米大陸と北欧では、SOC は小さな値となった。また同様に土層1mまでのCN 比を比較 すると、二次堆積母材(fluvial)起源の土壌が、残積(residual) 成母材、岩屑母材の土壌より低い傾向を示した(図3.2.4)。北 欧の有機質土壌はグラフ上で大きくはずれた。

永久凍土の活動層厚は森林の現存量蓄積に影響していた。活 動層が厚いほど地上部現存量の炭素蓄積が大きく、北東ユーラ シア(中央シベリアと東シベリア)のカラマツ林とアラスカ内 陸部のトウヒ林で、ほぼおなじ傾きの直線関係がみられた(図 3.2.5)。 (3) リモートセンシングによるユーラシア植生成長期間の変化
 執筆者: 永井信、鈴木力英

東シベリアの代表的な植生であるカラマツ(落葉針葉樹)林 の成長期間の時空間分布の変動を広域的に検出することは、気 候変動下における植生の光合成機能を介した炭素の吸収量の評 価を高精度化するための重要な課題の一つとなる。これを遂行 するためには、衛星リモートセンシングにより毎日観測した植 生指数の解析が有用である。しかしながら、衛星データは雲被 覆や大気の影響によるノイズを含み、衛星観測で得た植生指数 がどのような植生フェノロジー(季節変化)をとらえているか に関して生態学的な解釈が不十分であるという問題点がある。

そこで我々は、次の手順により、衛星リモートセンシング観 測の解析により検出した成長期間の開始と終了の期日の地上検 証をおこない、東アジアにおける成長期間の開始と落葉の期日 の時空間分布の変動を広域的にマッピングした。はじめに、微 気象・CO₂フラックス・生態観測が長期的におこなわれている スパスカヤパッドサイトにおいて、森林上部や林床植生を毎日 撮影するインターバルカメラを 2013 年の 6 月に設置し、カラ マツと林床のカンバのフェノロジーを長期連続的に観測した。 また、気候が異なるスパスカヤパッドとエレゲイサイトにおい て CO₂フラックス観測を継続的におこなった(後述「カラマツ 林成長期間の評価」を参照)。つぎに、Terra と Aqua 衛星に



図 3.2.4 周極域森林生態系における深さ 1m までの推定 SOC 蓄積量と CN 比。



図 3.2.5 凍土深(活動層の厚さ)と森林の地上部炭素蓄積量の関係。

搭載されている MODIS センサーにより観測された 500m の空 間分解能を持つ Green-Red Vegetation Index (GRVI=(可視 緑-可視赤)/(可視緑+可視赤))を解析し、スパスカヤパッ ドとエレゲイサイトにおける 2003年から 2014年の成長期間の 開始と終了の期日を検出した。落葉性の生態系では、0 未満の GRVI は開葉前や紅葉ピーク後の植生の状態を示すことが報告 されているため^{3).4}、GRVI の時系列において、GRVI が 0 を 超えた日と下回った日を成長期間の開始と終了の期日とそれぞ れ仮定した。最後に、フェノロジー画像や CO₂ フラックス観測 で得た Net Ecosystem Exchange (NEE)の日平均値と衛星 データの解析により検出した成長期間の開始と終了の期日の対 応関係を調査し、東アジアにおける 2003 年から 2014 年の成長 期間の開始と終了の期日の時空間分布の変動を広域的にマッピ ングした。

その結果、衛星観測で得た GRVI=0 は、開葉と黄葉のピーク の期日をそれぞれ示し、衛星観測で得た GRVI の解析は、着葉 期間(開葉から落葉まで)よりむしろ潜在的に光合成を可能と する機能的な成長期間を検出できることを見いだした。また、 衛星観測で得た GRVI の解析により検出された機能的な成長期 間の開始の期日の年々変動は、CO2フラックス観測で得た3日 積算 NEE 日平均値が0を下回った期日(正味吸収期間の開始 日)の年々変動と相関関係を示すことが明らかになった(図 3.2.6)。これに対して、衛星観測で得た GRVI の解析により検 出された機能的な成長期間の終了の期日と3日積算 NEE 日平 均値が0を上回った期日(正味吸収期間の終了日)との相関関 係は弱かった(図 3.2.6)。これらの結果は、衛星観測で得た GRVIの解析により、東シベリアにおける機能的な成長期間の 開始と終了の期日と潜在的な光合成の開始の期日(炭素の吸収 が放出を上回る期日)の時空間分布の変動を高精度にマッピン グ・推定できることを示唆した。

図 3.2.7 に、スパスカヤパッドやエレゲイサイトを含む東シ ベリアの機能的な成長期間の時空間分布の変動を示した。高緯 度は低緯度と比べて成長期間の開始(終了)の期日が遅く(早 く)、それらには経年変化がみられることが分かる。しかしな がら、衛星リモートセンシング観測による機能的な成長期間の 終了の期日の検出は、開始の期日の検出と比べて次のような不 確実性に起因した問題点を含んでいると考えられる。カラマツ 林のキャノピーは鬱閉していないため、観測タワー上部より撮 影したフェノロジー画像は、成長期間が異なるカラマツと林床 のカンバの両方をとらえていた(後述「カラマツ林成長期間の 評価」を参照)。樹種ごとに異なる紅(黄)葉や落葉の様式や 期日の特徴は、リモートセンシング観測の不確実性の原因にな ることが落葉広葉樹林における詳細な地上観測に基づいて報告



図 3.2.6 500m の空間分解能をもつ Terra と Aqua 衛星に搭載さ れた MODIS センサーで毎日観測した GRVI の解析により検出した スパスカヤパッドとエレゲイサイトにおける機能的な生長期間の 開始 (SGS) と終了 (EGS) の期日と CO₂フラックス観測で得た 3 日積算 NEE 日平均値が 0 を下回った期日 (正味吸収期間の開始日) と上回った期日 (正味吸収期間の終了日)の対応関係。



図 3.2.7 500m の空間分解能をもつ Terra と Aqua 衛星に搭載された MODIS センサーで毎日観測した GRVI の解析により検出した東シベ リアにおける機能的な成長期間の開始と終了の期日の時空間分布。

されている⁴⁾。衛星リモートセンシング観測は、センサーの空間分解能に相当する範囲に生育する植生の平均的なフェノロジー(たとえば 500m×500m)をとらえている。

(4) 年輪と生態系モデルを用いた環北極生態系の変化傾向と将 来予測

執筆者:鄭峻介、杉本敦子

周北極陸域生態系の樹木が過去の気候変動に対してどのような応答をしてきたのかを明らかにすることは、過去の現象に 関する知見を与えるのみならず、陸面モデル及び物質循環モデ ルの検証や高度化などを通して、将来予測の精度向上に大きく 貢献することができる研究課題である。GRENE-TEAでは、集 中的に観測を行っている 6 森林サイト(カリーナ(KAL)、ヤ クーツク(YAK)、ウスチマヤ(UST)、チョクルダ(CHO)、 イヌビック(INU)、フォートスミス(FSM)(表 3.2.1)に おいて、樹木年輪試料を採取し、過去 100 年間の樹木年輪幅指 数と炭素同位体比(δ^{13} C)の時系列データを作成し、過去の気 象データ(CRU TS3.10 data set)と併せて、その解析を行った。

過去の気候変動に対する樹木の応答は、地域ごとに異なって おり、特徴的な空間変動を示した。北極圏内の2森林サイト(チ ョクルダ、イヌビック)では、過去60年間(1950-2010年)に おいて、年輪幅指数が春と夏の気温と有意な正の相関を示し、 低温環境が樹木成長量を律速してきたことが示唆された。一方 で、北緯60°付近の森林サイト(カリーナ、ヤクーツク、ウス チマヤ、フォートスミス)は、年輪幅指数が春、もしくは夏の 降水量と有意な正の相関を示し、水分環境により樹木成長量が 律速されてきた可能性が高い。

大陸性の乾燥気候帯に位置する、東シベリア中央部の二つの 森林サイト(ヤクーツク、ウスチマヤ)では、より顕著に樹木 成長量が水分環境によって律速されていた。同森林サイトでは、 過去60年間に、樹木の成長量は夏季の降水量と正の相関を示す のみならず、夏季の気温と有意な負の相関を示し、近年の急激 な気温上昇により樹木成長量が大きく減少していた可能性が示 唆された(Tei et al., 2014)。年輪8¹³Cの変動は、その樹木個 体の光合成速度や気孔開閉度など、樹木生理学的な因子の変動 を反映する⁵。同森林サイトの年輪8¹³Cの解析結果から、近年 の樹木年輪幅の減少は、気孔開閉度の減少によって生じている こと、すなわち、気温上昇により蒸発散量が増加し、乾燥スト レスにさらされたことが強く示唆された。

樹木の過去の気候変動に対する応答を、より広域で調べるた めに、樹木年輪の様々なパラメータのデータベースである International Tree-Ring Data Bank (ITRDB, http://www. ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html)から、北緯50°以北で、標 高2000m以下、及び時期列が1990年以降まで測定されているサ イトの年輪幅データ取得し、年輪幅指数を求めた後、気象デー タ (CRU TS3.10 data set)との相関分析を行った。その結果、 東シベリア中央部に位置するヤクーツクやウスチマヤで観測さ れたような気温との有意な負の相関関係が、アラスカとカナダ の内陸部の多くの森林サイトでも観測された(図3.2.8)。この ような森林サイトの多くでは、1960年代に比べて、近年の年輪 幅指数が小さくなっていた。

この気温上昇が樹木成長量に与える負の効果が、将来の樹木 の成長量、すなわち炭素固定量の変動に与える影響について年 輪解析と生態系モデルから考察した。GRENE-TEAで集中的に 観測を行っている6森林サイトに、樹木年輪幅指数と気温が有 意な負の相関を示したアラスカ内陸部の1サイト(AK123, *Picea galuca*; 64N, 144W)を加えて、気象データ(CRU TS3.10 data set)から樹木年輪幅指数の変動を復元する重回帰モデル (1951-2010の年輪幅指数と気象データを使用)をAIC(赤池情 報量基準)を用いてサイト毎に求め、21世紀の気候変動

(RCP8.5 scenario)に対する樹木の応答を推定した。加えて、 1次元の陸面過程モデル (NOAH-LSM 2.7.1)⁶⁾を結合させた 植生動的モデル (SEIB-DGVM)⁷⁾の樹木純一次生産量 (NPP) の計算結果を比較した (図 3.2.9)。樹木年輪幅指数と気象デー タとの重回帰モデルから推定した樹木成長量は、その説明変数 である気温と降水量についての外挿を含むため、解釈には注意 が必要であるが、東シベリア、アラスカ及びカナダ内陸部の森 林サイトでは、樹木成長量の減少が将来も続く予想となった。 一方、植生動的モデルでは樹木生長量の減少は再現されなかっ た。すなわち、上述の地域のような大陸性の乾燥が厳しい地域 では、植生動的モデルによる将来の樹木による炭素吸収量の見 積もりが過大評価になっている可能性があり、その原因の一つ



図 3.2.8 年輪幅指数と夏季(北緯 67°以北のサイトでは7月、北緯 67°以南のサイトでは6·8月)の気温との相関係数(緑:正相関、赤:負相関)の空間分布(相関係数は1950-2010のデータを使用して計算)。

は気温上昇が樹木成長量に与える負の効果がモデルの中で良く 再現されていないことによると考えられる。今後、現場観測、 モデル研究の両面から、樹木年輪解析で明らかとなった周北極



図 3.2.9 年輪・気象重回帰モデルから推定した年輪幅指数(左)と 植生動的モデル SEIB-DGVM から推定した樹木純一次生産量(右) の過去(1961–1970;青色、1996–2005;緑色)と将来(2091–2100; 赤色)。 域の一部地域における樹木成長量に与える気温上昇の負の効果 について、その詳細なメカニズムを明らかにしていくことが重 要である。

2. 長期観測サイトにおける生態系の変動

執筆者:内田雅己 飯島慈裕 杉本敦子 鈴木力英 太田岳史 小谷亜由美 永井 信 内田昌男 佐々木正史

GRENE-TEA 観測を実施した多くのサイトで、気温上昇に伴 う CO₂放出量の増大や、樹木の成長速度低下の可能性が示され た。温暖化による樹木成長速度の低下は、温暖化に伴う乾燥ス トレスと考えられることから、土壌水分の変化が鍵となる。温 暖化に加え、今後頻度が増大すると考えられる極端現象も生態 系に大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。特に乾 燥気候帯の東シベリアにおける極端な湿潤イベントは生態系に 対して大きなインパクトを与えた。また、北極域・亜北極域の 生態系は貧栄養であることが改めて示され、利用可能な窒素量 においても土壌水分が鍵となる可能性が示された。

(1) スバールバル極砂漠

執筆者:内田雅己

ツンドラ気候に属しているスパールバル諸島は、ノルウェー 本土の約 1000km 北に位置する。陸地の 60%程は氷に覆われて おり、植生が存在するのは 10%程である。スパールバルで最も 大きい島であるスピッツベルゲン島の西部にあるニーオルスン 観測研究拠点に気象観測システムを立ち上げた。冬期に気温が プラスとなる日が何日か記録された。ヒーティング機能が無い 降水センサーでも、冬期中の降雨(rain on snow)現象を捉え ていた(図 3.2.10)。

CO2の吸収源である植生のモニタリングを開始した。氷河後 退時期が異なり、かつ土壌水分条件の異なる4つのプロット (1×1m²)を設定したところ、観測期間において、全てのプロ ットの被度に10%程の増加が認められた(図 3.2.11)。このこ とは、2012~15年は植生の被度増加に適した気候であったこ とを示唆した。また、植生を構成する植物の光合成活性につい て調査したところ、維管束植物の光合成特性は、種によるばら つきはあるものの、至適温度は15℃前後であり、5-20℃の範 囲内では、光合成活性は大きく変化しなかった。一方、光との 関係については、600mmol m⁻² s⁻¹程で飽和した。土壌呼吸速 度は水分状態を変化させても、測定温度範囲内では大きな違い は認められず、いずれの水分状態においても温度上昇にともな って増加した(図 3.2.12)。



図 3.2.10 調査地に設置した気象計により記録された rain on snow イベント(赤丸内)。気温:折れ線グラフ。降水 量:棒グラフ。



図 3.2.12 異なる土壌水分状態における温度と土壌呼吸速度との 関係。



図 3.2.13 地点 (A,B,C) の生態系純生産量に対する温度上昇 の影響。

ツンドラ生態系における植生・土壌および大気を循環する炭 素(特に CO₂) についコンパートメントモデルを作成し、環境 要因の変化が生態系炭素収支に与える影響について感度分析を 実施した。その結果、生態系純生産量は、温度上昇による土壌 呼吸量の増加を受け、温度の上昇とともに低下する結果が得ら れた(図 3.2.13)。

降水頻度や維管束植物の着葉期間の増加は生態系純生産量の 増加に僅かに貢献した。しかしながら、温暖化は、無雪期間を 延長させる可能性があるため、その期間を延長させてみると、 全てのプロットで生態系純生産量は減少した(図3.2.14)。こ れは、高緯度地域のため、秋期の日照時間が7月下旬以降急速 に減少することにより、秋期には、光合成生産の可能な時間が 急速に短くなる一方、土壌温度は低下するものの、土壌呼吸量 は光合成生産量と比較するとそれほど小さくならないことが影 響していると考えられた。

ツンドラ生態系に対する温暖化増幅の影響としては、温度上 昇が土壌微生物の呼吸活性に与える影響が大きいことが本研究 から示唆された。また、温暖化により秋の降雪時期が遅れるよ うであれば、そのことも増幅要因の一因となり得る可能性が明 らかとなった。現在、有機炭素の平均滞留時間は56年ほどと 推定されている。植生の被度やそれによるリター供給量の変化、 温暖化による有機炭素の滞留時間の変化等もツンドラ生態系の 温暖化増幅に関与する可能性が示唆されるため、今後の重要な 研究課題の一つとなることも明らかとなった。



図 3.2.14 地点 (A,B,C) の生態系純生産量に対する無雪期間 延長の影響。

(2) 東シベリア北極圏生態系

執筆者:杉本敦子、飯島慈裕、鈴木力英、他

チョクルダにおける活動と成果

東シベリア北極圏には、ヤナ-インディギルカ-コリマ河川低 地が広がっている。亜北極のタイガ林と東シベリア海沿岸部の 間は、ツンドラ植生の中にタイガ林を構成するカラマツの疎林 がパッチ状に広がるタイガ-ツンドラ境界生態系となっており、 ここは環境の変化によりタイガにもツンドラにも変化しうる場 所である。このような植生帯に位置するチョクルダ周辺にカラ マツ疎林の密度が異なる3カ所に観測点を設け、このうち典型 的な境界植生帯となっているコダックサイトに気象・渦相関フ ラックス観測システムを設置した。また、土壌呼吸測定用の自 動開閉チャンバーを CO₂とメタンの両方を並列で測定できる ように改良し、夏期間の観測が可能なシステムを立ち上げた。

植生は微地形に対応して決まり、カラマツは地表面がわずか に高い場所に分布し、ほとんどのカラマツが生育する場所は土 壌水分が40%を超えない場所である。また、カラマツの樹高と 胸高直径は設定した観測サイトにより異なり、カラマツの葉1 枚の重さと窒素含量も樹木サイズの違いと同様な傾向を示した

(図 3.2.15)。加えてこれらのパラメータは微地形に依存して おり、カラマツが根を張ることのできる比較的乾燥した微地形 の広がりが大きいほど成長が良いと解釈できる(Liang et al., 2014)。

メタンフラックスは、植生に依存して変化し、スゲ湿地で高 いフラックスを示し、樹木が生育する場所ではメタン放出は見 られなかった。また土壌水分に依存したと考えられる年々の変 動を示した。チョクルダ周辺では、2011年に河川水位の上昇と ともに地表面が湿潤となり、メタンフラックスは上昇したが、 翌年以降、土壌水分(湿地の水位)は徐々に低下したにもかか わらず、場所によってはメタンフラックスは遅れて上昇し、 2013年まで大きなフラックスが継続した。このことは、土壌水 分が上昇した後、土壌の還元が年を越えて進行したことを示し ている(Shingubara et al., in preparation)。

メタン放出量を広域評価するため、現場の植生調査結果と高 解像度衛星データ(Worldview 2)を用いてコダックサイト周 辺(10x10km)の植生図を作成した。植生は8クラスに分類し、 そのうちスゲ湿地が全体の約1/4を占めた。メタンフラックス が最も高いのは、土壌水分が高い植生であるスゲ湿地で、この 地域のメタン放出量の約8割がこのスゲ湿地からである

(Morozumi et al., in preparation)_o



図 3.2.15 カラマツの幹の直径と高さ、葉1枚の質量、および葉の 窒素含量の関係(Liang et al., 2014。)

前述のように、土壌水分は植生とメタン放出量を支配する主要な因子である。コダックサイトの夏期の土壌水分は、春の融雪水が表層土壌に留まることにより高くなることが水同位体比から明らかとなった。またこの表層土壌の排水速度は河川水位に依存していると考えられる(Takano et al., in preparation)。この地域は海岸付近から内陸部に100km以上の地点でも標高が10m程度と、ほとんど標高差のない平坦な河川低地となっている。従って、この地域の植生や温室効果ガスの動態を正確に予測していくためには、河川水位の変化メカニズムを理解し、正確に予測していくことが必要である。

ティクシにおける活動と成果

東シベリアのティクシ(北緯 71.58 度、東経 128.75 度)に おいて、水文気象、凍土温度観測および活動層厚や地形変化等 の現地調査を経年的に実施した。1995年以降の地温ボアホール 観測によって、近年の永久凍土温度の昇温傾向が明らかとなっ た。2004年までは年々変動に昇温傾向はみられなかったのに対 して、その後、2006年設置の新ボアホールともに、一貫した温 度上昇傾向(+0.045℃/yr)が認められた(図 3.2.16)。これ は環北極で共通してみられる気温上昇に加えて、積雪・降水増 加などの要因が考えられる。この地温上昇と対応して、内部の 地中氷(アイスウェッジ)の融解が進み、地表面では5~10m のスケールで亀甲状に周辺部が沈降する凍土融解地形(highcenter polygon) がコケや矮性低木の密集する湿性ツンドラ地 帯で発達している。ティクシサイトでは、トラフ状の水域(サ ーモカルスト池: thermokarst pond) が発達し、1m 近い水深 に達する場所も確認された(図 3.2.17)。これらのサーモカル スト池も、環北極のツンドラ地域で近年共通して発達しており、 これらは互いに水域同士がつながって、河川へと流出する流路 網として発達していることが明らかとなっている。(Lijedahl et al., 2016)。これらの変化は、将来的に気候条件の変化に加え て、凍土融解による地形変化(流域網の発達)が重なることで、



図 3.2.16 ティクシ地温ボアホールサイトにおける 10m 深地温(月 平均値)の変化。赤:1995 年設置の旧ボアホール、青:2006 年設 置の新ボアホール。

ツンドラ地域からの流出が促進され、地表面の水文環境が大き く変化する可能性を示唆している。また、地域的な活動層の融 解状況について、ティクシサイトでは国際永久凍土学会の基準 による1km四方のCALM(Circum-Polar Active Layer Monitoring) グリッドが設定されており、2014年の調査によ



図 3.2.17 ティクシの湿性ツンドラ地域で発達したサーモカルス ト池の様子(写真)と池の水深(グラフ)。



図 3.2.18 ティクシの CALM グリッド (1x1km) における活動層 厚分布。

- 1: Stony Dryas/lichen mountain tundra,
- 2: Stony grass/Dryas/lichen tundra on ridges in intermontane basins,
- 3: Spotty tussock tundra on footslopes,
- 4: Carex/green-moss spotty tundra on aprons,
- 5: Polygonal tundra on aprons,
- 6: Carex/Eriophorum/green-moss tundra on inter-ridge depres sions,
- 7: Grass/Carex/green-moss floodplain tundra.

って、湿性ツンドラから乾燥ツンドラ地帯との間に大きな活動 層厚の差があることが明らかとなった(Iijima et al., 2016b)。 植生の被覆率の高い湿性ツンドラ地点では活動層厚が 30-50 cm 深であるのに対して、礫質の斜面にあたる乾燥ツンドラ地 点では 60-100 cm に達していた(図 3.2.18)。これらの不均質 な融解深分布も、土壌水分や、地下水流動の変化を通じて、凍 土融解と連動した、生態系・水文変化に影響を与えると考えら れる。

(3) 東シベリアタイガ林生態系

執筆者:飯島慈裕、太田岳史、小谷亜由美、永井信、杉本敦子、鄭俊介、他 フラックス観測と湿潤イベントの影響

ここでは、各種フラックスと 2005 年~2008 年にかけて観測 された湿潤イベントの関係について報告する。

気象要素の気候値は、降水量はエレゲイの方がスパスカヤパ ッドよりも 20-30%多いが、気温はほぼ等しい状態にある。ま た、スパスカヤパッドでは、2005 年~2008 年に湿潤化により、 上層植生の枯死、下層植生の繁茂に影響が見られた(図 3.2.19、 3.2.20)。また、エレゲイでは最寄りの気象官署のデータによ りスパスカヤパッドと同じ時期に湿潤化の影響を受けたが、上 層植生の枯死などの影響は見られなかった。

スパスカヤパッドでの気象要素の経時変化は、以下の通りで ある(図 3.2.21)。降水量は 1998 年~2000 年および 2009 年 ~2011 年が平年並み、2001 年~2004 年が渇水年、2005 年~ 2008 年が豊水年であった。このような降水条件の下、大気側の 環境制御因子(純放射量、気温、飽差)には影響が見られなか ったが、地表面下の成分(地温、土壌水分量)とは関係が見ら れた。そして、レナ川を中心とする気候変動に対する植生への 影響は、2001 年~2004 年の乾燥化ではなく、その後の 2005 年~2008 年にわたる湿潤化による影響であったと考えられる (Ohta et al., 2014)。

図 3.2.22a は、土壌水分量と群落コンダクタンスの関係である。これによれば、2006 年以前と 2007 年以降で関係が異なっ



図 3.2.19 スパスカヤパッドにおける主な4樹種の樹冠投影図。 赤:カラマツ、青:カンバ、オレンジ:ヤナギ、緑:ハンノキ。 a) 1998 年と b) 2014 年を示す。

ており、2007年以降の方が同じ土壌水分量で群落コンダクタン スの値が 2006年以前より小さくなることが分かる。また、図 3.2.22bは土壌水分量と総一次生産量の関係を示している。こ れによれば、2007年以前の方が同じ土壌水分量であっても総 一次生産量は高くなる傾向にある。いずれも、これらの関係は 期間後半の方が前半よりも同じ土壌水分量に対して群落コンダ クタンス、総一次生産量が低くなる傾向がある。すなわち、2005 年-2008年の過湿条件によって蒸発散量、光合成量ともに低下 している。なお、土壌水分量と群落コンダクタンスの関係は 2006年から 2007年の間に、土壌水分量と総一次生産量は 2007 年から 2008年の間に関係が変化しているが、その1年のタイ ムラグに関する原因については、現在、検討中である(Ohta et al, 2014)。

また、2005年~2008年の間の湿潤化により、カラマツを主体とする上層植生の枯死が発生し、それに伴って下層植生に日射が当たることにより下層植生の繁茂が著しく増加した。下層植生が繁茂する事によって下層植生による蒸発散量と純一次生産量が増えることになった。そして、カラマツを主体とする上層植生の枯死は、蒸発散量と純一次生産量の上層植生に対する影響が原因となる。そして、これらの事がモデルによっても確かめられた (Kotani et al., in preparation)。

生産性の高いエレゲイの森林とそれほど高くないスパスカ ヤパッドでの森林における、蒸発散量、光合成量の比較が行わ れた。両サイトを比較すると、蒸発散量の差は大きくはないこ



図 3.2.20 スパスカヤパッドにおける主な4 樹種の樹高分布図 赤:カラマツ、青:カンバ、オレンジ:ヤナギ、緑:ハンノキ。 a) 1998 年、b)2014 年を示す。写真はスパスカヤパット(名古 屋大学・太田岳史、小谷亜由美)。



図 3.2.21 スパスカヤパッドのタワーで観測した気象データ(Ohta et al., 2014)。 a) Net all-wave radiation. b) Air temperature. c) Vapor pressure deficit. d) Soil water content. e) Ground temperature. f) Precipitation.



図 3.2.22 土壌水分量と群落コンダクタンス(a)と総一次生 産量(b)の関係 (Ohta et al., 2014)。



図 3.2.23 5月から9月のスパスカヤパッド(青)とエレゲイ(赤) における蒸発散(上)と純生態系生産(下)。水平方向の直線は夏 期(6-8月)の平均値(Kotani et al., 2014 を改変)。

とが分かる(図 3.2.23 上)。しかし、純一次生産量は、エレゲ イの方がスパスカヤパッドよりも約 30%大きくなった(図 3.2.23 下)。この蒸発散量が両サイトで等しくなった理由とし ては、スパスカヤパッドの森林は、上記のように上層植生の枯 死、下層植生の繁茂により上層植生と下層植生の蒸発散量の比 率が相対的に変わったためだと考えられる(Kotani et al., 2014)。



図 3.2.24 スパスカヤパッドサイト (カラマツ林) において 2014 年 に撮影したフェノロジー画像の解析により得た%RGB と GEI の季 節変化。



図 3.2.25 スパスカヤパッドサイト (カラマツ林)の 2013 年におけるフェノロジー画像と群落蒸発散量(ET)、生態系正味交換量(NEE)、気温(Ta)、10 cm深土壌水分量(SWC)、日降水量(P)の季節変化。

カラマツ林成長期間の評価

毎日撮影したフェノロジー画像からカラマツ林の赤・緑・青 のデジタルナンバー(R・G・B)の平均値を抽出し、それぞれの デジタルナンバーの割合(%R=R/(R+G+B)、%G=G/(R+G+B)、

%B=B/(R+G+B)) と Green Excess Index (GEI= (G-R) + (G-B))を計算した。%G と GEI は融雪期と開葉期に増加 し、黄葉と落葉期に減少した。%B は融雪期と開葉期に減少し た。%R と%B は黄葉期に増加と減少を、黄葉のピーク後に減 少と増加をそれぞれ示した(図 3.2.24)。これらの結果は、他 の生態系を対象とした過去の研究事と同様に⁸、デジタルカメ ラにより毎日撮影されたフェノロジー画像の解析により、機能 的な成長期間の年々変動を定量的に検出できることを示唆した。

前述のように、観測タワーの上部より撮影したフェノロジー 画像は、カラマツと林床のカンバのフェノロジーをとらえてい た。カラマツの開葉と黄葉のピークの期日は、林床のカンバと 比べて、1週間程度遅かった。CO2フラックス観測で得た3日 積算 NEE 日平均値が秋に0を上回った日(正味吸収期間の終 了日)は、カラマツよりかはむしろ林床のカンバの黄葉のピー クの期日に相当した。

2004から 2013 年のスパスカヤパッドサイト CO₂フラック ス観測で得られた NEE 日平均値の符号に基づき、正味吸収期 間の開始日(3日積算 NEE 日平均値が連続して0を下回るよ うになる期日)と終了日(同様に0を上回るようになる期日) を評価した(図 3.2.25)。観測期間における正味吸収期間日数 は101から127日(平均112日)で、この期間でトレンドは みられなかった。春季の正味吸収の開始日と秋季の正味吸収の 終了日は、それぞれ4月と9月の月平均気温と相関があり、温 度が高い年ほど NEE の符号の変化は早期化した。前述の衛星 リモートセンシングにより評価された機能的な成長期間の開始 の期日と、フラックス観測の CO2 吸収開始日には相関があった ことから(「1. 温暖化と環北極陸域生態系の変化(3)リモート センシングによるユーラシア植生成長期間の変化」を参照)、 気温が高い年には開葉が早く光合成吸収の開始が早いことが、 正味吸収の早期化をもたらすと考えられる。一方で、秋の気温 が高いほど早く正味放出が始まるのは、9月中旬から始まる黄 葉に先立ち光合成吸収が減少するなかで、気温が高いほど秋季 の生態系呼吸量の減少が遅くなるためと考えられる。

湿潤イベントによる森林の劣化

東シベリアでは、レナ川中流域において、気象水文観測、生 態学・永久凍土調査を継続し、長期の現地観測データを得てい る。ヤクーツク近郊のスパスカヤパッド研究林サイトでの長期 観測データは、GTMIP サイトとしてデータ提供されている。

この地域で広域に確認される 2000 年代以降の陸域環境変化 として、連続した過剰な夏季降雨と冬季積雪年の継続によって、 夏季の永久凍土融解層(活動層)の過湿、湛水状況の出現(Iijima et al., 2016a) にともなうカラマツ (Larix Cajanderi) からな る北方林の上層木が枯死・衰退する現象が起きた。この地域は 連続的永久凍土帯であり、気候湿潤化によって、活動層が深く 土壌水分か過剰となる状態が複数年継続しており、この森林荒 廃は土壌環境が変わることで起きた「湿潤ストレス」と考えら れる (Iijima et al., 2014)。また、2009、2014年の9月に実 施した活動層厚調査から、2005-2008年の湿潤気候年に微地形 の谷や平滑面で深くなっていた活動層は依然として 50cm 以深 に湿潤な層が残り、さらに微地形の斜面上部や尾根上の活動層 も 10-20cm 程度深くなりつつあるなど、長期的に活動層に影 響が残っている様子が確認された。気象観測タワーでの樹冠上 の熱・水・炭素フラックス測定によれば、群落蒸発散量の年々 変動は夏季の土壌水分量と線形な関係にあったのが、2007年を 境にその関係が低下する方向にシフトし、翌2008年以降には、 群落の総一次生産(GPP)の関係も同様にシフトし、水・炭素 収支の経年的な影響が明らかとなった(Ohta et al., 2014)。 ただし、湿潤ストレスによる森林荒廃の進行の生理的プロセス は依然不明であり、土壌湛水環境の継続に伴う根の呼吸・吸水 阻害や、それに伴う葉の生理応答や幹の樹液流変化を同時に明 らかにして、枯死に効く直接的要因を捉える必要がある。

さらに、ヤクーツク近郊のレナ川右岸・左岸での衛星データ 解析に基づき、湿潤気候年以降の水域の拡大状況と、それによ る永久凍土・活動層変化を伴う北方林変化域の抽出を試みた。



図 3.2.26 レナ川中流域(ヤクーツク周辺)における水域と植生の 変化地図。

(a) 2007年(ALOS-PALSAR)→2009年(ALOS-PALSAR)の変化、
 (b) 2007年(ALOS-PALSAR)→2015年(ALOS2-PALSAR2)の変化。

2006~2009 年の夏季の ALOS-AVNIR2 画像から、水域、草原、 北方林の教師付き分類を行い、その区分に対応させて ALOS-PALSAR 画像から、ジオコーディングとノイズ軽減の平滑化処 理を行った後、マイクロ波の後方散乱係数の閾値から水域と湿 潤ダメージを受けた森林域の抽出を行い、水域・森林変化を地 図化した(図 3.2.26)。レナ川中流の左岸地域は、地下氷が少 ない砂質ロームからなる河岸段丘上に北方林が広がっており、 凍土融解に伴うアラス湖沼は少ない。この地域では、2006~ 2009年にかけて段丘を刻む谷筋に沿って水域が拡大し、その 谷筋に森林の変化域が抽出された。一方、右岸地域は、凍土氷 を多く含む平地が広がり、アラス湖沼の密度が非常に高い。そ こでは、同期間にアラス湖沼の面積が拡大し、湖沼の周囲を囲 むように、森林の変化域が広がる様子が抽出された。これは、 左岸では谷や地形的に平坦になった地域のカラマツが選択的に 枯死し、右岸ではアラスの拡大と共に縁辺部のカラマツが倒伏、 枯死していた現地の観察結果ともよく一致していた。ALOS 後 継機の ALOS2-PALSAR2 画像を利用した、その後の水域・森 林変化についても、同様の傾向が継続しており、左岸地域の谷 筋と、右岸地域のアラス湖沼周辺において、依然として変化が 確認されている。以上から、ALOS 衛星データによる、北方林 内の林床状態と森林変化を抽出する手法によって、湿潤化の初 期の地表面状態を抽出し、その後の森林変化を追うことで、永 久凍土、森林荒廃をもたらす一連の現象を経時的に捉えられる 可能性が確認された。

気温上昇が東シベリアタイガ林樹木の成長に及ぼす影響と栄 養塩循環

GRENE-TEA 観測サイトのヤクーツクとウスチマヤにおい てカラマツ年輪を採取し、カラマツ成長量の変化と気温・降水 量の変動との関係を調べた。樹齢によって幹成長速度が変化す る効果を除くため、1911~1930年(#1)、1931~1960年(#2)、 1961~1990年(#3)、1991~2011年(#4)のそれぞれの期 間に90~100年の樹齢の個体の年輪幅を比較した。ヤクーツク 気温は#1と#3の期間はその他の期間より低く、これらの期 間はヤクーツク、ウスチマヤともカラマツの成長はよく、#2と #4の温暖な期間はヤクーツクでは成長が悪かったことがわか る(図3.2.27)。ヤクーツクよりわずかに降水量が多いウスチ マヤでは、#2の期間の成長速度の低下は顕著ではないが、#4 の期間は著しい成長速度の低下が見られた。これらの結果は東 シベリアの乾燥気候帯の森林では、温暖化により成長量が低下 する可能性を示している(Tei et al., 2014)。

ャクーツクのスパスカヤパッドのカラマツ林において、植物 が利用可能な土壌窒素プールの観測を行ったところ、無機態窒 素プールは顕著な季節変化を示し、夏期の前半までは極めて小 さく、晩夏に急激に増大した。そして、植物の成長期間が終了 後に最大となり、翌年の春には極めて小さな値に戻ることがわ かった。このことは、タイガ林土壌中では、植物と土壌微生物 の間で窒素をめぐる激しい競争があり、植物は成長期間が終了 するころの晩夏にようやく窒素の獲得ができるようになると考 えられる(Popova et al., 2013)。



図 3.2.27 ヤクーツク(a, c)とウスチマヤ(b, d) における過去 100 年間の年輪幅の変動

(4) アラスカ湖沼・湿地の温室効果ガス

執筆者:佐々木正史、内田昌男

凍土上の湖沼は選択的に凍土を融解して湖底下に不凍域(以 下タリク)を形成する。本研究では、近年の気候変動と関連し た永久凍土の脆弱性に関する影響評価の一環として、永久凍土 融解速度に関する知見を得ることを目的とした。

先ずアラスカ(北極圏ツンドラ〜タイガ)の湖沼表層水中溶 存メタン濃度(以下 DM)を観測し、永久凍土融解の影響を調 査した結果を図 3.2.28 に示す。一般に DM は湖沼面積 A が小 さいほど高いが、アラスカ北極圏(ツンドラ地帯)の DM-A ト レンドは、スウェーデンなどの北欧の湖沼におけるトレンドに 一致し、凍土融解による DM の強調効果は認められなかった。 DM と気象条件から推計した湖沼から大気へのメタンフラック スについてもノルウェーやスウェーデンの北欧と同レベルであ った。一方、タイガ地帯の湖沼 DM はツンドラに対し、有意に 高いレベルであったが、永久凍土融解との関連については明確 ではない⁹。

次に連続永久凍土のツンドラ土壌上に円形の湖沼が一つ存 在する軸対称2次元モデルを作成し、有限要素法(FEM)によ る非定常熱伝導解析を実施(ツンドラの代表気象条件としてサ グウォンヒルのデータを使用)したところ、全節点=0℃の初 期条件では季節変動は計算開始から数年程度で安定化して、湖 沼底下にタリクの形成が認められた。湖沼底における年間の熱 収支は入熱(鉛直方向)が余剰し、これがタリクの形成(不凍 化)・成長を支える。タリク底ではその大きな熱容量のために 季節変動は殆ど認められず、通年で入熱の熱流束であった。こ れによって永久凍土が常時融解(タリクが成長)するが、その 速度は高々数 mm/yr と極めて緩慢であった。これが永久凍土 の融解に伴う湖水 DMの強調(増加)効果が認められなかった 理由の一つではないかと考えられる。

これに対し、湖沼周囲の陸地では永久凍土のフロント (permafrost table) がある深度(0.5–1m 程度)で年間の熱収 支がバランスしてしまい、永久凍土は殆ど融解しないという結 果になった¹⁰⁾。

今後この解析には日射と降雨による入熱を考慮する必要が ある。また、気温の上昇(温暖化)効果についても推計を実施 する必要がある。

ー方、サーモカルスト湖では永久凍土の融解に伴う活発なメ タン放出(バブリング)が報告されている例¹¹⁾も少なくない。 今後サーモカルスト湖の熱的不安定(短時間で大量に凍土が融 解)が生ずるメカニズムに注目する必要がある。



図 3.2.28 溶存メタン濃度 DMと湖沼サイズ Aの相関。

3. GRENE-TEA 観測とモデルの連携研究

執筆者:斉藤和之 宮崎 真 森 淳子 末吉哲雄 佐藤篤司 伊勢武史 山崎 剛 朴 吴澤、他

GRENE-TEA陸域モデル相互比較(GTMIP)は、①北極陸 域の観測とモデル研究の連携体制を構築し、またモデル研究者 間の情報交換・協力を実質化・深化させること、また、②物理 過程から生物地球化学過程、生態系過程に及ぶ現行の各種陸域 モデルにおけるばらつきと不確実性の定量化とそれらが起因す るモデル実装過程の違いを評価すること、更に、③それらの結 果を次世代寒冷圏陸域モデル構築のために活用することを目的 として計画した。 2段階のステージを構成して実施した。Stage 1 は、四つの GRENE-TEA観測サイトにおける直近30年ほどのサイトシミ ュレーションであり、Stage 2は近代化以降(1850~2100年) の北緯50度以北の環北極域を対象とした広域シミュレーショ ンである。

Stage 1では、観測研究との連携の成果として得られた観測値 ベースのモデル強制データを利用し、熱・水・炭素循環につい てモデル間、サイト間の差を評価するとともに、それらを特徴 づけるプロセスや条件の特定を目的とした。

一方、Stage 2は、Stage 1により得られた結果を空間的・時間的な文脈の中に位置づけることにより、モデルの空間的代表 性を評価するとともに、温暖化時の北極陸域の反応に対するモ デル・地域的特徴を抽出することを目的とした。

更に、陸域モデルの予測性能の定量化とその改良をはかるた めに、新しい「データ同化手法」の評価を行い、それに基づく モデル改良が予測性能を向上させることを示した。

(1) 観測-モデル連携

執筆者:斉藤和之、GRENE-TEAモデリンググループ

上にも示したように、GTMIPに大きく三つの目的があった。 一つには、観測ーモデル間とモデルーモデル間の連携、二つ目に 現行モデルの不確実性の定量化と要因の評価、そして、次世代 寒冷圏陸域モデルへの提言である。その背景には以下のような 状況があった。まず、高緯度寒冷圏陸域には、凍土・積雪など の物理過程に関して単なる低・中緯度域の外挿では扱えない事 象が存在する。そのような物理的状況は生物地球化学的条件も しくは生態系の挙動に強く関連し相互に影響を与える(図 3.2.29)。

そのため数値モデルの開発・高度化においては、物理過程か ら生物地球化学的過程、また生態系過程について寒冷圏特有の 考慮・実装・評価をしなければならない。にもかかわらず、寒 冷圏モデルを評価するのによいベンチマーク(駆動および検証



図 3.2.29 北極陸域の(大気-積雪-水文-植生-地形) システムの概念図(Saito et al., 2013bを基に改変)。

に使うことのできる標準的なデータセット、評価指標と評価実 施プロトコールのパッケージ)が存在しなかった。一方、数値 モデル研究の内部にあっても、研究者コミュニティーにおける 物理系と生物地球化学系(生態系)との間の相互交流は限られ たものであった。

そのような状況において、モデル研究者側では上記のような モデルの実装・評価のためのベンチマークの必要性は感じてい ても、その作成や評価にはかなりの持続的かつ組織的な労力や、 更に観測研究者との連携(下記に述べるように観測研究におい てもグループやサイト間の観測が充分ではなかった)が要求さ れるため、実現の手立てが見えておらず、そのような努力は行 われて来なかった。

GTMIPのプロトコール策定以前に、モデル研究者(物理系6 名、生態系2名、物理-生態系2名)に対して行ったアンケート において、モデル研究と観測研究の連携についても意見を収集 した。結果はモデル研究者側では観測研究者との連携を望んで いることを裏付け、またその内容についても以下のようにある 程度具体的な優先度が示された。

<u>モデル研究者が観測研究(者)から期待すること</u>は、(ポイ ントが高い順に)モデル検証のためのデータ、モデル駆動のた めのデータ、既存モデル改良のアイデア、物性値等のモデル指 定パラメータ値、モデル新規開発の提案、境界値データの順で あった。また、<u>観測側に提供したいと考えていること</u>は、(同 様に)観測から得られた仮説的プロセスの解明、観測結果を用 いたモデルの開発・改良、観測結果をより広域に広げること(ア ップスケーリング)、新しい観測項目・方法の提案、新しい観 測サイト(場所、条件)の提案、粗い空間規模の(計算または 観測)値のダウンスケーリングの順であった。

観測-モデル連携にも幾つか解決するべき障壁があった。詳 しくは斉藤他(2014a)の3項を参照されたい。具体的・技術的 解決は後に述べるが、まず問題認識のレベルの差異がある。一 つにはモデル研究と観測が扱う(代表する)空間規模とその変



図 3.2.30 サイト観測と、より広域なモデル・観測における認識ス キームの差異の概念図 (斉藤他,2014aを基に改変)。

動性に対して、次にはモデリング(模型化)なるものに対する 認識である。一般にモデルはある程度の範囲で平均化された(あ る意味で仮想的な)値を扱うのに対して、観測においては常に ある限られた一点でのデータが測定される(図3.2.30)。また、 「代表的であること」に対する価値観の違いも存在する。

一方、モデルは自然等の現象の興味ある(あるいは重要度の 高い)一部を切り出して定式化したものであるから、その現象 の簡略化ではあってもミニチュアではない。これらが、観測に おける手間や観測手法の有無といった技術的問題とあいまって、 観測項目や観測場所の選定に対する期待の不一致をよび、「観 測データをそのままでモデル研究では使用できない」あるいは 逆に「観測結果がモデルで再現されない」という不満が双方に たまることになる。また、広域モデリングでは、物理系・生物 地球化学系にかかわりなく、複数のサイトのデータを必要とす ることがある。しかしながら、観測研究者の背景やサイトが異 なると観測のプロトコール(器機、頻度、項目、手法、基準値 などの決め事)が異なることが一般的で、多くの場合それら異 なるサイト間のデータを同一の基準で画一的に扱うことが困難 である。これらのことから、観測ーモデル連携を進める上で、 観測プロトコール(観測の目的、項目・頻度・位置、手段・器 機など)の標準化が非常に重要な点だと認識された。

以上のような差異や懸隔がGTMIP開始以前に存在していた。 これらを解消し実質的な連携を遂行する方法として、作業を通 して観測研究者とモデル研究者が一同に介して相互の理解を深 めるために、GRENE-TEAモデリンググループでは観測データ を元に(観測サイトに特化した)モデル駆動可能な連続データ セットを作成し、そのデータを基にモデル相互の比較を行うこ ととした。これが GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIP)であり、2段階のステージを構成して実施し



図 3.2.31 GTMIPの構成。

た(図3.2.31)。Stage 1 は、四つのGRENE-TEA観測サイト における直近30年ほどのサイトシミュレーションであり、 Stage 2は近代化以降(1850-2100年)の北緯50度以北の環北極 域を対象とした広域シミュレーションである。

また、高緯度陸域システム(図3.2.29)の広がりに対応して、 物理過程から生物地球化学的過程に渡って幅広くモデルの挙動



図 3.2.32 GTMIPの評価指標カテゴリー。

や再現性、過程間の関連性を評価するために、指標領域として 図3.2.32で示す五つのカテゴリー:「熱・水収支」、「積雪」、 「フェノロジー」、「凍土、土壌水分」、「炭素収支」、を扱 うこととした。

Stage 1では、観測研究との連携を通して得られた観測値と、 連続値として得られる再解析データ(ERA-Interim¹²⁾)とを融 合したモデル強制データを作成し(図3.2.33)、熱・水・炭素 循環についてモデル間、サイト間の差を評価するとともに、そ れらを特徴づけるプロセスや条件の特定を目的とした。



図 3.2.33 Stage 1 データ作成の概念図。



図3.2.34 Stage 2 積分の構成図。



GTMIPを通して

図3.2.35 GTMIP以前の観測-モデル、モデル-モデル連携の必要性 (上)とGTMIPによる相互連携のコミュニティの成立(Miyazaki et al. 2015 を基に改変)。

一方、Stage 2は、Stage 1により得られた結果を空間的・時 間的な文脈の中に位置づけることにより、モデルの空間的代表 性を評価するとともに、温暖化時の北極陸域の反応に対するモ デル・地域的特徴を抽出することを目的とした。駆動データは NCEP/NCAR再解析¹³⁾を1990年~2000年の気候値とし、時間 変動成分はMIROC-ESM¹⁴⁾によるCMIP5¹⁵⁾積分(1850–2005 年はそのhistorical runを、2006~2100年についてはRCP8.5お よび2.6シナリオ)をベースにして作成した(図3.2.34)。

GTMIPにおける科学的な知見に関する詳しい結果は以下の (2) GTMIPの項で報告されるが、寒冷圏陸域研究全体を見渡 した上でGTMIPの意義と成果をまとめると、図3.2.35および表 3.2.3の如くである。

表 3.2.3 GTMIPの意義と成果

項目	開始以前	以後			
寒冷圏に興味のある陸域(物 理、生態)モデルとその研究 者の相互理解	(分野、地域)限定的. 身内的。	GTM コミュニティの成立。 「立ち位置」の相互認知。 同一駆動下での相互対照。			
 北極域における観測研究に おけるモデル(その前提、制 限・限界、結果の意味、解釈 など): 理解、利用、親疎 度 	素朴もしくは限定的。 限られた共同研究内。	モデル計算結果の利用促進。 モデル過程開発・評価への積 極的参与。			
観測-モデリング研究間の 連携	相互に意識・期待はあれど も、限定的。 「言語」の壁。	相互理解。 同席して計画立案、協議。 サイト、分野、機関を跨った 観測プロトコール標準化。			
【benchmark】 強制項として、モデルですぐ に使える(観測値に近い)気 象データ	(欠測、外れ値などの) 観測 値から作成する困難さ。	Lv0: 再解析データ→1次近 似。 Lv1: 観測値をマージ・同化。			
【benchmark】 検証に、モデルですぐに利用 できる観測(メタ)データ	サイト、分野間での不統一。 不十分なメタデータの重 要性の理解。	GTMIPデータセットとして、 必要となる種類のデータや 記述方法を提示。			
モデリングにおける知見・方 法論	物理と生物地球化学との分 離。	両者の連携。			

(2) GTMIP

執筆者:森淳子、斉藤和之、山崎剛、朴昊澤、末吉哲雄、宮崎真 GTMIP (Miyazaki et al., 2015) では、GRENE 観測サイト を対象とした Stage1 と、環北極域から全球を対象とした Stage2 の二つの MIP を行った。参加モデルと特性分布図を図 3.2.36 に示す。

Stage 1

Stage1 では、GRENE-TEA 観測サイトデータを用いて入力 用データセット(Lv1)を作成した。対象としたサイト(およ びデータ使用期間)はフェアバンクス(2011-2013)、ケヴォ (1995-2012)、ティクシ(1997-2012)、ヤクーツク (2005-2011)である。なお、Lv1は、格子化された再解析デ ータと機構データから作成した汎用モデル入力用データセット (Lv0)を基にしているが、チョクルダ、トゥラについてはLv0 のデータを用いた。Stage1のデータセットは、国内外の21参 加モデルの出力値等とともに ADS にて公開した(Sueyoshi et al., 2016)。

植生・凍土条件が異なる4サイトでの炭素関係要素を比較した結果、モデル間のばらつきは連続的永久凍土帯に属するヤク ーツク、ティクシで小さく、これは植生が単調であることに起 因すると推測された(図3.2.37 左上)。

北極域に特徴的な物理過程である積雪及び凍土状態の再現性 について比較した。まず、永久凍土の有無と活動層厚(年間最 大融解深)のモデル間のばらつきを見ると、連続的永久凍土帯 に位置するヤクーツク、ティクシでは活動層厚の再現は比較的 良いが、不連続帯での凍土・未凍土判別、活動層厚の再現性は 悪い(図 3.2.37 左下)。下層に永久凍土が存在しないケヴォで も、Stage1のほぼ全期間に渡って永久凍土が存在すると判断し



O : enable to couple with AOGCM MAT-cnv: MATSIRO-4,-5 MAT-rev : MATSIRO-snow d, MATSIRO-perm afrost

図3.2.36 GTMIP参加モデルとその特性分布。



図 3.2.37 左上: NEP のモデル中央値とばらつき。右上: 10cm 深 年最高地温と年最低地温のモデル間ばらつき。左下:活動層のモデ ル中央値とばらつき。右下:積雪深のモデル中央値とばらつき。

たモデルが3モデルあった。これらは、実装されている土壌の 凍結・融解過程、土壌層の設定、土壌層の深さ、そして初期値 の与え方に起因していると考えられることがこれまでも論議さ れている¹⁶⁾。この結果から、将来永久凍土が消失するような 地域について現在のモデルで将来予測をしようとしても大きな 誤差が見込まれることが予想される。

土壤凍結に関わる因子を次に検討する。10cm 地温の年最高 温度と最低温度のばらつきを見ると、夏季よりも冬季の地温に ばらつきが大きく、観測値との差も大きい(図 3.2.37 右上)。 このことから、冬季の地表面温度を決定する要素にまず原因が あると考えられる。冬季の積雪をみてみると、積雪の密度変化 が考慮されていないモデルでは積雪深、さらに断熱効果が過少 評価されていた(図 3.2.37 右下)。また、冬季に風が強く積雪 の再堆積が発生するティクシではどのモデルでも積雪深の再現 性が悪かった。

以上のように、観測データに非常に近いデータセット(Lv1) を入力値としても、サイトによって炭素収支や凍土条件の再現 性に大きな違いが見られた。本事業終了後も、現在 ADS で公 開しているデータセットを用いて、再現性低下の原因となる要 素をさらに明確にし、モデル改良と観測要素の検討を行ってい くことが期待される。また、モデルの結果を利用する場合も、 これらのばらつきの幅を考慮する必要がある。

Stage2

Stage2 では7モデルが参加した。Historical および RCP8.5 の結果を用いて 50 度以北の環北極域について過去(1901 年 -1930 年)、現在(1981 年-2010 年)、将来(2071 年-2100 年)の3 期間すべての出力があるモデルについて解析を行った。

まず、Stage1で対象とした4サイトがどの程度空間代表性を もつかを見るために、モデル間のばらつきを各要素について確 認した。Stage1では炭素収支関係の要素においてモデル間のば らつきが東シベリアのヤクーツク、ティクシで小さいという傾 向がみられたが、Stage2のHistorical及びRCP8.5シナリオに よる現在期間についてNEPの空間分布をみてみると、シベリ ア北極海沿岸、東シベリア、アラスカ北極圏でモデル間ばらつ きが小さく、アラスカ南部、ヨーロッパで大きくなっており、 Stage1の結果とよく対応する(図 3.2.38 左上)。北極海沿岸



図 3.2.38 左上: NEP のモデル間のばらつき 右上: NEP の現在 (1981-2010年)と将来(2071-2100年)の差。正が増加。左下:現 在の湿潤度。右下:将来の湿潤度/現在の湿潤度。

でモデル間ばらつきが小さくなるのは、ティクシのようなツン ドラ植生では森林植生に比べて生産性が低いことによると考え られる。ただし、カナダ北極海沿岸でばらつきが小さくなって いるのは出力モデルが少ないためにそうみえていると考えられ る。

この結果より、炭素収支関係については、ティクシはシベリ アの北極海沿岸を、ヤクーツクは東シベリアを充分に代表して いるといえる。

Stage 2 入力値の降水量と気温の将来予測では、たとえば、 RCP8.5 による将来期間では、気温は北緯 50 度以北全域で上昇 していた。一方、湿潤度(降水量/可能蒸発量)は現在乾燥傾向 である東シベリア及びアラスカ北部、カナダ北極海沿岸で顕著 に湿潤化している一方、現在比較的湿潤な西シベリアでは乾燥 傾向になり、北米内陸の乾燥域ではさらに乾燥化している(図 3.2.38 左下、右下)。

NEP について、現在と将来期間(RCP8.5)とを比較すると、 東シベリアの北緯 60 度以北で顕著に増加する一方、西シベリ アで減少傾向を示す地域が点在する(図 3.2.38 右上)。一方北 米では、北極圏カナダ東部とアラスカ西部で増加するが、北緯 60 度以南では微増~微減である。これらの分布状況を湿潤度の 変化と比較してみると、NEP 増加が顕著である東シベリア及 び北極圏カナダ東部は湿潤化の強い地域に対応しており、気温 上昇と湿潤化の双方を反映して増加したと考えられる。また、 地温が相対的に低い東シベリアでは、同期間の土壌呼吸量の増 加が西シベリアより小さいことも NEP の顕著な増加に関係し たと考えられる。一方、同様に湿潤度が高くなっているアラス カからカナダ西部では、アラスカ北西部では NEP が増加傾向 であるものの、シベリアほど顕著ではなく、他の要因が関連し ているものと考えられる。

(3) GTMIP 以外のモデル研究成果(データ同化)

執筆者:伊勢武史

データ同化はさまざまなシミュレーションモデルを最適化す る手法として用いられているが、陸上生態系モデルは、その複 雑さゆえに、データ同化の応用が進んでいなかった。そこで本 研究では、粒子フィルタというデータ同化手法を用いることで、 非連続な挙動を示す陸上生態系をモデル化し、データ同化によ る最適化が可能であることを示した。ケーススタディとしてア ラスカ州フェアバンクス付近の落葉広葉樹林の展葉・落葉フェ ノロジーを取り扱った。人工衛星で観測された葉面積指数

(MOD15A2・解像度1km、8日周期の観測)の季節変化を観 測データとして用いて、粒子フィルタによるデータ同化を行っ た結果、モデルの複数のパラメータは総合的に最適化され、シ ミュレーション結果は観測地と高い整合性を持つにいたった。 2年分のデータ同化の結果、展葉・落葉のタイミングと成長期 の葉面積指数の変化を的確に推定することに成功した(図 3.2.39)。



図 3.2.39 陸上生態系モデル SSSEM を用いたデータ同化の結果(状態 推定)。12 のパラメータを同時にランダマイズして 1000 回のシミュ レーションを行った。 引用文献

- Osawa, A., Avaiomov, A. P., Zyryanova, O. A. 2000. Reconstructing structural development of even-aged larch stands in Siberia. 2000. Can. J. For. Res. 30:580-588.
- 2) Osawa, A., Kurachi, N., Matsuura, Y., Jomura, M., Nanawasa, Y. 2005. Testing a method for reconstructing structural development of even-aged Abies sachalinesis stands. Trees, structure and function 19:680-693.
- 3) Motohka, T., Nasahara, K. N., Oguma, H., Tsuchida, S. 2010. Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. Remote Sens 2:2369–2387.
- 4) Nagai S, Inoue T, Ohtsuka T, Kobayashi H, Kurumado K, Muraoka H, Nasahara, K. N. 2014. Relationship between spatio-temporal characteristics of leaf-fall phenology and seasonal variations in near surface- and satellite-observed vegetation indices in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. Int J Remote Sens 35 (10):3520–3536.
- McCarroll, D., Loader, N. J., 2004. Stable isotopes in tree rings. Quat. Sci. Rev. 23, 771-801, doi:10.1016/j.quascirev.2003.06.017.
- 6) Ek, M., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., Tarpley, J. D., 2003. Implementation of Noah land-surface model advances in the NCEP operational mesoscale Eta model. J. Geophys. Res., doi:10.1029/2002JD003296.
- 7) Sato, H., Kobayashi, H., Delbart, N., 2010. Simulation study of the vegetation structure and function in eastern Siberian larch forests using the individual-based vegetation model SEIB-DGVM. Forest Ecol. Manag. 259, 301–311, doi:10.1016/j.foreco.2009.10.019.
- 8) Wingate L, Ogée J, Cremonese E, Filippa G, Mizunuma T et al. 2015. Interpreting canopy development and physiology using a European phenology camera network at flux sites. Biogeosciences 12:5995–6015.
- 9) Sasaki, M., Uchida, M., Utsumi, M., Kondo, M., Kim, Y. and Endoh. N., 2015. Methane flux from lakes in the Alaskan Arctic Zone. Proceedings of 30th Intern. Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, B-10, pp.83-86.
- 10) Sasaki, M., Uchida, M., Kondo, M. Utsumi, M., Yonemura, S. and Nakayama, K., 2015. Influence of the thawing permafrost on methane diffusion flux from lakes in the Alaskan Arctic Zone., Proceedings of the ISAR-4 / ICARP III, session A6-3.
- 11) Greene, S., Walter, A. K. M., Archer, D., Sepulveda-Jauregui, A and . Martinez-Cruz. K., 2014. Modeling the impediment of methane ebullition bubbles by seasonal lake ice. Biogeosciences, doi: 10.5194/bgd-11-10863-2014.
- 12) Dee, D. P. et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 137, 553–597.
- Kalnay et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470.
- 14) Watanabe et al, 2011. MIROC-ESM. 2010. model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, Geosci. Model Dev., 4, 845–872.
- 15) Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design, B. Am. Meteorol. Soc., 93, 485–498.
- 16) Saito, K., 2008. Arctic Land Hydro-thermal Sensitivity under Warming: Idealized Off-Line Evaluation of Physical Terrestrial Scheme in Global Climate Model. Journal of Geophysical Research – Atmosphere, 113, D21106, doi:10.1029/2008JD009880.

Ⅲ.北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響: 大気プロセスの包括的研究

研究課題3 研究代表者:浮田甚郎

課題3では北極大気に関して、ブラックカーボン、雲、海氷 変動に伴う大気循環の変調という三つのトピックに焦点を当て て研究を進めた。この内で大気循環は、主に戦略研究目標 3a を対象とした研究内容である。以下、この三つに関してチーム ごとに成果を報告する。

執筆者:小池 真 近藤 豊 P.R.Sinha 茂木信宏 大畑 松井仁志 大島 長 塩原匡貴 東久身	1. 北極域におけるブラックカーボン観測										
に い ひ い て		執筆者:小池	真	近藤 島 松井仁記	豊志	P.R.Si 大島	nha 長	茂木信宏 塩原匡貴	大東	畑 久美	#
	はじめに										

北極域での放射強制力には、温室効果気体とともにエアロゾ ルの影響も大きいと考えられているが、その見積もりの不確定 性は大きい。ブラックカーボン・エアロゾル(BC)は大気中で の太陽放射吸収による加熱作用に加え、雪氷面に沈着し雪・氷 のアルベドを低下させる効果がある。これらの放射効果は BC の粒径などの微物理特性、濃度、沈着量に依存する(Kondo, 2015)。BCの濃度・沈着量は、その発生源・輸送・沈着過程 に大きく支配される。従来の北極研究においては、これらの要 素や過程の定量的理解の基礎となる BC 観測に大きな誤差があ ることが問題となっていた。また数値モデル計算においても北 極へ輸送される BC の除去過程の表現などに問題があり、北極 BC の挙動の再現性に問題があった。

このような研究背景から、本研究では高精度の BC 観測手法 を開発し、北極での BC の時空間変動を定量的に明らかにした。 降水による BC 沈着量も高精度観測により世界で初めて明らか にした。さらに BC の微物理特性の変化や除去過程を精度よく 計算できる数値モデルを開発し、BC の気候影響の推定の精度 向上の基盤を構築した。雲微物理量の直接観測も実施し、エア ロゾルの影響を受けていることを実証した。

BC 測定手法の開発

大気中 BC の測定法の開発

東京大学では、BC の全質量濃度の連続自動測定が可能な COSMOS 測定器を開発してきた。この装置は BC 以外の揮発 性エアロゾルをフィルター捕集前に加熱により除去して BC を 選別したうえで、光吸収法により測定する測定器である。本研 究では、北極での低濃度 BC が信頼性高く測定できるように、 BC 濃度の導出法に新たな改良を加えた。また中緯度において、 COSMOS をより高精度 BC 分析が可能な単一粒子レーザー誘 起白熱法(SP2)と繰り返し比較することにより、その質量濃 度の信頼性を確立した(Irwin et al., 2013, Irwin et al., 2015)。 BC 濃度が低い北極域ではまた、自然起源の不揮発性エアロゾ ル(海塩粒子など)の影響を詳細に評価する必要がある。この ため、海塩粒子とほぼ同じ屈折率をもつ PSL 粒子を用いて、 COSMOS 測定への不揮発性の干渉効果を精密に室内実験で評 価した。その結果、北極での BC 質量濃度の測定誤差は約 15% であると推定された。

降雪・降雨中 BC の測定法の開発

降雪・降水試料中の BC の粒径別数濃度を測定するために、 水試料をネブライザー(噴霧器)で霧粒化したのちに乾燥させ、 生成したエアロゾル粒子を SP2 で分析するという手法を採用 した。ネブライザーと SP2 を用いて水試料中の BC の粒径分布 を測定する手法を理論的・実験的な研究により確立した(Ohata et al., 2013、Moteki et al., 2014、Mori et al., 2014b、Mori et al., 2016)。以下、より詳細を記述する。

<実験>



図 3.3.1 ネブライザーの粒子化効率の決定。

降水中の BC の粒径別数濃度を観測するためには、ネブライ ザーで降水試料から BC をエアロゾルとして空気中に抽出した のち、SP2 で BC の粒径別数濃度を測定する。この測定で必要 となるネブライザーの粒子化効率を定量化するために、水中に 分散させた標準粒子であるポリスチレンラテックス (PSL) 粒 子の水中での濃度を定量化する方法を考案した。そしてこの濃 度が既知の PSL 粒子分散水の測定を SP2 で行い、PSL 粒径毎 にネブライザーの粒子化効率を評価した (図 3.3.1)。本研究で 用いるネブライザーMarin-5 については、直径 2 μm 以下の粒 子は粒子化効率が 50%であり、直径 2 μm 以上の粒子では粒径 の増大とともに粒子化効率が下がることが分かった。大気中・ 降水中では粒径が 2 μm を超える大きな BC 粒子はほとんどな いため、降水中の BC 粒径分布の観測は 50%の一定粒子化効率 で行えることが示された。

<理論>

ネブライザーで噴霧される一つの霧粒に複数の BC 粒子が含 まれる場合、その霧粒が乾燥するときに一つの大きな BC 含有 粒子となるため、空気中で観測される BC の粒径分布は、水中 における真の粒径分布よりも大きくなる傾向がある。この効果 を正しく考慮した測定を行うために、霧粒の粒径別数濃度を実 験的に決定しておき、その霧粒の粒径分布と観測される空気中 の BC の粒径分布から、水中の BC の粒径分布を推定するため のインバージョンアルゴリズムを開発した。このアルゴリズム の計算によれば、東京のような都市域においても雨水中の BC 数密度(数+µgL¹以下)では、噴霧器で生成される大きさの 霧粒に複数の BC 粒子が含まれる確率は小さく、空気中で観測 される BC の粒径分布と水中における BC の真の粒径分布との 差は無視できる事が分かった。この理論的研究により、ネブラ イザーを用いた方法により水中の BC の粒径分布を精密に測定 できる事が示された。

ここで開発された測定技術は本研究とともに、研究課題4の 「3. 積雪中不純物の空間分布の研究」における BC 測定にも用 いられ、重要な知見が得られつつある。

北極における大気中 BC の観測

アラスカのバローとスピッツベルゲン島のニーオルスンに おいて、前述した COSMOS 測定器で BC の連続測定を 2012 年から 3 年間にわたり実施してきた(図 3.3.2)。アラスカの バロー観測所では 20 年以上前から BC の観測が実施され、近 年ではアメリカ海洋大気庁(NOAA)の CLAP /PSAP 測定器 の観測により光吸収係数(babs)が報告されている。そこで本 研究では、同時観測が実施された 3 年間について、COSMOS と NOAA の CLAP / PSAP 測定器によって得られた光吸収係数 を詳細に比較した(図 3.3.3)。この結果、二つの観測は良く相 関しており、平均すると CLAP/PSAP による光吸収係数は、 COSMOS の値を 21%過大評価していることが分かった。これ までの研究から、単位質量あたりの BC による COSMOS で測 定される光吸収係数の値(質量吸収係数)が約 10%の精度で求 められているため、バローで測定された COSMOS の光吸収係 数から、BC の質量濃度(M_{BC})を推定することができる。ま たさらにこの COSMOS の質量吸収係数をもちいることにより、 二つの測定手法による光吸収係数の関係から、NOAA の CLAP/PSAP 測定器によって得られた光吸収係数に対する COSMOS の値に規格化された BC 質量濃度を推定することが 可能となる。従来、NOAA ではこの BC の質量吸収係数の推定 ができなかったため、光吸収係数のみを報告し、BC 質量濃度 を報告してこなかった。このため各研究者がそれぞれ BC の質 量吸収係数を仮定して BC 質量濃度に変換した上で、研究など に使用されてきた。本研究により NOAA のバローにおける BC の光吸収測定に対して初めて値付けが可能となった。これは、 BC の各種アセスメントや、数値モデル計算の検証の上におい て、重要な貢献である。



図 3.3.2 バローとニーオルスンの位置。



図 3.3.3 バローにおける COSMOS と CALAP/PSAP の光吸収係数の 日平均値の比較。

同様にして、もう一つの北極域での長期 BC 観測であるスト ックホルム大学が測定を行ってきたニーオルスンにおける PSAP による観測と COSMOS の観測との比較を実施した。ニ ーオルスンでは直径 10µm 以下という COSMOS と比較して大 粒径のエアロゾルまでを測定しているが、PSAP は COSMOS の光吸収係数よりも 33%過大評価していることがわかった。 COSMOS の BC 質量吸収係数をもちいることにより、ニーオ ルスンにおいても過去を含めて PSAP 測定から BC 質量濃度を 求めることができた。

図 3.3.4 に日平均したバローでの二つの測定器によって得ら れた BC 質量濃度を比較した。上述の値付け(COSMOS への 規格化)によりそれぞれの BC 質量濃度の日々の変動が良く一 致している様子がわかる。図 3.3.5 にはさらに遡って過去 10 年 間の NOAA およびストックホルム大学の CLAP/PSAP による 光吸収係数観測を COSMOS により規格化することにより BC 質量濃度に換算した結果を示す。バイオマス燃焼による BC 発 生量や BC の輸送・湿性沈着量などの年々変動により BC 濃度 が変動している様子が明らかに見える。このように、長期間の BC の変動を定量的に初めて明らかにすることが可能となった。 このデータは、今後の BC の気候影響を評価する数値モデルの 検証にも重要な役割を果たすと考えられる。



図 3.3.4 バローにおける COSMOS と CALAP/PSAP による BC 質量 濃度の日平均値



図 3.3.5 バロー(黒) とニーオルスン(赤) における CALAP/PSAP による BC 質量濃度の月平均値

北極における降水・降雪・積雪中の BC 濃度と粒径分布の観測

BC は大気から直接地表面に触れて沈着する乾性沈着と、降水(雨・雪)により沈着する湿性沈着の二つの過程により除去

される。アジアなど中緯度の地表面にある発生量の大きな BC 発生源(石炭・バイオ燃料燃焼や森林火災・焼畑など)から北 極への輸送においては、大気の上方輸送に伴う降水により除去 される割合(あるいは除去されずに北極まで輸送される割合) が重要となる。さらに北極内においては、輸送されてきた上空 の BC が地表面に沈着し、雪氷アルベド低下を引き起こす沈着 過程が重要となる。本研究では世界で初めて北極圏において降 水中の BC 測定を実施し、ニーオルスンとバローにおいて 2013 年からの2年間にわたり BC の湿性沈着量の定量化に成功した。 手順としては、現地において1日ごとに降雪・降雨の試料を採 集し、それらの試料を日本に送った上で、前述した方法を用い た分析を行った。この分析では試料中の BC の粒径分布を測定 し、全粒径の値を積算することにより BC 質量濃度(CBc)を 求めた。また1日あたりの降雪・降雨量の気象データを用いて、 BC の沈着フラックス(BC 濃度と降水量の積)を求めた。

図 3.3.6 の下段には、ニーオルスンにおける降水中 BC 質量 濃度 CBc 及び大気中の BC 質量濃度 (MBC) を示した。MBC が 高い冬季・春季に CBC が高くなっていることが分かる。図 3.3.6 の上段には、気象データに基づく日毎の降雪・降雨量 (Pr) と、 BC の沈着フラックス (FBC) を示した。FBC は CBC と Pr の積 として与えられる。CBC と同様に FBC は冬季・春季に高く、夏 季に低くなっている。これらの北極域での初めての観測から、 北極における BC の寿命を推定することなどが可能となった。

またこれとは独立に、2013 年 4 月に研究課題 4 の「3. 積雪 中不純物の空間分布」の研究により、ニーオルスンにおいて積 雪を 3 cm の層ごとに分けて採取された。この各層中の BC 沈 着量と、降雪観測から得られた F_{BC} 測定の整合性を確認するこ とが行われつつある。北極における BC の湿性沈着量の高精度 の直接的観測は初めてであり、BC を含むエアロゾルの除去過 程を定量的に解明する手法を確立するための重要な結果である。



図 3.3.6 ニーオルスンにおける降水観測 上段:日毎の降水量(黒実 線)、降雪(赤)・降雨(青)BCフラックス 下段:大気中 BC 質 量濃度(黒実線)、降雪(赤)・降雨(青)中の BC 質量濃度。

北極への BC 輸送に関わるエアロゾルモデル開発

上記のとおり、アジアなどの BC の地上発生源からの輸送中 の BC の降水除去過程は、北極 BC 動態を数値モデルで再現す る上で鍵となるプロセスである。BC の降水除去率は、被覆が ない状態で大気中に排出された湿性除去を受けにくい状態の BC が、大気中で水溶性の無機・有機エアロゾル成分により被 覆され湿性除去を受けやすい内部混合状態への変化する過程に 依存している。このような観点から、エアロゾルの粒径と BC の混合状態を陽に表現した新しいエアロゾルモデルの開発が進 められてきた (Matsui et al., 2013, 2014a, 2014b) 。図 3.3.7 には、このような詳細なエアロゾル表現を採用した領域 3 次元 数値モデルにより再現された BC の混合状態とアジアの航空機 観測との比較結果を示した。このような詳細なエアロゾル表現 に基づき、BC 混合状態観測の特徴を数値モデルで再現したの は世界で初めてである。

BC などのエアロゾルの降水による除去過程についても、数 値モデルの高精度化を行った(Oshima et al., 2013a)。図 3.3.8 の上図は BC の輸送効率(発生源から各場所・高度に降水など を経験しながら輸送された時に残った BC の質量割合)につい て、改良されたモデルが観測結果をよりよく再現していること を示した。また図 3.3.8 の下図には、このように改良したモデ ルで計算した BC 輸送効率の緯度-高度断面を示した。高緯度 側の発生源ほど降水などによる除去を受けにくい一方、アジア で上空へ運ばれた空気においても 20%以上の BC が除去されず に残る可能性のあることが示されている。

一方、多くの計算機資源が必要となるグローバルなエアロゾ ル数値モデルのために、より簡略化した BC の混合状態の変化 の表現の開発も行ってきた(Oshima et al., 2013b)。これら の先進的な領域モデル・グローバルモデルはアジアなどからの 北極への BC 輸送・湿性除去過程を定量化する上での基礎とな るものである。



図 3.3.7 BC の混合状態を考慮した数値モデル計算結果(赤)と航空 機からの SP2 観測(青)との比較。横軸は BC の体積等価直径。縦軸 は BC の体積等価直径に対するエアロゾル全体の乾燥体積等価直径の 比率。数値モデルの値は、航空機観測のフライトトラックに沿った場 所・高度での値を使用した。感度計算結果も示してある(黄および緑)。



図 3.3.8:(上図)オリジナルのモデルと改良されたモデルによる BC 輸送効率の比較。観測はアジアでの航空機観測から推定したもの。(下図) 改良されたモデルによる BC 輸送効率の緯度-高度断面。

エアロゾルの雲微物理影響

エアロゾルは雲凝結核や氷晶核として機能するため、雲微物 理過程に影響し、結果的に北極の気候に影響している可能性が ある。このためニーオルスンのツェッペリン山山頂の観測所(標 高 450m) において、2013 年から 2 年間にわたり 雲微物理量の 直接観測を実施した。この観測所では、1月に 5-10 日程度、 雲の直接観測が可能である。またツェッペリン山山頂と山麓で は、それぞれストックホルム大学とイタリアのフィレンツェ大 学などのチームがエアロゾルの粒径分布の観測を実施している ため(後者は夏季のみ)、これらのエアロゾル観測との比較を 実施した。図 3.3.9 の左図には、雲凝結核数濃度の指標として、 乾燥直径 100 nm 以上のエアロゾル数濃度を、山頂および山麓 の観測で比較した結果を示す。両者はよく一致しており、山頂 と山麓とでエアロゾル粒径分布がほぼ同じと考えてよいことを 示している。図 3.3.9 の右図には、山麓のエアロゾル数濃度(乾 燥直径 100 nm 以上)と、雲粒数濃度とを比較した結果を示す。 両者は相関しており、北極下層雲の雲微物理量がエアロゾルの 影響を受けていることを長期観測から初めて示すことに成功し た。



図 3.3.9 (左図) 乾燥直径 100 nm 以上のエアロゾル数濃度を、山頂お よび山麓の観測(30 分平均値)で比較した結果。山頂において雲がな い状況での比較を示した。

図 3.3.9 で示されたエアロゾルと雲粒数濃度の正の相関は、 エアロゾルの季節変化が一つの要因となっている。図 3.3.10 に は、冬から夏にかけてのエアロゾル数濃度と雲粒数濃度の季節 変化を示した。冬の期間は北極ヘイズに代表されるとおり汚染 大気のたまりこみがおこるが、過去の研究からエアロゾルでは 比較的粒径の大きなエアロゾルが支配的であることが知られて いる。一方、夏の期間はおそらく新粒子生成などによりエアロ ゾル総数濃度が冬よりも高くなる。この結果、夏には雲粒数濃 度が高くなっていることが考えられる。



図 3.3.10 ニーオルスンのツェッペリン山山頂で観測された雲粒数濃度(黒)と、山頂(赤)および山麓(緑)で観測された乾燥直径 70 nm 以上のエアロゾル数濃度の季節変化(2014 年)。

また季節変化以外にも、エアロゾルの日々変動に対応した雲 粒数濃度変動も見られている。このようなニーオルスンでの初 めての雲微物理量の連続観測により、その変動やエアロゾル影 響が明らかとなった。これらの知見は、北極全域の雲の動態理 解や数値モデル計算の基礎を与えるものである。

まとめ

北極気候変動において重要な役割を果たしている可能性が ある BC や雲微物理の従来の影響評価には、大きな不確定性が あった。その根本にあるのは、すべてのアセスメントの基礎と なる信頼性の高い観測が不十分であったことにある。本研究で は高精度の BC 観測装置をニーオルスンとバローに設置し、BC の濃度やその季節変化を明らかにした。また BC の沈着過程の 鍵となる降水中の BC 測定技術を開発し、その動態を初めて明 らかにすることができた。一方において、本事業の中では、観 測点を広げることができなかった。最新の研究では、北極内で の油田開発などに伴うガスの燃焼が BC 発生源として重要であ るとの指摘もあり、バラノバ観測所などロシア内での観測点の 整備が必要である。また BC の動態理解のために必要な大気中 の BC の粒径分布や混合状態の観測がこれまでほとんどないた め、今後の観測が必要である。地表面の雪氷中 BC との比較も 今後さらに強化する必要がある。

従来の研究では、数値モデル計算による北極 BC の再現性の 悪さも大きな問題となっていた。本研究では、その鍵となるの は BC の混合状態と、湿性除去過程であるとの認識に立ち、新 しいエアロゾルモデル・表現を開発してきた。その結果、BC の輸送効率などを精度良く再現することに成功し、BC の気候 影響の推定の精度向上の基盤を構築することができた。今後は、 北極域で得られた大気中あるいは降水中の BC 濃度の再現によ り数値モデルをさらに検証・改良するとともに、その BC の発 生源や輸送過程を明らかにしていく必要がある。

北極の雲微物理へのエアロゾル影響についても、研究基盤と なるニーオルスンでの連続観測を本研究で開始した。その結果、 その微物理特性の季節変化やエアロゾルとの対応を初めて明ら かとした。今後は雲凝結核・氷晶核との対応、雲レーダーやラ イダー観測ともあわせて北極で重要とされる混合雲の微物理特 性の研究、さらには人工衛星観測による北極域全体の雲との対 応などを調べていくことが必要である。

本研究で使用したデータは、下記の国際共同研究者の協力に よって得られたり、提供されたりした。バローのデータはアメ リカ NOAA の J. Ogren 氏とカリフォルニア大学バークレー校 の Y. Zhao 氏、ツェッペリン山のデータはノルウェー極地研の 方々と NILU の O.Hermansen 氏、ツェッペリン山山頂のエア ロゾルデータはストックホルム大学の J. Strom 氏と P.Tunved 氏、山麓データは ISAC/CNR の V. Gobetti 氏とフィレンツェ 大学の R.Udisti 氏と A. Lupi 氏。またデータ整理には大島育代 さんに協力いただいた。数値モデル計算では、東京大学情報基 盤センターのスーパーコンピュータなどを使用した。

2.北極域における雲の広域観測

執筆者:岡本 創 佐藤可織 浮田甚郎

はじめに

北極域における地球温暖化に伴う海氷面積の減少が今日大き な注目を集めている。北極域の温暖化メカニズムに関して雲の 果たす役割については未だ解明されておらず、大きな課題とな っている。雲の衛星観測としては静止衛星を用いた ISCCP の データセットが広く利用されてきた。しかし、これは衛星に搭 載された受動型センサーを利用するもので、これらの観測では、 極域においては海氷面と雲の区別がつきにくい原理的な困難さ が存在するため、雲の検出や高度分布の把握には大きな不確定 性が存在する。近年アクティブセンサーを用いた研究が盛んに なり、海氷面積の年々変動と雲量に関しては、逆相関であるこ とがこれまでに指摘されている¹⁾。また、夏季(6-8月)の雲 量の減少は、下向き放射の増大と海氷の減少をもたらすこと2)、 初秋(9月、10月)には、海氷の溶けた領域で下層雲が発生し ていることが報告されている3。これらの研究は受動型センサ ーだけでなく、2006年に打ち上げられた 94 GHz帯(波長 3.16 mm)の雲レーダーを搭載した衛星 CloudSat や、可視と近赤 外波長の2波長のライダーを搭載した衛星 CALIPSO を利用し 雲量を求めた点で信頼性が高いものとなっている。しかし、海 氷と雲の相互作用について、地表面における放射効果を見積も るために必要な氷や水の相に分けた研究や、雲の微物理特性に 関連させた研究はこれまでなかった。このため、海氷と雲の相 互作用の研究はまだ未解明であると言える。CloudSat 衛星と CALIPSO 衛星を同時に利用することで、水雲、氷雲それぞれ の雲量や物理特性の鉛直分布を高い精度で求めることが可能で ある4)。本課題では、これらのアクティブセンサーを中心とし た衛星の複合解析によって、雲の相と海氷の関係を解析した。

アルゴリズム

ここでは以下の三つの衛星に搭載された4種類のセンサーを 解析に利用した。まず、94 GHz の雲レーダーCloudSat 衛星、 CALIPSO 衛星に搭載されたライダーCALIOP、水蒸気量の鉛 直分布を得ることのできる AQUA 衛星に搭載された赤外サウ ンダ AIRS センサー、そして同じく AQUA 衛星に搭載された マイクロ波放射計 AMSR-E である。CloudSat は94 GHz の雲 レーダーを搭載し、雲や降水からのレーダー反射因子の観測を 行っている。CALIPSO 衛星に搭載された CALIOPセンサーは、 波長 532 nm と 1064 nm における減衰後方散乱係数と、波長 532 nm における偏光解消度の観測を行っている。 CloudSat と CALIPSO データの解析には、高度域に分けた 雲量に関して雲マスクアルゴリズム (Kyushu University cloud Mask: KU-Mask)を適用した⁵⁾。次に雲の相ごとに分け た雲量解析には、相識別アルゴリズム (KU-Type)を用いた⁶⁾。 そして氷雲微物理特性解析アルゴリズム(KU-Micro)を適用し た。上の三つのプロダクトの水平解像度は約 1.1 km,鉛直分解 能は約 240 m である。

AIRS の解析には、Ishimoto のアルゴリズムを用いる (Ishimoto et al.,2014)。温度には110の、水蒸気量の導出に は46のチャンネルの情報をそれぞれ利用する。従来の AIRS の水蒸気量プロダクトの水平解像度が45 km 程度、鉛直には 2·3 km であるのに対し、この手法では水平解像度13.5 km、鉛 直には1 km 程度とする事が可能である。そのため標準プロダ クトより現実に近い過飽和度値を推定できること、さらに海上 の晴天域だけでなく、下層等にある雲の上でも水蒸気量が推定 できることが挙げられる。

海氷面積のデータは JAXA によって提供されている Level 2 プロダクトである海氷密接度を用い、それが 15%以上のものを 海氷とし、緯度 65 度以上の海氷面積を解析した。なお解析期 間は 2006 年 6 月から 2010 年 12 月までである。

解析結果Ⅰ.海氷と水雲と氷雲の雲量の関係

まず CloudSat と CALIPSO の複合利用によって得られた全 雲量(C4:赤線)と、CALIPSO によって解析から求めた氷雲 (C2ice:緑線)と水雲の雲量(C2 water 青線)の 2006 年 6 月 から 2010 年 12 月の変動を図 3.3.11 に示す。全雲量は、いず れの年でも5月に極大、7 月に極小、9–10 月に極大、そして 2–3 月に極小となることがわかった。さらに CALIPSO のデー タ解析から求めた相に分けた解析結果からは、5–10 月には水雲 が卓越し、11 月–3 月には氷雲が卓越している。

図 3.3.12 は AMSR-E のデータを用いて、海氷面積を解析した結果を載せているが、9月に極小、3-4月に極大となることを示している。これらから、解析期間の4年間のいずれの年でも9月の海氷面積の極小と、雲量の極大の対応は良いと言える。2007年にはこの解析期間の中でも最も海氷面積が少ない年であった。

次に水雲に着目し、下層、中層、上層に分けた解析を行った (図 3.3.13)。北極域において、水雲は1年間を通じて、下層 で最も大きい雲量を示す。下層の水雲はいずれの年も7月に雲 量が極小となる。それが全雲量の7月の極小にも対応している 事がわかる。

次に、氷雲に関しても同様な解析を行った(図 3.3.14)。上 層が概ね、他の層の雲量より大きかった。下層と中層の氷雲の 雲量は、7、8月に各年で極小を示していたが、極大に関しては、 明確な月は存在していなかった。上層の氷雲の雲量は、極小と なる月は年によって異なり、一方で極大は毎年12月であった。 総じて、氷雲と海氷との対応関係は良くなかった。以上の水・ 氷の雲量の変動解析と海氷の対応から、7月の下層の水雲の減 少が、下向きの地表面への放射量の増加を招き、その熱の蓄積 によって9月の海氷の減少につながった事が示唆される。また、 その海氷の減少が、9、10月の下層の水雲の発生につながって いる事が同時に示唆される。



図 3.3.11 CloudSat と CALIPSO 衛星の同時利用から求めた北極域 (北緯 65 度以上)の雲量の 2006 年 6 月から 2010 年 12 月までの全雲 量、氷雲の雲量、水雲の雲量の変動を示す。



図 3.3.12 AMSR-E から求めた緯度 65 度以上の海氷面積の変動。解析 期間は図 3.3.11と同じ。



図 3.3.13 CALIPSO 衛星から求めた北極域の水雲の各高度域別の雲 量の変動。赤は上層、緑は中層、青は下層を示す。



図 3.3.14 図 3.3.13 と同様だが、氷雲の各高度域別の雲量の変動。

次に、下層の水雲と海氷密接度の関係に関して、水平パター ンの変化に着目し、2006年の7月、8月、9月の3ヶ月の月平 均の雲量を解析した結果を図3.3.15に示す。同様に、AMSR-E から求めた海氷密接度の変動を図3.3.16に示す。6月と7月の 雲量の比較から、下層雲は減少傾向にあることがわかるが、そ れと対応した領域で海氷が減少している事がわかる。海氷は8 月にも引き続き減少しているが、下層の水雲の雲量は増加傾向 となっている。7月から8月にかけて海氷の溶けた領域と対応 して下層の水雲が発生している事がわかる。



 (a)
 (b)
 (c)

 図 3.3.15
 北極域における下層の水雲の雲量の緯度経度分布の1ヶ月
 平均値。(a) 2006 年 6 月、(b) 2006 年 7 月、(c) 2006 年 8 月。



 (a)
 (b)
 (c)

 図 3.3.16
 北極域における海氷密接度の緯度経度分布の1ヶ月平均値。

 (a) 2006 年 6 月、(b) 2006 年 7 月、(c) 2006 年 8 月。



図 3.3.17 下層の全雲量の緯度経度分布の9月から11月の3ヶ月平均 値の年々変動。(a) 2006年、(b) 2007年、(c) 2008年、(d) 2009年。



図 3.3.18 図 3.3.17 の雲量の 4 年平均値からの各年の偏差。 (a) 2006 年、(b) 2007 年、(c) 2008 年、(d) 2009 年

さらに、海氷面積が減少している9月から11月の3ヶ月平均 の下層の雲量の年々変動を2006年から2009年の間で解析した 結果、及び雲量の4年平均値からの各年の偏差を図3.3.17、図 3.3.18に示す。いずれの年でも、海氷が溶けたopen ocean と なっている領域(図3.3.19)で下層雲が卓越しているが、その 特徴は、海氷が最小となった2007年に最も顕著に現れている ことがわかる。



図 3.3.19 9月の海氷密接度の緯度経度分布の平均値。 (a) 2006 年、(b) 2007 年、(c) 2008 年、(d) 2009 年。

解析結果Ⅱ. 氷雲と水蒸気量の関係

次に、氷雲の生成メカニズムを調べるために、北極域におい て AIRS センサーの放射輝度の観測値から水蒸気量と温度の鉛 直分布を求め、両者より過飽和度を導出した。600hPa から 200 hPa の間で、CloudSat と CALIPSO から求めた雲域を AIRS で過飽和となっている領域を比較した結果、概ね良い対応を示 していることがわかった(Ishimoto et al., 2014)。この高度領域 ではほぼ氷粒子であった。



(a)

図 3.3.20 AIRS から求めた氷過飽和度から推定された氷水相当量 [g/m3]。(a) 中層。(b)上層。2009 年 7 月の1 月平均値。



(b)

図 3.3.20(b)



(a)



(b)



(c)

図 3.3.21 CloudSat-CALIPSO の同時解析から抽出した氷水量。 (a)下層、(b)中層、(c) 上層。期間は図 3.3.17 と同様。

このような氷過飽和と雲の対応関係があったため、さらに、 氷過飽和度が100%以上の水蒸気がすべて氷粒子となったと仮 定して、氷水量相当量を求めた(図3.3.20)。解析期間は2009 年7月の場合である。中層では氷水量は0.1g/m3以上の値をと る場合もあった。また陸上で海上より大きな値をとる傾向であ った。極に近くなる程、小さい値を示していた。上層では1桁 程度中層より小さい値を示していた。海陸の差は小さくなって いた。次に CloudSat と CALIPSO の同時解析から氷水量を抽 出し、氷水量相当量との比較を行った(図3.3.21)。氷水量は、 下層、中層、上層と高度が上がるにつれ小さい値を示していた。 また、中層では極に近いほど小さい氷水量の値であり、水蒸気 量と整合性があった。上層の氷水量は水平に一様であり、これ は水蒸気のパターンとは異なった特徴であった。これらは氷粒 子の生成条件に中層と上層で異なっていることを示唆している。

解析結果Ⅲ. 地上設置型雲レーダーとライダーによる雲解析

衛星に搭載されたアクティブセンサーは、3次元の雲物理の 詳細な情報を与えるが、極軌道衛星であるため、常に同じ時刻 のデーターとなっており、雲の時間発展を追うには情報が足り ない。また雲レーダーは雲と霧雨の区別がつきにくい事、ライ ダーは光学的に厚い雲の場合減衰してしまい、宇宙からの観測 では雲底付近の情報の信頼性には課題があると考えられる。

本事業によりニーオルスンに設置された雲レーダーとマイク ロパルスライダーによる観測のデータは本事業期間で解析が進 展しつつある。地上設置された雲レーダーとライダーの2013 年10月8日の同時解析から、氷雲の微物理特性を求めた例を 図 3.3.22 に示す。解析に用いたアルゴリズムは衛星で利用した ものと基本的には同じであるが、地上のライダーでは真上向き で有ることを、参照テーブルでは表現している。この例では、 高度 3 km から 7 km に、氷雲が観測され、0 dBZ 以上という 非常に大きいレーダー反射因子に対応して、200ミクロンを超 える有効半径の氷粒子が抽出されていた。ライダーの偏光解消 度が小さい値を示している領域では(図 3.3.22 c)、平板状の 氷粒子が水平面に偏って配向していると考えられるが、この領 域では、大きいサイズの氷粒子が存在していた。この他の事例 解析でも同様に非常に大きなレーダー反射で、それに伴って大 きい有効半径の氷粒子が観測から得られていた。他の日の地上 のレーダーとライダー観測から、雲頂付近に過冷却水が存在し、 その下層で氷粒子が落下している状況が多い事がわかっている。 これらの地上観測データを用いる事で、CloudSat と CALIPSO の同時解析から得られた衛星プロダクトの検証が進展すると考 えられる。



図 3.3.22 ニーオルスンに設置された 95GHz 雲レーダーとマイクロパ ルスライダーの観測と氷粒子の微物理量の解析結果。 (a) レーダー反射因子、(b)ライダー後方散乱係数、(c) 偏光解消度、(d) 氷粒子の有効半径、(e) 氷水量。

2018年に打ち上げ予定である日欧共同衛星 EarthCARE で は、初の宇宙からのドップラー速度を観測可能な雲レーダーと、 高スペクトル分解ライダーを含む4種類のセンサーが搭載され る。これらの衛星で利用される衛星解析アルゴリズムとプロダ クトの検証サイトとしても重要な役割を担う。ドップラー速度 の情報は、雲粒子や降水粒子の微物理特性のこれまでより高精 度の抽出が可能となるだけでなく、雲内の鉛直流の情報を得る ことが期待されている。これらの情報を包括的に利用する事で、 北極域の大気と海氷と気候変動解析はさらに大きく進展するだ ろう。

3. 北半球中高緯度における対流圏-成層圏結合と そのインパクト

執筆者:山﨑孝治 三好勉之 中村 哲

はじめに

北極域の海氷面積は近年急速に減少しており、地上気温は全 球平均の2倍の速さで温暖化している。このような北極域の変 動が北半球中緯度の気候に影響を及ぼしている可能性がある。 最近の研究で海氷減少は冬の大気循環を変えユーラシアに寒波 をもたらすことが示唆されている^{71,8,9,10}本研究では晩秋の北 極域の海氷の近年の減少が大気循環場を変調し、その結果冬の 北極振動 (Arctic Oscillation (AO)¹¹⁾)/北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation: NAO) が負になるプロセスについて観測 データ解析と大気大循環モデルを用いた数値実験で調べた。

今昔実験:データと方法

海面水温 (SST) 及び海氷密接度 (SIC) の観測データは the Merged Hadley NOAA/OI SST and SIC¹²⁾ を用いた。大気デ ータは ECMWF の ERA-interim¹³⁾を用いた。また、AO index や NAO index は NOAA-CPC のサイトのデータを用いた。期 間 はいずれも 1979–2011 年の 33 年間である。

大気大循環モデル (AGCM) として、地球シミュレーターの AFES ver.4.1.の T79L56 を用いた。AFES ver.4.1 は Honda et al., 2009⁷⁾ でも用いられたモデルであるが、本研究で使用し たモデルの水平分解能はより高く (T42 から T79 に改良)、鉛 直領域も拡張している(高度 30 km までから高度 60 km まで)。 数値実験は1979–1983 年の5年平均の境界条件(SST と SIC) を与えたランを control (CNTL)) ランとした。北極域の海氷 だけを 2005–2009 年の最近の条件にした N.ICE ランを行い、 海氷の今昔の効果を論ずる (今昔実験)。この二つのランは1 年のスピンアップ後、各々60 年積分した結果を解析する。尚、 次項の結果は Nakamura et al. (2015b) にまとめられたもの である。

観測と今昔実験による海氷の効果

まず観測データにより冬(12、1、2月)平均の AO index と 9、10、11、12月の北極域の海氷面積とのラグ相関係数を計算 し、どの月の海氷偏差が冬の AO に最も影響を与えるかを調べ た。計算には線形トレンド除いたデータを使用した。その結果、 9、10、11、12月との相関係数は、それぞれ、0.14、0.28、0.48、 0.26であり、11月の海氷面積が冬の AO に最も影響を与える ことがわかった。11月の海氷面積が少ないと冬に AO が負に なり、北極域の気温は上昇するが、ユーラシア、特にシベリア と欧州および北米の地上気温が下がる(図 3.3.23 c,d)。北極 域の海氷のみ最近の値にしたモデル実験の偏差(N.ICE-CNTL) はこの観測結果を裏付けるものであった(図 3.3.23 a,b)。



図 3.3.23 (a)冬(12、1、2月) 平均の AFES 今昔実験による海氷減少 による 850hPa 気温偏差(N.ICE-CNTL)。片シェイド(/)は 95%、両 シェイド(X)は 99%で差が有意な所。単位は℃。(b) 東西平均した 850hPa 気温偏差。薄水色は陸地のみ、黒色は全体。(c) 11 月の北極の デトレンドした海氷面積変動に回帰した冬(11、12、1月)平均の 850hPa 気温の偏差。海氷の 1σ減少に対応する値。ERA- interim 再解析デー タによる。(d) (b)と同じ。ただし、ERA-interim 再解析データによる北 極の海氷面積の減少に対応する気温偏差。

このような偏差が生じる元々の原因は晩秋から初冬にかけて バレンツ海・カラ海の海氷面積が減少すると暖かい海表面から
の乱流熱フラックスが増加し下層大気を暖めることにある。9 月は海氷面積の減少は大きいが、その偏差は主に東シベリア海 にあり、乱流熱フラックスは小さい。またバレンツ海・カラ海 は晩秋以降、上空に南東向きのジェットが吹いており、加熱に より励起されたロスビー波が冬季には下流へ、つまりシベリア 方面へ伝播しやすい。この励起されたロスビー波は、基本場に 元々ある惑星波を変調し、その結果として西風を減速しAOを 負にシフトさせる(図略)。また波強制により誘起された残差 子午面循環は中緯度で上昇流、北極域で下降流となり、この加 熱効果は海氷減少による直接的な海面からの加熱の約60%に 相当する。つまり海氷減少による北極域の温暖化に力学的プロ セスにより正のフィードバックがかかる。

では海氷減少に伴いAO はどのように変化しindexの分布は どうなるのであろうか。図 3.3.24a,b は北半球(20°N 以北)の 冬平均500-hPa高度場のCNTL、N.ICEでの第1主成分(EOF1) である。それぞれのランにおいて北極域で負のときは中緯度域 で正になる AO 的な変動が最も卓越することが確認される。二 つのランを比べると N.ICE の方が北極域の活動中心がより強 くやや低緯度にシフトしている。図 3.3.24 c は、二つのランを 一緒にして求めた EOF1 であり、図 3.3.24 d はそのスコアの 120 年間の時系列である(前半は CNTL、後半は N.ICE)。



図 3.3.24 冬 (12、1、2 月) 平均 500hPa 高度場の EOF1 パターン。 (a) CNTL、(b) N.ICE、(c) CNTL+N.ICE、(d)結合した EOF1 スコ ア時系列。CNTL 欄での 60 年と N.ICE ランでの 60 年を結合した。



図 3.3.25 EOF1 スコアのヒストグラム(棒:左目盛り)と推定した確率 密度関数(線:目盛り)。横軸はスコア。赤は CNTL ラン、青は N.ICE ラン。

図 3.3.25 は、図 3.3.24 における EOF1 スコアのヒストグラ ムとそれから推定した確率密度関数である。標準偏差σの0.296 倍だけ CNTL は正にシフトし、N.ICE は負にシフトしている。 両者は重なってはいるが、+1σ以上の確率は CNTL の 24.6%か ら N.ICE では 8.9% に 6 割減少し、逆に・1σ以下の確率は 8.5% から 22.1%に 2.6 倍になる。つまり、海氷減少により寒気吹き 出しのような状況に季節平均場がなる確率が倍以上増える。こ れまでの結果を総合すると、日々の気象においても海氷減少に より中緯度、特に東アジアでの強烈な寒波が起こりやすくなっ ている事が示唆される。

まとめると、11月の北極域の海氷面積の変動が北半球冬の卓 越変動である北極振動に影響与えることが示された。大気大循 環モデル(AFES)による北極海の海氷を変化させ度実験によ り、海氷が減少した最近の状況では北極振動は負の位相となり、 北極域では温暖化するが、シベリア、欧州、北米の中緯度大陸 上で寒冷化することが確認された。ただし、温室効果ガス濃度 の上昇や海面水温の上昇傾向はこれらの効果を相殺する傾向に あると考えられる。

成層圏の応答

北極域の海氷減少の影響は成層圏にも明瞭に見られた。図 3.3.26 は冬季成層圏 10 hPa、60°N における東西平均東西風の 毎日の変動の様子を示している。CNTL では 12 月~2 月に時々、 突然昇温が起きている(東西風が負の値)。一方、N.ICE では 12 月の突然昇温は少なく、1 月での突然昇温の例数が顕著に増 加し、平均風も減少している。これは海氷減少により1 月にお けるプラネタリー波の活動が変化したためと考えられる。

成層圏の応答と対流圏との結合過程を見るために、60年平均 した 60°N における東西平均東西風(極渦を代表する)の二つ



図 3.3.26 60°N、10hPaにおける東西平均東西風のそれぞれのランに おける 10 月から 5 月中旬までの日々の変動。単位は m/s。(上) 黒線 は CNTL ランの 60 年分を重ねて描いている。赤は 60 年平均値の時間 変化を示す。(下) N.ICE ランの同様な図。

の実験での差(N.ICE-CNTL)を図3.3.27上に示す。12月までは、N.ICE ランの方が成層圏極夜ジェットが強化されているのに対して、1月から2月にかけては、成層圏極夜ジェットは弱くなっていることがわかる。この西風ジェットの弱まりは、時間と共に下方に伝播し、2月では、対流圏上部から中部にかけての西風が弱まっていることがわかる。このように、海氷の影響はまず成層圏上部に現れ、対流圏へと伝わっていく様子が見られる。同様に、北極域の東西平均温度についても、対流圏 -成層圏結合過程がみられる(図3.3.27下)。1月になると、 N.ICE ランでの成層圏極夜ジェットの弱まりに伴い、北極域の成層圏の温度は上昇する(最大で5-6℃)。この温度上昇のシ

グナルは、時間と共に下方に伝播し、2月には、北極域の対流 圏上部から中部にかけて、顕著な昇温がみられる。対流圏北極 域の昇温は、3月中旬くらいまで続く。図3.3.27下では、500 hPa より下層では、12月から2月にかけて昇温がみられるが、これ は、海氷減少に伴う直接の応答である(観測と今昔実験による海 氷の効果の節を参照)のに対して、2月から3月にかけて対流圏 上部から中部にかけて現れる昇温は、対流圏-成層圏結合過程 の結果生じたものといえる。



図 3.3.27(上) 60°Nにおける東西平均東西風偏差の時間・高度断面図 (N.ICE-CNTL)。マイナスの値は、N.ICE ランにおいて、西風が弱 まったことを示す。単位は、m/s。(下)80°Nにおける東西平均温度偏差 の時間・高度断面図(N.ICE-CNTL)。プラスの値は、N.ICE ランに おいて昇温となることを示す。単位は℃。

N.ICE ランでの東西平均東西風や東西平均温度の変化は、対 流圏から鉛直伝播するプラネタリー波の活動が変化したためと 考えられるので、波活動を示す Eliassen-Palm(E-P)flux を調べ た。図 3.3.28に、1月における E-P flux の偏差(N.ICE-CNTL) と E-P flux の発散(波による東西平均東西風の減速量を示す) の偏差を示す。図から明らかなように、N.ICE ランでは対流圏



図 3.3.28 ベクトルは、E-P flux の N.ICE と CNTL との差をしめす。 コンターは、E-P flux の発散の N.ICE と CNTL との差をしめす。単位は、m/s/dayであり、マイナスの値は、西風の減速量が増加したことを示している。

から成層圏へ伝播するプラネタリー波の活動(矢印)が活発と なり、その結果、波による東西平均東西風を減速する効果が増 加したといえる。つまり、北極域の海氷減少により、成層圏へ 伝播するプラネタリー波の活動が活発となり、その結果、成層 圏の西風ジェットが弱まり、ジェットの弱化の影響が下方伝播 し、対流圏中部から上部にかけての東西風や温度に影響を与え たと考えられる。

成層圏の役割(RS 実験)

前項で見たように今昔実験では海氷減少の影響が成層圏へ伝 播して真冬に極渦を弱める。その影響が下方に伝播し晩冬に対 流圏で負の AO となっている(Nakamura et al., 2015b)。最 近の他の研究14),15)もここで述べた成層圏経由のシグナルを示 唆している。そこで海氷減少シグナルにおける成層圏の役割を より明確にするために、成層圏の10(30)hPaより上層の東 西平均東西風を CNTL ランの日々の気候値に戻す実験を行っ た。いわば、上部成層圏で波と平均流の相互作用を抑えること をしたのである(Nakamura et al., 2016)。この実験を気候値 に戻すという意味で、Restoring 実験(RS 実験)とよぶ事にす る。RS10(30)実験は10(30)hPa以上で気候値に戻す力を 加え、その時定数は3(10)hPa以上で1日とするように変化 させた(図 3.3.29 左)。その結果、なにもしない FREE ラン (前述の CNTL ランに対応)に比べて成層圏での東西平均東西 風の年々変動は減少した(図3.3.27右)。ただし、対流圏では ほとんど変化はない。これらのランでは10年のスピンアップ 後、各々60年について平均した結果の差(即ち海氷減少に対す る応答)を解析する。



図 3.3.29(左) RS10 及び RS30 ランにおける damping 係数の鉛直分 布。(右) 各ランにおける 1 月の 60[°]N の帯状平均東西風の標準偏差。 FREE ランは、CNTL ランの 60 年積分から計算。

RS 実験の結果

図 3.3.30 は海氷減少の冬季における影響を示している。どの ランにおいても北極域の海氷減少は北極海やオホーツク海など の海氷減少地域及びその近辺で大気下層の気温上昇をもたらす (図 3.3.30下)。理由は晩秋から初冬にかけてバレンツ海・カ ラ海の海氷面積が減少すると暖かい海表面からの乱流熱フラッ クスが増加し下層大気を暖めるからである。一方、東アジア域 の有意な低温偏差は FREE ランのみみ見られ、R10 ランでは弱 い低温偏差はあるものの有意ではない。R30 ランでは東アジア の低温域は見られない。

対流圏の大気循環(500 hPa 高度、図 3.3.30 中)を見ると、 FREE ランでは欧州・シベリア・極東の波状パターンを伴い、 北極域で正偏差、中緯度で負偏差の北極振動/北大西洋振動の 負のパターンが顕著である。下部成層圏(図 3.3.30 上)でも負 の北極振動パターンが見られる。しかし、R10 ランでは 300 hPa でのバレンツ海付近での正偏差のみ FREE と共通で、その他は 似ていない。ただし、成層圏では弱い負の北極振動パターンが 見られる。R30 ではバレンツ海上の対流圏での正高度偏差を除





図 3.3.30 冬(12、1、2月) 平均の N.ICE ランと CNTL ランの差。 (上) 50 hPa のジオポテンシャル高度。等値線間隔は 10 m。(中) 300 hPa のジオポテンシャル高度。等値線間隔は 5 m。(下) 地表 2 m 高 度の気温。等値線間隔は 0.5 K。いずれも赤は正、青は負でゼロ線は省 略。薄い(濃い) 灰色の影は差の統計的有意性が 95 (99)%以上のとこ ろ。(左) FREE ラン、(中) RS10 ラン、(右) RS30 ラン。

いて、FREE ランとは全く異なる。これらの結果から、海氷減 少域の直接の温暖化は成層圏とは関係なく起こるが、東アジア の寒冷化のような遠隔応答は全成層圏を適切に扱うモデルでな いときちんと表現できないことがわかる。すなわち、これは東 アジアの寒冷化は成層圏経由の現象であることを強く示唆して いる。

次に、海氷減少シグナル(N.ICE-CNTL)の鉛直構造と季節 進行について述べる。北極振動は高緯度(60°N付近)の西風の 変動を伴う。そこで北極振動のプロキシとして 60°N の平均西 風偏差の時間・高度断面図を図 3.3.31上に示す。また、成層圏 の西風の変動をもたらす 100 hPa における E-P flux の上向き 成分の偏差を図 3.3.31下に示す。FREE ランでは、12 月下旬 から1月にかけて対流圏から成層圏へのプラネタリー波のフラ ックスが増えて(図 3.3.31下左)、上部成層圏(~1 hPa)の 西風が減速し、減速シグナルが1月下旬から2月に対流圏に降 りてきて(図 3.3.31上左)負の北極振動/北大西洋振動を形成 する。一方、RS10では成層圏のシグナルはあるが非常に弱く、 100 hPa までは降りてくるが、対流圏まで影響していない。R30 では偏差は上部成層圏に限られ、対流圏ではシグナルがない。

まとめ

北極域の海氷減少が大気循環に与える影響に関する AGCM 実験を行った。実験結果から、海氷減少が東アジアで低温偏差 を生じさせるメカニズムは以下のように考えられる。海氷減少 にバレンツ海・カラ海は晩秋以降、温暖化し上空に高気圧偏差 ができる。これが南東向きのロスビー波を誘起してシベリアに 伝播し、もともとあるトラフを変調する。増幅したプラネタリ ー波は成層圏に伝播し、そこでの西風を減速し北極振動を負に シフトさせる。さらに成層圏での偏差が対流圏に影響し、対流 圏での負の北極振動をもたらすと考えられる。即ち成層圏は「海 氷減少による東アジアの寒冷化」に寄与する。ここで注意が必 要なのは、対流圏だけのプロセスだけでもシベリア高気圧の発 達が起きると考えられ、今後、北極の海氷の減少が続くとした 時に、対流圏でのプロセスと成層圏-対流圏結合のプロセスが お互いにどの様に関係するのか、さらには、将来的にそれらの 相対的寄与がどの様に変化していくのか非常に興味深い。

また今回の結果は、海氷減少に限らず数値モデルによる長期 予報や温暖化予測においても成層圏を適切に表現したモデルが 必要であることを強く示唆するものである。



図 3.3.31 (上) 60°N の日平均帯状平均西風偏差の時間・高度断面図。 等値線間隔は2m/s。正は赤、負は青。差が 95(99)%で有意な所に薄い (濃い)影。(下) 50-80°N 平均の 100 hPa での EP flux の鉛直成分 (Fz) 偏差。偏差が 10⁴ m²s²以上の所を紫で示す。

引用文献

- Palm, S. P., Strey, S.T., Spinhirne, J., Markus, T., 2010. Influence of Arctic sea ice extent on polar cloud fraction and vertical structure and implications for regional climate. J. Geophys. Res., 115, D21209, doi:10.1029/2010JD013900.
- 2) Kay, J. E., L'Ecuyer, T., Gettelman, A., Stephens, G., O'Dell, C., 2008. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum. Geophys. Res. Letters, 35, L08503, doi:10.1029/2008GL033451.
- 3) Kay, J. E., Gettelman, A., 2009. Cloud influence on and response to seasonal Arctic sea ice loss, J. Geophys. Res., 114, D18204, doi:10.1029/2009JD011773.
- 4) Okamoto, H., Sato, K., Hagihara, Y., 2010. Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of specular reflection in lidar signals. J. Geophys. Res., 115, D22209, doi:10.1029/2009JD013383.
- Hagihara, Y., Okamoto, H., Yoshida, R., 2010. Development of com- bined CloudSat/CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, J. Geophys. Res., 115, D00H33, doi:10.1029/2009JD012344.
- 6) Yoshida, R., Okamoto, H., Hagihara, Y., Ishimoto, H., 2010. Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from Cloud - Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) data using attenuated backscattering and depolarization ratio. J. Geophys. Res., 115, D00H32, doi:10.1029/2009JD012334
- Honda, M., Inoue, J., Yamane, S., 2009. Influence of low Arctic sea ice minima on anomalously cold Eurasian winters. Geophys. Res. Letters, 36, L08707. doi:10.1029/2008GL037079.
- Petoukov, V., Semenov, V. A., 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. J. Geophys. Res., 115, D21111, doi:10.1029/2009JD013568.
- 9) Screen, J. A., Simmonds, I., Deser, C., Tomas, R., 2013. The atmospheric response to three decades of observed Arctic sea ice loss. J. Climate, 26, 1230-1248, doi:10.1175/JCLI-D-12-00063.1.
- 10) Mori, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Inoue, J., Kimoto, M., 2013. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. Nature geoscience, 7, doi:10.1038/NGEO2277.
- 11) Thompson, D. W. J., Wallace, J. M., 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. J. Climate, 13, 1000-1016.
- 12) Hurrell, J., Hack, J., Shea, D., Caron, J., Rosinski, J., 2008. A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the Community Atmosphere Model. J. Climate, 21, 5145-5133.
- 13) Dee, D. P., and 35 co-authors, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q. J. R. Meteorol. Soc., 137, 553-597. doi:10.1002/qj.828.
- 14) Kim, B.-M., et al, 2014. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. Nat. Commun., 5, 4646, doi: 10.1038/ncomms5646.
- 15) Cohen, J., Screen, J.A., Furtado, J., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J., Jones, J., 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather (Review). Nature Geosci., 7, 627-637, DOI: 10.1038/NGEO2234.

Ⅳ.地球温暖化における 北極圏の積雪・氷河・氷床の役割

研究課題 4 研究代表者: 榎本浩之

1. 研究実施概要

執筆者:榎本浩之

北極圏の雪氷分布は急速な縮小を示しているが、その実態を 知ること、またそこで起きている未知の原因を探査し、影響を 評価すること、そして将来への予測することに取り組んだ。本 研究では、次のようなサブテーマを設定した。

- ・北極域における広域積雪時空間変動
- 北極域の雪氷中不純物
- ・氷河融解を促進する雪氷微生物
- ・北極域氷河変動と将来予測

・グリーンランド氷河氷床:氷床変動メカニズムと将来予測お よび海水準への影響

広域積雪時空間変動では、広域積雪調査や衛星観測を用いて 温暖化増幅や全球的炭素循環にかかわる地表面の雪氷被覆の把 握を行なった。また、アルベドを低下させる積雪中の不純物に ついても調査を行なった。北極圏では、氷河氷床の氷質量減少 が著しい。本研究では氷床変動のモデル調査域を設定し、質量 変化のメカニズムと変化予測を行なった。

2. 北極積雪の変容

執筆者:杉浦幸之助 堀 雅裕 佐藤篤司 Nuerasimuguli Alimasi 榎本浩之

北極域北方林における高精度の降積雪観測

北極域の降積雪の実態を把握し、モデル化していくためには、 北極特有の弱い強度の降雪の扱いが課題になっている。また、 降雪とともに生じる森林への着雪や着氷についても未知の点が 多い。この着雪氷による北方林のエネルギーフローと昇温の予 測も課題である。しかし、このような過程を含んだ北極域での 衛星観測アルゴリズムや陸面モデルなどを検証・改良するため には降積雪データが必要となるが、北極域の低温下での高精度 な通年観測はこれまで実現されていなかった。

そこで本研究では、研究課題1「北極気候再現性検証および 北極気候変動・変化のメカニズム解析に基づく全球気候モデル の高度化・精緻化」、および研究課題2「環北極陸域システム の変動と気候への影響」との連携にもとづき、北方林における 降積雪の観測体制の構築を目的として、シベリアおよびアラス カで多分野連携にもとづく通年の高精度な自動降積雪観測を実施した。

シベリアではヤクーツクから北に直線距離で約22kmの地 点に位置するスパスカヤパッド観測サイトに、また、アラスカ ではフェアバンクスから北に直線距離で約34kmの地点に位 置するポーカーフラットリサーチレンジ (PFRR) 観測サイト のそれぞれにディスドロメーター (降水粒子の粒径・落下速度 分布を測定する装置)を設置した。本研究により、スパスカヤ パッド観測サイトでは、ロシア科学アカデミーシベリア支部北 方圏生物問題研究所と、またポーカーフラットリサーチレンジ 観測サイトでは、アラスカ大学フェアバンクス校と研究協力体 制を構築することができた。

これまでの降雪の観測結果から、北極域に特徴的である降雪 強度の弱い降雪であっても、ディスドロメーターは降雪を検出 して記録できることなどが確認された。このような降雪強度の 弱い降雪は、世界的に展開されているような降水を直接捕捉し て貯留するタイプの降水量計では観測できないことから、地上 観測所での降水量データ(特に高緯度域)の利用には注意を要 する。

さらに、森林への着雪氷についても定点観測を行なった。シ ベリアおよびアラスカにおける画像解析の結果から、両観測サ イトともに根雪が開始して終了するまでの間には必ずしも連続 して森林に着雪氷が生じていないことが分かった(図 3.4.1、 3.4.2)。特に厳冬期には、量が多く十分に森林を被覆する着雪 氷が見られるものの、根雪の開始および終了前後には降雪イベ ントに応じて森林に着雪氷が生じていた。シベリアでは着雪氷 の期間が5カ月程度と、断続的に被覆されるアラスカに比べて 長期にわたっていた。



図 3.4.1 アラスカ・ポーカーフラットリサーチレンジ観測サイトにおけ る森林への着雪氷の頻度。TSGS:森林着雪氷あり積雪あり、TNGS: 森林着雪氷なし積雪あり、TNGN:森林着雪氷なし積雪なし、ND:観 測データなし。(Sugiura in preparation)



図 3.4.2 シベリア・スパスカヤパッド観測サイトにおける森林への着 雪氷の頻度。TSGS:森林着雪氷あり積雪あり、TNGS:森林着雪氷な し積雪あり、TNGN:森林着雪氷なし積雪なし、ND:観測データなし。 (Sugiura in preparation)

続いて、大気の多重散乱を考慮するエネルギーフローに関す る1次元の数理モデルを用いて、北方林への着雪氷による大気 の影響を考察した。北方林が着雪氷で覆われているときの地表 面アルベドを0.7、北方林が着雪氷で覆われていないときの地 表面アルベドを0.3と仮定して、北方林が着雪氷で覆われなく なった場合の全球地表面の平均温度を求めたところ、約0.5K の上昇となった。シベリアおよびアラスカでの観測結果による 着雪氷の被覆期間の違いから、アラスカよりシベリアの方が今 後に昇温するポテンシャルが高いことが示唆される。

衛星観測に基づく北半球積雪域面積の長期トレンド抽出

近年北極域では、地球温暖化進行に伴う顕著な気温上昇や海 氷面積の減少が観測されており¹⁾、北極域の気候・環境形成因 子である積雪分布にも大きな変動が生じているとされている。 しかしながら、衛星データ由来の積雪分布として最も代表的か つ最長期間のデータが記録されている米国海洋大気庁気候デー タセンター (NOAA/NCDC) の北半球 Weekly 積雪チャート²⁾ を用いると、秋期の積雪面積トレンドが地上観測の結果とは矛 盾する増加傾向を示すことが指摘されている³⁾。NOAAの積 雪チャートは、気象衛星が撮影した可視・近赤外域画像をもと に、訓練された運用担当者が数値天気予報向けに積雪分布を目 視で手書きしたものがベースとなっており、人間による解析に 頼っている点や時代とともに新たな衛星の追加が行われてきた こともあり、検出精度に変動が生じる可能性があることが懸念 される⁴⁾。また、空間分解能が 190km 程度と非常に粗く、今 日の衛星データと比較する上では大変効率が悪い。したがって、 長期トレンドを精度よく評価する上では、過去から現在までの 衛星データを統一的な処理方法を採用して解析し、温暖化に伴 う積雪分布の変動を改めて評価し直す必要がある。

本研究は、1970年代後半から現在までの期間で入手可能な極 軌道衛星搭載光学センサーのデータを用いて、30年超の長期間 積雪分布データを構築し、北半球の積雪面積、積雪被覆期間の 長期変動傾向の特徴を評価することを目的とする。入力とする 衛星データには、1978年11月から2000年2月までは米国気 象衛星 NOAA に搭載されている AVHRR センサーの GAC

(4km 間引き放射輝度) データを、2000 年 2 月以降は米国地 球観測衛星 Terra および Aqua 搭載 MODIS センサーの MOD02SSH (5km 間引き放射輝度) データを用いた。地表面 の分光反射率・輝度温度とその時間変動の情報をもとに積雪域 の判定を1日単位で行った。その際、異なるセンサー間の積雪 検知性能を同一に保つため、AVHRR が有する5つのバンドと 同一波長帯の輝度データのみを使用した。積雪面積は、上記の 1日単位の積雪域の判定結果を半月間単位で合成したものから 算出した。また、1月上旬から12月下旬まで半月単位で集計し た積雪被覆日数割合を年毎に総計して積雪被覆期間を算出した (以下、本研究で作成したデータを JAXA 版と呼ぶ)。積雪域 の検知精度の評価には、NOAA/NCDC が公開している Global Historical Climatology Network-Daily (GHCND) ⁵⁾ データに 格納されている地上計測された積雪深(1週間平均の積雪深2.5 cm以上を積雪有り、日最高気温 2.5℃以上を湿雪有りと判定) を用いた。また、冒頭に述べた NOAA/ NCDC の北半球 Weekly 積雪チャート(以下 NOAA版と呼ぶ)を用いて同様に積雪検 知精度を評価し、JAXA 版の性能と比較した。

GHCND の地上計測積雪深を用いて評価した結果、積雪域判 定の正答率はJAXA版、NOAA版ともに 80%程度であったが、 検知率については、JAXA版の方がわずかに増加傾向を示すも のの 85%前後で安定していたのに対し、NOAA版は 80年代か ら 90年代前半は 80%前後で推移し、2000年代以降は 85%を 超える値をとるなど、年代により大きく変動している様子が見 て取れた。このことから NOAA版では使用する衛星種類の増 加や積雪域を判読する担当者の交代等により積雪判読基準にば らつきが生じているものと考えられた。また、季節毎の特徴を 見ると、夏期に NOAA版が積雪域を過大評価する傾向が大き いことが分かった。これは、NOAA版の空間分解能が粗いため、 積雪域が小さくなる夏期に、積雪域を大きめに判定しているこ とが原因と考えられた。これらのことから、積雪域面積の長期 間変動を評価する上では、JAXA版の方がより適したデータで あると言える。

季節毎に平均した北半球の積雪域面積の経年変動を解析す ると、北半球全体での積雪面積は、全ての季節において減少傾 向を示していた。しかしながら、年間の積雪被覆期間を地域毎 に見ていくと、世界中どの地域でも一様に短縮化が進んでいる わけではないことが分かった。図 3.4.3 は、北半球の積雪被覆 期間の 30 年平均値および積雪被覆期間、積雪消失日、積雪開 始日の 30 年トレンド(各画素毎の回帰直線による 30 年間の変 化量)を示している。北半球で最も短縮化が進行しているのは、 欧州からロシア西部にかけてのユーラシア大陸西部地域で、例 えば、ウクライナ周辺では 30 年間で 40 日以上の短縮化が進行 していた (図 3.4.3b)。

図 3.4.4 に、スカンジナビア半島北部の Kevo の積雪被覆期 間について、衛星データから切り出したものと地上での積雪深 観測の結果に基づくものの比較を示す。期間は異なるが、衛星 データから抽出した積雪被覆期間の短縮傾向が地上観測でも裏 付けられることが分かる。一方、東アジアや北米西部の山岳域 においては短縮化よりむしろ長期化を示す地域が見られている。 これらの要因を分解すると、ユーラシア西部の短縮化は、英国 など一部の地域では積雪消失日の早期化が効いているが、大部 分は積雪開始日の遅延により生じていることが分かった(図 3.4.3c)。一方、アジアや北米西部山岳域での長期化について は、積雪消失日の遅延化が寄与していることが分かった(図 3.4.3d)。このような大陸間あるいは大陸東西間での積雪被覆 期間トレンドの不均衡は、温暖化に伴い近年縮小が著しい北極 海氷の縮小、大気循環場や植生被覆の変動など、地球温暖化に 伴う他の環境要因とも密接に関係していると考えられ、北極域 の温暖化増幅メカニズムを解明する上で今後の研究課題として 重要である。



(b),(c),(d) 積雪被覆期間・積雪消失日・開始日のトレンド[日/30年]

図 3.4.3 過去 30 年間の北半球積雪被覆期間の (a) 平均値、および (b) 積雪被覆期間、 (c) 積雪消失日、 (d) 積雪開始日のトレンド (Hori et al., unpublished data) 北極の温暖化増幅に関しては、アイス・アルベドフィードバ ックの重要性が確認されている(研究課題1)。アイス・アル ベドフィードバックは夏季において北極海の海氷域で顕著であ るが、北極海での海氷融解が始まる前に環北極の陸域で積雪の 融解が進む。アラスカにおいての観測からカナダ内陸部や太平 洋岸から開始した融雪地域がアラスカを北上し、北極海に至っ たあと、海氷の表面融解と後退が始まることが観測されている。



図 3.4.4 衛星 (全積雪:白棒、湿雪:水色棒) および現地観測データ (赤丸) から抽出したフィンランド・ケボにおける積雪被覆期間の年変動 (Hori et al., unpublished data)

3月~5月に陸上積雪域での融解域が北上し、6月以降にカナ ダ北極圏や海氷域へと融解域が移動する、一方でグリーンラン ドでは標高の低い沿岸部から融解が始まっており、7月には標 高の高い内陸に及ぶ。

環北極を北上する融解域の面的情報は MODIS データを用い た JASMES でモニターできる。融解の強度については、マイ クロ波放射計の観測が有効である。北極観測で成果を上げてい る GCOM-W(しずく)衛星のマイクロ波放射計 AMSR2 およ び衛星 AQUA に搭載された AMSR-E は 2000 年代の北極域の 雪氷融解を観測してきた。図 3.4.5 にマイクロ波の昼夜の輝度 温度の差から融解を検出する DAV(Diurnal Amplitude Deviation)によって得られた環北極域の融解状況と JASMES の比較を示す。



図 3.4.5 環北極域の春(4月)融解情報。(左)AMSR-E(赤色が融雪 域を示す)、(右)JASMESによる(白色:乾雪、水色:湿雪、灰色: 海氷)。

3. 積雪中不純物の空間分布

執筆者:東久美子 塚川佳美 杉浦幸之助 近藤 豊 小池 真 茂木信宏 大畑 祥 森 樹大 永塚尚子

北極域における積雪サンプルの採取と分析

北極域の積雪中に含まれるブラックカーボン (BC) やダスト 等の光吸収性エアロゾルは、積雪のアルベドに影響を及ぼす可 能性があり、近年、注目されている。しかし、積雪中の BC や ダストの高精度の測定データは非常に限られている。本研究で は北極域の広域で一冬分の積雪を採取し、BC の濃度と粒径を 高精度で分析した。サンプル採取地点を図 3.4.6 に示す。アラ スカでは、2012 年から 2015 年までの間、2 月下旬から 3 月上 旬にかけて北極海沿岸のプルドーベイから北太平洋沿岸のアン カレッジまでのアラスカを縦断するルート上で積雪の採取を行 った。シベリアでは、2013 年 3 月にミールヌイからヤクーツ クまでの東西にわたるルート上で積雪採取を行った。フィンラ ンドでは 2013 年 3 月に北緯 70 度から 60 度までの間の地点で 積雪採取を実施した。さらにスバールバルでは 2013 年 4 月中 旬にニーオルスンの町中と氷河上で積雪を採取した。

北極域で採取した積雪サンプルは日本へ運び、国立極地研究 所でWide range SP2 (Mori et al., 2016)を用いて BC を、 イオンクロマトグラフを用いてイオンを分析した。また、一部 のサンプルについては、ダストの起源推定のため、総合地球環 境学研究所において Nd と Sr の同位体比を分析した。BC につ いては、新しく開発した分析法 (Mori et al., 2016)を用いる ことで、従来 100%程度あった測定誤差を 10%程度まで減少さ せることができた。



図 3.4.6 北極域積雪採取地点

積雪中不純物の空間分布

図 3.4.7 に BC 濃度 (図 3.4.7a、b) とイオン濃度 (図 3.4.7c、 d) の緯度分布を示した。北緯 69 度以南においては、BC 濃度 は積雪量が多いアラスカ山脈付近の地域 (FA7-FA10) が最も 低濃度であった。一方、北緯 65 度のフェアバンクス周辺では 濃度が高く、YU-FA6の4年間の平均 BC 質量濃度は FA7-FA10 の約 5.5 倍とであった。AC (Arctic Circle) 以北では、PB (プ ルドーベイ)を除いてフェアバンクス周辺より低濃度であった。 PB は AC 以北の他の観測地点と比べて高濃度であったが、こ れは PB が油田採掘の町であり、人為起源の BC の排出量が大 きく、BC 濃度が局所的に高くなるためだと考えられる (図 3.4.7a,b)。

BC 濃度分布の傾向から、アラスカを YU から FA6 までの BC 濃度が高い中部地域(63.57–65.9°N)、FA7 から FA12 の BC 濃度が低い南部地域(61.82–63.27°N)、中部より北の TL から AC までの北部地域(66.56–68.62°N)、さらに PB (70.19°N)、Barrow(71.32°N)の5地域に分けることがで きる。PB は前述のとおり、局所的な汚染の影響を受けている ため他の地域と分けた。Barrow は後方流跡線解析より、アラ スカ内陸を通過する気塊がほとんどなく、他の地域と異なって いるため一つの地域とした。FA6 と FA7 付近にアラスカ山脈 があり、山脈を境にして中部と南部で濃度分布の傾向が異なっ ていると考えられる。



図 3.4.7 アラスカ積雪中の不純物濃度の緯度分布。各データは 2012 年から 2015 年の平均値、エラーバーは1σを示す。

BC 濃度の高い中部の中心であるフェアバンクスは、周囲が 山岳で囲まれた場所にあり、大気境界層の底部が冷却され逆転 層が形成されやすい冬季は気塊が滞留する。このためフェアバンクスでは冬季に人為起源の大気中のエアロゾル濃度が高くなると考えられる (Ward et al., 2012)。

積雪中の高濃度 BC は人為起源の BC の沈着によると考えら れる。一方、南部では,北上するにつれて BC 濃度が減少して いる。後方流跡線解析よるとこの地域は南側からの気塊の移流 が多い。BC の人為発生源であるアンカレッジ周辺から遠ざか るにつれて BC 濃度が低下すると解釈できる。化石燃料の燃焼 起源と考えられる硝酸も BC と同様の緯度分布を示しており、 発生源が共通であることを示唆する。硫酸は BC や硝酸と同様、 中部地域で高濃度になるという傾向はあるが、緯度分布は BC や硝酸と異なるため、発生源や輸送経路が BC や硝酸とは異な ると考えられる。

今後、BC、硝酸、硫酸の濃度や堆積量に対してアジア、ロシ ア、北米東部などの工業地帯から長距離輸送されるもの、アラ スカで発生する局所的な人為起源のもの、自然起源のものの寄 与が、それぞれどの程度か、輸送モデルと合わせて研究する必 要がある。

本研究で得られた BC のデータから、局所的な人為起源 BC の影響を強く受けているフェアバンクス周辺とアンカレジ周辺 のデータを除いて平均濃度を計算し、結果を先行研究と比較し た(表 3.4.1)。本研究の結果は先行研究よりも1桁程度低い 傾向があり、先行研究が BC 濃度を過大評価していた可能性を 示唆する。先行研究の結果を BC の輸送・沈着モデルや衛星の検 証データとして用いる場合は注意が必要である。

文献	観測場所, 観測期間	深さ	平均濃度 [µg L ⁻¹]	濃度範囲 [μg L ⁻¹]	測定方法
Clarke and Noone (1985)	Barrow, 1983Apr, 1984Mar		22.9	7.3-60.4	IP
Hegg et al. (2009)	North Ameriaca, 2007, spring	Surface	>20		ISSW
Doherty et al. (2010)	Canadian and Alaskan Arctic, 2007 and 2009 Canadian sub-Arctic, 2007 and 2009	Surface, Subsurface Surface, Subsurface	8 14		ISSW
Sterle et al. (2013)	Eastern Sierra Nevada, 2009Jan-Apr (accumulation period)	snow pit (10cm intervals) Surface (top-2cm)	3 25	<1-89 3-81	USN/SP2
Doherty et al. (2014)	Pacific Northwest, 2013, Jan-Mar Intramountaion Northwest, 2013, Jan-Mar	Surface Subsurface Surface	35 32 37		ISSW
	Northern U.S. Plains, 2013, Jan-Mar	Subsurface Subsurface	44 78		
	Canada, 2013, Jan-Mar	Surface Subsurface	19 22		
Pedersen et al. (2015)	Barrow, 2008Apr	Surface (top-5cm)	9	0-36	TOT
This study	Alaska, 2012-2015, Feb-Mar	Surface (top-2cm) Subsurface (2-10cm) whole layer	1.6 1.1 1.3		M5/WR-SP2

表 3.4.1 先行研究との比較

アラスカ、シベリア、フィンランド、スバールバルの各地域 で、複数のサンプル採取地点での積雪全層の BC 濃度と一冬の 堆積量の平均値を計算した結果を図 3.4.8 に示す。濃度はシベ リア、フィンランド、アラスカ、スバールバルの順に高く、堆 積量はフィンランド、シベリア、アラスカ、スバールバルの順 に高かった。本研究で求めた高精度の濃度と堆積量のデータは、 BCの輸送・沈着モデルや衛星データの検証に貢献することが 期待される。また、BC が融雪に及ぼす影響を評価する上でも 重要である。今後、BC だけでなく、ダストについても同様の 研究を進める予定である。



図 3.4.8 北極域の各地域の積雪における BC の濃度(上段)と 堆積量(下段)

北極域積雪中ダストの起源推定

北極積雪中ダストの同位体比とダスト発生源地域の同位体比の 比較を行った結果を図 3.4.9 に示す。



図 3.4.9 北極積雪中ダストの同位体比(丸印)とダスト発生源地域の同 位体比(エリアで示す)の比較。

図 3.4.9 から、北極域に飛来するダストの供給源は地域や年に よって大きく異なることが分かる。アラスカの中でも場所と年 により差が見られた。アラスカ山脈より南ではアジアの砂漠や 火山灰など遠方起源のものが供給されており、その起源が年に よって異なっていた。これに対して、アラスカ山脈より北に位 置するフェアバンクス周辺では主にローカルなダストが供給さ れており、年による違いは少なかった。また、フェアバンクス の北北東に位置するサークル (CI) では、年によって起源が異 なり、2015年にはアジアからのダスト供給が多かった。一方、 シベリアとモンゴル、グリーンランド沿岸では、ローカルなダ ストが主であった。ダスト同位体比はダストの起源推定と輸送 過程の推定に有効な手段であるが、まだ測定例が少ないため、 今後、更に分析を進める予定である。



北極域の氷河の融解が急速に進んでいるが、その原因は単に 気温の上昇だけではなく、氷河表面の不純物によるアルベド低 下も原因であることが指摘されるようになってきた(図 3.4.10)。



図 3.4.10 北極圏の温暖化による生物学的融解加速過程(竹内望)。

この氷河表面の不純物は、雪氷藻類と呼ばれている光合成微 生物に由来する暗色の有機物が主成分であることがわかってき た。近年の北極域の氷河の暗色化は、微生物の繁殖の変化が関 わっている可能性がある。そこで、北極域の氷河で氷河表面の 不純物および微生物の分析、およびその融解に対する効果を調 べた。

東シベリア、スンタルハヤタの氷河での調査の結果、氷河表 面には、合計7種の光合成微生物である雪氷藻類が繁殖してい ることがわかった。中でも、暗色の色素を持つアンキロネマ・ ノルデンショルディという緑藻の一種が大量に繁殖しているこ とがわかった(図 3.4.11、Tanaka et al., 2016a)。



図 3.4.11 スンタルハヤタの氷河表面の不純物と、そこに含まれて いた微生物(雪氷藻類)の顕微鏡写真(Takeuchi et al., 2015)。

スンタルハヤタの氷河表面の不純物分析の結果、鉱物粒子、 暗色有機物、藻類細胞が含まれることがわかった。氷河表面ア ルベドと不純物の濃度および構成の関係を調べた結果、構成物 の中でも雪氷藻類細胞がアルベドと負の相関があり(図 3.4.12)、 もっともアルベド低下に影響している成分であることがわかっ た(Takeuchi et al., 2015)。



図 3.4.12 融解速度 PDDF (Positive Degree Day Factor) に対する表面反射率(左)、および表面反射率に対する微生物量(右)の関係 (Takeuchi et al., 2015)。

氷河表面の融解量と表面アルベドとの関係を調べた結果、この氷河では不純物によって融解速度 1.6~2.6 倍に加速されていることがわかった。衛星画像の分析から、融解加速は平均 1.8 倍になることがわかった(図 3.4.13、Takeuchi et al., 2015)。

3年間の調査の結果、氷河表面の藻類の種類や群集構造は、 年によって変わることがなかったが、融解期の気温の高い年ほ ど、藻類の繁殖量が増加することがわかった。このような気象 条件に伴う藻類の繁殖量の増加が、氷河融解を顕著に加速して いることがわかった。



図 3.4.13 Landsat-8 衛星画像から求めた、スンタルハヤタ山域の氷河 上の暗色域の分布。(a) Band 2、3、4の Natural color 画像。(b) Band 2 の反射率をカラーTable で強調した画像。暗色域は氷河中流部 分に分布し、平均反射率は 0.290 できれいな氷に比べた融解速度は 1.8 倍となることがわかった(Takeuchi et al., 2015)。



図 3.4.14 調査を行った北極域の氷河。各地の氷河で微生物の暗色化が 起こっている(竹内望)。

北極域のグリーンランド、スバールバル、アラスカの氷河の 調査の結果、その地域の氷河でも微生物による暗色化が起きて いることがわかった(図 3.4.14)。さらに雪氷藻類の種構成は、 北極圏では共通であることがわかった。雪氷藻類の中でも、氷 河表面の暗色化の原因となる緑藻のアンキロネマ・ノルデンシ ョルディ、およびシアノバクテリアの生活史の理解が、氷河融 解への影響の推定に重要であることがわかった。

5. 北極圏山岳氷河の変動

執筆者:大畑哲夫 白川龍生 Yong Zhang Alexander Fedorov

20 万あると言われる地球上の氷河・氷帽のうち北極圏には半 数近くが分布しており、「縮小する世界の氷河の海水面上昇寄 与」の議論では重要な地域となっている。重要性にも関わらず、 変動予測にとって重要となる氷河の量と特性に関して十分な精 度で予測するための知見の蓄積がない。本研究では、第一に情 報の空白地帯である東シベリアの氷河の現地調査、変動特性解 析を行うことで、北極氷河の知見のギャップを埋め、また第二 として北極他地域を含め、広域評価を行うためのモデリング開 発を行った。なお現地観測は、ロシア科学アカデミー・永久凍 土研究所(MPI)などの協力を得つつ、本事業と海洋研究開発 機構の共同研究として実施された。

東シベリア・スンタルハヤタ山域北部の氷河の基本情報

当該山域の No.31 氷河および周辺の氷河に関する気象・形 態・質量交換に関する現地調査を 2011~2014 年の間、毎年実 施した(詳細は Shirakawa et al., 2016 参照)。



図 3.4.15 DGPS 測量成果から作成した No.31 氷河の DEM (白川作成)。

現在の形状について、DGPS 測量およびアイスレーダーによって調査し、DEM を作成した。過去の調査に比べより信頼性の高い地図を得ることができ、今後の変動議論の貴重な情報を取得した。図 3.4.15 のように、現在(2013 年)の No.31 氷河の氷河長は 3.38 km、面積は 2.27km²、平均氷厚が 76m であることがわかった(Shirakawa et al., 2016)。

No.31 氷河の流動を DGPS 測量によって測定し、現在の流動 速度は、中央部で 2ma⁻¹程度であることが分かった(Shirakawa et al., 2016)。また、現在の表面質量収支を導出したところ、 氷河上部まで質量収支がマイナスであり、全体が融解域であり 縮小中であることが分かった。

氷河周辺に設置した気象観測装置により、2012 年から 2014 年までの気象データを収録した(図 3.4.16)。2012/13 シーズ ンの氷河上 2446m a.s.l.地点での平均気温は-13.6℃、同最低気 温は-46.0℃を記録した。近郊のオイミヤコン村(約 700m a.s.l.) の気温と比較すると、11 月~4 月の氷河上の気温は 10℃程度 高く、強い気温逆転があることが分かった。



図 3.4.16 氷河上 (氷河キャンプ: 2446m.a.s.l.) に設置した自動気象 測器 (AWS) ・温度計・インターバルカメラの写真 (白川作成)。



積雪についてインターバルカメラで撮影し、2012年8月以降1年間の変化を算出したところ、積雪増は冬の初めと終わりに見られ、前年からの積雪深増加は2013年5月に記録され、

2446m a.s.l.地点では 158cm を記録した(図 3.4.17)。また オイミヤコンと比較すると、氷河上の積雪期間は約 3 ヶ月長い ことがわかった。

これらの情報は、過去変動の高精度の解析、今後の氷河変動 研究の基礎になると考えられる。また、本事業の調査が刺激と なった結果 MPI が独自に 2016 年以降も再測を続ける予定とな っている。

氷河の規模の長期的変化の解明

No. 31 氷河に関する過去の調査結果・研究、今回現地観測で 取得した結果、および衛星情報解析から 1945 年以降、特に IGY (1957-59)以降の変動・変化について、以下のことが分かっ た (Ohata et al, to be submitted)。20世紀中盤以降、No. 31 氷河および周辺氷河は、1995 年以降特に顕著になった北極気温 上昇の影響を受け、縮小している。その結果、IGY から本事業 実施時期にかけ、末端が 500m あまり後退し(図 3.4.18)、面 積は 1945 年から本事業期間にかけ 23%減少したが、2000 年以 降その変化は加速している(図 3.4.19)。末端付近および下流 部での表面低下量は 70m にも及んでいる。また、IGY と本事 業実施時期を比較すると、最も変化が大きかったのが氷河速度 であり、下流部から中流部にかけ、半分から 3 分の 1 に減って いることが分かった。これは氷河の応答に大きな影響を与える と考えられる。



図 3.4.18 No. 31 氷河。IGY から本事業実施時期にかけての氷河末端 位置の変化。IGY 時の地図、衛星写真、DEM (2013) 年を合成したもの(白川・鈴木作成)。

IGY と本事業実施時期の表面質量収支を比較すると、IGY 期 には涵養域が存在したが、本事業期には、上端まで全面融解域 になり、涵養域が存在しなくなっていた。それでも長期的質量 損失量は、北極の中では中程度であることも分かった。この氷 河が長期的温暖化の影響で氷河縮小は進んでいて、1995年以降 はそれが強まったことで、涵養域がない年が発生しつつ損失・ 縮小が加速化し、それに伴い動きが鈍化していると言える。こ の状況は、No. 31 氷河がいわゆる氷河の基本的特徴を失いつつ、 消失する方向に向かっていることを示している。また Galanin et al. (2013, 2014) は、モレーン年代、岩石風化の調査、コケ の成長、航空写真(1940年代)の総合的解析から、この地域の ムスハヤ山塊では、氷河面積が小氷期から1940年代までに5 ~7%減少、1940年代から2012年までに、36%減少したこと を明らかにした。No.31 氷河のみならず、当該地域全体で氷河 が縮小していることを示している。



図 3.4.19 1945 年から本事業観測時期にかけての No.31 氷河面積の変 化。赤:1957 年から 2001 年にかけて(Koreisha,1963^{e)}、 Ananicheva et al., 2005⁷⁾)、黒:空撮写真の解析結果、青:LANDSAT 画像の解 析結果、緑:作成した DEM2013 による(大畑作成)。

北極域・環北極域の氷河変動のシミュレーション

氷河変動の広域評価のため、HYOGA モデルを用いて二つの 広域氷河変動解析を実施した。まず氷河・気候データの揃って いる環北極地域・アルタイ山脈において、RCM によるデータ を用いて HYOGA モデルの検証を行うとともに、計算方法を改 善し、質量収支の変動予測を行なった(Zhang et al., 2016a)。 その結果、温暖化シナリオ RCP4.5 では、21 世紀中の地域氷 河質量収支の値は、小型氷河が消滅するため、全体として頭打 ちになる一方、強い温暖化のシナリオ RCP8.5 では、気温上昇 の影響が顕在化して、質量収支は減少する一方となることが分 かった(図 3.4.20) (Zhang et al., 2016a)。



図 3.4.20 アルタイ山脈全体の氷河についてシナリオ RCP4.5 と RCP8.5 の二つの場合に関して推算した氷河質量収支 (a) と 2005 年に 対する氷河面積の長期変化。(Zhang et al., 2016a)

また、同じモデルで現地観測を実施したスンタルハヤタ山塊の No. 31 氷河について評価を行った。第一に、IGY 当時から

本事業での観測までにかけての氷河全体の積算質量損失を計算 したところ、全期間で-22.3 m 水当量になり、その内 1991 年 以降が 56%を占めることが分かった(図 3.4.21)。第二に暗色 化をもたらす物質が質量収支に与える影響の評価を行ったとこ ろ、多い場合と少ない場合には、平均的な場合よりそれぞれ 20 ~30%の増加・減少が見られ、暗色化物質の状況が質量収支に 多大な影響を及ぼすことが明らかになった(Zhang et al., 2016b)。



図 3.4.21 HYOGA モデルを用いた 1950 年から 2014 年までの No. 31 氷河の質量収支(a)、年平均気温(b)と二つの方法(Oymiakon 気 候値および APHORODITE データセット)で得られた年降水量(c)の 長期的変化。図中の線は、10 年毎の平均値(a)および線形回帰直線 (b と c)。

6. グリーンランドにおける氷損失とそのメカニズム

執筆者:杉山 慎 齋藤冬樹 的場澄人

グリーンランドは面積の80%が平均1700 mの氷に覆われ、 地球第二の氷床と多数の氷河・氷帽を形成している。1990 年代 後半から氷床の質量減少が報告されており、2000 年以降は減少 速度が加速している。その原因として、①大気の温暖化による 融解増加、および②カービング氷河からの氷流出の増加が挙げ られているが、それらの詳しいプロセスは明らかになっていな い。また沿岸部の氷帽・氷河でも氷損失が起きているが、氷床 と比較して研究が進んでいない。さらに、氷の損失速度は時空 間的にばらつきがあり、グリーランド全域で正確なデータの収 集が急務となっている。

以上の背景に基づいて、グリーンランドにおける氷損失の定 量化とそのメカニズム解明に取り組んだ。特に北西部カナック 村の周辺では(図3.4.22)、野外観測、衛星データ解析、数値 実験など総合的な研究を実施した。グリーンランド北西部は、 2005年以降に氷損失の加速が報告されているが、南部と比較し て観測データが不足している地域である。また、グリーンラン ド全域を覆う氷床モデルを改良して運用し、一連の数値実験に よって、氷床縮小が海水準に与える影響を解析した。

人工衛星データによる氷河氷床、海洋の変動解析

氷帽とカービング氷河の質量損失を定量化するために、人工 衛星ステレオペア画像(ALOS-PRISM画像)の実体視によっ て雪氷の表面高度を測定し、2006年から2010年の標高変化を 測定した(図3.4.22)。カナック周辺に位置する6つの氷帽で は、平均-1.14ma⁻¹の標高変化が確認された。この値は、過去 に報告された2003-2008年と比較して、氷損失が約2倍に増 加していることを示すものである(Saito et al.,2016b)。一方、 海洋に流入するカービング氷河の末端域では、標高200m以下 の領域で-0.72~-6.7ma⁻¹の標高変化が起きている。各カービ ング氷河の変動はばらつきが大きく、幾つかの氷河では平均よ りも著しく大きな速度で氷が失われていることが判明した。



図 3.4.22 2006 年から 2010 年における、カナック周辺の氷帽および カービング氷河の表面高度変化。氷帽の質量損失は近年加速しており、 一部のカービング氷河では年間 5 m 以上の氷が失われている(Saito et al., 2016b、片山修士論文, 2016)。

カナック周辺に位置する全てのカービング氷河に関して、 Landsat 画像を使って 1987 年以降の末端位置、流動速度の変 化を解析した。その結果、全氷河が後退傾向にあり、特に 2000 年以降、顕著な後退が始まったことが明らかになった(図 3.4.23)。Tracy 氷河、Bowdoin 氷河など、一部の氷河では数 km 以上の大きな後退が起きている。氷河の流動速度は 2000 年以降に加速傾向にあり、特に標高変化や後退の激しいカービ ング氷河では、より顕著な流動加速が見出された。これらの結 果から、幾つかのカービング氷河で末端後退、加速、氷厚減少 が同時に起き、急激な質量損失を駆動していることが示唆され た。



図 3.4.23 カナック周辺に流入するカービング氷河の末端位置変化。 1980 年代以降、全ての氷河が後退傾向にある(榊原博士論文, 2016)。

急激な変動が観測されたカービング氷河の一つ Bowdoin 氷 河では、より詳しい衛星データ解析を行った。1950 年頃から安 定していた氷河末端は、2008 年から急激な後退に転じた。また 急減な後退に先立って、2000 年頃から流動速度が 2 倍以上に 増加している。さらに、2007 年と 2010 年の表面高度を測定し たところ、その変化は隣接する Tugto 氷河(陸上に末端を持つ) よりも顕著に大きく、4 m a⁻¹を超える標高低下が確認された (図 3.4.24a)。Bowdoin 氷河は、上流から末端にかけて流動 速度が増加する、典型的な伸長流動場を示す(図 3.4.24b)。 この速度場が加速することで、氷の歪による氷厚減少が増加し た可能性が高い。すなわち、大気の温暖化による融解増加に加 えて、流動変化に起因する氷損失が、カービング氷河の急激な 変動に重要な役割を果たしている。



図 3.4.24 Bowdoin 氷河 (右) と Tugto 氷河 (左) における、(a) 2007 年から 2010 年の表面高度変化速度、および (b) 2007 年の流動速度。 海に高速で流入する Bowdoin 氷河でより大きな氷厚減少が確認された (Tsutaki et al., 2016)。

氷河氷床、氷帽の縮小は、グリーンランド沿岸の海洋環境に も影響を与えている。カナックの周辺で、Aqua/MODIS 衛星 画像の波長 555 nm における反射率を使って、海洋表層の濁度 分布を解析したところ、陸や海洋で終端する氷河前縁海域に高 濁度域の分布が確認された(図 3.4.25a)。この結果は、土砂 を多く含んだ氷河融解水が、高濁度水の起源であることを示唆 するものである。また夏期に拡大する高濁度水域の最大面積は、 夏期平均気温と相関がある(図 3.4.25b)。すなわち夏の気温 が高い年には、海洋のより広い範囲が高濁度水によって覆われ る傾向が示された。この結果は、温暖化が進む北極域において、 将来のさらなる環境変化を示唆するものである。



図 3.4.25 (a) グリーンランド北西部沿岸海域における、波長 555nm のリモートセンシング反射率。暖色で示された反射率の高い領域が高濁 度の氷河流出水に覆われた海域を示す。(b) 2002-2014 各年における 高濁度水域の最大拡大面積と、夏期平均気温との相関関係。気温の高い 夏に氷河からの流出が増加して、より広い範囲まで海洋が高濁度水に覆 われることを示している(Ohashi et al.,2016)。

野外観測による氷損失定量化とメカニズムの理解

氷帽の質量損失についてより詳しく理解するため、2012年から2015年にわたってカナック氷帽において観測を実施した。 氷帽表面アルベドと融解量を測定したところ、氷の暗色化が著しい中流域では、融解の気温感度(PDDファクター)が最大 1.5倍の値を示した(図3.4.26)。この結果から、気温上昇に 加えて暗色化によるアルベドの低下が、雪氷融解の増加に重要 な影響を与えていることが確認された。なお、グリーンランド 沿岸における雪氷表面暗色化の原因は、雪氷生物の繁殖である ことが明らかになっている(Takeuchi et al., 2014)。この他、 質量収支と流動速度のモニタリングを継続して、氷河氷帽変動 の基礎となるデータの蓄積を行った。質量収支のデータは、グ リーンランド研究の国際コミュニティーがまとめる論文に提供 された(Machguth et al., 2016)。

2008年以降の急速な後退(図 3.4.27a)が判明した Bowdoin 氷河では、その変動メカニズムを明らかにするため、2013年か ら 2015年にわたって現地観測を実施した。氷河と海洋の底面 地形をアイスレーダーとソナーで測定したところ、2008年まで 氷河末端が安定していた海底に高さ約 50 m の凸地形が見出さ れた(図 3.4.27b)。また氷河末端部では、氷の約 90%が海水 面下にあることが判明した。これらの観測結果から、海底の突 起によって安定していた氷河が、水深に対して十分な氷厚を保 てなくなったためカービングが増加し、急激な後退が始まった と考えられる。



図 3.4.26 カナック氷帽の(a) 標高 250 m および(b) 750 m における 表面状態。(c) 各標高における衛星画像輝度(青線)(ALOS PRISM 2009 年 8 月 29 日)、および 2012 年 7 月 18-29 日の融解量(●印) の標高による変化(Sugiyama et al., 2014)。



図 3.4.27 Bowdoin 氷河における (a) 1987–2013 年の末端位置変動と、 (b) 氷河および海底地形を示す断面図 (Sugiyama et al., 2015)。

氷河上末端から約2kmの地点では、スイス連邦工科大学と 共同で、氷河底面に達する熱水掘削を行った。その結果、氷河 底面に排水システムの存在を確認し、氷河の温度構造が明らか になった。カービング氷河末端部での底面観測は先駆的な試み であり、現在スイスの共同研究者と協力して解析を進めている。

カービング氷河の後退に主要な役割を果たすカービング現 象に関しては、スイス連邦工科大学およびフィレンツェ大学と 共同で、地震計、自動撮影カメラ、インフラサウンド、水位計 などを用いた観測を行った。氷河末端まで250mの位置に近寄 って地震波測定を行ったところ、氷河地震の発生頻度と潮汐と の間に相関が見出された(図3.4.28a)。カービング氷河末端 にここまで近寄った地震波測定は世界初の試みであり、潮汐と 地震波との相関はグリーンランドで初めて見出されたものであ る。この結果は、潮汐に起因する氷河流動変化が氷の破壊現象 をコントロールすることを示しており(図3.4.28b)、海洋が 氷河氷床に与える強い影響を明らかにしたものである。



図 3.4.28 (a) Bowdoin 氷河末端から 250 m において測定した氷河地 震の発生頻度。一日に2回ピークを持つ周期的な変動を示す。 (b) 潮 汐に駆動される氷河地震の発生メカニズム (Podolskiy et al., 2016)。

グリーンランドのカービング氷河が近年急激な後退に転じた 原因の一つとして、海洋の温暖化・循環の変化が指摘されてい る。この仮説を検証するデータを得るため、Bowdoin 氷河前の フィヨルドにおいて海洋観測を行い、フィヨルドの温度構造を 明らかにした(図 3.4.29)。フィヨルド深部は外洋から流入す る比較的暖かい水塊で満たされており、表層部には氷河融解水 を起源とする冷たく塩分濃度が低い懸濁水が存在する。この結 果は、氷河底面からの融解水湧昇がフィヨルドの循環を駆動し、 氷河末端融解を促進するとする仮説と整合するものである。このようなカービング氷河と海洋の相互作用は、地球規模の気候変動を駆動する海洋循環の変化とも密接に関係するプロセスである。したがって、本研究で明らかになった海洋構造の長期的な変化、および氷河氷床・海洋相互作用の詳しいメカニズムの解明が、今後の課題として示された。



図 3.4.29 Bowdoin 氷河前のフィヨルド地形と海水温度分布。底層に塩 分濃度の高い暖水、表層に融解水を含む冷水の存在が明らかになった (杉山他, 2015)。

カナック地域のカービング氷河上流部の涵養域では、気象観 測と雪氷コアサンプルの採取を実施した。標高 2100 m の SIGMA-D 地点(北緯 77.64 度、西経 59.12 度)では、自動気 象観測装置を設置し、気象データのモニタリングを行った(図 3.4.30)。気温、風速風向、日射量、積雪深などの測定値は ADS を用いて公開され、研究コミュニティーに提供されている。



図 3.4.30 (a) 氷床内陸 (SIGMA-D: 北緯 77.64 度、西経 59.12 度、標高 2100 m a.s.l.) に設置した AWS と、 (b) ADS に公開中の気温データ (Matoba et al., 2015)。

また SIGMA-D 地点では 2014 年 5 月に 225 m のアイスコア を、標高 1500 m の SIGMA-A 地点(北緯 78.05 度、西経 67.63 度)と標高 1800 m 地点の SIGMA-A2(北緯 78.10 度、西経 64.08 度) でそれぞれ 19 m、7m の雪氷コアを採取し、水同位 体比とナトリウムイオン濃度の季節変動から、過去の涵養量の 変化を推定した(図 3.4.31)。

SIGMA-D のアイスコアからは、小氷期終焉前後に涵養量は 大きく変化せず、現在までほぼ一定であることが示された。ま た、3本のアイスコアの比較から、標高による涵養量の違いが 小さいこと、1500m地点では融解水の流出が生じている可能 性が示唆された。現在各種コア分析が進行中であり、近年の涵 養量変化や堆積環境の変化について解析を予定している。



図 3.4.31 アイスコアから推定された涵養量の時間変化。小氷期以降、 涵養量はほぼ一定であることが示された(門田修士論文, 2016)。

数値実験によるグリーンランド氷河氷床変動の解析

グリーンランド氷床の質量変化に関して、国際氷床モデルプ ロジェクト SeaRISE (Bindschadler et al., 2013) を含むさ まざまな将来の百年スケールの温暖化応答実験を行った。



図 3.4.32 IPCC AR5¹⁾におけるグリーンランド氷床モデルの比較。国際比較における三つのモデル結果の提出を行なっている(Nowichi et al., 2013)。

気候などの境界条件、氷床力学過程、モデル構成などさまざ まな要素の不確定性に起因するグリーンランド氷床変動の不確 定性を評価し、モデル間のばらつきは氷床力学の再現より、表 面質量収支の再現や現在の氷床の再現の違いに強く影響される ことが明らかとなった(図 3.4.32、3.4.33)。SeaRISE のモデ ル間のばらつきについての解析は Greve and Herzfeld (2013) やSaito et al. (2016a) としてまとめられた。



図3.4.33 SeaRISE (Bindschadler et al., 2013) によるグリーンラン ド氷床の温暖化実験結果。A1B シナリオ下での500年の体積変動を示 したもの。SICOPOLIS、Elmer/ICE、IcIESが日本から参加したモデ ル。

氷床力学モデル(IcIES)に基づいて構築されたグリーンランド氷床変動史を入力値として、固体地球モデリングによるグリーンランド沿岸域の完新世海水準変動を再現した(図 3.4.34)。当該地域の地殻変動に対する地球内部粘性構造の依存性を検証した結果、従来の地球内部粘性構造モデルを用いた海水準変動は、地形地質学的観測値を十分説明可能であり、氷床力学モデルにより構築された氷床変動史は、グリーンランド沿岸域における約1万年の時間スケールの固体地球変動に対しても、十分適用可能であることを示した。



図 3.4.34 固体地球モデルによって求められた現在のグリーンランド 氷床上の地殻変動量の再現。(A) グリーンランド氷床のみの寄与(B) 過去の北米氷床変動の寄与(C) 全体の変動。



図 3.4.35 (a) 衛星データで測定したボードイン氷河の流動速度。 (b) 数値実験によって計算された流動速度、 (c) 底面流動係数、 (c) 底面 流動が全流動速度に占める割合 (Seddik et al., unpublished data) 。



図 3.4.36 カナック氷帽縦断面について計算された (a) 流動速度と (b) 氷温度の分布 (Sugiyama et al., 2014)。

野外観測および衛星データ解析を行ったカナック周辺では、 Bowdoin 氷河と氷帽に関して、観測データを用いたモデル開発 と数値実験を実施した。Bowdoin 氷河では、氷厚、表面標高、 流動速度などの現地・衛星データを使って、カービング氷河流 動モデルを構築した。フルストークスと呼ばれる高次の力学項 を考慮した3次元モデルを、カービング氷河末端部に適用する のは世界で初めての試みである。このモデルを用いた数値実験 によって、潮汐や底面融解水が流動に与える影響が定量的に示 された(図 3.4.35)。

一方カナック氷帽では、二次元の熱動力学モデルを用いて氷 の流動と温度分布を解析した。数値実験の結果から、カナック 氷帽の氷体が融解水の再凍結の影響を受けて、大気温度よりも 高い温度にあることが予測された。この結果を受けて現地では 表層 13 mの氷温を測定し、数値実験の結果を検証した(図 3.4.36)。 引用文献

- IPCC,2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Armstrong, R. L., Brodzik, M. J., 2013. Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent. Ver. 4. NSIDC.
- Brown, R. D., Derksen, C., 2013. Is Eurasian October snow cover extent increasing? Environ. Res. Lett. 8 024006. doi:10.1088/1748-9326/8/2/024006.
- 4) Frei, A.,. Tedesco, M., Lee, S., Foster, J., Hall, D. K., Kelly, R., Robinson, R. A., 2012. A review of global satellite-derived snow products. Advances in Space Research, 50, 1007-1029, doi:10.1016/j.src.2011.12.021.
- Menne, M.J., Durre, I., Vose, R.S., Gleason, B.E., Houston, T.G., 2012. An overview of the Global Historical Climatology Network-Daily Database. J. Atmos. Oceanic Technol., 29, 897-910, doi:10.1175/JTECH-D-11-00103.1.
- Koreisha, M. M., 1963. Modern Glaciation of the Suntar-Khayata ridge, Glaciology (IX Section of IGY Program), No. 11. Moscow: Publ. House of the Academy of Sciences of the USSR. 170.
- Ananicheva, M. D., and Koreisha, M. M., 2005. Glacial recession in northern and southern parts of Suntar-Khayata Mts. and Chersky Range. Data Glaciol. Stud. 99, 18–25.

Ⅴ. 北極域における温室効果気体の循環と その気候応答の解明

研究課題5 研究代表者:青木周司

1.研究実施概要

執筆者:青木周司

CO2をはじめとする温室効果気体が人間活動に伴って急速に 増加しており、北極域を筆頭に世界各地で温暖化が顕在化しつ つある。この地球温暖化問題に的確に対応するためには、将来 の温室効果気体濃度の予測精度を向上させることが重要である。 それにはまず、地球表層における現在の温室効果気体の収支を 明らかにし、さらにその気候・環境変化に対する応答を定量的 に理解する必要がある。特に北半球高緯度域は自然環境が厳し く、領域の広大さに比して観測が限られていたため、温室効果 気体循環の理解は全く不十分であり、観測とモデルによる融合 研究が強く求められていた。

本研究においては、北極域における温室効果気体の循環・収 支の現状を把握するとともに、地球温暖化に対するそれらの応 答を明らかにし、そのメカニズムを探ることを目的とした。こ の目的を達成するために、我が国において温室効果気体循環に 関する先端的研究を精力的に進めている研究者に参加を求め、 図3.5.1に示すような観測とモデルによる融合研究を実施した。



図 3.5.1 本研究の実施体制

まず、本研究では図 3.5.2 に示すような観測網を展開し、温 室効果気体の現状や過去の変動を詳細に把握した。具体的には、 北半球高緯度域における大気中の CO2やメタン、一酸化二窒素 などの温室効果気体やそれに関連する酸素などの濃度および同 位体の分布や変動を、地上基地、航空機、船舶を用いた総合的 な観測から詳細に明らかにした。さらに、グリーンランドなど で採取された氷床コアやフィルン空気を分析することにより、 過去から現代までの温室効果気体の濃度と同位体の変動も明ら かにした。また、温室効果気体および関連物質の変動では北極 海も重要な役割を果たしていると考えられているが、その実態 はほとんど知られていなかったため、「みらい」による海洋観 測も毎年実施した。



図 3.5.2 本研究で構築した温室効果気体の環北極観測網。図の赤丸は 地上観測基地、黄色の丸はタワー観測地点、青丸は小型航空機を用い た観測地点を示す。また、青線は日本と欧州を結ぶ定期旅客機を用い た観測線を、緑の領域は「みらい」による航海観測領域を、紫の丸は グリーンランドの氷床掘削およびフィルン空気採取地点を示す。

一方、本研究では我が国において開発された高解像度大気化 学輸送モデルのほぼ全てを用いて、上記の観測網から得られた 北半球高緯度域の温室効果気体の濃度・同位体データおよび全 球観測データを解析し、北極域における温室効果気体の放出 源・吸収源分布とその変動を定量化する研究を進めた。さらに、 陸上生態系モデルと高解像度大気化学輸送モデルを結合し、観 測された濃度・同位体の年々変動の再現実験を行うことによっ て、北極域における温室効果気体循環プロセスの評価と最適化 を行い、気候応答について検討した。加えて、氷床コア・フィ ルン空気分析から得られたデータを解析することにより、温室 効果気体の発生・消滅量の時間変化や発生源の種類別強度の気 候・環境変化に対する応答の実態を明らかにした。具体的な成 果としては、温暖化や大気中 CO2 濃度の上昇に伴い、北方林に よる CO2 吸収が強化されてきたことや、メタン濃度が急上昇し た1940年から1990年にかけてのメタン放出インベントリーが 30%も過小評価されていることなど、温室効果気体の観点にお いて戦略研究目標2「全球の気候変動及び将来予測における北 極域の役割の解明」に資する数多くの重要な知見が得られた。

2. 温室効果気体の環北極総合観測

執筆者:後藤大輔、村山昌平、森本真司 町田敏暢 石井雅男

要旨

本課題では北極域を中心に、地上基地のみならず航空機や船 舶といった機動力を活用して、大気中における温室効果気体や その関連気体の濃度および同位体の観測を重点的に実施した。 得られたデータは他の観測データとともに3次元大気化学輸送 モデルに入力し、いわゆるトップダウン手法により、北極域に おける温室効果気体の放出源や吸収源の分布や強度の定量化に 活用された。

(1) 地上観測基地を利用した温室効果気体観測

執筆者:後藤大輔、村山昌平、森本真司 ニーオルスンでの大気中 CO2 濃度、O2 濃度観測による CO2、 O2 収支の解明

化石燃料の消費によって大気に放出された CO_2 は、一部は海 洋に、一部は陸上生物圏に吸収され、残りは大気中に残留して 大気中の濃度増加として観測される。海洋と陸上生物圏に吸収 される CO_2 の量的な理解は、将来の CO_2 濃度予測する上で最 も重要な情報である。本研究では、海洋および陸上生物圏の CO_2 吸収量を定量的に評価するため、スバールバル諸島ニーオ ルスンにおいて、フラスコサンプリング法による系統的な大気 中 CO_2 濃度および O_2 濃度 (O_2/N_2 比: δ (O_2/N_2))の高精度 時系列観測を実施した。さらに、大気中 δ (O_2/N_2) および CO_2 の様々な時間スケールの変動をより詳細に把握するため、ニー オルスン現地での連続観測を開始した。

化石燃料の燃焼や陸上生物圏の呼吸・光合成において CO_2 と O_2 は同時に交換されるが、大気海洋間ではそれぞれ独立して交 換される。このような CO_2 と O_2 の振る舞いの違いを利用する ことで、大気中の CO_2 と O_2 の濃度変化から海洋と陸上生物圏 の CO_2 吸収量を分離して推定することが可能になる。観測され る大気中の CO_2 および O_2 の濃度変化をそれぞれ ΔCO_2 、 ΔO_2 とすると、大気中の CO_2 および O_2 の収支は以下のように表す ことができる。

$$\Delta CO_2 = F - B - O \tag{1}$$

$$\Delta O_2 = -1.4F + 1.1B - Z \tag{2}$$

ここで、F は統計データから得られる化石燃料燃焼による CO₂ 放出量、B および O は陸上生物圏、海洋による CO₂ 吸収量、 1.4 及び1.1はそれぞれ化石燃料の燃焼と陸上生物活動による $O_2 \ge CO_2 の交換比、Z は海洋からの正味の O_2 放出量である。$ 式(1)、(2) を解くことにより、陸上生物圏の吸収量 B 及び海洋の吸収量 O は次のように計算される。

$$B = F - \Delta C O_2 - 0 \tag{4}$$

Manning and Keeling (2006)¹⁾は、[O₂]+1.1[CO₂]で定義さ れる大気ポテンシャル酸素 (APO)を用いて式(3)を以下の ように変形し、APO の変化を利用して B 及び O を推定してい る。

$$0 = (-0.3F - \Delta APO - Z)/1.1 \tag{5}$$

本研究においても海洋の吸収量 O の推定に(5) 式を用いた。 当初、海洋は O₂ の収支に無関係であるとされてきたが、地 球温暖化に伴う海水温の上昇による溶解度の変化や海洋循環の 変化によって、海洋は O₂の放出源であることが明らかになり、 その放出量(Z)を補正する必要性が指摘されている。本研究 では Z の絶対値及び経時変化を導出するため、まず海洋貯熱量 変化(NOAA/NESDIS/NODC Ocean Climate Laboratory database)から海洋-大気間の O₂ フラックスを導出し、大気 輸送モデルを用いて海洋貯熱量の変化に伴う APO の変化を推 定した。それをニーオルスンおよび昭和基地において観測した APO の経年変動から差し引くことで、式(5)の Z の項を補正 した。なお APO は、観測された O₂ 濃度変動から陸上生物圏の 影響を除去していることから、主に大気-海洋間の O₂ 交換に よって変動するトレーサーと考えることができる。

ニーオルスンおよび昭和基地における CO2濃度の観測結果お よび Z を補正済みの APO を式(4)、(5) に代入することに より、2001–2009 年における海洋及び陸上生物圏による CO2 吸収量はそれぞれ 2.9±0.7、0.8±0.9 GtC/yr と推定された。ま



図 3.5.3 ニーオルスン(黒)及び昭和基地(赤)で観測された 大気中の $\delta(O_2/N_2)$ (上)、 CO_2 濃度(中)および APO(下)の 変動。ニーオルスンにおける 2011–2012 年の欠測は大気サンプ リングシステムの不具合による。灰色はニーオルスンにおける 連続観測結果(日平均値)を示す。

た、2002-2003 年エルニーニョの影響を除外すると、2004-2009 年における海洋及び陸上生物圏による CO₂吸収量はそれ ぞれ、2.8±0.8、1.5±0.9 GtC/yr と推定された(Ishidoya et al., 2012)。

新たに開始した CO2 濃度及びδ(O2/N2)の連続観測結果から は、様々な時間規模の変動が明らかになった。特に5-6月に数 日規模の不規則で大きな APO の変動 (O2 モル比にして 10ppm 以上)が観測された。後方流跡線解析の結果と衛星データから 推定された海洋の純一次生産量(NPP)の分布を比較すると、 高 APO が観測された期間は、スパールバル諸島の南側の高 NPP の海域を通過した空気塊がニーオルスンに到達し、低 APO が観測された期間は北極海の海氷に覆われた領域を通過 した空気塊がニーオルスンに到達していることが明らかになっ た。更に、3次元大気輸送モデルを用いたタグ付きトレーサー 実験結果を解析することによって、5-6月に観測される APO の不規則変動は、主にグリーンランド海、ノルウェー海、バレ ンツ海での海洋生物のブルーミングによる O2 放出によって生 じていることが明らかになった。また、観測した APO の変動 から、海洋生物活動による生産量を推定し、衛星観測データか ら推定された純一次生産量分布と比較した。その結果、両者は 良い一致を示すことから、 ニーオルスンにおける APO の連続 観測は、海洋生物活動の生産量の評価や、海洋の生態系モデル の改良にも有益であることが示唆された(Goto et al., 2013a)。

近年、北極海の海氷融解により開氷域が拡大し、北極海の海 洋生物生産量が増加していると推定されている。このような変 化は北極域の炭素循環にも少なからず影響を与える可能性があ る。本研究で開始したニーオルスンにおける大気中δ(O2/N2) の連続観測は、北極域における炭素循環の変化を検出し、理解 するために重要な役割を担うと考えられる。

ニーオルスンで観測された大気中 CO₂、CH₄、CO 濃度の変動 とその起源解析

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。この緯 度帯では、温暖化に伴って自然起源の温室効果気体の放出が増 大する一方で、北方林による CO2吸収が強化される可能性や、 海氷面積減少に伴って大気-海洋間の物質循環が変化する可能 性等が予想されている。同緯度帯での温室効果気体の放出・吸 収源は時間的に大きく変動する上に空間分布が不均一であるた め、大気中の濃度は大気輸送の影響を受けて大きく変動する。 その変動要因を詳細に明らかにするには、高時間分解能の連続 観測が必要となる。また、放出・吸収源を特定するためには、 複数成分のデータを組み合わせた解析が有効であると考えられ る。このような背景の元で、本研究ではレーザー分光法を用いた CO₂、CH₄、COの3成分同時連続観測装置を開発し、2013年9月にニーオルスンにおいて連続観測を開始した。

大気試料を国立極地研究所ニーオルスン観測基地の屋上か らポンプで観測室内に引き込み、フィルターでエアロゾルを除 去し、2℃及び-75℃にそれぞれ冷却された電子除湿器及びスタ ーリング式冷凍機を通して除湿した後、キャビティリングダウ ンレーザ分光(CRDS)分析計に導入して、各成分の濃度分析 を行った。周辺温度の変動による影響を抑えるために、分析計 は局所空調機で温度制御されたケース内に設置した。分析計の 校正は、3日に1度、対象成分を混合した異なる濃度の標準ガ スを導入して行い、12時間に1度ガスシリンダーに充填された 圧縮空気を導入して分析計のドリフト補正を行った。取得され たデータは、現地に設置された電子媒体に保存されるほか、イ ンターネット経由で定期的に自動的に国内サーバーに転送され た。なお、2015年初め頃より、濃度分析計(Picarro社、G2401) の出力が不安定になる現象が頻繁に現れるようになったため、 2015年7月に別メーカーの分析計(Los Gatos Research 社、



図 3.5.4 ニーオルスンで観測された CO₂(上)、CH₄(中)、CO (下)濃度の1時間平均値の変動。分析計の交換(本文参照)の 前後で、プロットの色を変えている。

GGA-30r-EP) と交換したが、当分析計では CO を対象成分と していないため、分析計の交換後 CO 濃度観測は欠測となった。 各成分の測定精度(1 σ)は、G2401 については、CO₂:0.01 ppm、 CH₄: 0.3 ppb、CO: 1.3 ppb、GCA-30r-EP については、CO₂: 0.03 ppm、CH₄: 0.1 ppb とそれぞれ見積もられている。

図 3.5.4 にニーオルスンで観測された CO₂、CH₄、CO 濃度 の1時間平均値の変動を示す。2015年7月に分析計の交換を 行ったが、観測値には統計的に有意なずれは見られなかった。 各成分とも、数日~半月程度の短い周期の変動を伴いながら、 秋~冬にかけて濃度が増加し、春~夏に減少していることが分 かる。しかし、CH4および CO の季節変動と CO2の変動を比較 すると、後者は位相が遅れており、成分毎のソース・シンクの 時空間変動の違いを反映しているものと考えられる。上述の短 周期の変動については、多くの場合、各成分でよく対応して起 こっているが、秋~初春にかけて変動の振幅が大きく頻度も多 くなっており、春~夏には振幅および頻度が減少している。図 3.5.5に2014年2月に観測された数日スケールの濃度変動イベ ントと、流跡線解析モデル (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT. php) によって得られたイベント時のニーオルスンに到達した 気塊の5日間後方流跡線解析結果の例を示す。この図から、各 成分の濃度の変動パターンは良く一致しており、低濃度時には 大西洋上での滞留時間が長い気塊が、高濃度時には西ヨーロッ パ上を通過した気塊がそれぞれニーオルスンに輸送されている



図 3.5.5 数日スケールの濃度変動イベント(CO₂(上)、CH₄ (中)、CO(下))と NOAA の流跡線解析モデルにより得られ たイベント時のニーオルスンに到達した気塊の 5 日間後方流跡 線の例

ことが分かる。この他の冬季・短周期の濃度上昇についても、 後方流跡線解析や3次元大気輸送モデルによるタグトレーサー 実験から、ヨーロッパ・西シベリア域からの化石燃料生産・消 費の影響を受けた気塊の流入が、このような変動を引き起こし ていることが明らかになった。

本研究により、北極域における大気中 CO₂、CH₄、CO 濃度 に関する高時間分解能の観測データが得られた。今後さらに観 測を継続してデータを蓄積し、大気輸送モデルや陸域生態系モ デル等を用いた解析を行って各成分濃度の変動要因を明らかに していくことにより、急速に進む北極域の気候変動が温室効果 気体の循環に与える影響を推定する際の不確定性の低減に貢献 することが期待される。

北極域での CH4 同位体比観測による、大気中 CH4 濃度変動原 因の推定

CO₂に次いで重要な温室効果気体である大気中の CH₄につ いて、その濃度変動の原因、つまり地球表層での CH₄収支の変 化を明らかにすることは将来の CH₄濃度予測の高精度化に不 可欠である。しかし、CH₄の放出源が湿地域での有機物分解や 反芻動物の腸内発酵、化石燃料採掘や森林・泥炭火災まで非常



図 3.5.6 ニーオルスン (赤) 、チャーチル (黒) で観測された大気 中 CH₄ 濃度 (上) 、 δ^{13} C-CH₄ (中) 、 δ D-CH₄ (下) の変動

に多岐にわたるため、観測された大気中 CH₄濃度の変動のみか らその変動原因を解釈することは困難であった。本研究では CH₄濃度の変動原因についての知見を得ることを目的として、 スバールバル諸島ニーオルスン及びカナダ・チャーチルにおい て、CH₄濃度と CH₄ 放出源に関する情報を持つ CH₄の炭素・ 水素同位体比(δ^{13} C·CH₄、 δ D·CH₄)の系統的な観測を実施し た²⁾。ニーオルスンは近傍に CH₄ 放出源が存在しないため、 北極域大気のバックグランド状態の観測に適している。一方の チャーチルはハドソン湾低地の湿地域北端に位置しており、重 要な CH₄ 放出源の一つである湿地域の影響を強く受けると考 えられる。また、 δ^{13} C·CH₄、 δ D·CH₄ は、CH₄の放出源毎に特 徴的な値を示すことが知られているため、CH₄濃度と δ^{13} C·CH₄、 δ D·CH₄の同時高精度観測によって CH₄濃度の変動原因を推定 することが可能である。

図 3.5.6 に、ニーオルスン (2000 年以降)、チャーチル (2007 年以降) における CH_4 濃度、 $\delta^{13}C$ - CH_4 、 δ D- CH_4 の観測値と、 ベスト・フィット・カーブ及び長期変化成分の変動を示す。

ニーオルスンでは、CH4濃度、 δ^{13} C-CH4、 δ D-CH4それぞれ に明瞭な季節変動が観測された。CH4濃度とδD-CH4の季節変 動はほぼ逆位相であり、CH4濃度の極大・極小値およびδD-CH4 の極小・極大値はそれぞれ 1-3月、7月に観測された。一方で、 $δ^{13}$ C-CH₄の季節変動にはCH₄濃度、δD-CH₄と比較して位相が 異なっており、極大・極小値はそれぞれ 9-10 月、6 月に観測 された。CH4濃度、δ¹³C-CH4、δD-CH4の平均的な季節振幅は それぞれ 45 ppb、0.42 ‰、5.9 ‰であった。一方、チャーチル での観測値は、ニーオルスンと比較して CH4濃度が高く、δ¹³C-CH4、 δD-CH4 は同位体的に軽い値を示した。これは、チャー チル周辺の湿地から大量の CH4 が放出されていることを反映 していると考えられる。チャーチルで観測された CH4 濃度、 δ^{13} C-CH₄、 δ D-CH₄の季節変動をニーオルスンと比較すると、 CH4濃度の極小値、δ¹³C-CH4、δD-CH4の極大値の出現時期が 全て1ヶ月程度早いことが明らかとなった。また、CH4、6D-CH4 の季節変動の平均振幅はそれぞれ 37.8 ppb、4.5 % であり、ニ ーオルスンよりも小さいが、δ¹³C-CH4の振幅は0.44‰と同程度 であった。ニーオルスン、チャーチルにおける CH4 濃度、 δ¹³C-CH₄、δD-CH₄の季節変化について CH₄、¹³CH₄、CH₃D の収支を解析し、微生物起源、化石燃料起源及びバイオマスバ ーニング起源 CH₄ それぞれの、CH₄ 濃度の季節変化に対する寄 与を見積もった。その結果、CH4濃度の季節変化は主に 6-9 月 の微生物起源(湿地など)のCH4放出とOHとの反応による CH4消滅のバランスによって生じており、バイオマスバーニン グと化石燃料起源 CH4の影響は相対的に小さいことが明らか になった。また、微生物起源 CH4 の影響が最大になる時期は、

チャーチルの方がニーオルスンよりも約1ヶ月早いことが示唆 された。

ニーオルスンで観測された CH4 濃度は 2000 年までは年々増 加していたが、2000 年から 2005 年までは濃度増加が停滞し、 その後 2006 年から再度増加するという複雑な変動を示した。 2006 年以降の CH4 濃度の再増加について、OH ラジカルとの 反応による CH4 消滅量に経年的な変化がなかったと仮定した 上で、CH4 濃度とδ¹³C-CH4 の観測値を用いて CH4、¹³CH4 の 収支解析を行った。その結果、2006 年以降に観測された CH4 濃度の再増加は、微生物起源・湿地起源の CH4 放出量の増大に 起因することが示唆された。

CH4濃度と同位体比の同時高精度観測データは、CH4放出源 の変動を評価する上で最も重要な拘束条件の一つである。将来 の温暖化による永久凍土の融解や海水温上昇によって地球表層 でのメタン収支がどのように変化するかを明らかにするために、 今後も CH4濃度・同位体比の系統的な観測を維持することが必 要である。

(2) 航空機観測

執筆者:町田敏暢

航空機観測サブグループでは、チャーター機を利用したシベ リア上空でのデータの収集および、民間航空機を利用した北極 域上空における温室効果気体の観測を実施した。

チャーター機による観測

シベリア域におけるチャーター機を使った温室効果気体の観 測は国立環境研究所のモニタリングプロジェクトによって、ス ルグート(61°N,73°E)、ノボシビルスク(55°N,83°E)、 ヤクーツク(62°N,129°E)の3か所上空において高度約7km までの大気をサンプリングし実験室に持ち帰ってサンプル大気 中の濃度を分析する方法で実施されている(Sasakawa et al., 2013, Umezawa et al., 2012)。本課題では観測データを処理 し、同じ課題内のモデリングサブグループに提供して温室効果 気体の発生源の定量に利用した。

スルグート上空では 20 年以上のデータの蓄積がある。例と してスルグート上空における CO2 濃度の時系列を図 3.5.7 に示 す。高度 1km における CO2 濃度の季節振幅は約 23 ppm であ り、これは同緯度帯の沿岸域で観測される振幅(15–18 ppm) に比べて明らかに大きく、内陸ではシベリアの植生の影響を直 接受けて経度方向に CO2 濃度の不均質を作り出していること がわかる。高度 7km の季節振幅は高度 1km の約半分であり、 CO2 は大気中で化学的に安定なので地上で陸上生態系が作り出 した季節変動のシグナルは上空に伝搬するにあたって減衰して いることがわかる。高度7kmにおける夏季の最低値の位相は 高度1kmに比べて約半月遅れている。一方、CO2濃度の年平 均値は高度方向の差がほとんどないことから、スルグート域で はCO2の放出量と吸収量とがほぼ均衡していると考えられる。



図 3.5.7 スルグート上空の高度 7km、3km および 1km における CO₂ 濃度の変動。赤丸が観測値、青線と緑線はそれぞれフィッティングカー ブと経年変動曲線を表す。

スルグート上空では 2005 年より SF6 濃度の観測も行っている (図 3.5.8)。観測期間中の SF6 濃度はいずれの高度においても 0.30-0.31 ppt/year の割合で一方的に増加している。







図 3.5.9 スルグート上空における SF6濃度の平均的な季節変動。青丸は 経年変動を差し引いた観測値、赤線はフィッティング曲線を表す。SD は観測値のフィッティング曲線からの標準偏差である。

SF6は大気中の寿命が 3000 年以上であるので対流圏での季 節変動はほとんど報告されていないが、スルグート上空で観測 された SF6濃度にはわずかな振幅の季節変動が見られる。図 3.5.9 はスルグート上空における高度別の平均的な季節変動で ある。季節変動の振幅は観測データのばらつきと同じレベルで あるが、低高度で夏季から秋季にかけて濃度が低くなっている ことが確認できる。これらの観測値について研究課題 5 のモデ リングチームが利用する複数の大気輸送モデルと比較を行った ところ、いずれの計算結果も観測値の位相との一致が見られな かった。SF6に関してはこれまで知られている放出源分布また は大気輸送に見直しが必要であると言える。

ノボシビルスク上空で採取された大気サンプルは温室効果気体の濃度分析に加え、N₂Oの同位体比を測定した。ノボシビルスク上空 500m における N₂O は、濃度が経年的に増加しているのに対し、窒素同位体比は減少していることが確認された。

民間航空機を使った観測

民間の旅客機を利用した観測は、日本と欧州を結ぶ路線上で シベリア上空における高度 10–12km 付近の大気をサンプリン グし、CO₂、CH₄、N₂O、SF₆、CO、H₂の各濃度および CO₂ と CH₄の安定同位体を測定した。サンプリングは 2012 年 4 月 より月に1回の頻度で自動大気サンプリング装置(ASE)を日 本航空が運航するボーイング 777-200ER 型機に搭載して行わ れた。ASE を搭載できる 777-200ER 型機は 2014 年 3 月を最 後に欧州路線を飛行しなくなったために、2014年4月から 2015年9月までは日本航空の協力を得て観測者が航空機に搭 乗して手動大気サンプリング装置(MSE)を使って同じ頻度で 観測を続けた。なお、同路線のMSE 観測は2015年10月以降 もArCS予算を利用して、頻度を下げた形で継続している。北 極域は圏界面の高度が低いために航空機の巡航高度であっても 成層圏を飛行することがある。本研究では気象庁の客観解析デ ータを使って渦位が"2"である高度を圏界面とし、圏界面か らの温位差によってサンプリング地点の空気塊を分類した。

図 3.5.10 は圏界面からの温位差(ΔΘ) ごとに分類した空気 塊の CO₂ 濃度、CH₄ 濃度、N₂O 濃度、SF₆ 濃度の時系列である (Sawa et al., 2015)。ΔΘが負の値は対流圏の空気であること を、正の値は成層圏の空気であり、値が大きいほど高高度であ ることを示す。上部対流圏の CO₂ 濃度は、チャーター機による 観測でも見られるように陸域生態系の光合成・呼吸のバランス で夏季に低い濃度を示すが、成層圏の濃度は逆に春季から夏季 にかけて上昇しており、対流圏とは逆の位相が観測された。成 層圏における夏季の濃度上昇は、上部対流圏の低緯度にある大 気が圏界面を横切って高緯度の下部成層圏に輸送されるメカニ ズムによって引き起こされていると考えられる。一方、秋季か ら春季にかけての成層圏の CO₂ 濃度にはわずかな減少傾向が 見られる。これは上層にある低濃度のCO₂が冬季に沈降してくることが要因と思われる。

成層圏のCH4とN2Oには化学的な消滅反応があるために対 流圏との濃度差が明確であり、成層圏における鉛直濃度勾配も 大きい。上部対流圏の CH4 濃度と N2O 濃度には目立った季節 変動はないが、経年的な増加傾向が観測された。これらの濃度 増加率は地上での観測値とほぼ同等であった。対流圏の CH4 濃度はOH ラジカルとの反応によって地上付近では夏季に低く なる明瞭な季節変動を示すが、上部対流圏のような低圧下では OH ラジカルとの反応性が低くなるために季節変動は明瞭では なくなる。また、シベリアのような内陸域では夏季に対流圏内 での鉛直輸送が盛んになるので、低高度の高濃度気塊が上空に 達しやすいことも季節変動を明確にしない要因と考えられる。 N2Oは対流圏での寿命が長いために濃度の季節変動は見いだ しにくい。これに対して成層圏のCH4濃度とN2O濃度には非 常に大きな季節変動が確認できる。季節変動を作り出すメカニ ズムは CO2 と同様に、夏季の対流圏大気の流入と冬季の上層大 気の沈降であるが、CH4とN2Oは対流圏と成層圏の濃度差な らびに成層圏における鉛直濃度勾配が CO2より顕著であるた めに成層圏での振幅が大きく明瞭になると解釈できる。



SF6はN2Oと同様に対流圏での寿命が長いので、スルグート

図 3.5.10 2012 年 4 月から 2016 年 1 月にかけて北極域上空の上部対流圏と下部成層圏で観測された CO₂濃度、CH₄濃度、N₂O 濃度、SF₆濃度の時系列。色の違いは圏界面からの温位差($\Delta \Theta$)を表す。実線はそれぞれの温位差のデータに対して FFT と調和関数でフィッティングした曲線。

上空での観測値と同様に上部対流圏では濃度の季節変動が見い だしにくい。成層圏では対流圏との濃度差と鉛直方向の濃度差 があるので、夏季と冬季の輸送によって明瞭な季節変動が観測 されている。SF6が大気中で安定であることを利用して、本研 究で成層圏において観測された空気塊が対流圏を離れてから経 過した平均的な時間(年齢)を知ることができる。成層圏大気 の大部分は赤道域の上部対流圏から供給されていると考えられ るので、同様な民間航空機による豪州路線で観測された低緯度 上部対流圏のSF6濃度と高緯度下部成層圏の濃度を比較したと ころ、 $\Delta \Theta$ が 37.5-50 Kの下部成層圏大気は5月に22か月の、 11月には9か月の時間差が存在していることが明らかになっ た(Sawa et al., 2015)。

上部対流圏から下部成層圏で観測された CO 濃度の時系列を 図 3.5.11 に示す。CO 濃度も対流圏と成層圏での差が明瞭であ るが、CH4濃度や N₂O 濃度とは違ってΔΘが 25 K以上の成層 圏における鉛直勾配がほとんどないことがわかる。これは成層 圏に CO にとっての顕著な消滅源が存在しないことと、CO の 経年増加がほとんどないために空気年齢による濃度差が小さい ためであると考えられる。

一方、上部対流圏には季節変動が存在し、春季から初夏にか けて極大値を示している。COの対流圏における主たる消滅源 はOH ラジカルとの反応であり、主に夏季に消滅が盛んになる ので、このメカニズムだけでは図3.5.11の季節変動を説明でき ない。夏季に上部対流圏のCO濃度を上昇させる要因として、 地表付近の大気の鉛直輸送が考えられる。シベリア上空におけ る夏季の鉛直輸送はCH4濃度やCO2濃度の季節変動も矛盾な く説明できる。大気の鉛直混合は夏季の内陸域での微量気体の 変動を考える上で非常に重要な要素であることが、本課題によ る観測結果から言うことができる。



図 3.5.11 図 3.5.10 と同様。ただし CO 濃度の時系列。

(3) 船舶観測

執筆者:石井雅男

要旨

北極海では、夏に海氷面積の縮小が顕著に進行している。 2012 年から 2015 年の 9 月中旬の平均海氷面積は、1980 年代 の同時期の平均海氷面積の 60%にまで減少した。海氷面積や氷 厚の減少は、海洋表層の塩分構造、光環境、熱フラックス、大 気・海洋相互作用などを変化させ、さらに海洋の循環、物質循 環、生物生産、生態系を変化させることで、温室効果気体の動 態にも顕著に影響していると考えられる。

2012年から2015年の毎年9月から10月に実施された海洋 地球研究船「みらい」のMR12-E03、MR13-06、MR14-05、 MR15-03の各航海に担当者が乗船し、研究課題6の参加者と協 力して、海氷面積が1年の中で最も縮小する9月初めから10 月初めに、チャクチ海とカナダ海盆域において、温室効果気体 に関わる洋上大気と海洋表層水の航走観測や試料採取を行った。 測定項目は、大気がCO2濃度とその¹³C/¹²C比、CH4濃度、O2/ N2比など、表層海水がCO2分圧、全炭酸濃度、溶存O2濃度、 CH4分圧、クロロフィル蛍光、水温、塩分など多岐にわたった。 これらのデータから、表層海水と大気の間のCO2、O2、CH4 の動態や、それらに対する海氷融解や生物活動の影響などにつ いて評価した。

海洋表層の夏の二酸化炭素分圧の変動

チャクチ海とカナダ海盆では、海洋表層の CO₂分圧が空間的 に極めて大きく変化した。たとえば 2013 年 9 月の観測では、 最低値が 151 μ atm だったのに対して、最高値は 532 μ atm に 達した。しかし、観測値は概ね 200 μ atm から 350 μ atm の範 囲にあり、大気の CO₂分圧 (~385 μ atm) に対して未飽和の 状態にあった (図 3.5.12)。水深が 100m より浅いチャクチ海 では、海洋表層の CO₂分圧が特に低かった(235±44 μ atm)。人 工衛星からの海色観測によると、チャクチ海では 6 月から 7 月 に植物プランクトンが大増殖する。チャクチ海で海洋表層の CO₂ 分圧が特に低かった原因は、それ以後の生物生産により CO₂が多く消費されたためである。

これに対して、水深が 1000m を超えるカナダ海盆では、海 洋表層の CO₂分圧がチャクチ海に比べると平均しておよそ 100 µatm 高く(330±27 µatm)、表層海水中の CO₂ 分圧が大気の CO₂分圧に近かった。また、塩分はチャクチ海が概ね 29–32 だ ったのに対して、カナダ海盆では 27 以下だった。チャクチ海 やカナダ海盆域では、これらの海域にベーリング海峡を通って 流入する太平洋の表層水(塩分 32.9)に、河川水や海氷融解水 が加わることで表層の塩分が低下している。CO₂分圧と全炭酸 濃度などの観測データから全アルカリ度を計算し、その塩分と の関係を調べることで、カナダ海盆の塩分低下に対する河川水 と海氷融解水の加入の寄与をそれぞれ評価したところ、河川水 の混合比率が平均10%だったのに対して、海氷融解水の混合比 率は平均16%に達した。海洋上層の鉛直分布を見ると、塩分が 特に低い層は水深10mから20mまでに限られており、主に海 氷融解水の流入によって密度成層が形成されていた。それ以深 では、溶存酸素が10-40 µmol kg⁻¹ほど過飽和の状態だったと 同時に、全炭酸濃度と全アルカリ度などから計算した CO₂分圧 が、チャクチ海の表層と同じ程度に未飽和だった。

これらのことから、カナダ海盆でも海洋表層下では、生物生産が高いために CO₂未飽和の状態になっていたが、表層は栄養塩の乏しい海氷融解水に覆われることで生物生産が抑制されており、CO₂の吸収は弱くなっていたことが分かった。このことは、今後、夏の海氷融解がさらに進行したとき、表層の成層構造を崩すような擾乱が広い範囲で起きない限り、北極海の CO₂吸収が大きく増えるとは言えないことを示している。



図 3.5.12 MR13-06 航海(2014年9月)で観測したチャクチ海とカナダ海盆域の海洋表層の CO₂分圧。

北極海の二酸化炭素吸収

1997年1月から2013年12月までの204ヵ月それぞれについて、北緯60度以北の北極海及びその周辺海域全体を対象に海洋表層のCO2分圧分布を推定し、大気・海洋間CO2フラックスの季節変化・年々変化とそれらの海域分布を評価した。CO2分圧の観測データは、データベースSOCATv3、LDEOV2014及び本研究においてチャクチ海やカナダ海盆で取得した

MR12-E03 や MR13-06 航海の観測データや、GLODAP の全 炭酸濃度・全アルカリ度データから計算で求めた値を使用した。 これらのデータに、水温、塩分、海氷密接度、大気 CO2濃度、 緯度・経度に基づく自己組織化マッピング法を適用して、CO2 分圧を時間・空間的に内挿・外挿した。CO2フラックスの計算 には、NCEP2 再解析データの風速場を利用した。

1997年から2013年の17年間の大気・海洋間CO2フラック スの平均値は-180 ±210TgC yr⁻¹で、北極海は大気からの CO2 の吸収域であると推定された。しかし、ユーラシア海盆や東シ ベリア海などでは観測データが著しく少ないことや、海氷密接 度とガス交換係数の関係に不確かさが大きいことから、CO2フ ラックスの評価にも大きな不確かさがある。海洋への CO2 吸収 速度は、風が強い冬のグリーンランド海・ノルウェー海 (>15 mmol m⁻² day⁻¹) とバレンツ海 (>12 mmol m⁻² day⁻¹) や、本 研究でも観測を行った夏のチャクチ海 (~10 mmol m⁻² day⁻¹) で大きく、これらの海域では季節変化の振幅も10 mmol m-2 day-1と同等かこれを超えるほど大きかった(図 3.5.13)。こ れに対してユーラシア海盆、カナダ海盆、ラプテフ海、東シベ リア海では、大気から海洋への CO2 フラックスは年間を通じて 比較的小さく、誤差(3.4~4.6 mmol m⁻² day⁻¹)範囲内と推定 された。CO2フラックスの季節変化は、主に風速の変化に支配 されているのに対して、その年々変化は主に海洋表層の CO2 分圧の変化に起因していた。グリーンランド海とノルウェー海 では、近年の水温低下傾向に伴う大気海洋間 CO2分圧差の増大 により、海洋への CO2 吸収が増加する傾向が見られた。近年海 氷が減っているバレンツ海では、北部で CO2 吸収が増加する一 方、南部では減少する傾向が見られ、海氷減少に対する CO2 吸収の変化は、海域によって異なっていた。



図 3.5.13 北極海における大気・海洋間フラックスの平均分布 (1997-2013)

大気・海洋間の酸素フラックス

海洋地球研究船「みらい」で採取した北極海域内の大気の O2/N2比は、毎年9月から10月初めの観測期間中に、30-50 per megほど低下した。これと同期して大気中のCO2濃度の上昇や その ¹³C/¹²C 比の低下も観測されたことから、 O_2/N_2 比の低下は、 主に北極海を取り巻く陸の植生の呼吸の季節的な増加に起因す ると考えられる。しかしながら、 O_2/N_2 比と CO₂ 濃度の観測値 から求めた APO (Atmospheric Potential Oxygen = $\delta(O_2/N_2)$ - 1.1: $xCO_2/xO_2 - 2000$)も、10-20 per meg ほど低下している ことから、海洋への O₂吸収も、この季節の O₂/N₂比の低下に 寄与していることが分かった(図 3.5.14)。

特に、APO の時間変化の中でも数日スケールの変化は、海洋 表層の溶存 O_2 濃度などに基づいて計算した大気・海洋間の O_2 フラックスの変動によって概ね矛盾なく説明することができた。 このことは、チャクチ海などで観測された活発な生物生産が、 表層水温の変化とともに、大気・海洋間の CO_2 フラックスだけ でなく、 O_2 のフラックスにも顕著な影響を及ぼしていることを 示している。化石燃料消費や土地利用変化によって人為的に排 出された CO_2 の収支を、大気 O_2 濃度の変化に基づいて評価す る上で、大気・海洋間の O_2 交換は、評価の不確かさを生む要 因となっているが、この観測結果は、スバールバルや仙台での 観測結果とともに、海洋における生物生産に伴う O_2 フラック スの変化を考慮する必要性の高さを示している。



図 3.5.14 「みらい」MR14-05 航海(2014年9月~10月)において北極海で観測した APO、海洋からの O_2 フラックス、クロロフィル濃度、海洋表層の O_2 分圧と CO_2 分圧、風速、大気境界層の厚さ、緯度・経度の時間変化。

海洋表層の夏のメタン分圧の変動

洋上大気と海洋表層の CH4 分圧観測を実施するため、北極海 観測では世界で初めてキャビティーリングダウン分光法を導入 し、CH4 分圧を高い時間解像度で航走観測することに成功した。

海洋表層の CH4 分圧は、多くの場合 2 µatm 程度の数値を示 し、他の海域と同様に大気中のメタンに対していくらか過飽和 の状態にあった。しかし、アラスカのバロー岬沖、ベーリング 海峡付近、チャクチ海の北部では、それぞれ 6.1 µatm、4.5 µatm、 3.6 µatm の高メタン域が見つかった(図 3.5.15)。

バロー沖・ベーリング海峡付近とチャクチ海北部では、海洋 表層でメタン分圧がスポット状に高かった原因が、全く異なっ ていた。バロー沖とベーリング海峡付近の沿岸域海洋表層の CH4分圧が高かった場所では、海水の CO2分圧や酸素消費

(AOU) も高かった。また、バロー岬沖では表層水に多くの懸 濁粒子が含まれていた。これらのことから、バロー沖やベーリ ング海峡付近では、海底堆積物の影響を受けた海水が、沿岸の 湧昇流などによって表層に運ばれたために、CH4分圧が上昇し たと考えられる。一方、チャクチ海北部では、CO2分圧や AOU は低く、クロロフィル蛍光値は高かった。これらのことから、 チャクチ海北部の高い CH4分圧は、現場付近の生物活動(たと えば動物プランクトンの消化器官からの発生)に起因している ことが示唆された。

なお、ラプテフ海のシベリア沿岸域で広く見つかっており、 海底の永久凍土融解に起因するとされるような、分圧が数十 μatmにも上る高メタン域³⁰は、チャクチ海やカナダ海盆では 今のところ見つかっていない。



図 3.5.15 MR12-E03 航海(2012 年 9~10 月) で観測したチャ クチ海とカナダ海盆域の海洋表層の CH4 分圧

3. 氷床コア・フィルン空気分析による過去 100 年間の 温室効果気体の推定

執筆者:菅原敏、川村賢二

要旨

(1) NGRIP フィルン空気を用いた温室効果気体の分析結果とフ ィルン空気拡散モデルを用いた解析によって、北極における過 去 100 年間程度のメタン濃度の変動を明らかにした。さらに、 モデル研究グループと共同して、フィルン空気から得られた結 果と 3 次元大気化学輸送モデルを用いた数値シミュレーション とを組み合わせて、過去のメタン収支を調べた。その結果、特 に濃度増加が著しい 1940~1990 年の期間の全球放出量は、従 来のボトムアップ研究による放出量データよりも大きいことが わかった。これらの結果は、両グループの共同執筆論文として 発表した(Ghosh et al., 2015)。

(2) 希少なフィルン空気や氷床コアの空気の分析には、分析精 度を低下させることなく試料量や分析時間を減らす必要があっ た。そのための新たな分析装置の開発および自動化を実施した 上で、工業化前の温暖期(完新世)を対象として NEEM 氷床 コアの分析を行い、メタン濃度変動を約50年の時間分解能で 復元した。従来ならノイズと区別が付かなかった大気中の詳細 変動を復元できる道が開かれた。

(3) 氷床コア連続融解装置と組み合わせ、融解水から空気を連続抽出しメタン濃度を分析する手法を開発した。北西グリーン ランドで2014年に掘削された氷床コアを本装置により分析し、 過去100年のメタン濃度を復元した。

(4)フィルン内のガス輸送・分別を検討しモデル化する国際共同研究に参加し、フィルン空気から温室効果ガス同位体の復元の際の問題点について特に検討した上で、論文を共同執筆した。

(Buizert et al., 2012, Witrant et al., 2012)

以下に上記(1)~(4)について詳述する。

(1) NGRIP フィルン空気の解析

重要な温室効果気体である大気中のメタンは、過去 100 年間 に急激に増加していたことが知られている。しかし、その増加 は単調なものではなく、地球上の様々なソース・シンクの影響 を受けることによって、複雑に変化していることが近年の研究 で報告されている。一例として、大気の直接観測が拡充されつ つあった 1990 年代以降には、大気中の濃度増加率が徐々に低 下しはじめ、2000 年から 2008 年にはほぼ増加が止まり、その 後現在にかけて再び増加しつつある。このような極めて特異な 濃度変動の原因はまだ十分に理解されておらず、今後の将来予 測にとって大きな困難となっている。メタンの循環の解明のた めには、現在の大気のモニタリングに加えて、過去の大気の変 遷を明らかにすることが重要である。特に人間活動の影響が強 く、地球の歴史の中で最も急激な変化があったと考えられる過 去100年間の大気の変化については、南極や北極の氷床コア中 の気泡解析とフィルン空気の解析が有効である。これまでの先 行研究では、主に南極における氷床コア・フィルン空気を用い た過去の大気濃度の推定が行われてきた。しかし、全球的なメ タン循環の解明のためには、北極における過去の大気濃度の変 遷を明らかにしなければならない。そこで、本研究では北極グ リーンランドのノースグリップ (NGRIP) において採取された フィルン空気の分析結果を再解析し、北極におけるメタン濃度 の変遷を明らかにし、さらに、その南北両半球のメタン濃度と 数値モデルによるシミュレーションを組み合わせて、過去100 年間のメタンのソース・シンクの変動を明らかにした。

NGRIP におけるフィルン空気中のメタン濃度は、深くなる につれて低下していき、深さ 65m 以深では急激に濃度が下が っている(図 3.5.16)。フィルンの中では空気の成分が主に分 子拡散に支配されており、深いほど古い年代の空気が存在して いる。得られた濃度の深度分布から過去の NGRIP 表層の大気 中の濃度変化を推定するためには、フィルン空気の分子拡散を 考慮して、それぞれの深度の空気がいつの時代のものであるの かを決定する必要がある。そこで、本研究では鉛直1次元のフ ィルン空気拡散モデルを用いた。ただし、南極のフィルン空気 のために用いられた既存の数値モデルでは、NGRIP のフィル ン下層にあるロックインゾーンで起こる空気の隔絶と拡散現象 を十分に再現できないため、従来の鉛直分解能を 100 倍にした 高分解能モデルを開発した。フィルン内におけるメタンの拡散 係数は、同じフィルン空気を用いて分析されている CO2濃度の



図 3.5.16 北極 NGRIP フィルン空気を分析して得られたフィ ルン内の濃度の鉛直分布(◊) とモデルによるシミュレーション の結果(実線)。

鉛直プロファイルを利用して推定した。観測された深度のメタ ン濃度に対応した年代の決定は、有効年代決定法を用いた。す なわち、初期条件として与えられた大気中のメタン濃度の時間 変化を用いて、フィルンの中の鉛直分布をモデルによって再現 し、観測深度におけるモデル計算値が初期条件の時系列の中に 現れる年代を求める。このような方法で決められた年代により、 観測された深度分布を時間軸上の変動に置き換えることができ る。新たに求められた時間変動を初期条件の時間変動と置き換 えて、同じ操作を繰り返すことで、有効年代を決定した。この 繰り返しは数回程度で収束した。このようにして得られた北極 におけるメタン濃度の変動を図 3.5.17 に示した。本研究で得ら れた結果は、同様に北極で行われた NEEM フィルン空気の結 果と極めて良い一致を示している。さらに、南極フィルン空気 の観測結果との比較から、1950年代以降の急激な濃度増加に伴 って、濃度の南北差が徐々に拡大してきたことが明らかになっ た。

モデル研究グループと連携することにより、NGRIP フィル ン空気の解析により得られた北極のメタン濃度変動の観測結果 を、3次元化学輸送モデル(ACTM)⁴⁾を用いた解析に利用し、 過去 100 年間のメタン収支を調べた。ACTM の計算に EDGAR-HYDE⁵⁾などのボトムアップ研究に基づくメタンの地 表における放出源強度シナリオを用いた場合、南北両半球のメ タン濃度の計算結果は観測値と著しく異なることがわかった。 そこで、フィルン空気などから観測された大気中の濃度変動を よりよく再現するように放出源強度の最適化を行った(図 3.5.17)。その結果、濃度の急上昇が見られる 1940 から 1990 年にかけて、ボトムアップ・データの全球放出量が 30%程度過 小評価であることがわかった。また、メタンの炭素同位体を含



図 3.5.17 グリーンランド NGRIP のフィルン空気から推定された CH₄ 濃度の変化。北極 NEEM フィルン空気、南極 Law Dome の氷コアお よびフィルン空気による観測結果、および ACTM の結果との比較。

めた収支の解析により、この期間の放出量の増加にバイオマス 燃焼が大きく寄与していることがわかった。

(2) NEEM 氷床コアの解析

約1万年前に始まり現在まで続く温暖期(完新世)には、氷 期-間氷期のような気候の大変動がなかったにも関わらず、大気 中メタン濃度が大きく変動したことがこれまでの氷床コアの解 析から知られている。近年のメタン濃度の変動メカニズムを理 解し将来予測に役立てるためにも、この間のメタン濃度を両極 の氷床コアから詳細に復元し、環境要素の情報と照らし合わせ る必要がある。しかしながら、グリーンランドの高地で掘削さ れる氷床コアに共通する問題として、完新世の大部分が、高圧 の気泡のために氷が脆くなる深度域(ブリトル・ゾーン)に当 たっているため、気体の抜けやクラックへの大気の侵入等によ り、分析結果の信頼性が低いことが挙げられる。加えて、過去 の分析においては多くの場合、分析精度や時間分解能が低いこ とも問題であった。そのために、高精度・高時間分解能でのメ タン濃度の復元が求められている。

本研究では、グリーンランドの NEEM 氷床コアの気体分析 を行った。試料は、配分された約 50 年間隔のコアから目視で きるクラックのない部分を切り出し、汚染除去のため表面を切 削した氷である。新たに開発した融解法空気抽出装置とガスク ロマトグラフ分析により、試料量を約 80gと従来の半分以下に 減らしつつ、分析精度を 2.4ppb (15) と 2 倍以上に引き上げ た。分析対象は、完新世以前の約 14500 年前から工業化開始頃 の約 200 年前の期間で、試料数は 181 である。

完新世におけるメタン濃度は、完新世初期の約11000年前を 中心に最高濃度が750ppbと高い時代があり、その後、約5000 年前にかけて長期的には減少を続け、極小値である約 610ppb を取り、その後再び増加した。本結果は、過去 2500 年間にお いては GISP2 コアから最近得られたデータのと良く一致し、ま た、9500~14500 年前にかけては連続融解分析装置による NEEM コアの分析結果ⁿと良く一致し、新たな分析システムに よるデータの信頼性の高さを示した。

(3) 氷床コアの連続融解法によるメタン濃度解析

氷床コアを掘削現場または実験室において連続的に融解し、 リアルタイムで分析したり水試料を採取したりする「連続融解 分析」(Continuous Flow Analysis、以下 CFA)が近年可能 になってきた。我が国でも CFA の開発が国立極地研究所にお いて進められ、実用化の目処が立ってきていた。この CFA の 融解水から連続的に気体を抽出し、レーザー分光式のメタン分 析装置(Picarro G2301)に導入して分析するための装置を開 発した(図 3.5.18)。



図 3.5.18 連続融解装置の概念図。左端にあるヒーター部で発生する融解水を気液分離器 (Debubbler) に導入し、大部分の水と空気を分離する。

この目的のため、従来開放系であった CFA の流路を全て気 密とした上で、空気を水から 2 段階で分離・抽出した。1 段目 の分離には、ピペット先端形状に類似した先細った空間に融解 水を導入し、その底部から気泡が含まれない水を、上部から水 混じりの空気を取り出す「気液分離器」を用いた(図 3.5.18 の Debubbler)。2 段目の空気抽出には市販の脱気チューブを使 用した(図 3.5.19)。そのように抽出された空気を、ナフィオ ン水トラップで乾燥したうえでレーザー分光式分析装置(キャ ビティ圧を 40Torr に下げた特注仕様の Picarro G2301)に導 入しメタン濃度を測定した。



図 3.5.19 空気抽出部の概念図。気液分離器の後、空気と水が混合 した試料から脱気チューブ(Membrane Filter)により空気を抽出 し、ナフィオン水トラップで乾燥したうえで分析装置(低圧仕様の Picarro G2301)に導入する。

脱気チューブの気体抽出効率が 100%に満たないため、この ように測定された気体濃度は、アイスコア中の値から変化する。 メタンの場合は、水への溶解度が窒素や酸素より僅かに大きい ため、濃度が低くなる。そのため、3 種類の標準ガスを脱気し た超純水に3種類の圧力で混入し、実際の空気抽出に近い方法 で分析することで、様々な濃度と圧力下での補正を可能にした。 CFA 分析は、50 cm 長の氷試料を順次積み重ねつつ行うため、 サンプル間の継ぎ目から部屋の空気が混入して試料空気が汚染 される可能性がある。この効果を、みずほ氷床コアの 380 m の 試料で検証したところ、継ぎ目を精密に整形した場合には(コ ア間の継ぎ目が平面かつ水平)、試料に混入する大気の量が少 なく検出できない場合も多いことが分かった。継ぎ目から汚染 した場合は、それが収まるまで 20 cm 程度分のデータを破棄す る必要があることも分かった。

このようにして、CFA の融解水から空気を連続的に抽出して メタン濃度を分析する手法を確立し、グリーンランド北西部の SIGMA アイスコアを分析した(図 3.5.20)。図の左端が約 1900 年、右端が現在に近い年代である。100 年間の上昇トレンドが 明瞭に現れており、それに多数のスパイク状の高濃度が乗った 結果となった。スパイク状の値は明らかに汚染によるが、その 発生頻度と深度間隔から、前述した継ぎ目からの大気混入でな く、コア内でのメタン発生が疑われる。このことは NEEM コ アでも報告されている[®]。化学成分やブラックカーボンとの比 較により、今後アイスコアからより高精度のメタン濃度復元を 可能にするための基礎データが取得できた。



図 3.5.20 CFA による SIGMA コアのメタン濃度分析結果。

4.3次元大気化学輸送モデルおよび陸上生態系モデルを用 いた温室効果気体の放出源・吸収源の推定

執筆者: Prabir Patra

フラックスタワー観測を用いた CO₂インバージョンシステム の評価

北半球高緯度帯が温暖化するにつれ、シベリアの炭素吸収量 やメタン貯蔵量は影響を受けると考えられている。研究課題2 と研究課題5の協力により、シベリアのフラックスタワー観測、 陸域生態系モデル及び大気インバージョンから得られた CO2 フラックスの比較解析を行った。GELCA-EOF (NIES・ロシ ア CAO)、ACTM (JAMSTEC)、NICAM-TM (MRI-JMA)、 NIES-TM (NIES) によるインバージョンの結果については観 測サイトを中心とした5×5度の領域を平均した。

図 3.5.21 に示す通り、インバージョンによる月平均の CO₂ フラックスは観測値とおおよそ良い一致を示した。これは、観 測サイトの周辺が比較的均一な土地被覆であること、地形が平 坦であることによると考えられる。しかしながら、CO₂フラッ クスの年々変動を見ると、モデル推定値と観測値の違いは特に 夏季と冬季に顕著であり、差の要因については今後の課題とな った。





シベリア上空における CO2, CH4, SF6 の変動

2-(2)で記した 2012 年より行われている日本-欧州間を飛 行する民間航空機を用いた温室効果ガス観測について、観測に より得られた CO₂と CH₄の濃度データと大気輸送モデル NICAM-TM によるシミュレーションとの比較を図 3.5.22 に示 す。この比較解析により、上部対流圏における濃度変動がよく モデルによって再現されていることがわかった。一方、モデル 内で上部対流圏-下部成層圏間の物質混合速度が、実際より速 くなっていることが示唆された。これは、用いたモデルの解像 度が水平(格子間隔~240km)、鉛直(40層)ともに十分で はないためであると考えられる。同様の比較解析は、 N_2O や SF6も含めて、他の大気輸送モデルACTMやNIES-TMでも行 われており、特に N_2O の解析では、成層圏空気の流入の影響と 見られる大きな濃度変動がモデルでも再現された。



図 3.5.22 日本ー欧州間で CONTRAIL-ASE により観測された CO₂ と CH₄の季節変動(上段)とそれに対応する NICAM-TM のシミュレー ション結果(下段)。赤が対流圏界面 PV=2 で定義された上部対流圏の データを示し、他の色は下部成層圏(橙、緑、青、紫の順に成層圏上層) のデータを示す。

日本-北極海航路における CO2、O2/N2 および CH4 変動

2012年から2015年の4年間の9月から10月の期間に、 JAMSTECが所有する観測船「みらい」による大気中のCO₂、 CH₄、CO濃度およびO₂/N₂比の観測が日本から北極海に渡る 広範囲で実施された。この航海観測では陸域および海洋の様々 な発生源/吸収源シグナルを追跡することを目的とした(詳細 は前節2-(3)を参照)。

図 3.5.23 に 2012 年の航海 (MR12-E03) における大気中 CH4、 CO₂、O₂/N₂比、および、APOの観測値と、二つの大気輸送モ デル、ACTM および STAG、によるシミュレーションの結果を 示す。「みらい」が北極圏に向かう途中で CH4 濃度の増加が見 られた。これは、北緯40度付近では北半球の夏季に支配的な OH ラジカルによる CH4分解の影響がまだ残っている一方で、 北緯 65 度以北の領域では高緯度地域からの CH4 放出の蓄積の 影響がより支配的であることを反映したものである。およそ1 ヶ月後の北極海から日本への帰路では、OH ラジカルの減少に よって CH4 放出の影響が支配的となり、中緯度帯でも CH4 濃 度の増加が見られた。一方 CO2 については、北極海に向かう途 中の北緯50度までは濃度減少が見られたが、これは中国・日 本・韓国といった化石燃料起源 CO2の放出地域から徐々に遠ざ かることでその影響が減衰することを反映したものである。ま た、CO2濃度は秋季に一般的に見られるように時間とともに増 加傾向が認められる。ACTM によるシミュレーションは、観測 されたこれらの緯度分布に加えて、CO2やCH4の顕著な濃度上 昇イベント、特に2012年9月4日に日本の沖合で観測された CO₂のピークをよく再現している。

O₂/N₂比および APO は、秋季に一般的に見られるように、時間とともに値が減少する傾向を示した。ACTM および STAG によるシミュレーションはこの減少傾向を概ね再現した。しか しながら両モデルは、特に APO に見られる日々変動を過小評 価している。このような過小評価は、シミュレーションに用い た大気海洋間 O₂フラックスの気候値と「みらい」航海で観測 された溶存酸素濃度に基づく大気海洋間 O₂フラックスとを比 較した結果、現実の大気海洋間 O₂フラックスが気候値に反映 されない大きな日々変動を示すことに起因することが示唆され た。



図 3.5.23 2012 年 9–10 月に実施された MR12-E03 航海において観測 された大気 CH₄濃度、CO₂濃度、O₂/N₂比、および APO と、ACTM (赤 線)および STAG(青線)モデルによるシミュレーションの結果の比較。 黒三角で示された CH₄ と CO₂ は船上連続観測の結果を、青ひし形で示 された CO₂、O₂/N₂および APO はボトルに採取された大気試料の分析 結果を表す。

国際地球観測年(IGY)以降の CO2季節変動振幅の変化

大気中 CO₂濃度の直接観測は、1957年に南極で、1958年に マウナロアで開始された。航空機を用いた上部対流圏での観測 は 1958年から 63年にかけてスクリップス海洋研究所の C. D. キーリングによって開始され、近年では HIPPO 航空機観測プ ロジェクトが 2009–2011 に行われている。これら地上と航空 機による CO₂ 観測値を用いて緯度ごとの季節変化の振幅の変 化を解析した(図 3.5.24)。その結果、マウナロアを含む低緯 度対流圏よりも、北半球高緯度の対流圏(ポイント・バロー、 700mb、500mb)において、CO₂季節変動の振幅の増加率が大 きいことが明らかとなった(Graven et al., 2013)。この振幅 の増加は、施肥効果により陸域生態系の CO₂交換が促進された ことが一因として挙げられる。しかしながら、大気モデルによ る数値実験では、観測されるほどの CO2振幅の増加は得られな かった。最近の研究では、北半球中緯度での農業活動の活発化、 CO2施肥効果、気候への植物の応答、気候変動等が、CO2振幅 の増加の原因となっているとされている。



図 3.5.24 1958-63 年と 2009-2011 年における地上 2 地点(ポイント・バローBRW、マウナロア MLO)及び対流圏 700mb と 500mb において観測された CO₂濃度の季節変動の振幅(Graven et al., 2013)。

大気輸送モデル STAG (産総研)を用いて、北極域で検出さ れた CO2 濃度の季節変動振幅の増加を再現することを試みた。 陸上生熊系の活発化による交換量の増大を全球同率と仮定して 大気輸送モデル (STAG) により評価した。大気輸送モデルは 1979-2013 年のヨーロッパ中期予報センターの再解析値で走 らせた。1950年に全球一様 320ppm と仮定し、1978年以前 は 2010-2013 年の気象場を用いて積分した。二酸化炭素解析 情報センターの報告した化石燃料起源の月別排出強度分布と国 際輸送モデル相互比較実験(TransCom)のために Columbia 大の Prof. Taro Takahashi から提供された海洋起源の月別放 出吸収値をそのまま用いた。 陸上植生の月別放出吸収は、 TransCom に提供された CASA の推定値をポイント・バロー の1971年の振幅に調節した値を基準として変更した。放出と 吸収は年平均濃度の増加率が観測と合う事を拘束条件として調 節した。強くなった吸収の何割が放出されるかをゼロから6割 まで指定した実験を行ったところ5割と指定した場合が最も観 測に近かったが、この場合放出は年 0.31%で増大し吸収は 0.56%で増大する。他の地点に関しては現在解析中である。

メタンのモデル計算とインバージョンによるフラックス推定 へ向けた大気中水酸基ラジカル分布の評価

水酸基ラジカル (OH) は大気中汚染物質やメタン等の温室 効果気体の化学的除去過程において重要な酸化剤である。そこ で、対流圏中ではほぼ OH との反応のみによって消滅する成分、 メチルクロロホルム (CH₃CCl₃) とその ACTM による計算を 用いて全球的な OH 濃度の分布を評価した (Patra et al., 2014)。 CH₃CCl₃ はオゾン層破壊物質であることからモントリオール 議定書 (1988 発効) により生産・使用が規制されており、それ 以降の排出量は大きく削減されてきている。それ故、大気中の OH との反応の影響が CH₃CCl₃濃度の変動に表れやすく、OH の検証に優れた大気成分である。また、ACTM の南北輸送は SF₆ 等を用いてよく検証されている。これらの事実に基づき、 南北両半球の平均 OH 濃度の比を変えながら大気中 CH₃CCl₃ の濃度をモデル計算し、その地上および航空機観測結果と比較 した。その結果、観測と整合する南北両半球の OH 濃度の比は 0.97±0.12 であると見積もられた (図 3.5.25)。



図 3.5.25 モデル中の両半球の平均 OH 濃度の比([北]/[南]、横軸) に 対するモデル計算(中抜き)された両半球の平均 CH₃CCl₃ 濃度の差 ([北]-[南]、縦軸)。観測された南北 CH₃CCl₃ 濃度差(塗り潰し)は、 モデル計算における OH 濃度比と得られた南北 CH₃CCl₃ 濃度差の関係 直線上(各実線)にプロットされている。これにより観測に基づく最適 な南北 OH 濃度比を得た(点線)。解析には2004-2011年の平均値を 用いた。凡例は用いた4種の異なる観測を表し、括弧内は CH₃CCl₃濃 度の南北濃度差の計算に用いた南北両半球の対となるステーションを 表す。GCMD は AGAGE、MEDUSA は NOAA/ESRL による観測で、 HIPPO は航空機観測(30 度より高緯度のデータを使用)である。

CH4インバージョンシステムの開発

大気輸送と OH 化学が十分に評価された化学輸送モデル ACTM (JAMSTEC) を用いて、CH4のインバージョンシステ ムを開発し、39 サイトの観測値を用いて、陸域 53 地域におけ る 2002 年から 2012 年の CH4 フラックスを推定した (Patra et al., 2016) 。その結果、全球 CH4 放出量は、2002–2004 年と 2010–2012 年の期間において、それぞれ 505–509 Tg yr⁻¹、 524–531 Tg yr⁻¹となった。12 の亜大陸毎の CH4 放出量を図 3.5.26 に示す。本研究から近年の EDGAR インベントリ (v4.2FT2010) は、2010年における全球 CH4放出量を少なく とも 25 Tg yr¹過大評価していることが示唆された。2004年か らの CH4放出の増加は、熱帯域と南半球に起因することが明ら かとなった。これは、乳牛以外の牛の頭数が 2002年(10.56 億頭)から 2012年にかけて約 10%増加したことと一致する (CH4量にして 10Tgyr¹の増加に相当)。東アジア(主として 中国)の CH4放出量増加は 2002–2006年から 2008–2012年に かけて 7–8 Tg yr¹という結果が得られ、先験値の 17 Tg yr¹か ら大幅に減少した。





図 3.5.26 インバージョンによって得られた CH₄ 放出量(Tg/領域/年) (Patra et al., 2016)。

シベリア域におけるメタン変動の理解

ロシアのシベリアは地球温暖化による温室効果気体収支への 影響を理解する上で最も重要な地域の一つである。そこで ACTM と NIES のモデルによるメタンの計算結果を環境研に よるタワー連続観測 (JR-STATION) と比較した (図 3.5.27)。 モデルは観測された 2006-2012 年の濃度増加をやや過大評価 した(Igrim における濃度増加は、観測:21ppb、ACTM:28ppb、 NIESTM-FWR: 51ppb)。モデルは、冬に極大で、夏にも湿 地放出由来の小さなピークがあるなど、観測された季節変動の 傾向をある程度は再現するものの、その変化量や年々の変動等 はほとんど再現できていない。例えば、三つのステーションで 2009-2011 年に観測された冬のピークは全モデルが過小評価 している。これはモデルに用いた地表メタン放出量が現実にお ける年々変動を表現できていないことを示している。また、こ れらタワー観測ステーションはしばしば、市街地、ガスパイプ ライン、湿地等が混在するエリアに位置するため、低解像度の 全球モデルでは、そのような細かなメタン放出の不均一性を解 像できないという可能性も示している。



図 3.5.27 シベリアのタワー観測ステーションにおける、観測および モデル計算により得られたメタン濃度の日中データの月平均値。

オイラー-ラグランジュ型結合モデルを用いたシベリア CO2シ ミュレーション

空間解像度の荒い全球モデルでは内陸の地上観測値の微細な 構造を捉えることができないことから、オイラー・ラグランジ ュ型結合モデル (NIES) を用いてシベリアの CO₂ 観測値の解 析を行った。図 3.5.28 に示すように、Karasavoe における観測 値との比較では、高解像度(水平解像度 0.1×0.1 度)の結合モ デルを用いた方が、観測値の再現性が向上することがわかった。 本高分解能モデルを用いた CO₂ フラックス推定を現在実行中 である。



図 3.5.28 JR-STATION サイトの一つシベリア Karasevoe における CO_2 濃度観測値と二つの空間解像度で実行した結合モデルの計算結果 の比較。

衛星観測データ(GOSAT)を用いた二酸化炭素データ同化シ ステムの開発

衛星観測データ(GOSAT TIR L2 Ver.1.0)から得られた二酸化炭素濃度データが二酸化炭素収支解析に与える影響について4次元データ同化手法(LETKF)を用いて評価した。実観

測データを用いたデータ同化には水平解像度 2.8°のオンライン輸送モデル(MJ98-CDTM)を用い、6日間平均の二酸化炭素フラックスを評価した。衛星観測データのバイアスは独立解析値(気象庁二酸化炭素分布情報)を用いて評価し、数種類のバイアス補正法を試験した。GOSAT TIR L2 Ver.1.0 観測データを用いることにより、ほぼ地表面全ての二酸化炭素フラックス先験情報を修正することが可能になる一方、二酸化炭素フラックス解析値はバイアス補正法に大きな影響を受けることが分かった。

図 3.5.29 に GOSAT TIR L2 Ver.1.0 観測データをバイアス 補正後にデータ同化した 2012 年 12 月における二酸化炭素濃度 月平均値を示す。北半球の冬季において、化石燃料燃焼に伴う 二酸化炭素高濃度領域(ホットスポット)がアジア、北米、欧 州の主要工業地帯においてみられている。熱帯および南半球に おいては海洋起源の大気や植生による吸収の影響を受けて相対 的に二酸化炭素濃度が低くなっていることが分かる。



360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420

図 3.5.29 GOSAT 観測データをアンサンブルカルマンフィルタ (LETKF) で同化後の 2012 年 12 月における月平均地表面二酸化 炭素濃度分布図。
引用文献

- Manning A., Keeling, R. F., 2006. Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network. Tellus 58B, /95-119.
- Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T., Yamanouchi, T., 2006. Temporal variations of the carbon isotopic ratio of atmospheric methane observed at Ny Ålesund, Svalbard from 1996 to 2004. Geophys. Res. Lett., 33, L01807.
- 3) Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Yusupov, V., Kosmach, D., Gustafsson, O., 2010. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. Science 327: 1246–1250. doi: 10.1126/science.1182221.
- Patra, P. K., et al., 2009. Growth rate, seasonal, synoptic, diurnal variations and budget of methane in lower atmosphere. J. Meteorol. Soc. Japan, 87, 635–663.
- 5) Van Aardenne, et al., 2001. A High Resolution Dataset of Historical Anthropogenic Trace Gas Emissions for the Period 1890-1990. Global Biogeochemical Cycles, 15(4), 909-928.
- Mitchell et al., 2013. Constraints on the Late Holocene Anthropogenic Contribution to the Atmospheric Methane Budget. Science, 342(6161), 964–966.
- Chappellaz et al., 2013. High-resolution glacial and deglacial record of atmospheric methane by continuous-flow and laser spectrometer analysis along the NEEM ice core. Clim. Past, 9(6), 2579–2593.
- Rhodes et al., 2013. Continuous methane measurements from a late Holocene Greenland ice core: Atmospheric and in-situ signals. Earth Planet. Sci. Lett., 368, 9–19.



全体概要

北極海で急速に進行している海氷の減少は地球温暖化の影響が 最も顕著に現れている現象の一つである。その海氷減少は、北極 海の海洋環境を変化させ、そして海洋生態系や水産資源に影響を 与えることが懸念されている。本研究課題では、海氷減少による海 洋生態系への影響を明らかにするために、国内の海洋物理・化学・ 生物の研究者が集まって、学際的な研究を進めた。特に既に海氷 減少の影響が顕著に現れていると言われているベーリング海北部 からチャクチ海・ボーフォート海・カナダ海盆などの太平洋側北極海 とその周辺海域を主たる研究対象とした。海氷減少や温暖化によっ て起きる北極海の温暖化・淡水化・酸性化・貧栄養化(富栄養化)な どの物理化学環境の変化が微生物や動植物プランクトンなどの低 次生態系に影響を与える。特に北極海は世界で最も海洋酸性化が 進行している海域として知られており、その実態を明らかにすること は喫緊の課題である。また我々が対象とする海域では、食物網の 底辺を支える植物プランクトンの基礎生産力が高いことが大きな特 徴の一つである。これが海氷減少や温暖化に伴ってどのように変化 し、動物プランクトンや更に高次の生態系にどのように影響するかを 知ることは、とても重要である。さらに、北極海の環境変化に伴って 生物の群集組成が変化することが考えられる。北極海で海氷と共に 生きてきた生物に危機が訪れている反面、これまで北極海で住むこ とができなかった種が入り込んでくる事例が観測され始めている。こ のような北極海の海洋生態系に係る緊急かつ重要な課題を明らか にすることを主たる目的とし、北極海の海洋生態系の将来予測に資 する研究活動を進めてきた。

上記の研究目的を達成する方策として、海洋地球研究船「みらい」 北極航海による学際的観測、北海道大学練習船「おしょろ丸」北極 航海による海洋生態系調査、カナダ砕氷船航海による太平洋側北 極海の海氷域・氷縁域での観測及び係留系設置・回収作業、バイ オロギングによる高次生態系(海鳥など)の調査、などを行い、本事 業期間における観測データを取得した。この期間は、2012 年に北 極海全体として海氷面積最小値を記録したものの、太平洋側北極 海の海氷状況は 2000 年以降の平均もしくはそれ以上の状況であ った(図 3.6.1)。これらの得られた観測データと共に、IPY 期間 (2007–2008)に取得されたデータなどと比較検討することで、近年 の海氷の増減に伴う変化を調べた。併せて地球シミュレーターによ るモデル計算により、現状の詳細分析及び将来に起こり得るシナリ



図 3.6.1 太平洋側北極海の夏季海氷面積最小時の面積の経年変動。 表中の地図は、2012 年 9 月 16 日の海氷密接度分布を示す。地図中 の赤線で囲まれた領域(北緯 83 度以南、東経 165 度~西経 120 度) を、当該領域として海氷面積の変化を計算した。

オの推定を行った。

海洋地球研究船「みらい」による北極航海

2012 年 9 月から 10 月に本事業による海洋地球研究船「みらい」 北極航海(MR12・E03)を行った。9 月 4 日に八戸を出航し北太平 洋・ベーリング海を北上、9 月 13 日にベーリング海峡で行った観測 から 10 月 3 日まで約 3 週間の北極海観測を行った。その後、10 月 4 日にノームに寄港し一部研究者らが下船、その後ベーリング 海・北太平洋を回航し 10 月 16 日八戸、10 月 17 日関根浜に帰港 した。図 3.6.2 に航跡図を示す。



図 3.6.2 本事業による海洋地球研究船「みらい」2012 年北極航海 (MR12-E03) の航跡図。

2012年は海氷面積最小となった年であったことからも本航海では 海氷の影響を受けることがほとんどなかった。一方で、波が高くなり 予定を変更せざるを得ないことがあった。しかしながら航海全体とし ては、95点でのCTD/採水観測を始め、係留系回収・設置作業、海 洋光学観測、プランクトンネットによる試料採取、マルチ・コアによる 海底堆積物採取、海鳥・海生哺乳類の目視観測などをほぼ当初計 画通りに行うことができた。

海洋地球研究船「みらい」による北極海観測は、2013~2015年 にも毎年行われ、本事業の研究者が参加して現場観測データの取 得、係留系回収・設置作業や試料採取などを行った。

北大練習船「おしょろ丸」による北極航海

本課題において、2013年に海氷が後退していく6月から7月に おいて北海道大学水産学部練習船「おしょろ丸」による北極航海を 行った。図3.6.3は観測地点図及び2013年7月12日の海氷分 布を示す。北部ベーリング海及びチャクチ海において、75点の CTD/採水観測をして各種の分析を行うとともに、海底堆積物・プラ ンクトン・稚魚などの採取、底引き網調査、ROV調査、海鳥や海生 哺乳類の目視観測など、海洋生態系を広くカバーする観測・試料 採取を行うことができた。



図 3.6.3 本事業による北海道大学水産学部練習船「おしょろ丸」 2013 年北極航海の Leg.2 における観測地点図。青丸が CTD/採水観 測地点を、ピンク色の線が航跡を示す。カラーの背景は海底地形、 白黒のハッチは 2013 年 7 月 12 日の海氷密接度分布図を示す。

カナダ砕氷船航海への参加

本課題では、太平洋側北極海の生物学的ホットスポットであるチャ クチ海南部ホープ海底谷及びチャクチ海北東部バロー沖において 通年観測データを取得するために係留系観測を行った。この係留 系の設置・回収作業を行うために、毎年7月に行われるカナダ沿岸 警備隊所属砕氷船ローリエ号によるベーリング海・チャクチ海航海 に2012~2014年の間、参加した。本航海は国際共同観測プロジェ クトである Distributed Biological Observatory (DBO)の一環とし て行われており、我々も DBO と連携して観測・解析を進めた。

またこの他、カナダ沿岸警備隊所属砕氷船ルイ・サン=ローラン 号や同所属砕氷船アムンゼン号などによるカナダ海盆での観測航 海を、カナダやアメリカの研究機関と共同で実施した。これらの観測 から海洋環境変動の解析を行った。

バイオロギング調査

海洋生態系における高次捕食者の一つである海鳥の行動を明ら かにするために、ベーリング海・セントジョージ島に生息する複数の 種の海鳥類の行動を動物装着型の小型記録計(GPS、深度水温記 録計、加速度計等)を用いて計測した(バイオロギング調査)。この バイオロギング調査は本事業の期間において複数年にわたって続 けることができ、海氷変動をはじめとする海洋環境の変化がこの地 域の海洋生態系の高次捕食者に与える影響を明らかにするための 貴重なデータを取得することができた。

成果発表、国際連携、国際貢献

本課題の研究成果や進捗状況の発表と関連して、国内外の学会 などにおいて特別セッションやシンポジウムを開催した。特別セッ ションやシンポジウムのリストについては、本報告書参考資料5.学 会セッション及び6.アウトリーチ(2)主催講演会に記載した。特に、 本課題としての一般向けシンポジウムを2015年11月9日に東京・ 品川にあるコクヨホール小ホールにおいてGRENE北極研究事業 海洋生態系シンポジウム「ここまで分かった海洋生態系の変化」と して開催した。研究者や学生の他、水産、漁業、貿易といった水産 資源でビジネス展開している民間企業、海難防止や自然環境団体 などから100名以上多くの参加があった中で、第I部として本事業 で得られた研究成果の紹介を、第II部でこれからの北極海海洋生 態系研究をどのように進めていくべきかに関するパネルディスカッ ションを行った。また合わせてポスター発表や本事業で使用した観 測機器の展示、ADSによる観測データのデモンストレーションを行 い、多くの参加者と活発な議論が行われた。





図 3.6.4 2015 年 11 月 9 日に行った GRENE 北極研究事業 海洋生 態系シンポジウム「ここまで分かった海洋生態系の変化」での講演 の様子(上写真)と、ポスター発表・機器展示の様子(下)。

2013 年 5 月に日本が北極評議会のオブザーバー国として認めら れて以降、これまで以上に北極に関する貢献が求められるようにな った。例えば、北極評議会の元にある作業部会の一つである AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme:北 極圏監視評価プログラム作業部会)では、北極域で進行する環境 変化とその影響に関する評価報告書を取りまとめて、発表している。 これらの評価報告書の作成に対して、本課題の研究者も貢献する ようになってきた。具体的には、Snow, Water, Ice, and Permafrost in the Arctic (SWIPA) や Arctic Ocean Acidification (AOA)、Adaptation Action for Changing Arctic (AACA) Beaufort/Chukchi/Bering regional report などの作 成に、貢献している。これらの報告書は、2016 年中に公表され、 2017 年の北極評議会閣僚級会合などでの議論の元となる。

2. 物理・化学環境の変化

執筆者:西野茂人

北極域は地球温暖化の影響が最も顕著に現れる場所の一つであ る。地球温暖化は北極海の海氷減少を引き起こし、その結果、海の 温暖化や淡水化、貧栄養化/富栄養化、酸性化などを進行させて いる。このような北極海の変化は、そこに生きる生物たちにも影響を 及ぼしているはずである。ここでは、これまでの我々の観測研究か ら明らかになってきた北極海の環境変化について、主に海洋循環 や水温・塩分・栄養塩・微量元素・有機物分布などの物理・化学環 境の変化を中心に報告する。

北極域の温暖化と海氷減少

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書¹⁾に よると、将来(2100年)の世界平均気温は最大で4.8℃も上昇する 可能性があり、特に北極域は世界平均より早く温暖化し温度上昇も 著しいとされている。その原因は氷や雪の反射率(アルベド)にある。 アルベドの高い氷や雪が溶けてなくなれば、アルベドの低い海や 地面が日射を吸収して暖まり、その結果、氷や雪が溶け、さらに海 や地面の面積が増え温まる(この過程をアイス・アルベドフィードバ ックと言う)。このため極域での温暖化が急速に進行するのである。 さらに、本事業において、北極海の海氷・海洋の現場観測、及びモ デルによる解析により、一年氷域(氷厚約 0.7m)では多年氷域(氷 厚約 1.1m)の3倍以上のスピードで海氷減少が起こっていることが 示唆された(Itoh et al., 2011)。北極海では、夏季の海氷面積の 減少に加え、厚い多年氷の割合が減り、薄い一年氷の割合が増え ている。このことが近年の海氷減少をさらに加速させている一因で あると考えられる。

北極海の温暖化・淡水化

北極域が温暖化すると、その影響で北極海も暖められ温暖化した り、海氷が融解し淡水化したりといった物理環境の変化が起こること が考えられる。我々は、1990年代終わりから本事業(2011年~ 2015年)に至るまで、夏季に太平洋から北極海に流入してくる海水 (太平洋夏季水)を、その主要な通過点であるバロー海底谷で、係 留系(水温・塩分センサーや流速計などを取り付けた海水中の観測 システム)によりモニタリングしてきた。その結果、2000年代前半か ら後半にかけて海洋表層の顕著な温暖化(約4℃から8℃に水温上 昇)がみられた(図 3.6.5; Itoh et al., 2013、Williams et al., 2014)。この太平洋夏季水はチャクチ海で日射によって加熱され (太田修士論文, 2014)、北極海での熱輸送や海氷融解に大きく寄 与している(Itoh et al., 2013, 2015a)。また、近年の夏季の水温上 昇によって、冬季にまで暖かい夏季水の影響が残り、海氷形成が 妨げられている(Itoh et al., 2012)。 一方で、北極海の至る所で温暖化が起こっているわけではないこ とも、本事業の解析で明らかになってきた。例えば、シベリア側北極 海の亜表層(50–100m)ではむしろ寒冷化が起こっている (Nishino et al., 2013)。この海域では近年、結氷期前の海氷減少 が著しく、開放水面では海洋が直接大気から冷却を受け鉛直的に 混合する。その結果、冷たく厚い水が形成されシベリア側北極海の 亜表層に広がっていくと考えられる。

また、淡水化については、2000年代前半から後半にかけてアラス カ側北極海で淡水量が増えていたことが米国・カナダを中心とした 観測研究により明らになった²⁰。これは、ただ単に海氷融解水が増 加しただけではなく、海氷減少に伴い風により駆動される海洋循環 が強化され、アラスカ側北極海のボーフォート循環内に淡水を含ん だ太平洋水や河川水が蓄積されたためである。このような淡水化は、 後述するように、生態系にも影響を及ぼすことが本事業からも分か ってきた(e.g., Nishino et al., 2011a, 2013)。

北極海の酸性化・貧栄養化/富栄養化~生態系への影響~

北極海の海氷減少や海洋循環の変化、温暖化や淡水化といった 物理環境の変化は、海水中の化学環境や生態系の変化とも密接に 関係している。例えば、北極海は、二酸化炭素(CO₂)の吸収を妨 げていた海氷の蓋が溶けて無くなったことで、酸性化が急速に進行 している³⁾。酸性化や淡水化は海水中の炭酸カルシウムの飽和度 (Ω)を低下させ、炭酸カルシウムの殻を持つ生物の成長を阻害す る可能性がある(北極海の酸性化や Ω の低下については次の第 3 項で詳しく述べられている)。

さらに、本事業では、海氷減少に伴う海洋循環の強化や渦の活発 化が、栄養塩分布の変化を通じて、植物プランクトンの分布や生産 (基礎生産)にも影響を及ぼすことを明らかにした。Nishino et al. (2011a)は、近年の海氷減少に伴いアラスカ側北極海ではボーフ ォート循環内に淡水が蓄積することにより表層栄養塩濃度が低下 (貧栄養化)し、その結果、大型植物プランクトン量が減少している ことを示した(図 3.6.6)。このような貧栄養化が著しい海域では、渦 が陸棚域から栄養塩や鉄、有機物を運ぶのに重要な役割を果たし、 植物プランクトン量や沈降粒子量の増加に寄与している(Nishino et al., 2011b, Aguilar-Islas et al., 2013, Watanabe et al., 2014)。一方、シベリア側北極海では、結氷初期の開放水面拡大 に伴い、海洋の冷却と混合により低温で高栄養塩の陸棚冬季水が 形成され、この冬季水が海盆に広がり、そこでの栄養塩濃度を高め ている(富栄養化; Nishino et al., 2013)。この海域では海氷減少 により海水中の光環境も改善されるため、基礎生産が増加している 可能性がある 4)。北極海のアラスカ側とシベリア側の化学環境の違 いは、栄養塩だけでなく、化学トレーサーとしても有用な溶存有機 物の分布にもみられる(Gueguen et al., 2012, 2015)。シベリア側 (アラスカ側)の溶存有機物は高分子量(低分子量)で陸起源の割



図3.6.5 (a) 人工衛星より得られた 2009年9月5日の表面水温分布 (アラスカ大学フェアバンクス校提供) と太平洋水の流れの模式図、 及び(b) バロー海底谷における海洋表層(40m)の水温の時系列(Itoh et al., 2013を更新)。赤、青、及び黄色のグラフは、それぞれバロ 一海底谷の東側、中央、及び西側に設置した係留系より取得したデー タを表す。灰色のグラフは、人工衛星より取得した表面水温のデータ

合が高い(低い)。また、海氷減少に伴い秋季に植物プランクトンの 大増殖(秋季ブルーム)が起こる海域が広がっていることが最近の 衛星観測より確認されている⁵⁾。本事業でも、チャクチ海で初めて 現場観測により秋季ブルームが起こるメカニズムを捉えた(Nishino et al., 2015)。高時間分解能の定点観測から、秋季の強風による 乱流混合と慣性周期でみられる栄養塩躍層の上昇が同期したとき に、表層に栄養塩が供給されブルームが起きることが明らかになっ た。植物プランクトンのブルームは、低温環境下であっても、微生物 の活性や現存量を増加させることも分かってきた(Uchimiya et al., in prep.)。植物プランクトンは生態系の底辺を支える生物であり、 その生産や分布の変化は食物連鎖網を通じて、より高次の生態系 にも影響する(e.g., Yokoi et al., 2016、Matsuno et al., 2015c)。 詳細は後述の第4~6項を参照されたい。

を表す。



図 3.6.6 近年の北極海の海氷減少に伴う海洋循環の強化と栄養塩分布、及び生物生産の変化についての模式図 (Nishino et al., 2011a, 2013)。 (上側中央) 2002 年/2003 年と(下側中央) 2008 年/2009 年における水深 50m での力学高度(dyn.m; 破線) と硝酸(µmol/kg; カラー) の分布、(上側右) 2002 年/2003 年と(下側右) 2008 年/2009 年における大型(10µm より大きい) 植物プランクトンのアラスカ沖の(赤 いラインに沿った) 鉛直断面、及び(上側左) 2002 年と(下側左) 2008 年における硝酸(µmol/kg) のシベリア沖の(青いラインに沿った) 鉛直断面。データは「みらい」及び米国・カナダ砕氷船により取得。

北極海の生物学的ホットスポットの海洋環境

北極海の玄関口であるチャクチ海南部は、世界の海の中でも最も 生物生産が高い海域の一つである。この海域は、太平洋からの高 栄養塩水が流入してくるため基礎生産が高く⁶⁰、大量の有機物が海 底に沈積し底生生物の餌になっている⁷⁰。その底生生物を求めて、 多くの海生哺乳類が集まる⁸⁰。このため、この海域は生物学的ホット スポットと呼ばれる。生物学的ホットスポットの形成・維持機構につい てはまだ不明な点が多く、また生物生産が高いチャクチ海南部の 生態系の変動は社会的にも大きなインパクトを与えるため、本事業 ではこの海域を一つのターゲットエリアとして観測研究を行った。

我々は、チャクチ海南部の生物学的ホットスポットにおいて、 2012年7月から2014年7月までの期間、初めて係留系観測を行 うとともに、2012年及び2013年の秋季に「みらい」による詳細な船 舶観測を実施した。その結果、この海域では春季と秋季に植物プラ ンクトンのブルームが起こっていることが明らかになり、特に秋季ブ ルーム前には底層水の濁度が上昇し、酸素濃度が低下することか ら、海底への粒状有機物の沈積と分解(栄養塩の再生)により秋季 ブルームが引き起こされることが示唆された(Nishino et al., 2016)。 ここでの粒状有機物の主要な構成成分は透明細胞外ポリマー粒子 (TEP)であることも分かった(Yamada et al., 2015)。また、底層水 がドーム状構造を形成することにより、栄養塩が表層に供給されや すくなり、この海域が周りより基礎生産が高くなることが示唆された (Nishino et al., 2016)。一方で、基礎生産は海洋表層の成層の 強さに左右され、2012 年の秋は海氷融解水が表層を占め成層が 強くなり、下層からの栄養塩供給が低下したことにより通常年より基 礎生産が低下したと考えられる(Nishino et al., 2016、大額修士 論文, 2016)。

チャクチ海(陸棚域)はまた、北極海中央部(海盆域)への物質供 給においても重要な海域である。我々は、「おしょろ丸」や「みらい」 を用いて、ベーリング海北部及びチャクチ海からカナダ海盆にかけ ての広域観測を実施し、基礎生産や動植物プランクトンの分布と密 接に関係する栄養塩・微量元素・溶存有機物等の分布を詳しく調



図 3.6.7 北極海沿岸から沖合への化学物質輸送の模式図。Hioki et al., 2014の模式図に本事業の様々な研究成果を加筆。

査した。その結果、チャクチ海陸棚底層と、陸棚斜面からカナダ海 盆の亜表層(100~200m)でみられる冷水塊に、高濃度の栄養塩・ 鉄·溶存有機物が観測された(図 3.6.7; Hioki et al., 2014)。水塊 分析から起源と広がりを推定した結果、チャクチ海陸棚底層から栄 養塩・鉄・溶存有機物が供給されることで、それらは高濃度となり、 冬季の陸棚上で海氷形成に伴って生成される水塊(ブライン水)に よって陸棚底層から陸棚斜面、そして海盆域に運ばれていることが 示唆された。鉄の供給源には他にも河川や海氷 (Takesue and Nishioka, in prep.)、エアロゾル(Kanna et al., 2014)が挙げら れる。溶存有機物は、高濃度になるほど陸起源のものが多くなる (田中修士論文, 2014、Tanaka et al., 2015)。また、有機ヨウ素ガ スや微量元素であるマンガン、ニッケル、亜鉛、カドミウムも、鉄と同 様に多くは海底から供給され、ブライン水による輸送で海盆域に運 ばれていると考えられる(Ooki et al., 2015、Kondo et al., in prep.)。有機ヨウ素ガスはバロー海底谷など水塊の湧昇が起こる海 域で大気に放出され、北極域の対流圏オゾンを触媒的に破壊する 可能性がある(Ooki et al., 2016)。一方、カナダ海盆の亜表層に はチャクチ海から有機物が供給されているため、微生物活性のプロ ファイルは亜表層で極大となる特徴的な構造を示す(Uchimiya et al., 2013)。また、チャクチ海陸棚域からカナダ海盆の密度躍層の 直上に、TEP を多量に含む粒子が蓄積する薄層が存在することが 明らかになった(Yamada et al., 2015)。TEP はチャクチ海陸棚域 において生成され、その一部がカナダ海盆へ水平的に輸送される ことで、海盆域の物質循環に影響を及ぼしている可能性がある。上 述した陸棚域から海盆域への物質輸送とは逆に、カナダ海盆の高 栄養塩水が栄養塩の枯渇したチャクチ海北部に貫入してくることで、 亜表層にケイ酸塩極大が形成され、秋季の珪藻ブルームを維持し ていることも観測されている(Nishino et al., 2016)。

まとめ

北極海の海氷減少に伴う物理・化学環境の変化、及びそれらに 対する生態系の応答は場所や季節により異なり、今後さらなる観測 研究の拡充が求められている。中でも、シベリア側北極海は、地球 温暖化に伴う海底永久凍土の融解⁹⁰や海岸浸食¹⁰⁰、そして海氷激 減が引き金となり生物地球化学的な変化(メタンや CO2の大気への 放出、炭素・栄養塩・微量元素・粒状及び溶存有機物等の北極海 への供給、及びそれらと関係した炭素循環や生態系の変化)が最も ダイナミックに起きている海域であるが、未だデータの空白域となっ ている。また、北極海に隣接するベーリング海も温暖化と海氷変動 に伴う劇的な環境変化が生じており、ベーリング海峡を通過する海 水の流入を通じて、北極海に大きなインパクトを与えると考えられる が(例えば、海洋生物の北側へのシフト)、ベーリング海と北極海の 相互作用についてはまだ十分には理解されていない。ベーリング 海の海氷変動は太平洋西部亜熱帯域の対流活動とも関係している ことが本事業の解析から分かっており(Nakanowatari et al., 2015)、北極海の環境変動を論ずる際は、熱帯・中緯度・高緯度に おける大気海洋相互作用をも視野に入れる必要がある。

一方、季節的には、海氷が最も後退する夏から秋にかけての時期 を中心に観測が行われてきた。今後は、冬季の氷上キャンプでの 観測や係留系による通年観測を通じて、夏から秋の船舶観測だけ では得られないデータを取得し、北極海の物理・化学環境、及び生 態系の季節変化を把握する必要がある。さらには、観測データに加 えて、時空間的により広い範囲をカバーする衛星データや数値モ デルを駆使して、激変する北極海の海洋環境を把握するとともに、 それが環北極海域、そして全球の生態系・気候システムに与える影 響について評価することが期待される。

3. 海洋酸性化への影響

執筆者:川合美千代

北極海は、海洋酸性化の影響が他の海域に先駆けて現れる海と して知られている。しかし酸性化の状況や生物への影響は北極海 の海域ごとに大きく異なる。本事業では、カナダ海盆とチャクチ海に おける海洋酸性化の状況を調査した。特に、石灰化生物が豊富な チャクチ海に注目し、これまで不明であった季節変動に着目した解 析を行った。

北極海で進行している海洋酸性化のこれまでの知見

産業革命以降、人為起源の CO2 が大気から海水に溶け込むこと により、海水の pH は徐々に減少しつつある。これが海洋酸性化で あり、現在、全球規模で進行しつつある¹⁾。酸性化が進行すると海 水の炭酸カルシウム飽和度(Ω)が低下するため、炭酸カルシウムの 殻や骨格をもつ石灰化生物にとってその形成・維持が困難になる。 また、多くの石灰化生物には、発育、成長、繁殖などにも負の影響 があらわれることが室内実験などにより指摘されている¹¹⁾。

北極海では、水温が低いため CO₂をたくさん溶かしていることと、 河川水が大量に流入するため CO₂ に対する緩衝能力が低いことに より、もともと海水の Ω が低い。したがって、酸性化が進行した際、 他の海より先に Ω <1(未飽和:炭酸カルシウムが海水に溶け出すよ うな状況)に達すると予想されている ^{12), 13)}。しかし、酸性化の進行 状況は、北極海の中でも海域によって大きく異なっている ¹⁴⁾。これ まですでに、ベーリング海¹⁵⁾、東シベリア海¹⁶⁾、カナダ多島海^{17), 18)} (Yamamoto-Kawai et al., 2013)など沿岸域とカナダ海盆 ^{3), 19),} ²⁰⁾の低塩分な表層水について、アラゴナイト(炭酸カルシウムの結 晶形の一つで、比較的溶けやすい)に対して未飽和に達しているこ とが観測されている。また、有機物分解に由来するCO2が多いベー リング海²¹⁾、東シベリア海¹⁶⁾、チャクチ海²²⁾の大陸棚底層水と、これ らの大陸棚起源水が流入するカナダ海盆中層²³⁾、多島海下層*¹⁸⁾ (Yamamoto-Kawai et al., 2013)、バフィン湾¹⁸⁾などでもアラゴナ イト未飽和が観測されている。一部の大陸棚底層では、溶けにくい カルサイトタイプの炭酸カルシウム未飽和についても観測されてい る^{15, 23)}。

表層におけるQの分布

2008 年、カナダ海盆表層における大規模なアラゴナイト未飽和 が観測され、その原因が人為起源 CO₂ だけでなく、海氷の融解に よる CO₂ 吸収量の増加と、融解水による希釈という温暖化の影響に よるものであることが指摘された^{3),18)}。2012 年、カナダ海盆からチ ャクチ海にかけての広範囲の表層水について調査を行った。その 結果、アラゴナイト未飽和の状態が 2008 年以降継続的に起きてい ることを確認した(図 3.6.8)。また、淡水の多いカナダ海盆では一様 に低かったが、一次生産の高い測点では Ω が高い傾向が見られた。 このことから、近年の温暖化による一次生産量の増減が、酸性化の 状況にも影響を与えることが示唆される。また、2015 年にも広範囲 の調査を行った結果、現在も広範囲にアラゴナイト未飽和海域が広 がっていることが明らかになった。

底層におけるQの分布

大陸棚底層でも、炭酸カルシウム未飽和が観測されている。しか し、これまでの観測は5月から10月にかけての時期(多くは夏季) に実施されたものあり、Ωの一年間の季節変動は不明であった。そ こで本事業では、石灰化生物の豊富なチャクチ海底層を対象とし、 船舶観測で可能な範囲の季節変化をとらえるため、2012年9~10 月の「みらい」航海ならびに2013年7月のおしょろ丸航海において Ωの観測を実施した。図 3.6.9 に示したように、2 度の観測における Ωの値は大きく異なっていた。2012年秋にはアラゴナイト未飽和海 域が広く分布しており、生物学的ホットスポット(第2章戦略研究目 標 3b 参照)においては、カルサイト未飽和も観測された。これは、 表層で生産された多量の有機物が下層に沈降し、CO2 に分解され たためと考えられる。一方、2013年7月には、アラゴナイト未飽和な 底層水は全く観測されなかった。この時期は、有機物の分解よりも 光合成が盛んで、海水中の CO2 が消費されていたためと考えられ る。これらの船舶観測の結果、一次生産が活発な海域の底層水は 秋季に炭酸カルシウム未飽和に達していることが明らかとなった(三 船修士論文,2013)。

チャクチ海における Qの季節変動の推定(係留観測から)



図 3.6.8 2012年における表層海水のアラゴナイト飽和度の分布。



図 3.6.9 チャクチ海底層水のアラゴナイト飽和度。 左) 2012 年秋の「みらい」航海、右) 2013 年初夏のおしょろ丸航 海の結果。



図 3.6.10 チャクチ海南部生物ホットスポット底層におけるアラ ゴナイト飽和度の季節変動。水温・塩分・溶存酸素の係留観測結 果から推定したもの。期間は 2012 年 7 月から 2014 年 7 月。

次に、これらの船舶観測の結果を係留系データと合わせることで、 観測例のない冬季を含む Ω の季節変動の復元を試みた。まず、船 舶観測の結果を元に、水温・塩分・溶存酸素から Ω を推測する経験 式を算出した。このような方法は、北極海以外の海域ですでに使用 されている方法であるが²⁴⁾、北極海に適用したのは今回が初めて である。得られた経験式を、チャクチ海の生物ホットスポットに設置 した係留系(Nishino et al., 2016; 第2章参照)による水温・塩分・ 溶存酸素のデータに適用することで、2012 年から 2014 年の2 年 間にわたる Ω の季節変動を復元した(図 3.6.10)。

その結果、春の光合成により一旦Ωが上昇するが、夏から秋にか

けて沈降した有機物の分解によって Ω が大きく低下してアラゴナイト・カルサイト未飽和に達した後、冬の間もほとんどアラゴナイト未飽 和のままであるという結果が得られた。このことは、冬季も溶存酸素 が未飽和であるという係留系のデータによるもので、冬季の底層水 における有機物分解・呼吸の維持が低い Ω の原因であると推察さ れる。カルサイトについては、冬季は過飽和と見積もられた。底層水 がアラゴナイト未飽和であった時間は年間の 66%、カルサイトにつ いては 16%であった。これまで、チャクチ海における夏季底層の未 飽和については知られていたが ^{22),25)}、未飽和の時期がこれほど長 いこと、冬季もアラゴナイト未飽和であることは本事業により初めて 示された(Yamamoto-Kawai et al., 2016)。

大気中二酸化炭素の増加に伴う影響評価

得られた Ω の季節変動について、大気中 CO₂ 濃度増加の影響 を見積もった。まず、人為起源 CO₂ が無かった産業革命以前の大 気中 CO₂ 濃度(280 ppm)の場合、チャクチ海底層のアラゴナイト 飽和度は現在に比べて高く、未飽和な時期は現在の約 1/3(年間 24%)であったと見積もられた。ただし、海域の生物生産量ならび に有機物分解量が温暖化などにより変化した場合、春から秋にか けての Ω の値も変化するものと考えられる。しかし、例えば産業革 命以前の生物生産量・有機物分解量が現在の半分だったと仮定し ても、年間の 12%がアラゴナイト未飽和であったと見積もられた。こ れらの結果から、生物生産と有機物分解の盛んな生物的ホットスポ ットにおいては、産業革命以前からアラゴナイト未飽和を経験してい た可能性があることを示唆している。人為起源 CO₂の増加は、未飽 和な時期を大きく延長したと同時に、未飽和な海域の面積も拡大し たものと考えられる。

同様に、今後も CO₂ 濃度が増加した場合についても見積もりを 行った。現在から50年後に大気中 CO₂濃度が650 ppm に達した ときには、アラゴナイト未飽和の時期は年間の82%にも達し、光合 成の盛んな一部の時期を除いて、年中未飽和であると予想される。 カルサイトについても年間の57%が未飽和になると見積もられた。 このことは、人為起源CO₂により、石灰化に適した時期が大幅に減 少しつつあることを示している。二枚貝はチャクチ海における主要 な底生生物かつ海鳥やセイウチなどの高次生物の餌であるため^{7),} ²⁶⁾、チャクチ海の生態系において重要な位置を占めている。このた め、長期にわたる炭酸カルシウム未飽和が、石灰化生物に与える 影響を調べる必要がある。

一方で、2013年のおしょろ丸航海において、生物ホットスポット での底生生物の採取を行ったところ、多くの二枚貝が採取された (図 3.6.11)。これらの貝類は季節的未飽和に耐えうる何らかの保 護機構、例えば有機層による殻の保護、移動、豊富なえさによるエ ネルギー補填^{27), 28)}などを持ち合わせていることが示唆される。また、



図 3.6.11 チャクチ海南部生物ホットスポットにおいて、ドレッジ観測で 採取された貝類。

大きな成貝だけでなく、小さな稚貝の生息も確認されたことから、特 に脆弱な幼生期・着底期が、炭酸カルシウム過飽和の時期に一致 しているのかもしれない。この場合、今後 CO₂ 濃度の上昇により過 飽和時期が縮小した際には、石灰化生物の繁殖や成長を阻害する 可能性が考えられる。

いずれにしても、季節的未飽和に対する生物の応答を定量的に 調査することが急務である。本事業により、チャクチ海の生物的ホッ トスポットはすでに長期にわたって炭酸カルシウム未飽和であること が示された。このことは、この海域が海洋酸性化に対する生物の脆 弱性や耐久性、あるいは酸性化による物質循環の変化などを明ら かにする上で重要な情報を与える貴重な場であり、今後も注視す べき海域であることを意味している。

4. 基礎生産の変化

執筆者:平譯 享 藤原 周 鈴木光次 平田貴文 齊藤誠一 飯田高大 渡邊英嗣

北極海の海氷縁では、春季から夏季にかけての海氷後退に伴っ て海洋表層が成層化し、ケイ藻類を主とする大型の植物プランクト ンが大規模な氷縁ブルームを起こす。また、継続的に栄養塩供給 がある海域では海氷後退後の夏季にもブルームを起こす場合があ る(open water bloom)。北部ベーリングおよびチャクチ海陸棚域 は海底深度が浅く、植物プランクトンの増殖速度が動物プランクトン による捕食速度よりも一般に高いため、ブルームによって生産され た有機物の多くは海底に沈降し、底生生物に大量の餌が供給され ている。また、その底生生物を利用する大型の海生哺乳類も多く存 在する、生産性が極めて高い海域である。

地球温暖化に伴って、近年では海氷の減少、海氷後退時期の早 期化が進んでいる。このような現象が、生物生産の原点となる基礎 生産のタイミングを変化させ、それを利用するより高次の生物生産 に影響することが懸念されている。しかしながら、北極海域における 基礎生産や植物プランクトンの群集構造、動態、生理機能に関する 研究は時空間的に断片的なものが多く、海氷変動に伴う基礎生産 の変化、増殖のタイミングや植物プランクトンのサイズ・群集組成の 変化についての知見は限られている。また、新生産、CO2の吸収と の関係、アイスアルジーについても不明な点が多い。そこで、本事 業では現場観測と衛星観測、およびモデル実験を活用し、主に北 部ベーリング・チャクチ海陸棚において、海氷変動(面積、後退時 期、開放水面期間などの変化)と上記の項目について調べ、海氷-基礎生産ー植物プランクトンサイズの関係については広範囲かつ長 期的にその傾向を明らかにした。

基礎生産および植物プランクトンのサイズを時空間的に広く観測 するためには、現場データに加えて衛星データを利用することが望 ましい。しかしながら、北極海域においては有色溶存物質(CDOM) や懸濁物質の影響のため、一般に使われている推定方法(アルゴリ ズム)が利用できない。そこで、本事業では初めに北極海専用の基 礎生産および植物プランクトンサイズ推定アルゴリズムを開発した。 データは本事業で行われた「みらい」、「おしょろ丸」による航海のほ か、2007-2008年の国際極年(IPY)で実施した「おしょろ丸」の航 海で取得したものを用いた。



図 3.6.12 2006 年 8 月および 2007 年 8 月のチャクチ海およびベー リング海陸棚域における、(a) 植物プランクトンサイズ組成、(b) chl-a 濃度、および (c) 海表面水温(SST)の頻度分布。縦軸はピクセ ル数。

植物プランクトンサイズは、細胞粒径 5 µm 以上の植物プランクトン群集が持つクロロフィル a (chl-a)が全てのサイズの chl-a に占 める割合をサイズ組成の指標とし、衛星リモートセンシングで得られ る光吸収係数と後方散乱係数を用いて推定するアルゴリズムを構 築した。本アルゴリズムの応用研究として、近年では比較的寒冷で あった 2006 年 8 月と、温暖であった 2007 年 8 月のチャクチ海お よびベーリング海陸棚域における植物プランクトンサイズ組成、 chl-a 濃度および海表面水温(SST)の空間分布の傾向を統計的に 比較した。その結果、植物プランクトンサイズは chl-a に比べ、SST の変化に対してより鋭敏に応答することが示唆された(図 3.6.12)。 本研究は、植物プランクトンサイズ組成の時空間的に連続したモニ タリングと、北極域における海洋環境変動に対する海洋生態系の応 答の評価を可能とした(Fujiwara et al., 2011)。

基礎生産については、北極海の高い CDOM の影響を避けるた めに、誤差を生じやすい chl-a 濃度を使用せず、植物プランクトン の光吸収を用いて 1 日あたりの純基礎生産力を衛星から推定する アルゴリズムを開発した。chl-aを使用した場合、2002 年から 2012 年にかけてベーリング海北部からチャクチ海陸棚域の基礎生産力 に有意な増加・減少傾向は見られなかったが(図 3.6.12 c, d)、本 アルゴリズムを使用することにより、同期間および同海域の基礎生 産力に有意な増加傾向があることが明らかとなった(図 3.6.13a、b) (Hirawake et al., 2012)。

その後、本基礎生産アルゴリズムの特性は、他の研究者によって 開発された31種類の衛星純基礎生産力推定アルゴリズムとともに、 北極海域のデータセットを用いて比較された。多くのモデルは北極 海域の純基礎生産力を完全には再現できず、幾つかのモデルは バイアスが非常に大きかった。また、低い純基礎生産力は概ね比較



図 3.6.13 北部ベーリングおよびチャクチ海における1日あたりの基礎生産量の 変動。(a)、(b)本研究で開発したアルゴリズムによって推定。(c)、(d) chl-aを 使用したアルゴリズムで推定。上段は8月、下段は9月の平均値。

的良い精度で推定できていた。光吸収モデル(本研究のアルゴリズ ムを含む)はバイアスが低いが、現場データとの相関が低くなる場 合があった(Lee et al., 2015)。

本事業で開発したこれらのアルゴリズム(一部改良)を利用し、年 間の生物生産の基盤となる春季ブルーム期の植物プランクトンサイ ズ組成が、海氷融解タイミングの経年変化と共にどのように変わる のか、16年間の衛星データを用いて空間統計的に評価した。海氷 融解タイミングが早い年ほど、春季ブルーム期の大型の植物プラン クトンがより栄養を獲得しやすい海洋構造が形成され、全植物プラ ンクトン中に占める大型植物プランクトン(細胞粒径 5µm 以上)の割 合が増加することを示した。さらに、当海域の年間基礎生産量は大 型植物プランクトンの比率が主要なコントロール要因となっていた (図 3.6.14)。これらの結果は、北極海の昇温による海氷融解の早 期化に伴って、大規模な春季ブルームに必要な栄養塩が供給され ることを示唆するものであり、更にそれに対する基礎生産者の応答 の一端を示すものであり、今後、食物網を介した高次生物の種組成 や分布変化の要因解明への貢献が期待される (Fujiwara et al., 2016)。

一方、チャクチ海の北部(海盆域)においても、海氷減少に対する 植物プランクトンの群集構造の応答を、2008 年-2010 年の観測で 得られた植物プランクトン色素のクラスター解析により評価した。 2008年は 2009年および 2010年よりも海氷後退の時期が 1-2ヶ 月早く、2008 年はハプト藻が優占していたのに対し、2009 年およ び 2010 年は冷水域を好むプラシノ藻類が優占していた。2008 年 におけるハプト藻類の優占は、海氷後退が早く、それに伴って海面 水温が上昇していたことが原因と考えられる。本結果は、今後、夏 季の海氷後退期間が長くなれば、植物プランクトンの群集構造が変 化し、食物連鎖や生物地球化学過程に影響を与えることを示唆す るものである (Fujiwara et al. 2014)。

海氷、水温の変動とそれに伴う基礎生産の変動が、西部北極圏 海域において生物過程が pCO2 にどの程度寄与しているかについ ても調査した。データは本事業で実施された「みらい」MR12-E03 航海で取得した。生物過程のパラメータとして基礎生産力を使用し たが、より正確に推定するために前述の基礎生産力推定アルゴリズ ムを最適化した。その結果、最適化したアルゴリズムの推定精度は、 他のアルゴリズムによりも高く、従来のアルゴリズムの問題点であっ た過大評価傾向も小さくなった。また、観測を実施した9-10月にお いて、海氷融解水や強風などの物理過程が顕著な海域では生物 過程の寄与が小さく、CO2の吸収能力が低かった。一方、海氷融解 水や強風など CO2を放出するような物理過程の影響が小さい海域 ではCO2の吸収能力が高く、水塊が移流する過程において生物過 程による CO2 の吸収が顕著であることが示された。したがって、海 氷の減少に伴って基礎生産が増加する海域では CO2 を吸収する 能力が高くなるが、逆に融解水によって成層化が進むと CO2 の吸 収能力が妨げられる可能性もある (夫津木修士論文,2014)。

海洋表層に吸収された CO2 が植物プランクトンの光合成によって 有機物として固定され、深層へ輸送される(バイオロジカルポンプ) 速度を推定する上で、新生産は非常に重要なパラメータである。主



図 3.6.14 年間基礎生産量を a) 5 µ m 以上の植物プランクトンの割合 (E)、b) SST、 および c) 海氷に覆われていない期間(日数)の重回帰式として表した際の各従属変数 の偏回帰係数。d) は Ftest の p 値。

150°W

160°W

180°W

170°W

に珪藻類がその役割を担っており、植物プランクトンサイズや海氷 融解後の経過時間とf比(全一次生産に占める新生産の割合)の関 係も報告されているが、新生産に寄与する主要珪藻種に関する知 見は無い。そこで、本事業による「おしょろ丸」航海で調査を行った ところ、新生産は、海水中の硝酸塩濃度と有意な正相関(p < 0.05) があり、硝酸塩を供給する物理過程に支配されていたことが示唆さ れた。また、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた有殻藻類の属同 定および炭素生物量の算出結果より、細胞濃度で Chaetoceros 属 (特に、*Ch. socialis*) が優占 (>50 %) したが、全植物プランクト ンの炭素生物量では Thalassiosira 属が珪藻生物量に最も寄与し ていた (p<0.01)。さらに、f比と Thalassiosira 属の炭素生物量と の間に有意な正相関 (p <0.05)が見られたことから、新生産に寄 与していた珪藻は Thalassiosira 属であったと考えられた(図 3.6.14)。また、硝酸塩濃度と Thalassiosira 属および Ch. socialis の相対存在量との間にそれぞれ負および正相関 (p < 0.05)があっ たことから、水柱の成層化が強化されることで、Thalassiosira 属 (細胞サイズ 26.3±8.3 µm)の存在比が低下し、Ch. socialis (9.4 ±4.3 µm)の存在比が高くなった可能性が考えられた(吉野修士 論文,2014)。

現場観測や衛星観測により、海氷の減少や関連した海洋環境の 変化に対する植物プランクトンの応答が部分的に明らかになったが、 観測方法に大きな制限を受ける海氷直下の付着藻類(アイスアル ジー)に関する知見は非常に少ない。これまで、北極海全域を対象 にした海氷海洋物理モデル COCO に低次海洋生態系モデル NEMURO を結合させた上で、チャクチ海の低次生物とその輸送 プロセスについての再現実験を行ってきたが(Watanabe et al., 2014)、海氷生態系の基礎生産者であるアイスアルジーは組み込 まれていなかった。そこで本事業では、低次海洋生態系モデルに 新たにアイスアルジーを含む海氷生態系を組み込み(Arctic NEMURO と命名)、海洋循環変動とそれに対する生態系応答に ついて解析を行った(Watanabe et al., 2015、図 3.6.15)。複数 年を対象とした季節変動実験の結果から、2012年は冬季の北風偏 差によってボーフォート循環内部の貧栄養水が陸棚側に拡がること で、ノースウィンド海嶺周辺域においてアイスアルジーの基礎生産 とそれに伴う粒子沈降が抑制されたことが明らかとなった(図 3.6.16)。またアイスアルジーに関する光特性・栄養塩取込過程・捕



[Arctic NEMURO]

図 3.6.15 海氷海洋生態系結合モデル(Arctic NEMURO)の概念図。

食圧・沈降速度などを変化させる感度実験を行い、海氷生態系が 海洋中の食物連鎖や物質循環に及ぼす影響についても定量的な 見積もりを行った。多くの海域においてアイスアルジーの年間基礎 生産量は浮遊性植物プランクトンより少ないが、短期間に爆発的に 増殖することで、特に氷縁域では動物プランクトンの生活史と密接 な関係がある。また海氷融解後に一気に沈降することで、大気中の 二酸化炭素を海洋深層に隔離する「生物ポンプ」としての働きが無 視できない。今後、海氷過程を考慮した 3 次元生態系モデリングと セジメントトラップ観測などが融合しながらお互いに進展していくこと で、高次捕食者を含めた北極海洋生態系の全体的な理解につな がることが期待される。

以上のように、本グループでは、海氷や水温といった北極海にお ける環境変動に対する、基礎生産者および生物地球化学的な応答



図 3.6.16 海氷海洋生態系結合モデルから計算されたアイスアルジーの年間基礎生産量。(a) 2011 年、(b) 2012 年、(c) 2012 年と 2011 年の差。

について調べてきた。対象海域におけるこれらの結果は、海氷後退 の早期化が春季の表層水温の低下と栄養塩供給を促進し、大型の 植物プランクトンが増え、基礎生産が増加する可能性を示している。 しかしながら、本研究は主に陸棚域での変動を調査したものであり、 暖水の流入や海盆域で見られる海氷融解水による強い成層化など、 基礎生産にとって負の方向へ働く要因も考慮しながらその将来を 予測する必要がある。また、中ー高緯度においては、水温変化の地 理的移動方向がそのまま植物プランクトンのサイズ等の移動方向と ならない可能性も、衛星を使った研究で明らかとなった(和賀修士 論文, 2014)。したがって、北極海生態系全体の将来像は、生物に 影響を与える環境の変動をモニタリングするだけでは予測が困難で あり、現場観測、衛星観測およびモデル実験を効果的に活用し、各 生物の環境への応答を注意深く調べる必要がある。

5. 動物プランクトンへの影響

執筆者:山口 篤 松野孝平

動物プランクトンは、海洋生態系において基礎生産を高次生物に 受け渡す、エネルギー転送者としての役割を持つ。北極海に優占 する動物プランクトンの世代時間は、小型種では約1-3ヶ月で、バ イオマスに優占する大型カイアシ類 *Calanus glacialis*(カラヌス・ グラシアリス)は1年である(Matsuno, 2014a)。動物プランクトンは 大半の種が1年以内の世代時間を持ち、かつホルマリン固定にて、 半永久的な試料保存が可能なため、該当海域における生物生産の 経年変動を評価するのに適した分類群である。海氷減少が動物プ ランクトンに与える影響を評価することを目的とした本分野での研究 成果は以下のようにまとめられる。

マイクロプランクトンの動態解明

まず、動物プランクトンの餌である、マイクロプランクトンの水平分 布を明らかにした(Matsuno et al., 2014a)。2010 年 9–10 月の 「みらい」航海にて、採水した試料をグルタールアルデヒドにて固定 し、静沈検鏡することにより、西部北極海における 10 μm 以上のマ イクロプランクトン群集の水平分布を評価した。マイクロプランクトン 群集は水平的に明確に分離しており、陸棚域には珪藻類が卓越す る群集が分布し、これは栄養塩濃度の高い太平洋水の流入に起因 していると考えられた。一方、斜面域には渦鞭毛藻類や繊毛虫類 が優占する群集が分布しており、これは高気圧性渦などの複雑な 物理環境に起因していると考えられた。

マイクロプランクトンはその大半が珪藻類や渦鞭毛藻類といった 植物プランクトンであるため、その増殖には光が必要不可欠である。 しかし、北極海では冬至前後に、日中でも薄明か、太陽が沈んだ状 態が続く極夜が起こる。この不適な環境を生き抜くために、マイクロ プランクトンはシストや休眠期細胞などを形成し、水中から底泥中に 生活環境を移す。しかし、北極海における底泥中のマイクロプラン クトン休眠期細胞に関する知見は乏しかった。そのため、底泥中の マイクロプランクトン休眠期細胞の動態として、珪藻類の休眠期細 胞(Tsukazaki et al., 2013)および貝毒原因藻である渦鞭毛藻類 *Alexandrium tamarense*(アレキサンドリウム・タマレンセ)のシスト (Natsuike et al., 2013)の底泥中現存量を明らかにした。

ベーリング海陸棚域の底泥中の珪藻類休眠期細胞は、その大半 が春季ブルーム構成種やアイスアルジーであった。このことは、珪 藻類は冬季の不適な環境を休眠期細胞として底泥中で生き延び、 海氷融解後の鉛直混合により水柱に回帰し、春季植物プランクトン ブルームに寄与していると考えられた(Tsukazaki et al., 2013)。 ベーリング海およびチャクチ海における海底堆積物中の貝毒原因 有毒渦鞭毛藻類 *A. tamarense*のシスト密度調査は本事業が最初 であったが、チャクチ海において既報の世界最高密度でシストが分 布していることが明らかとなった(Natsuike et al., 2013、図 3.6.17)。これは、本種が低水温海域に適応していることを意味し、 当該海域において貝毒被害を引き起こしている可能性が示され た。

マイクロプランクトンの珪藻類や渦鞭毛藻類は単細胞生物である。 分裂により増殖するため、環境の好転に応じて、速やかに細胞数を



図 3.6.17 ベーリング海とチャクチ海の海底堆積物中に存在する 有毒渦鞭毛藻類 *Alexandrium tamarense*の水平分布。

増加させることが出来ることは、室内実験にて確かめられている。し かし、野外における環境変動に応じた、短期間の増殖や群集構造 の変化に関する観察例は少ないのが現状であった。そこで、秋季 のチャクチ海における低気圧通過に伴う強風イベントが、マイクロプ ランクトン群集に与える影響を評価した(Yokoi et al., 2016)。

2013年9月10日~25日にかけてチャクチ海1定点において 16日間にわたる短期時系列観測を行い、マイクロプランクトン群集 構造の短期変動を明らかにした。マイクロプランクトン群集には珪藻 類が優占していた。観測9日目に強風イベントがあり、Chl.aが2 倍程度多くなり、一部の種には有意な増加が見られた。大気冷却に より躍層構造が徐々に弱まりつつある秋季のチャクチ海では、強風 イベントは表層への栄養塩供給をもたらし、小規模なブルームを形 成し得ることが明らかになった。またこの小規模ブルーム後は優占 珪藻類群集が中心目から羽状目へと変わっており、夏から冬にか けての群集の季節遷移を促進する機能的役割があると考えられ た。

動物プランクトンの機能的役割

この短期時系列観測では、同時に動物プランクトンのネット採集も 行い、主要動物プランクトンであるカイアシ類 C. glacialisの消化管 内色素量を測定することにより、カイアシ類による植物プランクトン 群集の摂餌量推定も行った(Matsuno et al., 2015a)。16 日間の 観測期間の間に、動物プランクトン群集に明確な変動はなく、秋季 に優占カイアシ類 C. glacialis は体内に大量の油分を蓄えた後期 発育段階が優占し、越冬に備えていた。一方、強風イベントによる 小規模な植物プランクトンブルームに伴い、カイアシ類の消化管色 素量は 1.8 倍と、摂餌強度が増加していた。越冬のためのエネルギ ー蓄積として、強風イベントに伴う小規模な植物プランクトンブルー ムは、動物プランクトンの越冬のためのエネルギーとしてプラスの効 果があることが示唆された。しかし、16 日間ではカイアシ類の油球 蓄積や生殖腺発達までの影響は見られなかった。

この動物プランクトンによる植物プランクトン摂餌過程には、摂餌 量だけで無く、食べた餌がどれだけ動物プランクトンに消化吸収 (同化:Assimilation)されるかの割合、同化効率(Assimilation efficiency)も重要である。動物プランクトンの主要分類群である、カ イアシ類の物質循環に関わる諸パラメータのうち、同化効率は海洋 生態系内における高次栄養段階へのエネルギー転送を推定する 際に必要不可欠なパラメータである。しかし、カイアシ類の同化効 率を実験的に求めた研究は乏しいのが現状である。そのため、北 太平洋亜寒帯域の動物プランクトン相に優占する、大型外洋性カイ アシ類(*Neocalanus* 属と *Eucalanus* 属)を対象に、同所的に分布 する植物プランクトンを餌として与え、その同化効率の変動パターン を飼育実験により明らかにした(Abe et al., 2013)。得られた同化 効率の平均は N. cristatus で 45%-66%、N. flemingeri で 44%-66%、E. bungiiで34%-65%の範囲にあり、植物プランクトン の種によって大きく変動していた。これらカイアシ類3種の同化効率 は、実験に使用した植物プランクトンの無機物含有量との間にいず れも有意な負の関係があった(r²=0.79-0.87, p<0.01)。植物プ ランクトンのうち、高い無機物含有量を示すのは主に珪藻類で、カ イアシ類は珪藻殻無機物の構成要因である Si をほとんど同化でき ないため、植物プランクトン無機物含有量の割合と同化効率には負 の関係があると考えられた。

現在、海洋生態系モデルの NEMURO のような NPZD モデル (生物量を計算するモデル)や、PDM (Population Dynamics Model)および LEM (Lagrangian Ensemble Model)のように数 を計算するモデルにおいても、動物プランクトン(主にカイアシ類を 想定)の同化効率は70%という固定した値が用いられているが、本 研究によってカイアシ類の同化効率は可変性が大きく、やや低いこ と(34-66%)が明らかになった。N. cristatus における LEM にお いて同化効率を 66%に変化させた場合、本種は生活史を継続する ことができたが、44%に変化させた場合には生活史を継続できず、 死亡することが明らかとなった。また 70%に比べて 66%の時にはコ ペポダイト期の発育も遅れることがわかった。このように、同化効率 の変化は個体群維持や、その発育にも大きな影響を及ぼすため、 今後海洋生態系モデルにおいてカイアシ類の同化効率も変動させ ることが望ましいと考えられる。特にカイアシ類の同化効率は植物プ ランクトンの無機物含有量と極めてよい相関を持つため、これらの パラメータとの関係を持つ式を用いることが重要と考えられる。

このように植物プランクトン基礎生産を受け継いだ動物プランクト ンは、海洋漂泳区において、高次生物への餌といった水産学上の 重要性と、鉛直的な物質輸送(Biological pump)の主要な駆動源 としての海洋学上の重要性の二つの側面を合わせ持っている。そ のため、動物プランクトン群集が低次生産からより影響を受けている か(ボトムアップコントロール)、もしくは高次生物による捕食からより 影響を受けているか(トップダウンコントロール)を明らかにすること は、生態系を介した物質循環を理解する上で大変重要である。海 洋プランクトン群集のトップダウン・ボトムアップを定量的に比較する には、動物プランクトンサイズに基づく Normalized Biomass Size Spectra (NBSS)を求め、その NBSS 式の傾きを比較する方法が 取られるが、西部北極海での研究例は乏しいのが現状であった。そ こで 1991、1992、 2007、2008 年の夏季にチャクチ海でおしょろ 丸にて採集された動物プランクトンホルマリン固定試料について、 光学式プランクトンカウンター(Optical Plankton Counter: OPC) による計測を行い、その NBSS の経年及び水平分布を明らかにし た(Matsuno et al., 2012b)。クラスター解析の結果、全定点は大 きく4つの群集に分けられた。リズバーン半島以南では調査を行っ た4年ともNBSSの傾きが急なボトムアップ的な群集が存在した。 これは太平洋水による栄養塩供給により基礎生産が常に高いことの 反映と考えられた。一方、リズバーン半島以北では、1991/92年は 一般的な群集であったが、2007年はバイオマスの低い群集、2008 年にはフジツボ幼生が卓越するNBSSの傾きが急なボトムアップ的 な群集が見られ、経年変動が確認された(図 3.6.18)。このリズバー ン半島以北の経年変動は、海氷融解タイミングの経年変動に関係 していると考えられた。



図 3.6.18 チャクチ海における動物プランクトン群集毎のサイズ組成 (NBSS)。上がカイアシ類 C。下はフジツボ類幼生が優占した群集。 回帰式の傾きが急なほど、生産性が高いことを示す。

動物プランクトンの水平・経年分布

このように、西部北極海の一部であるチャクチ海において動物プ ランクトン群集は、水平的に大きく変動することが示されたため、西 部北極海の広範囲に及ぶ動物プランクトンの水平分布を明らかに した(Matsuno et al., 2012a)。2008年と2010年の9月から10 月にかけて西部北極海にて、NORPACネットの鉛直曳きを行い得 た。動物プランクトン出現個体数とバイオマスは陸棚域で高かった。 カイアシ類は出現個体数の 8–95%を占め、優占分類群であった。 両年の出現個体数に基づくクラスター解析の結果、動物プランクト ン群集は4群に分けられた。各グループの水平分布は水深とよく対 応しており、それぞれ陸棚域、陸棚斜面域、斜面域および海盆域 群集と呼称した。各群集の特徴種は、陸棚域では沿岸性カイアシ 類の Pseudocalanus 属とベントス幼生で、陸棚斜面域では北極海 産カイアシ類の C. glacialisと Metridia longa の若い発育段階が 多く、個体数も多かった。斜面域と海盆域では深海性種が多かった。 2008 年と2010 年で動物プランクトン群集の水平分布を比較すると、 2010 年は陸棚域から海盆域へと水深に対応して群集が明瞭に区 分されていたが、2008年は陸棚斜面域群集が高緯度にまで見られ、 斜面域群集と混在していた。これは 2008 年の海氷面積減少が 2010 年よりも著しかったことによる、ボーフォート循環の強化または 流路変化の影響と考えられた。

このように、当海域における動物プランクトン群集には経年変動 の影響が大きいことが示されたため、より長期間(1994 年-2009 年 の夏季)におよぶ動物プランクトン試料セットが揃っているベーリン グ海南東部陸棚域における動物プランクトン群集の経年変動 (Ohashi et al., 2013)²⁹⁾と、1991/92 年および 2007/08 年夏季の チャクチ海における動物プランクトン群集の経年変動(Matsuno et al., 2011)を明らかにした。1994-2009年の16年間におよぶべー リング海南東部陸棚域において、水温は寒冷期(1994-2000年)、 温暖期(2001-2005 年)そして寒冷期(2006-2009 年)へと変動し ており、この水温のレジームシフトに対応して、カイアシ類の出現個 体数およびバイオマスは、寒冷年に多く、温暖年には少なかった。 カイアシ類群集は 6 グループに分けられ、水平分布と経年変動は 明確に分離しており、群集を分ける主な要因は緯度と水深であった。 カイアシ類群集に寒冷年と温暖年に対応した経年変動がみられた ことは、寒冷年と温暖年の春季植物プランクトンブルームの規模と 期間の差によると考えられた。一方、1991/92年と2007/08年のチ ャクチ海における動物プランクトン群集では、出現個体数とバイオ マスは 1991/92 年よりも 2007/08 年の方が多く、これは海氷面積の 減少が動物プランクトン現存量や生産量という観点では正の効果が あることを示唆している。動物プランクトン群集は大きく 4 群に分け られた。各グループの分布は経年的・水平的に明確に分離しており、 1991/92 年は同様の水平分布であったが、2007/08 年は各グルー プの水平分布が北にシフトしていた(図 3.6.19)。特に 2007 年は南 部に太平洋水により輸送された、太平洋産種が優占する群集が見 られた。このように、海氷域の減少は元来存在する北極海産種を駆 逐するために、生物相の改変という負の効果があることを示してい る。

このチャクチ海でのデータセットは後にアメリカとロシアの共同研 究である RUSALCA のデータセットとも合わせて、1945-2012 年 の長期変動を解析する論文でも、重要な役割を果たした(Ershova et al., 2015)。このように、動物プランクトン試料は長期間の保存が可能で、かつ1年以内の生活史を持つため、経年的な生物生産や 生物相の比較をする際に大変有用で、本事業により得られたデー タセットは国際的にも高い評価を得ている。



図 3.6.19 1991、1992、2007、及び 2008 年のチャクチ海におけ る動物プランクトン群集のクラスター解析の結果。2007 年のみ に観測された群集 D は太平洋産種が卓越していた。

動物プランクトンの季節変化

これら一連の動物プランクトン・マイクロプランクトンの研究成果は、 水平分布や経年変動、また短期時系列変動において、北極海海洋 生態系の重要な側面を明らかにしてきた。しかし、これらの研究は いずれも、船舶によるアクセスが容易な季節(夏季)のスナップショッ トによるものであった。それ以外の季節における北極海の動物プラ ンクトン生態に関する理解は、これら方法論的な問題から、未だ乏 しいのが現状であった。この状況を打開すべく、周年にわたり西部 北極海ノースウィンド海底平原の水深 180 m に、2010–2011 年の 1 年にわたり設置されたセジメントトラップ試料中に出現した動物プ ランクトンスウィマー(>1 mm 以上)について解析を行い、その群集 構造の季節変化(Matsuno et al., 2014b)と、優占カイアシ類の生 活史解析を行った(Matsuno et al., 2015c)。

約2週間間隔で得られた試料解析から、動物プランクトン輸送量 は7月~10月に多く、カイアシ類が18-94%を占め優占していた ことが明らかになった。クラスター解析の結果、全26試料は3群に 分けられた。各グループの出現には明確な季節性があり、結氷下 でも群集が変化することが明らかとなった。優占カイアシ類の個体 群構造は種毎に異なり、*Calanus hyperboreus* はほとんどが成体 雌(C6F)で、2 月~4 月には成熟個体が優占していた。*Metridia longaと Paraeuchaeta glacialis*は1月~5月にC6Fが優占し、 6 月~10 月に初期発育段階の割合が高かった。*Heterorhabdus norvegicus*は11月~2月にC5が優占し、3月~5月にC6F/M の割合が増加していた。太平洋産種の*N. cristatus* は周年を通し て出現し、海氷が衰退する6月~9月に多かった。このように、西部 北極海における動物プランクトン群集構造および主要カイアシ類の 個体群構造には明確な季節変動があり、その季節性は海氷の季節 変動や各々の生活史に起因すると考えられた。

太平洋産種の北極海での再生産成功

前述の経年変動の解析から、近年の海氷衰退により、太平洋水に より北極海に輸送される、太平洋産種の動物プランクトンが明らか になった(Matsuno et al., 2011)。またセジメントトラップ試料解析 により、この太平洋産種は周年を通して北極海に輸送されているこ とも明らかとなった(Matsuno et al., 2015c)。動物プランクトン群集 は、北極海と太平洋で出現種が異なるため、もし今後海氷衰退が 進み、輸送される太平洋産種が更に増えれば、北極海にて太平洋 産種が移入種として定着して、生態系の改変をもたらす可能性があ る。この太平洋産種の北極海での定着の可能性の評価については、 船上飼育実験が必要である。

本事業では、実際に北極海で採集された太平洋産種 Neocalanus flemingeriの C6Fを船上にて飼育し、産卵速度と卵 ふ化率を観察した(Matsuno et al., 2015b)。北極海で採集された C6F の 19 個体は、全ての個体が産卵を行い、そのうち約半数(9 個体)は 4 回以上の産卵を行った。1 回の平均産卵数(382±82 eggs clutch-1)、産卵間隔(11.9±3.7 日)、卵のふ化時間(0℃で 5.1±1.2 日)等は、本種について太平洋で報告されている値と整合 的であった(図 3.6.20)。唯一異なっていたのは卵のふ化率で、 7.5±8.7%と極めて低かった(太平洋では 93%と報告されている)。 北極海における本種の低い卵ふ化率は、未受精卵の割合が高か ったことによると考えられた。これは、元来の生息域である北太平洋 にて、本種の成熟、受精および産卵は水深 1000 m 前後の深海で 行われるが、チャクチ海のように浅い(水深 50 m 前後)環境に輸送 されて、正常な受精が行えなかったことを示唆している。同じ試料 中に、本種の雄成体は1個体も出現しなかったことも、この考えを支 持している。海氷衰退により北極海へ輸送される太平洋産カイアシ 類は増加すると考えられるが、雌成体の低い出現個体数と、低い卵 ふ化率から判断して、現時点で太平洋産種が北極海に定着するこ とは困難であると考えられるが、今後の環境変動が太平洋産種にど のような影響を及ぼすか、注意深く継続観測することが大切である。



図 3.6.20 チャクチ海で採集された太平洋産カイアシ類 Neocalanus flemingeriの産卵。写真は、雌成体、卵および孵化したノープリウス幼生。

6. 高次生態系への影響

執筆者:綿貫 豊

海氷面積及び結氷期間の縮小は、さまざまな海洋生物の分布に 影響するだろう。その仕組みは複数考えられる。クジラや海鳥など の肺呼吸生物は、開氷面がないとその海域を利用できない。魚類、 動物プランクトンなどは、それぞれ生活に適した水温や塩分濃度が あるので、海氷はこれらに影響することで海洋生物の分布を制限す るだろう。もっとも興味深いのは、海氷が低次生産から高次捕食者 まで、食物連鎖を通じて生態系全体に影響する仕組みである。南 東および北部ベーリング海における研究では、寒冷期に海氷が多 いと表層での生産が底層の食物連鎖に流れ、温暖期に海氷が減 少すると表層での生産が表層の食物連鎖に流れるだろうと考えられ ている⁷。

海氷減少と生物の分布

まず第一に、種により好適な水温な塩分濃度が決まっているので、 海氷減少がもたらすこれらの変化は海洋生物の分布や生態に影響 する。本研究では、まず北極海生態系のカギ種と言われるホッキョ クダラ仔魚の分布と海氷との関係を調べた。北部ベーリング海とチ ャクチ海において、おしょろ丸をつかって2008年と2013年に仔魚 を採取した。種構成のクラスター解析をしたところ、採取地点は4つ のグループに分けられた。これらの違いは、海洋環境と海氷融解か らの日数に関係すると考えられた。ホッキョクダラでは特に、採取地 点により仔魚密度は大きくばらつき(Kono et al., 2016)。海氷の融 解からの日数が短い地点で仔魚の密度が高く、そのサイズは小さ



図 3.6.21 ホッキョクダラ仔魚採取地点の海氷融解からの日数と 仔魚の (a)密度、及び(b)サイズ。

かった(図 3.6.21)。これはホッキョクダラが海氷縁で産卵することを 示していると考えられた。

第2に、クジラや海鳥など肺呼吸動物にとっては、海氷のない期間のみその海域を利用できる。本研究では、海氷域の減少とともに、 コククジラの分布域が拡大している可能性が示された(Iwahara et al., in preparation)。これまでボーフォート海東部では、コククジラ は 1980年代に航空期調査によって発見されたのが 1 例だけだっ たが、近年本種がボーフォート海東部にもよく来遊することが報告さ れ始めている。本研究でも、2014年9月にアムンゼン号による目視 観測で、ボーフォート海東部で 2 群 3 頭のコククジラを発見した。こ の海域において海氷がない滞在可能期間の長期化していることが 原因と考えられる。

分布に影響する環境要因

本研究ではこうした動物プランクトン、海鳥、クジラ類の分布に影響する環境要因を探るため衛星データをつかったハビタットモデリ ング手法がもちいられた。

まず第一に、北部ベーリング海およびチャクチ海において、3 種 のカイアシ類(北極海産大型・小型種、太平洋産種)のハビタットモ デルを構築し、それぞれの生物量に影響を与える海洋環境要因 (海氷融解日偏差、水塊、表層・底層クロロフィル a 濃度、水深)を 調べた。水塊の組み合わせは全ての種に対して影響を与えており、 その効果は種によって異なっていた(図 3.6.22)。また、海氷融解日 偏差が小さい場所や年でカイアシ類密度が大きかった。これは、海 氷融解日が早まる事でカイアシ類が増殖可能な環境となる事を示 唆するものである(Sasaki et al., Submitted)。この結果は、カイア シ類の生物量に影響を与える海洋環境を定量的に示したものであ り、今後の環境変動に伴うカイアシ類の生物量の変化を予測する上 で役立つと考えられる。

バイオロギング手法による海鳥の分布調査も実施された。2 番目 に、タスマニアで繁殖し北太平洋で5月~9月の非繁殖期をすごす ハシボソミズナギドリにジオロケーター(光記録により毎日の日の出 日の入り時刻を計算し、そこから緯度経度を推定する)を装着、1 年 後に回収し、2 年間の移動追跡を調べた(Yamamoto et al., 2014)。夏(5~8 月)はオホーツク海およびベーリング海南東部で 過ごし、秋(9 月)には多くの個体がベーリング海峡からチャクチ海 南部を利用した(図 3.6.23)。また、水温が高かった 2011 年のほう が 2010 年に比ベチャクチ海の利用度が高かった。これは、本種の 主たる餌であるオキアミがその適水温に合わせてより北に分布を移 したためと推察された。カイアシ類をもっぱら食べていると思われた ホッキョククジラがオキアミを主食とする例があることが近年報告され ている。北極海においてはカイアシ類-ホッキョクダラがカギ種と考 えられていたが、後述するように、この研究は北極海においてオキ アミもカギ種となる可能性を示唆している。

3番目に、チャクチ海とベーリング海北部において、ヒゲクジラ類 の分布を目視によって調べ、分布環境の把握と分布のモデル化を おこなった(岩原修士論文,2013、Iwahara, in preparation)。 2007~2012年の夏あるいは秋に「みらい」とおしょろ丸において目 視調査するとともに、オキアミを NORPACネットと音響調査で、底 生生物を採泥で調査した。ヒゲクジラ類(主にコククジラ)は夏には ベーリング海峡南部で、秋にはベーリング海峡北部で多数みられ た。コククジラの集中分布域は、2012年秋にはオキアミの生物量 の高い場所と、2013年夏には底生ヨコエビ類が多い場所と一致し ており、季節的に食性を変えたことが示唆された。これは底性ヨコエ ビ類を食べていると通常考えられていたコククジラが秋にはオキアミ を食べる可能性があることを示唆する。ハビタットモデルの結果から は餌生物との統計的な関連は見いだせなかったが、海氷縁からの 距離が影響要因として選択され、コククジラの北上途中である夏は、 氷縁付近でも分布確率が高かった。



図 3.6.22 ハビタットモデルから計算された(上段)北極海産大型カイアシ類、(中段)北極海産小型カイアシ類、(下段)太平洋産カイアシ類の分 布密度に対する 各海洋環境要因の影響。左から順に、海氷融解日からの日数(aTSR)、水塊分布を示すインデックス(PC1、PC2、 PC3)、表 層クロロフィル a 濃度(Chl*a*Upp)、底層クロロフィル a 濃度(Chl*a*Bot)、海底深度(Bdepth)。



図 3.6.23 ジオロケータを用いた調査からわかったハシボソミズナ ギドリの分布。(上)7月、(下)9月。

こうした海洋におけるハビタットモデルの利用には問題点がいく つかある。本研究では、北極における大型動物研究でも使用され ているハビタットモデル(空間統計モデル)の利点と、使用の際に気 をつけなくてはならない点についても検討した(Watanuki et al., under review)。生物学的制約(性・年齢)、時・空間スケールの制 約についてレビューし、特に船からの目視では、観測海域や時期 が制限されること、性・年齢が不明であることが多いこと、繁殖集団 が特定できないことが欠点として挙げられた。また、分布を決める重 要な要因は、年や海域あるいはコロニーによって変わる可能性が最 近分かってきており、モデルの普遍性について十分検討の必要が あることが指摘された。特に、捕食者の分布を決めるもっとも直接的 な要因である餌生物の分布情報が欠けていることは問題であり、餌 生物の分布を小スケール大地域での生態系モデルで得る手法の 開発もこれを解決する一つの手段であろう。

また、この海洋におけるハビタットモデリング手法のレビュー論文 においては、性・年齢および出自コロニーの情報が欠けていること が船からの目視の欠点としてあげられた。本研究ではこれを改善す る手法の開発をおこなった。オオミズナギドリ材料として、ジオロケ ーターによるコロニーや性・年齢を組み込んだハビタットモデルの 結果と船からの目視観測によるデータの統合を行うことで、性・繁殖 ステータスを組み込んだモデルの有効性が確かめられた (Yamamoto et al., 2016)。 ここまでをまとめると、海氷分布、それと関連した水温や塩分濃度 の変化、および水塊の変化は好適物理化学環境の変化や利用可 能海域の制限を通じて動物プランクトン、魚類、海鳥、クジラの分布 に影響するだろう。ただし、捕食者の分布に影響する最も重要であ ると思われる餌生物の分布に関する情報は多くの場合欠けている。 複数の栄養段階を含む分布調査、あるいは餌生物情報を組み込ん だハビタットモデルの構築が必要である。

餌生物と魚類・海鳥・クジラ類の餌や分布

ハビタットモデルでは表面海水温など衛星データで得られる環境 要因を対象生物の分布を説明する要因とした。しかしながら、高次 捕食者の生態や分布に直接影響するのはかれらの餌生物の量と 分布である。本研究では、調査船によって餌生物のサンプリングも 行いこの点を明らかにしようとした。大型捕食者の主たる餌であるカ ギ種が変化しつつある証拠が得られた。

その第一は、ホッキョクダラがゼラチン質動物プランクトンを主食 とする海域があった点である(Nakano et al.,2015)。底引きトロー ルで夏期間に採取されたホッキョクダラの食性を調べたところ、北部 ベーリング海・南部チャクチ海ではゼラチン質プランクトン(尾虫類) を主に食べ、中部チャクチ海ではカイアシ類を始めさまざまな動物 プランクトンを食べていた(図 3.6.24)。ゼラチン質プランクトンは目 につきやすいため、これをある程度利用できる海域では、ホッキョク ダラはこれを食べるが、栄養価が低いので、胃充満度は高くとも肥 満度は高くなかった。海氷減少によってゼラチン質プランクトンがも し増えるとすれば、ホッキョクダラ資源は影響を受ける可能性がある ことをこの研究は示している。



図 3.6.24 2013 年おしょろ丸航海において、チャクチ海中央部と 南部で採取されたホッキョクダラの食性(胃内容物の割合)。数 字は観測地点。緑が尾虫類を示す。

第2には、クラゲと海鳥の採食行動の新しい関係の発見である。 ベーリング海のプリビロフ諸島で繁殖する潜水性の海鳥ハシブトウ ミガラスに小型のビデオロガーを装着し潜水中の映像を記録したと ころ、アカクラゲの一種との遭遇が全潜水回数の85%で観察された (Sato et al., 2015)。ハシブトウミガラスはクラゲの触手周辺に集ま っているスケトウダラの稚魚を捕食していた。ゼラチン質のクラゲが 増えると、高次捕食者の行動が変化する可能性がある。

第3に、北極海においてオキアミの分布が海鳥の分布に関係して いそうなことを示唆する証拠がみつかった(Nishizawa et al., BiogeoScience submitted)。先に示したジオロケーターによるトラ ッキングの結果(図 3.6.23)と同様、船による目視調査でもハシボソ ミズナギドリは、夏には南東ベーリング海に分布するが秋にはベー リング海峡から南部チャクチ海を利用することが確かめられた。ノル パックネットで本種の主たる餌であるオキアミを採取したところ、チャ クチ海では、夏より秋の方が大型個体のオキアミが多く、秋のチャク チ海では大型個体が多い場所ほどハシボソミズナギドリも多かった。 このことから、ハシボソミズナギドリの分布の季節変化にオキアミが 大きく関わっていることが示唆された。

以上をまとめると、これまで表層北極海生態系においては寒冷性 カイアシ類-ホッキョクダラを軸とする食物連鎖の重要性が指摘され てきた³⁰⁾が、本研究では、ゼラチン質動物プランクトンやオキアミ、 また太平洋産カイアシ類の増殖やベーリング海峡を通じての流入 によるカギ種の変化^{31,32)}(Matsuno et al., 2011)が、より上位の 食物連鎖の構造を大きく変える可能性があることが示された(図 3.6.25)。



図 3.6.25 北部ベーリング海及びチャクチ海の表層における食物 連鎖(黒矢印)と、物理・化学的な効果(赤矢印)。

高次捕食者の密度や生態の年・季節変化の記載的研究

本研究では過去の記録も利用し、北極海生態系の構成員の密度 や生態の長期・短期変化を知ろうという試みもなされた。それによっ て、海氷変化の生態系影響を解明するために役立てようという目的 である。まず第一に、1990年代から断片的におこなわれたおしょろ 丸での底引き網による底生生物および魚類採取の資料をまとめた ところ(中野修士論文, 2014)、まず生物組成を海域間で比べると、 ベーリング海では魚類が多くチャクチ海では魚類に比べ、ベントス が多かった。また北部ベーリングおよび南部チャクチ海において過 去の同海域のデータと比較したところ、トロール網目サイズが不統 ーであるという問題はあるものの、ベントス、特にホヤ類は 1990年 代に比べ 2000年代は増加したが、魚類の量は増加しておらず、特 にカジカ科魚類の数は減少していた。これはベーリング海陸棚域で のベントス生物量の減少傾向とは異なる。

次に、ベーリング海に繁殖する表面採食性の海鳥(アカアシミツ ユビカモメ)と潜水性海鳥(ハシブトウミガラス)の採食行動の年変化 の調査も行われた。表面採食するアカアシミツユビカモメは主に海 盆域で採食し、2013年と2014年で採食海域は変化せず、血中スト レスホルモンレベルにも差がなかったが、主に陸棚域で潜水採食 するハシブトウミガラスでは、採食場所までの距離は2013年の方が 2014年に比べ遠く、陸棚斜面を含んだ海域で採食し、血中ストレス ホルモンレベルが高かった。これは、気候変化への生態系応答は 海盆域と陸棚域で違っており、ひいては高次捕食者の反応の違い にも現れることを示唆するだろう(Yamamoto et al., 2016)

3番目として、チャクチ海南部定点での動物プランクトン量の季節 変化と動物プランクトン食のナガスクジラの来遊時期との関係を、前 者は係留式多周波音響プロファイラーでの音響反応で、後者は同 時に設置した多周波音響プロファイラーで調べた。水温・塩分も測 定すると同時に、同地点の海氷密接度を衛星データから取得した。 鳴音は夏から秋(2012年:8月4日~10月20日、2013年:7月 25日~11月1日)に検出され、2013年の方が長期間であった。海 氷密接度との関係から、本種の回遊時期は海氷の融解日・結氷日 に影響されると考えられた。さらに、鳴音を応答変数、動物プランク トンの音響反応、水温、塩分、および年を説明変数とした GLMによ るモデルをつかったモデル選択の結果から、本種は、夏の海氷融 解とその後の水温上昇、および動物プランクトンの増加と共にチャ クチ海南部に来遊し、水温・塩分の低下と共に撤退しているという パターンが示唆された(Tsujii et al., 2016)。

ベーリング海・北極海における高次動物の生態記載

こうした海氷との関係に着目した研究以外にも、ベーリング海・北 極海における高次捕食者の餌および採食行動に関する研究が実施された。一つ目は、ベーリング海で2002年の夏と初秋にサンプリ ングされた、シロザケ Oncorhynchus keta (尾叉長 300-755 mmに該当する1398個体)の胃内容物を分析し、本種の餌生物に 関して、季節的、個体発生的、日周的な変動を調べた研究である。 夏期は、オキアミ、クラゲノミ、腹足類が胃内容物の大部分を占めて いたのに対して、初秋はコヒレハダカ Stenobrachius leucopsarus、 キタノホッケ Pleurogrammus monopterygius が重要な餌生物で ある事が明らかになった。餌消費量の顕著な日周差が見られ、午前 中に漁獲されたシロザケはコヒレハダカを捕食していたが、午後に 漁獲されたものは主にオキアミを捕食していた。餌生物の生活史や 日周鉛直移動によって、シロザケの食物は時間とともに変化するこ とがわかった(Sakai et al., 2012)。

二つ目に、海氷減少に対する反応は同属種でも異なるだろうと思われるので、プリビロフ島で繁殖するウミガラスとハシブトウミガラス の採食行動を比較した(Kokubun et al., 2016)。採食トリップ時間 や採食行動の日修正には差がなかったが、ウミガラスの方が潜水 深度のバリエーションが大きく、また魚を雛に持ち帰る傾向が強くこ れは血液の窒素安定同位体比が高いこととも一致した。ウミガラス の方が翼面荷重が小さく、水中での機動力の高さに関連していると 思われた。これが、亜寒帯・極域における個体数の長期な変動はウ ミガラスの方がハシブトウミガラスよりも大きいことの一部を説明する かもしれない。

ベーリング海のプリビロフ諸島で繁殖する飛翔性の海鳥アカアシ ミツユビカモメはもっぱらハダカイワシを食べるが、いつどうやって 食べているかわからなかった。小型の GPS ロガー、加速度計を装 着して、5 個体の行動軌跡と4 個体の加速度記録を得て、かれらの 採餌行動の特徴を調べた。アカアシミツユビカモメはおもに水深 1000m 以上の海盆域に出かけており、そこで中深層性の魚、ハダ



カイワシを潜ることなく捕食していた。アカアシミツユビカモメの捕食 行動は夜間に活発になっており、飛翔や休息に挟まれた捕食行動 の平均継続時間は約2.5分だった。ハダカイワシは夜間に表層近く に鉛直移動してくることが知られている。アカアシミツユビカモメは、 ハダカイワシの日周鉛直分布パターンに合わせて、夜間に採餌努 力を高くし、かつ採餌中には飛び回ったり水面で休んだりしながら、 短い時間でしか表層で利用することのできない中深層性のハダカ イワシを食べていると考えられた。

海鳥の羽根をつかった汚染モニタリングの試み

本研究では人間による生態系へのインパクトを調べるための手始 めとして、周年移動を追跡した海鳥個体の羽根の水銀濃度を調べ、 外洋における水銀汚染の空間パターンを推察する試みも行われた (Watanuki et al., 2015)。ハシボソミズナギドリをジオロケーター で追跡した結果(図 3.6.26 左)、非繁殖期(5-8 月)にはオホーツク 海南部から北海道周辺を利用する個体とベーリング海南東部を利 用する個体がいることがわかった。非繁殖期に生え変る最外側風切 り羽根の水銀濃度を調べたところ、オホーツク海・北海道個体の方 がベーリング海南東個体の3倍近かった(図 3.6.26 右)。これは北 太平洋の北西部はベーリング海に比べ水銀汚染が進んでいること を示唆するかもしれない。



図 3.6.26 (左) 2 個体のハシボソミズナギドリの越冬海域 (右)オホーツク海南部型北海道で越冬する個体(WEST)と、ベー リング海 南東海域で越冬する個体(EAST)、及び西から東に移動 する個体(MIX)の風切り羽の水銀濃度。 引用文献

- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Proshutinsky, A., Krishfield, R., Timmermans, M.-L., Toole, J., Carmack, E., McLaughlin, F., Williams, W. J., Zimmermann, S., Itoh, M., Shimada, K., 2009. Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations. J. Geophys. Res., 114, C00A10. doi:10.1029/2008JC005104.
- 3) Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F., Carmack, E., Nishino, S., Shimada, K., 2009. Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: Effects of ocean acidification and sea ice melt. Science, 326, 1098-1100. doi:10.1126/science.1174190.
- Nishino, S., Shimada, K., Itoh, M., Chiba, S., 2009. Vertical double silicate maxima in the sea-ice reduction region of the western Arctic Ocean: Implications for an enhanced biological pump due to sea-ice reduction. J. Oceanogr., 65, 871-883. doi:10.1007/s10872-009-0072-2.
- 5) Ardyna, M., Babin, M., Gosselin, M., Devred, E., Rainville, L., Tremblay, J.-É., 2014. Recent Arctic Ocean sea ice loss triggers novel fall phytoplankton blooms. Geophys. Res. Lett., 41, 6207–6212. doi:10.1002/2014GL061047.
- Springer, A. M., McRoy, C. P., 1993. The paradox of pelagic food webs in the northern Bering Sea-III. Patterns of primary productivity. Cont. Shelf Res., 13, 575–599.
- 7) Grebmeier, J. M., Bluhm, B. A., Cooper, L. W., Danielson, S. L., Arrigo, K. R., Blanchard, A. L., Clarke, J. T., Day, R. H., Frey, K. E., Gradinger, R. R., Kedra, M., Konar, B., Kuletz, K. J., Lee, S. H., Lovvorn, J. R., Norcross, B. L., Okkonen, S. R., 2015. Ecosystem characteristics and processes facilitating persistent macrobenthic biomass hotspots and associated benthivory in the Pacific Arctic. Prog. Oceanogr., 136, 92–114. doi:10.1016/j.pocean.2015.05.006.
- 8) Feder, H., Jewett, S., Blanchard, A., 2005. Southeastern Chukchi Sea (Alaska) epibenthos. Polar Biol., 28, 402–421.
- 9) Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Joussupov, V., Kosmach, D., Gustafssonet, Ö., 2010. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. Science, 327, 1246-1250. doi:10.1126/science.1182221.
- 10) Semiletov, I. P., Shakhova, N. E., Pipko, I. I., Pugach, S. P., Charkin, A. N., Dudarev, O. V., Kosmach, D. A., Nishino, S., 2013. Space-time dynamics of carbon stocks and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay of the Laptev Sea. Biogeosciences Discuss., 10, 2159-2204. doi:10.5194/ bgd-10-2159-2013.
- 11) Kroeker, K. J., Kordas, R., Crim, R., Hendriks, I. E., Ramajo, L., Singh, G. S., Duarte, C. M., Gattuso, J.-P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. Global change biology 19(6):1884-1896
- 12) Steinacher, M., Joos, F., Frölicher, T.L., Plattner, G.-K., Doney, S.C., 2009. Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. Biogeosci., 6, 515–533.
- 13) Steiner, N. S., Christian, J. R., Six, K. D., Yamamoto, A., and Yamamoto-Kawai, M., 2014. Future ocean acidification in the Canada Basin and surrounding Arctic Ocean from CMIP5 earth system models, J. Geophys. Res. Oceans, 119, 332–347, doi:10.1002/2013JC009069.
- 14) Popova, E.E., Yool, A., Aksenov, Y., Coward, A.C., Anderson, T.R., 2014. Regional variability of acidification in the Arctic: a sea of contrasts. Biogeosci., 11, 293-308.
- 15) Mathis, J.T., Cross, J.N., Bates, N.R., 2011. Coupling primary production and terrestrial runoff to ocean acidification and

carbonate mineral suppression in the eastern Bering Sea. J. Geophys. Res., 116, C02030, doi:10.1029/2010JC006453.

- 16) Anderson, L.G., Tanhua, T., Björk, G., Hjalmarsson, S., Jones, E.P., Jutterström, S., Rudels, B., Swift, J.H., Wåhlstöm, I., 2010. Arctic ocean shelf–basin interaction: an active continental shelf CO2 pump and its impact on the degree of calcium carbonate solubility. Deep Sea Res., 57(7), 869-879.
- 17) Chierici, M., Fransson., A., 2009. Calcium carbonate saturation in the surface water of the Arctic Ocean: Undersaturation in freshwater influenced shelves, Biogeosciences, 6(11), 2421–2431.
- 18) Azetsu-Scott, K., Clarke, A., Falkner, K., Hamilton, J., Jones, E.P., Lee, C., Petrie, B., Prinsenberg, S., Starr, M., Yeats, P., 2010. Calcium carbonate saturation states in the waters of the Canadian Arctic Archipelago and the Labrador Sea. J. Geophys. Res., 115(C11).
- 19) Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., 2011. Effects of ocean acidification, warming and melting of sea ice on aragonite saturation of the Canada Basin surface water. Geophys. Res. Lett., 38, doi:10.1029/2010GL045501.
- 20) Miller, L. A., Macdonald, R. W., McLaughlin, F., Mucci, A., Yamamoto-Kawai, M., Giesbrecht, K.E., Williams, W. J., 2014. Changes in the marine carbonate system of the western Arctic: patterns in a rescued data set, Polar Research, 33, 20577.
- 21) Mathis, J.T., Cross, J.N., Bates, N.R., 2011. Coupling primary production and terrestrial runoff to ocean acidification and carbonate mineral suppression in the eastern Bering Sea. J. Geophys. Res., 116, C02030, doi:10.1029/2010JC006453.
- 22) Mathis, J. T., Cooley, S. R., Lucey, N., Colt, S., Ekstrom, J., Hurst, T., Hauri, C., Evans, W., Cross, J. N., Feely, R. A., 2015. Ocean acidification risk assessment for Alaska's fishery sector,
- 23) Jutterström, S. and Anderson, L. G., 2005. The saturation of calcite and aragonite in the Arctic Ocean, Mar. Chem., 94, 101–110, doi:10.1016/j.marchem.2004.08.010.
- 24) Juranek, L. W., Feely, R. A., Peterson, W. T., Alin, S. R., Hales, B., Lee, K., Sabine, C. L., and Peterson, J., 2009. A novel method for determination of aragonite saturation state on the continental shelf of central Oregon using multi - parameter relationships with hydrographic data. Geophysical Research Letters, 36(24).
- 25) Bates, N.R., Orchowska, M.I., Garley, R., Mathis, J.T., 2013. Summertime calcium carbonate undersaturation in shelf waters of the western Arctic Ocean–how biological processes exacerbate the impact of ocean acidification. Biogeosciences, 10(8), 5281-5309.
- 26) Blanchard, A. L., Parris, C. L., Knowlton, A. L., and Wade, N. R., 2013. Benthic ecology of the northeastern Chukchi Sea. Part I. Environmental characteristics and macrofaunal community structure, 2008–2010. Continental Shelf Research, 67, 52-66.
- 27) Ries, J. B., Cohen, A. L., and McCorkle, D. C., 2009. Marine calcifiers exhibit mixed responses to CO2-induced ocean acidification. Geology, 37(12), 1131-1134.
- 28) Wood, H. L., Spicer, J. I., Widdicombe, S., 2008. Ocean acidification may increase calcification rates, but at a cost. Proc R Soc B 275:1767-1773
- 29) Ohashi, R., A. Yamaguchi, K. Matsuno, R. Saito, N. Yamada, A. Iijima, N. Shiga, and I. Imai, 2013. Interannual changes in the zooplankton community structure on the southeastern Bering Sea shelf during summers of 1994–2009. Deep-Sea Res., 94, 44-56. doi:10.1016/j.dsr2.2013.03.018.
- 30) Hop H, Gjøsæter, H.,2013. Polar cod (Boreogadus saida) and capelin (Mallotus villosus) as key species in marine food webs of the Arctic and the Barents Sea. Mar Biol Res 9:878–894.
- 31) Kattner G, Hagen W, Lee RF, Campbell R, Deibel D et al.,2007. Perspectives on marine zooplankton lipids. Can J Fish Aquat Sci 64:1628–1639.

32) Deibel D, Saunders PA, Acuna J-L, Bochdansky, Shiga, N., Rivkin R.B.,2005. The role of appendicularian tunicates in the biogenic carbon cycle of three Arctic polynyas. In: Gorsky G, Youngbluth MJ, Deibel D (ed) Response of Marine Ecosystems to Global Change: Ecological Impact of Appendicularians. Contemporary Publishing International, Paris, 327–356. Ⅲ. 北極海航路の利用可能性評価につながる海氷分布の将来予測

研究課題7 研究代表者:島田浩二

1. 海氷変動をもたらす基礎メカニズム

執筆者:島田浩二 工藤めぐみ 吉澤枝里

(1) アイス・アルベドフィードバック、メルトポンドの再考 オホーツク海や南極海など、氷盤サイズの小さな海氷群から なる氷海では古典的なアイス・アルベドフィードバックを中心 に夏の海氷減少プロセスを論ずることは有効であろう。しかし、 北極海の海氷は、氷盤サイズが大きく、氷盤間の開水域での短 波放射吸収により氷盤の縁が側面融解するというよりも、海氷 上に存在するメルトポンドの面積拡大によるフィードバックが 海氷の融解速度(減少速度)を支配していると考えられる。 図 3.7.1に1980年代(黒)、1990年代(青)、2000-2006年(緑)、 2007-2014年(赤)の4つの期間に対し、総海氷面積に対する 海氷面積変化率(%/day)を示す。2007-2014年の期間につい ては、北極海内部での融解域である6月初旬から9月上旬の海 氷面積減少率が他期間の2倍近くにもなっていることがわかる。 2007年の海氷激減以降、北極海の主たる海氷は一年氷(薄い氷) に置き換わり、多年氷(厚い氷)より融けやすいためであると 定性的に説明されてきた。注目すべきは、8月まで続く大きな 減少率の持続性にある。一般に8月第2週に入ると、海氷域の 日平均気温は氷点下になり、海氷上に存在するメルトポンドの 表面は凍結する。2007-2014年の他期間との質的な違いは、日 平均気温が氷点下になっても、海氷面積が減少するプロセスが 始動したことにあると考えられる。



図 3.7.1 総海氷面積に対する海氷面積の変化率(%/day)。

SHEBA(1997-1998年)以降、太平洋側北極海の海盆域に おいて長期に渡る氷上観測は行われてこなかった。2014年の韓 国砕氷船アラオン航海では、5日間ではあるが、複数日、同じ 場所に留まる機会に恵まれた。そこで、複数の水温ロガー (SBE56)を用い、ポンド内の水温プロファイル(鉛直分解能は 約 2cm)を、上層と下層には水温電気伝導度計(SBE37)を配 置し、2 レベルで塩分を観測した。水温・塩分成層の結果を図 3.7.2 に示す。「塩ポンド(図 3.7.2 左)」は、一年氷が重なっ ていない領域に存在するポンドであり、大きな塩分成層を呈し ている。これは、ブライン・チャンネルが残存している一年氷 では、海氷下の海とポンドの間で僅かではあるが、水交換がな されていることによる。塩分成層が密度成層を支配しているた め、メルトポンド表面の氷を透過する日射により、ポンド内の 水は温められるが、最終的に水温極大はポンド上層に形成され る。この水温極大層は、ポンド表面近くの側面融解を促進し、 ポンド面積の拡大をもたらす。一方、「淡水ポンド(図 3.7.2 右)」は、海氷が重なったリッジ周辺に存在し、ポンドは周囲 の海面レベルよりも高い位置に存在するため、塩水の浸み込み は起こっておらず、ポンド内の水の塩分は、一年氷の塩分値(ほ ぼ淡水に近い)を示していた。この場合、日射によりポンド内 の水は温められるが、4℃以下の水温であるがゆえに、温かい 水ほど密度が大きく、水温極大は、ポンド下層に形成される。 その結果、淡水ポンドでは、側面海氷融解よりもメルトポンド の底での融解が卓越し、海氷が融解するとしても、面積拡大は あまり起こらない。実計測はしていないが、夏を越す際にブラ イン・チャンネルが塞がれ再凍結した多年氷の場合も、リッジ 上に分布する「淡水ポンド」と同じ性質があると考えられる。 つまり、フラットでブラインチャンネルの痕跡が残る一年氷が 支配的になった現在の北極海では、メルトポンド表面が凍結す る8月以降でも、大きな海氷面積減少率は持続できるようにな ったため、9月の海氷面積最小時の面積は著しく小さくなった と考えられる。



図 3.7.2 メルトポンド(左「塩ポンド」、右「淡水ポンド」) の水温成層(上)と塩分(下)。

(2) 外洋域における海氷厚係留観測およびデータの再考

執筆者:島田浩二、工藤めぐみ、吉澤枝里

北極海において氷厚計(IPS等)を用いた氷厚観測が行われ ているが、開放水面が頻繁に捉えられる沿岸ポリ二ア域を除き、 その観測データは、真の海氷厚値を示していないとの印象があ った(例えば、Krishfield et al., 2014)。長期間に渡って開放 水面が捉えられない氷海域では、開放水面からの偏差としてキ ール深度を求めることができず、センサーと海氷下面間の音波 の伝播時間で求めなければならない。通常、海氷との係留系セ ンサーの接触、センサーの亡失を回避するため、最上部の係留 センサーは 50m以深の深度に設置されることが多い。しかし、 50m深付近は、太平洋夏季水の中心的な存在深度であり、その 間欠的な移流により水温の季節変動がある。また、表層混合層 0-20mは水温および塩分の季節変動が大きい。それらの影響に より、上層 50mの平均音速の季節変動は約1%となる(音速変 動は約15m/s程度)となる。固定音速値を用いて、キール深度 を求める場合、その誤差は、センサー(氷厚計)の設置深度の 約1%になる。50mにセンサーが設置されている場合、その後 差は 50cm にも達する。本事業の実施期間、太平洋側北極海域 に係留系を設置し、水温塩分や海氷速度等に加えて、音響式ド ップラー流速プロファイラー (ADCP) による海氷厚観測を実 施した。その際に、ADCP と表層混合層間に水温ロガー、電気 伝導度水温計を取り付け、音速の直接観測を行い、音速変動を 反映させた正確な海氷厚変動を求めた。



図 3.7.3 係留系 CP13 地点における海氷厚。赤: ADCP によ る実測値。音速補正あり。青: AMSR・2 輝度温度データより、 Krishfield et al..2014 のアルゴリズムにより計算した海氷厚。

図 3.7.3 に、係留系 CP13 (チャクチ海台北部)の補正後の海 氷厚時系列データを示す。赤線が実測値で、青線は Krishfield et al. (2014)による衛星観測データを利用したアルゴリズムにて 係留系地点の海氷厚を算出したものである。まず、実測値とこ の衛星アルゴリズムを用いた海氷厚値では、変動の位相がずれ ていることが分かる。これは、海域により太平洋夏季水の到達 タイミングがずれること、表層混合層の水温・塩分の時間変動 が異なることによる音速変動が反映されていないことに起因し ている。この位相ずれによる、衛星観測値の誤差は12月から4 月には約1mにも達している。ノースウインド海嶺より東のカ ナダ海盆東部海域では上述の衛星観測による海氷厚データはあ る程度は利用できるものの、ノースウインド海嶺近傍のチャク チ海台では、真値との間に大きな差があることを認識しなけれ ばならない。

本事業の係留系観測で得られた正確な海氷厚データを用い、 ①海氷集積の無い状況

②衛星輝度温度データから一年氷と同定できる場合 に対して、衛星データを用いた海氷厚アルゴリズムを開発すれ ば、(具体的には、近似曲線を求めるのみ)、時間や空間に依 存しない一年氷の海氷厚マッピングデータが得られる。ただし、 この方法でも、海氷が積み重なっている場合には、海氷表面の 放射特性と厚さの間の関係は失われるため、海氷厚を同定でき ない。つまり、積み重なった海氷に対しては、第2章IV.戦略研 究目標4の1で述べた、海氷集積効果推定のアルゴリズムを併 用することにより、積み重なった一年氷であっても、海氷厚の 推定は可能になるはずである。尚、海氷集積効果推定のアルゴ リズムは、海氷収束による厚さの増加率を求めるものとした。 従って、このアルゴリズムに具体的な海氷厚さを代入すること により、速やかに海氷厚モニタに向けた併用が行える準備を整 えている。

その他、日毎の衛星海氷厚データと対話のできる日平均海氷 厚のみならず、ラフティングに伴う凹凸等が反映される海氷厚 の標準偏差等の統計量が、融解期における海氷の寿命に大きく 関係していることなどが分かった。また、本事業では、これま で、定点係留観測では初となる 20m以浅の表層混合層まで係留 索を立ち上げる試みを行った。但し、海氷接触時には、接触深 度以浅の浮力体をリリースし、浮力体リリースまでのデータは 確保できる工夫を凝らしたものである。実際、CP13 係留系に ついては、2013 年の設置後、2015 年 4 月下旬に海氷と接触し たが、浮力体のリリースがされ、全てのセンサーの回収に成功 した。

2.海氷生産量マッピングと沿岸現場観測

執筆者:大島慶一郎 深町 康 田村岳史 平野大輔 柏瀬陽彦

(1) チャクチ海沿岸ポリニヤ域の係留観測

執筆者:深町康

本事業の実施期間、冬季にポリニヤが形成されるチャクチ海 沿岸域の2地点に超音波氷厚計や超音波ドップラー流速プロフ ァイラーなどからなる係留系を設置し、海氷厚・海氷漂流速度、 海洋流速・水温・塩分を連続的に観測した。

この係留観測の主な目的は、連続的な観測データが存在しな かったこの海域における海氷厚の実態を明らかにすることであ り、2009-13年の陸岸から約25kmの地点でのデータからは、 各年の最大 draft (喫水下の海氷厚)は~23-27mに達するこ と、この海域における一冬の期間の熱力学的な海氷厚の成長は 1.5-2m程度であることが明らかになった。また、ポリニヤの 形成やそれに伴う過冷却水生成の実態についても明らかになっ た(Ito et al., 2015b)。

この係留観測のもう一つの目的は、下記の(2)にある人工衛 星データによる薄氷厚の推定アルゴリズムの検証をすることで あった。図3.7.4 は超音波氷厚計によって1秒毎に得られた海 氷厚の値とマイクロ波放射計 AMSR によるデータから推定さ れる薄氷厚の推定値を用いて熱収支計算で求められる日平均の 海氷生産量を比較したものである。両者は良く一致しており、 AMSR による薄氷厚の推定およびそれに基づく海氷生産量の 見積もりの妥当性を示している。



図3.7.4 AMSR データから推定された薄氷厚から算出した海氷生産量 と、超音波氷厚計による1秒毎の海氷厚から算出した海氷生産量の一日 平均での比較。点線は主成分分析による近似直線であり、a は傾き、b は 切片、r は相関係数である。

(2) 人工衛星データのアルゴリズムの開発と海氷データセット の作成

執筆者:大島慶一郎

本研究ではまず、人工衛星マイクロ波放射計 AMSR で観測 される偏波比から薄氷厚を推定するアルゴリズムを開発した (Iwamoto et al., 2013)。これに基づいて、北極海全域で 2002

~2011年までの約9年間で一日毎6.25×6.25kmの分解能の海 氷厚データセットを作成した。さらに、大気再解析データセッ トと組み合わせた熱収支解析により海氷生産量のデータセット を作成した。図 3.7.5 は、9年間平均の年間積算の海氷生産量 をマッピングしたものである。海氷生産は、ほとんど沿岸ポリ ニヤで行われていることがわかる。多量の海氷生産があると多 量のブライン(高塩分水)の排出により高密度水が作られるた め、北極海の海洋構造を決める重要な要素となる。本研究では、 チャクチ海沿岸ポリニヤを検証サイトとして、係留観測(前述 2-(1)項参照)による高時間分解能の氷厚データを用いた現場 との比較・検証も行っている。係留データと AMSR を用いて 見積もった海氷生産量(熱フラックス)はよく一致しており、 AMSR からの海氷生産量の見積もりの妥当性を示している。こ のような検証を行った研究は他に例がない。海氷生産量は海洋 への塩フラックスにも換算でき、作成したデータは数値モデル 研究の比較・検証・境界条件データとしても有用なデータセッ トとなっている。例えば、後述 2-(4)、や 3-(2)、3-(3)項の モデル研究などにも利用されている。これら薄氷厚及び海氷生 産量のデータセットは、北極域データアーカイブへ提出され、 一般公開されている。



図 3.7.5 AMSR と熱収支計算から見積もった年間積算海氷生産量(海 氷の厚さに換算。Iwamoto et al., 2014)。

(3) 北極海氷変動の熱収支解析

執筆者:柏瀬陽彦

近年北極海が季節海氷域化を伴う急激な変化を示しており、 その変動メカニズムとして海氷と海面でのアルベドの差によっ て生じるフィードバック(海氷-海洋アルベドフィードバック)

の影響が注目されている。衛星を用いた海氷観測からは、特に 太平洋セクターにおいて海氷密接度の減少がみられ、それに伴 って海洋表層に吸収される日射が増加傾向にあることが示され ているものの、詳細な物理プロセスは明らかになっていない。 そこで本研究では衛星観測による海氷データ(密接度、氷厚、 漂流速度、メルトポンド分布など)を組み合わせて北極海太平 洋セクター(図 3.7.6、扇型領域)でのフィードバックの海氷後 退の変動や近年の激減への影響について評価をおこなった。図 3.7.6 赤線は海氷域(密接度 30%以上)において開水面から海 洋表層に吸収される熱量であるが、その経年変動が氷厚を1m として計算した融解量(黒線)の変動と良い一致を示している。 この海域での海氷後退は流出(灰線)の影響が小さく大部分が 融解によるものであり、それはフィードバックの前提条件が満 たされていることを意味する。さらに、融解が始まる5月頃の 海氷発散(青線)はその後の融解量と1-2ヶ月のラグで有意な 相関を持つことから、初夏の海氷発散による密接度低下をきっ かけとしたフィードバックの効果により、海氷融解が促進され ていることが示唆される。また、これらの変動はすべて2000 年以降に有意な増加トレンドが見られており、フィードバック の強化が近年の激減に寄与していることも示唆される。以上の 結果は漂流速度による海氷後退の予測可能性も示唆しており、 実際に 2000 年以降の海氷後退をごく簡略なモデルで再現する ことにも成功した。



図 3.7.6 (左上) 2012 年 7 月のメルトポンド分布。(左下) ICESat 観測 による解析領域内での氷厚分布。(右)海氷域における熱収支(赤線)、 海氷融解量(黒線)、流出量(灰線)、および初夏の海氷発散(青線) の経年変動。比較のため海氷体積はそれを融解するのに必要となる熱量 の形で示す。

(4) アラスカ沖バロー沿岸ポリニヤの生成・維持プロセス

執筆者:平野大輔

冬季、アラスカ沖に形成されるバロー沿岸ポリニヤ(Barrow Coastal Polynya: BCP)は、風や海流による海氷発散によって形成される潜熱ポリニヤとして考えられてきたが、近年の研

究(Ito et al., 2012, 2015b) ではポリニヤ形成時に高温水塊が 流入することによって海氷生産が抑制される可能性も示唆され ていた。そこで、BCP イベント時における海洋内部の状況につ いて着目し、係留観測(水温・塩分・流向流速)・衛星観測

(AMSR-Eデータに基づく海氷密接度・海氷生産量)・大気再 解析データ(ERA-Interim、10m 風速・海面気圧)、および数 値モデル実験(トレーサー実験)の異なる複数の手法を融合し て BCP の特徴を調べた。BCP が潜熱ポリニヤから顕熱ポリニ ヤへ移行する一連の素過程(図 3.7.7)は(1)冬季、アリュー シャン低気圧とボーフォート高気圧の気圧配置により、北東風 (バロー峡谷に平行、バロー付近では沖向き)が連吹すると、 海氷発散による潜熱ポリニヤが形成され、その後 BCP 域に高 温水(主に大西洋起源水;AW)の湧昇がもたらされる、(2) 湧昇に伴い形成された傾圧的な up-canyon flow が次第に強化 される、(3)鉛直混合が促進(鉛直シアが強化)され、下層 の高温水層から表層へと海洋熱が輸送される、(4)表層への 海洋熱輸送により効果的に海氷成長がなされない顕熱ポリニヤ へと移行し、海氷生産の抑制および停止が生じる。この一連の プロセスは数値モデルでもよく再現された。また、高温水湧昇 による熱力学的な影響として、2009/10シーズンでは海氷生産 が10-30%抑制されたと推定された。これには海氷底面融解へ の影響は含まれていないので、実際にはさらなる熱力学的影響 が見込まれる。

本研究では、この海域で強い北東風が吹くと海氷発散による 潜熱ポリニヤ形成(海氷生産)と共に、高温水湧昇によって顕 熱ポリニヤが形成(海氷生産抑制)されるプロセスを伴い、一 つのポリニヤイベントにおいて(強い北東風という同一の原因 によって)潜熱・顕熱ポリニヤの双方の特徴を併せ持つ"ハイブ リッド"ポリニヤであることを明らかにした。



図 3.7.7 バロー沖に形成される"wind-driven hybrid latent and sensible heat polynya"の模式図 (Hirano et al., 2016)。

3.北極海の循環と物理過程のモデリング

執筆者:小室芳樹 川崎高雄 松村義正

(1) 低解像度モデルを用いたパラメタリゼーション開発

執筆者:小室芳樹

気候変動研究等に用いられる低解像度全球海洋モデルにお いて、北極海の海氷・海洋成層構造の再現性は改善すべき点の 一つである。北極海領域モデルを用いた過去の研究1)では、モ デルが陽に表現できない混合過程を表す背景鉛直拡散を全層に 渡って極めて弱くすることで再現性が向上することが示されて いる。しかしこの方法は全球深層循環を非現実的に弱めてしま うため、全球モデルには適用できない。本研究では、海洋大循 環モデル (COCO) を用いた全球標準実験をベースに、表層の み背景鉛直拡散を極めて弱くし、かつ海氷が存在する場合に風 波の砕波に伴う混合の効果を抑制する、混合抑制パラメタリゼ ーションを導入した。その結果、これまで非現実的に弱かった 北極海表層の鉛直成層が改善された(図 3.7.8a)。この成層改 善の主要な原因は、標準実験で亜表層に最大を持つような分布 であった河川起源水が、観測結果2)と同様表層にとどまって分 布したことにあった(図 3.7.8b)。河川起源水分布の改善は従 来の気候モデルの北極海における共通した課題であり、この混 合抑制パラメタリゼーションが COCO だけでなく一般の低解 像度海洋モデルでも有用であることを示唆している。また、こ の混合抑制パラメタリゼーションは北極域以外の海域にほとん ど影響を与えず(図省略)、したがって全球モデルへの導入に 適したパラメタリゼーションであることを確認した。



図 3.7.8 (a) 北極海上層の深さ別平均塩分の気候値からの差。(b) ベー リング海峡 (BS) から北極点 (NP) を通りフラム海峡 (FS) へ抜け る断面 (地図上の白線) での河川起源水含有率。

(2) 北極海から流出する低塩分水がラブラドル海深層水形成に 及ぼす影響

執筆者:川崎高雄

ラブラドル海での深層対流を伴う深層水形成は全球海洋熱 塩循環の起点の一つであり、気候をコントロールする重要な要 素である。ラブラドル海へは、メキシコ湾流を起源とする高温 水と北極海起源の低塩分水の2種類の低密度水が流入しており、 それらのもつ浮力が渦によってラブラドル海中央部での冬季海 面冷却に伴う深層対流の規模を制御している。高温なメキシコ 湾流起源水の浮力による深層対流抑制について評価した先行モ デリング研究は存在するが、低塩分の北極海起源水はモデルで の再現が困難であり、その深層対流抑制に対する寄与の見積も りはされていなかった。そこで、本研究ではラブラドル海での 渦活動を陽に表現できる高解像度海洋大循環モデルを用いて、 メキシコ湾流起源水と北極海起源水のそれぞれの寄与を定量的 に評価することを目的とした。

高解像度モデルによって衛星観測にみられるラブラドル海 での渦活動が再現された。メキシコ湾流起源の高温水に加え、 これまでの先行モデリング研究では表現できなかった北極海起 源の低塩分水がよく再現された(図3.7.9)。これら低密度水の ラブラドル海中央部への渦による輸送(図3.7.9)が冬季深層対 流に影響を与え、その水平規模と深度ともに従来のモデルより も現実的に再現された。浮力収支解析によって、ラブラドル海 中央部に対する、北極海起源水とメキシコ湾流起源水の浮力寄 与について定量的に調べた。その結果、渦が輸送する北極海・ グリーンランド氷床起源の低塩分水が、ラブラドル海での深層 対流の抑制に十分有意な寄与を持つことが示された。この結果 は、北大西洋における深層水形成が、大西洋・北極海間の水交換 に強く影響を受けることを示唆する。



図 3.7.9 ラブラドル海での海面塩分(カラー)と水平流速(矢印)のスナッ プショット。北極海起源の低塩分水がラブラドル海中央部へと渦によっ て輸送されている。

(3) 大西洋水の流入と循環に関する高解像度モデリング

執筆者:川崎高雄

北極海の海洋内部において大西洋水は最も高温の水塊であ り、その北極海海氷に対する影響は大きい。北極海への大西洋 水の流入口としてフラム海峡とバレンツ海が挙げられる。フラ ム海峡では幅の小さい西スピッツベルゲン海流が大西洋水を北 極海内部へと輸送する一方、渦によってその海流の水温が低下 するなど、小スケールの物理現象がその熱輸送量に影響を与え ている。また、バレンツ海を通じた大西洋水の流入とその変質 過程も気候モデルなどの低解像度モデルでは再現できない。そ こで本研究では、大西洋水の流入量・深さ・経路や渦活動など を適切に再現できる高解像度モデルを構築し、北極海への熱輸 送量とその経年変動要因について調べた。

フラム海峡では西スピッツベルゲン海流を通じた大西洋水 の流入がモデルによって適切に再現された(図 3.7.10)。フラ ム海峡周辺に見られる海洋中規模渦は衛星観測結果と整合的で あった。熱輸送に対する渦の寄与は平均流に比べて無視できる ほど小さかった。バレンツ海においても Barents Sea Opening (BSO)を通じた大西洋水の流入が再現され(図 3.7.10)、熱 フラックスも船舶観測やインバース法を用いたモデルの結果と 定量的に一致した。モデルで計算されたバレンツ海内での大西 洋水の流路は地形に捕捉され、下流に向かって海面冷却と海氷 融解による低温・低塩分化が見られた(図 3.7.10)。

フラム海峡を通して北極海に流入する熱量の経年変動が North Atlantic Oscillation (NAO)やシベリア高気圧といっ た総観規模大気場の経年変動によってもたらされることを示し た。また、BSOを通してバレンツ海に流入する大西洋水につい ても、総観規模大気変動が熱流入量の経年変動を支配すること を示した。さらに、バレンツ海への大西洋水の流入量の変動は バレンツ海の海氷面積変動に重要であることを示した。



図 3.7.10 モデルで計算された表層(0-300m)での 20 年平均(a)ポテンシ ャル水温と(b)塩分分布。フラム海峡とバレンツ海を通じた北極海への 大西洋水流入を再現。

(4) 結氷に伴う微小物理過程のモデリング

執筆者:松村義正

結氷初期の海氷形態は海況により大きく異なる。海面が穏や

かな場合は一様な薄氷が徐々に成長するのに対し、強い海上風 の影響で海面が荒れた状態にある場合は、過冷却となった海水 中でフラジルアイスと呼ばれる微小な結晶がまず形成され、そ れが徐々に集積してグリース状の海氷・海水混合物をなす。前 者に比べ後者は海水が大気に直接晒される状態が長く保たれる ため、大気海洋熱交換を妨げる効果が低いと考えられるが、既 存の海氷海洋結合モデルや熱収支解析においてこのような海氷 形態の差異は十分に考慮されていなかった。そこで新たに非静 力学海洋モデルに粒子追跡法を組み込んだ Euler-Lagrange 型 混相流モデルを開発し、これを用いてフラジル結晶を粒子とし て扱う新奇的な海洋海氷結合モデルを構築した。このモデルは フラジル結晶の生成・成長および融解・消滅過程とこれに伴う 淡水・潜熱の収支と、フラジル結晶が持つ浮力が海水の運動に 与える影響を陽に扱うことができる。厳冬期の沿岸ポリニヤを 想定した理想化数値実験により、強い海上風存在下におけるフ ラジルアイスを伴う対流(図 3.7.11)が、海氷生成初期段階で の大気海洋間熱交換および正味の海氷生産量に与える影響を定 量的に示した。また沿岸ポリニヤでの係留観測でしばしば検出 される亜表層でのポテンシャル過冷却水の形成に、海面付近で 析出したフラジルが対流により下方に輸送され融解することに よる潜熱輸送が重要であるとする新たなメカニズムを提示した

(Matsumura and Ohshima, 2015) 。本研究で開発した粒子 追跡による混相流モデルは汎用的であり、海水中の堆積物粒子 のモデル化にも応用できる。海面での冷却によるフラジル粒子 の生成・輸送・消滅過程と海底からの堆積物粒子の浮上・輸送 過程を同時に扱う数値実験を実施し、沿岸ポリニヤでの海氷生 成時に、巻き上げられた海底堆積物が対流により表層まで輸送 され、海氷に取り込まれる現象の再現に成功した。



図 3.7.11 数値モデルによるフラジル粒子の生成・輸送過程の様子。色 はフラジル粒子集積率、領域は一辺 64 m の立方体様、水平周期境界。

4. 長期海氷予測システムの開発

執筆者:石井正好

気候モデルを用いた中高緯度における気候の中長期予測を 成功させるためには、北極周辺の大気ならびに海洋・海氷変動 のメカニズムの理解と、予測のための高精度な初期値化が重要 であると考える。本課題では、地球温暖化予測に適用された気 候モデルに、海洋ならびに大気の観測データを同化して、過去 の事例について各種の海氷予測実験を実施した、また、気候予 測に用いられる気候モデルを高精度に初期値化するために、ア ンサンブルカルマンフィルタにより大気、海洋、海氷の多様な 観測データを同時に扱うことのできる同化スキームを開発した。

実際の観測データに基づく海氷再現・予測実験をいくつかの 初期値化手法を試みながら実施した。大気データを同化するこ とで海氷の年々変動が良く再現され、このことによる海氷予測 精度の向上も確認された。また、海氷の予測可能性には季節依 存性があることが指摘されており、本課題の実験では、夏季か ら開始した予測は2季節ほど予測可能で、冬季の海氷の状態は、 初期値の季節によらず予測しやすいという結果が得られた(図 3.7.12)。近年の海氷減少トレンドは、気候モデルの温暖化気 体等の外力を適切に与えることで長期的に予測可能性であるこ とも分かった。

開発したアンサンブルカルマンフィルタに基づくデータ同化 システムは、気候モデルによる長期の気候再解析を効率的に実 施できるものである。様々な種類の観測データを容易に気候モ デルに同化できる点は、多くの課題が残る北極域研究では有用 なものと考える。本課題では、気圧と水温の地表面での観測デ ータを主に使用した気候モデルの初期値化を先ず試みて、海氷 変動の再現性に注目した。図 3.7.13 に示したとおり、地表面気 圧のみの大気データを同化したのにもかかわらず、北極域周辺 の大気循環がアンサンブルカルマンフィルタにより適切に再現 され、海氷変動の再現性も向上したことが分かる。このシステ ムに海氷データ同化を行うスキームを取り込む高度化の作業も 進めた。

当該研究期間中実施された、北極域における季節から年々変 動の予測可能性に関わる国際プロジェクト(APPOSITE)に参 加した。共通の実験プロトコルによる理想的条件下における予 測結果を相互比較するものであったが、その中で2000年相当 の温暖化条件下で長期間気候モデルを積分し、モデル気候値を 理解するための実験も実施された。後者の実験出力から得られ た海氷の長期変動を解析して、気候の内部変動のみによっても、 2007年に観測されたような急激な海氷減少が現れることが分 かった(図 3.7.14)。この出力の解析をさらに進めることで、 海氷変動メカニズムの理解に貢献できると考え、研究を進めた。



図 3.7.12 上)7月初期値の3ヶ月先の予測。黒は観測、赤と緑はそれぞ れ同化あり無しモデル実験、青は予測。下)1月、4月、7月、10月の それぞれの初期時刻毎に計算した、海氷面積偏差のアノマリー相関(1 ならば予測は完全)。横軸はリードタイム(月)。海氷減少トレンドを含 む場合(左)と含まない場合(右)を示す。



図 3.7.13 再現された海氷変動の相関係数の地理的分布。海洋の水温と 塩分データのみを同化した場合(左)と海面気圧データも併せて同化し た場合(右)。海氷データは同化していない。



図 3.7.14 2000 年の温暖化条件下で長期積分したときの 8 月および 9 月の北極海氷域の時間変化(上:横軸の単位は年だが、気候強制力固定で行う実験のため、現実の特定年とは対応しない)と海氷最大年と最小年における海氷密接度分布(下)。

5. 短期·中期海氷分布予測

執筆者:木村詞明 小野 純

(1) 短期予測

執筆者:小野純

本課題では、数日から1週間先の海氷分布を予測するために、 プリストン大学で開発された海洋モデル POM に、海氷の力 学・熱力学過程を計算するコードを組み込んだ海氷海洋結合モ デルを開発・改良し、それを用いた一連の数値実験を実施した。 海氷力学モデルには、一般的に使われる弾粘塑性体モデルに、 氷縁付近で重要になる氷盤衝突レオロジーを独自に組み込んだ ものになっている。また、海氷移動表現には Semi-Lagrange 法を導入し、氷縁位置の精度を高めている。船舶の航行を考え た場合、氷縁付近の精度を上げることは、極めて重要なことで ある。

使用したモデルは水平解像度が25kmの中解像度北極海全域 モデルと2.5kmの高解像度領域モデルである。両モデルの境界 条件(表面駆動力)には、ヨーロッパ中期予報センターで提供 している大気再解析データ(ERA-Interim)を使用した。まず、 水平方向境界条件の不確かさの少ない、北極海全域モデルを 1979~2013年まで駆動して、モデルの性能を評価・確認した。 その結果、海氷域面積の季節および経年変化を高精度で再現し たが、その空間的特徴および氷縁位置の精度は十分なものでは なかった。

そこで、北極海全域モデルの計算結果を水平方向境界条件と して、北極航路域に特化した高解像度領域モデルを複数の領域 で作成し、ロシア側およびカナダ側の航路域に適用した。高解 像度モデルでは、スケールの細かい海氷および氷縁付近に発生 する渦に伴う海氷ー海洋相互作用が表現されたことにより、全 域モデルの結果よりも海氷域面積が後退する様子を高精度で再 現できるようになった(図3.7.15)。次に、各国の気象機関が 提供している気象データ (TIGGE) を用いて、融解期における 5日予測の可能性を調べた結果、氷縁誤差は気象データによっ て差があるものの12km程度であった(図3.7.16)。これは、 本研究の目的である氷縁誤差±10kmに近い数値であり、ほぼ目 標を達成できたと言える。また、7気象機関の中で日本の気象 庁 (JMA)の大気データでモデルを駆動した結果が最も良く海 氷分布を再現することもわかった。ただし、対象年や海域によ って結果が異なる可能性があるため、複数の事例で調べ、より 定量的な議論をする必要がある。

総じて言えば、この課題項目について当初設定した目標が計 画通り達成され、次のステップへの確かな指針が得られたと言 える。



図 3.7.15 解像度の異なる数値モデルによる海氷域後退の再現性の比較。



図 3.7.16 高解像度モデルによる 2015 年 7 月 20 日からの海氷 5 日予 測で得られた氷縁誤差。ここで、氷縁誤差とは、海氷密接度 15%の等 値線の観測値と予測値の間の面積を予測値の長さで割ったものであり、 観測と予測の氷縁位置の差の平均値になる。使用した各国の気象機関は CMA:カナダ、CMC:中国、ECMWF、JMA:日本、FMD:フラン ス、UKMO:英国、NCEP である。

(2) 中期予測

執筆者:木村詞明

人工衛星による観測データをもとにした統計的手法により、 春までのデータから夏季の海氷分布を予測する手法の開発をす すめた。解析には主に人工衛星搭載のマイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E) および AMSR2 のデータを ADS を通じて取得し 用いた。解析に利用した海氷の情報は、毎日の海氷密接度、海 氷漂流速度、海氷厚で空間分解能はそれぞれ、10 km、60 km、 10 km である。海氷密接度は BootStrap アルゴリズムで計算さ れたものを、海氷漂流速度は面相関法によって独自に計算した ものを用いた。得られた漂流速度と海氷上の漂流ブイの動きと を比較した結果、漂流速度データの平均誤差は 1.4 cm/s であっ た。この漂流速度の計算アルゴリズムは ADS に移植され、漂 流速度データがリアルタイムで公開されている。また、海氷厚 は Krishfield et al. (2014) による計算式によって計算したも のを用いた。

海氷予測は春の海氷厚分布と夏季の海氷密接度との関係をも とに行った。まず、冬季から春季にかけての海氷の動きの解析 を行い、この時期の海氷の移流、収束、発散が夏季の海氷分布 と密接な関係にあることを明らかにした(Kimura et al., 2013)。 これは海氷の動きによって春季の海氷厚分布が決定されている ためだと考えられる。ただし、この手法ではベーリング海側の カナダ海盆域での夏季海氷面積の減少を再現することはできな かった。そこで、12月の海氷厚を考慮に加えた上で、12月か ら4月までの海氷の動き(図 3.7.17)から4月末の海氷厚分布 を推定した。この手法により、4月の海氷厚の推定値を直接用 いるよりも高精度で4月の海氷厚分布が推定可能であることが わかった。これは、海氷厚アルゴリズムが、海氷融解期では冬 季より精度が悪くなるためと考えられる。

こうして得られた 2003 年以降の 4 月末の海氷厚推定値と 7 月から 9 月までの海氷密接度との関係式を導出し、それをもと にその年の 4 月までのデータを用いて予測を行った。予測結果 は日本語版と英語版を 5 月末にウェブサイトで公開した。また、 5 月以降の最新の海氷密接度を計算に加え、6 月末と 7 月末に も予測の更新を行った。予測手法の改良の結果、2015 年の予測 では 9 月の最少面積を誤差 2%で予測することに成功し、航路 の開通時期*1 も誤差 10 日以内、最少時の海氷分布についても ほぼ正確に予測できた(図 3.7.18)。 すなわち、当初計画で設 定した目標を達成できた。また、厚さを考慮した新しい手法を 適用することにより過去の予測を再計算したところ、とくに極 方向からの厚い海氷の流入の影響を受けやすいカナダーアラス カ側の海域で予測精度が改善した。

冬季から春季にかけての海氷の動きを決定するのはこの時期 の気象条件である。ロシア沿岸域のカラ海、ラプテフ海、東シ ベリア海の夏季の海氷分布の年による違いは、それぞれの海域 の冬季の海面気圧場の違いで説明できることも分かった。海氷 はその厚さ変化を通じて冬季の気象条件を夏季まで記憶するメ モリーの役割を果たしていると言え、海氷の中期予測は大気モ デルに対してより正確な海面境界条件を与えることになり、気 象の中期予測の精度向上にも貢献できると期待される。

ただし、現在のところ、この手法では、夏季の氷厚分布の予 測値が得られず、後述の最適航路探索による航行シミュレーシ ョンに使えない。それは、信頼できる夏季の海氷厚データが非 常に乏しいからであり、今後、そのデータの蓄積が必要不可欠 である。



図 3.7.17 2014年12月1日に等間隔に配置した粒子の2015年4月 30日の分布。カラーバーは海氷厚を表す。



図 3.7.18 2015 年 9 月 11 日の予測氷縁(緑線)と実際の海氷分布(白い領域)。

6. 海氷厚モニタリング

執筆者: 舘山一孝

人工衛星搭載のマイクロ波放射計データから海氷厚を推定す るためのアルゴリズム開発をすすめた。そのために、北西航路 (2012-2013 年)、カナダ海盆(2011-2014 年)、オホーツ ク海(2011-2015 年)において砕氷船を用い、電磁誘導式氷厚 計やマイクロ波放射計(図 3.7.19)、前方カメラや目視観測か ら現場の海氷の種類や厚さ、状態およびそのマイクロ波特性を 観測した。



図 3.7.19 現場氷況観測装置の写真。左:電磁誘導式氷厚計、右:マイクロ波放射計。

現場観測結果から海氷の種類や厚さ、融解に敏感なパラメー タを開発し、それらのパラメータを用いてカナダ海盆に 2002 年から 2014 年にかけて設置された係留ブイの Upward Looking Sonar (ULS) による実測氷厚と比較した。その結果、 衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR-E および AMSR2 で取得さ れた輝度温度データから一年氷と多年氷それぞれの海氷厚を推 定するアルゴリズムが得られ、一年を通して毎日の海氷厚をモ ニタリング可能になった(図 3.7.20)。

海氷厚推定は、海氷密接度が 80%以上、かつ表面融解が少な い海氷域において実施した。これは融解期に海氷表面が融け水 溜り(メルトポンド)が生じるとマイクロ波は水の層を透過で きず、メルトポンドの下からの情報が得られないためである。

ULS 実測氷厚と AMSR-E および AMSR2 の推定氷厚を比較 した結果(図 3.7.21)、AMSR-E では平均二乗誤差(RMSE) は 0.66-0.72 m, AMSR2 では 0.67-0.71 m を示した。厚さ 1 m 以下、9 月から 12 月の時期に限定すると、RMSE は 0.23-0.32 m を示した。



図 3.7.20 毎年 9月 10日の海氷厚分布の年変化(2002年-2014年)



図 3.7.21 AMSR-E/AMSR2 推定氷厚と ULS 実測氷厚の比較。上段: AMSR-E (2002–2011 年)、下段: AMSR2 (2012–2014 年)。

本テーマでは当初数値目標を「氷厚1m以下の海氷で推定精 度0.1m」と設定したが、結果は約0.3mとなり、目標達成に 至らなかった。推定精度の改善を目指し、実測データとしてこ れまで使用してきた3系の係留ブイデータの他、13機の漂流ブ イの氷厚・積雪・氷温データ、CryoSat-2の海氷厚分布データ と比較する。また、海氷成長にともなうマイクロ波特性の変化 について水槽実験を行っており、これらの結果をもとに積雪や 融解などの季節変動の影響を見積もり、より精度の高いアルゴ リズムへの改良を行う。

7. 航行支援モデル

執筆者:山口 一 金野祥久 澤村淳司 尾関俊浩 高木敏幸

(1) 海氷が船体に及ぼす衝撃

執筆者:金野祥久、澤村淳司

氷海中を航行する船舶の氷中性能および安全性評価には、大 小様々な海氷から受ける氷荷重の推定と、推定した氷荷重下で の船舶の運動と構造応答を知る必要がある。氷海中を航行する 船舶は、浮遊する氷板の大きさにより、氷を排除又は砕氷しな がら航行する。このような様々な氷況中を船舶が航行する時の 氷荷重が計算できる数値計算法を開発した(図3.7.22)。さら に、数値計算から得られた氷荷重分布を用いた、氷荷重下での 船体構造部材の構造応答計算法を確立した。これらにより、氷 海中での船舶の氷荷重と船体運動、さらには、氷荷重下での船 体構造の応力状態を知る事ができ、氷荷重下での船体の損傷度 の判定が可能になった。このように、本研究成果を用いる事で、 氷海中での船舶の氷中性能および構造安全性評価ができる。



北極航路の夏季の航海では氷がほとんどない海域を船舶が航 行するが、レーダーでは観測しにくい小氷片が航路に浮かんで いる可能性があり衝突リスクを考慮する必要がある。過去には 大きな氷盤と衝突した船舶が受ける最大荷重を推定する方法が 提案されており、これに基づいて小氷片との衝突に際して船舶 が受ける最大荷重を求める方法を提案した。衝突前後の運動量 保存および力学エネルギー保存の考え方に基づき、衝突に費や されたエネルギーを求め、ここから最大荷重を導く。このとき 氷片の質量および衝突前の運動量を求める必要があるが、船舶 レーダーで発見しづらい大きさである直径 20 m 程度までの氷 片を想定すれば良いと判断した。また衝突前の氷片速度は衝突 直前の船舶と氷片との流体(海水)を介した干渉によって決ま ると考え、数値流体解析により衝突直前の氷片の運動量を算出 した(図 3.7.23)。この算出方法の妥当性は模型実験により確 認している(図 3.7.24)。



図 3.7.23 氷片挙動の数値解析例



図 3.7.24 模型実験と数値解析の氷片移動距離の比較例。

(2) 船体着氷

執筆者:尾関俊浩

北極海など寒冷海域では、しばしば船舶や構造物に着氷が大 きく発達し、除氷の問題が発生する。そこで、寒冷海域を航行 する際の船体着氷のメカニズムを明らかにするための研究を行 った。船舶に設置した飛沫計で海水飛沫の観測と実験室での実 験を行ったほか、着氷被害を低減させるための方法について検 討を行った。

まず、飛雪粒子カウンターを改良した「SPC型しぶき計」と、 船舶用雨量計を改良した「雨量計型しぶき計」を開発した(図 3.7.25)。両しぶき計とも海水飛沫の連続観測が可能である。



図 3.7.25 船舶に取り付けた飛沫計。(左)SPC型、(右)雨量計型。



図 3.7.26 着氷指標 $W_s(T_f - T_a)$ と着氷断面積増加量との関係。

観測は大型砕氷船である「しらせ」と巡視船「そうや」で実施した。「しらせ」の観測結果では、最上層甲板中央に設置したSPC型しぶき計は、1時間当りのしぶき量と相対風速の間に最も強い相関が見られ、相関係数は0.82であった。左右両舷に設置した雨量計型しぶき計と相対風速の相関係数は左舷が0.84、右舷が0.88でありいずれも強い相関があった。したがって、各船種におけるしぶき量観測データを蓄積することにより、1時間当りの大型船舶への海水飛沫のしぶき量を風向、風速と、船速、船首方向(針路)から推定できる可能性が示された。

世界的には着氷の度合いを示す着氷指標 PR を次式から求めることが多い³⁾。

 $PR = \frac{W_s(T_f - T_a)}{1 - 0.3(T_w - T_f)} \tag{1}$

ここで、 W_s は風速、 T_a 、 T_f 、 T_w はそれぞれ気温、結氷温 度、海水温である。結氷温度に近い海水では、分母を1として 扱っても差し支えないので、ここでは $W_s(T_f - T_a)$ の有効性を 検討した。船体着氷と防波堤灯台に成長する海水飛沫着氷は同 様の現象であるので、本研究では防波堤(石狩市浜益区)に設 置した約4mの灯塔をインターバル撮影した画像を用い、着氷 の成長と気象の関係について調べた。着氷断面積の増加量は $W_s(T_f - T_a)$ の増加とともに単調に増加する結果となった(図 3.7.26)。 $W_s(T_f - T_a)$ は飛沫着氷の着氷率(熱収支)を決め る一つの要素である顕熱フラックスに関連するので、着氷には 顕熱フラックスの影響が大きいことが推測された。

寒冷海域を航行する船舶にとって、海水飛沫着氷の実際的な 課題は難着氷や除氷対策である。本研究では広範囲の着氷には 難着氷シート、窓などの透過性の必要な場所には面ヒータ付き ポリカーボネイトを提案した。難着氷シート(例えば Ozeki et al., 2012) はコーティングによる難着氷性に加えてシートの変 形を用いることで効果的な除氷対策を行うことができる.一方、 透明発熱シートを積層したポリカーボネイトは透過性が良いこ とに加え、高強度であり形状への対応も可能で、発熱量の調整 も容易なことから、窓などの重要な箇所だけに選択的に使うの は有効であろう。

(3) 最適航路探索

執筆者:高木敏幸 山口 一

氷海中での最適航路探索の研究結果について述べる。航行中の船舶への通信環境はまだまだ貧弱で、実質上、大量のデータを送れる状況にない。そこで、海運会社の陸上支援部が使用するような全体航路の最適化手法と、船員が船上で使用するような、コンパクトな装置(PC)で氷況データとしては船舶レーダを用いる近傍航路最適化手法の、二つの手法を開発した。まず、後者を述べる。

船の近傍スケールの航行支援のため、船舶のレーダ画像をも とに砕氷船の能力に応じて氷盤を避けながら最短で目的地に向 かうルートの探索手法を開発した。本手法は、まず、レーダ画 像上にロードマップの分岐点になるマイルストーンを格子状に 配置する。次にマイルストーン間の距離とマイルストーンの海 氷密接度に対する砕氷船の氷中航行能力を評価関数に加え、ダ イクストラ法を用いて現在地点から目的地までの航路を求める。

図 3.7.27 は 2012 年 8 月の北極海におけるカナダの砕氷船ル イ・サン=ローラン号の船舶レーダ画像である。砕氷船の氷中 航行能力は、図 3.7.27 左の様に、開放水面での船速に対して船 速が 1/2 になる海氷密接度を航行可能な領域として区分線形関 数で近似して表現している。ここでは、砕氷船が航行可能な海 氷密接度を10%から30%まで変化させ、開放水面上に設置し た8つの目的地に対して航路を探索した。氷中航行能力によっ て選択される航路は異なり、また、氷中航行能力の増加に伴い、 海氷迂回の航路曲率が減少する。図 3.7.28 に、図 3.7.27 右に 示す8つの目的地に対する氷中航行能力と航路の距離の関係を 示す。航行が可能な海氷密接度が高くなるにつれて、すべての 目的地に対する航路の距離が短くなっている。特に、目的地③ の場合においては目的地の間に海氷が多く分布しているため、 砕氷船の航行可能な海氷密接度が 10%と 30%とでは、探索さ れた航路も異なり、2791 m 航路の距離が短くなっている。本 手法は船舶レーダ画像から容易に結果を得られるため、実時間 による海氷密接度に応じた航路探索が可能である。



図 3.7.27 氷中航行能力と航路。氷中航行能力を海氷密接度 30%とした場合。



また、北極海全体スケールの航行支援のため、A*アルゴリズ ムによる最適航路探索手法を開発した。まず、Choi et al. (2014) が、アンサンブル数値予測計算による氷況データをもとに、平 均値とバラツキの両方を考慮する探索手法を開発した。バラツ キの大きい所は不確実性の高い所であるから、安全のためなる べく避けるという考え方である。次に、中野修士論文(2015) が、船速の推定に Ice Index (氷況と船の耐氷クラスを考慮した 経験的指標)による式を考案した。式は、2014年の航行実績か ら決定した。これにより、船速がより現実的なものとなった。 それをもとに、アンサンブル予測計算の氷況データの他に、衛 星観測による氷密接度・氷厚分布を使った航路探索結果と現実 の航路の比較を行った。その例を図 3.7.29 に示すが、どの例に おいても、本手法の適用により、航行距離・時間ともに有意に 短縮できることが解った。本研究中に調べた例では、概ね航行 距離で約 5-15%、航行時間で約 10-30%短縮が実現されている。 また、これらは、最小化すべきコスト関数の係数設定により、 コントロール可能である。本手法は ADS に移植されており、 ADS の氷況データを用いて、ユーザは任意の条件で計算できる 様になっている。



図 3.7.29 2014 年 10-11 月の耐氷船の実際の航路と最適航路の比較

次に、気候モデル MIROC5 の予測シナリオ RCP4.5 と RCP8.5 による 2100 年までの予測氷況に対し、本手法を適用し た。RCP8.5 の氷況に対し、各月1日に出航した場合の北極海 航路通過航行日数*2の変化を、図 3.7.30 に示す。無氷になり極 点航路を通れる時の、この船の航行日数が約 9.3 日であるから、 2080 年頃以降から、少なくとも7月初から 11 月末までの期間、 極点航路を通れることになる。また、秋以降の航行日数増加が 緩やかであることから、今後、秋に向かって航行期間を広げて いくのが現実的と考えられる。なお、他の気候モデルと同様、 MIROC5 の予測海氷域面積は、図 3.7.31 に示すように観測の 海氷域面積の減少より数 10 年遅れており、図 3.7.30 の状況が 40 年ほど早く訪れるという可能性は、否定できない。課題 7-2 で開発された高精度北極海モデルの成果が、早期に全球気候モ デルに反映されることを期待する。



図 3.7.30 MIROC5-RCP8.5 による予測氷況を用いた、北極海航路通 過航行の日数変化。


図 3.7.31 最小海氷域面積の年変化の計算と観測の比較。

8.経済性評価および輸送シナリオ

執筆者:大塚夏彦

東アジア~欧州間の海上輸送路としての北極海航路につい て、海運市場動向を踏まえた運航シナリオ並びにその経済性に ついて検討し、北極海航路の成立要件を示した。輸送シナリオ では、欧州及び北極圏と東アジアの間で実際に輸送され得る貨 物として、鉄鉱石、液体バルク、完成自動車、LNG、コンテナ を取り上げ、実際の国際輸送動向及び我が国における調達動向 を考慮したうえで、北極海航路輸送並びに既往輸送ルートによ る輸送シナリオを定めた。北極海航路輸送に関しては、氷況に よる航行速度や燃料消費への影響を考慮して、具体的な運航オ ペレーションを算出した。これをもとに、実際の国際市場(燃 料価格、海運市場ほか)を考慮して、北極海航路輸送および既 往シナリオに関する経済性分析を行った。

北極海航路の運航速度は、氷況にもとづく船の航行難易性を 示すパラメータである Ice Index⁴⁾を取り上げ、これと船速の 関係を仮定して、航路上の氷況変化に応じて算出した(表 3.7.1)。 航路上の氷況は、JAXA による 10km 格子の日平均海氷密接度 より 2013~2014 年期間の 15 日平均を、その他のパラメータ は Kitagawa et al. (2001)⁴による氷況データを補正して用い た。これより、15 日ごとの北極海航路の航行速度、航行時間、 燃料消費量などを算出し、経済性分析に用いた。

6月~11月の北極海航路横断に要する時間は、砕氷船支援を 伴うアイスクラスPC7の船では7日~11日、アイスクラスPC4 の砕氷船級による単独航行では7日~8日となった。これは実 際の運航事例がおよそ10日間要していることと合致している。

この結果をもとに海上輸送コストの比較分析を行った。鉄鋼 石及び液体バルク輸送は、同じ産地と消費地であれば、距離の 短い北極海航路輸送において燃油費の削減効果が大きく発現し、 同時に輸送日数短縮による船の減価償却費(以後、船体償却費

表 3.7.	1:	71	'スイ	ンテ	゙ック	スと	:船速の	関係式
--------	----	----	-----	----	-----	----	------	-----

Ice-Index	Ice strengthened ship of PC7(1A)	Icebreaking LNG carrier (PC4,Arc7)
ID>20	Independent navigation in 15knots.	
18 <id≦ 20</id≦ 	Independent navigation, V=2.5*IceIndex-35	
0 <id≦18< td=""><td>Icebreaker escorting under constant speed of 10knots.</td><td>V=0.25*IceIndex+10</td></id≦18<>	Icebreaker escorting under constant speed of 10knots.	V=0.25*IceIndex+10
ID≦0	Icebreaker escorting. V=0.2*IceIndex+10	

と記す)や操船経費の削減により、スエズ運河を使う既往航路 よりも輸送コストは有利となる。ただし、ロシアの砕氷船支援 料がスエズ運河通航料程度であることが求められる。また、既 往航路が大型船にてコスト減を図っても、それと同等程度の輸 送コストが実現できる。完成自動車の場合、輸送コスト中の船 体償却費の割合が大きくなり、燃料費だけでなく輸送日数削減 によってコスト削減が実現できる(Otsuka et al., 2016a)。 LNG 輸送費は中東産 LNG の場合よりも高くなった。ただし輸 送コスト差は、最近の日本における LNG スポット輸入価格の 3%程度で、需要者側にとっては許容可能な程度にあると考えら れる。また船体償却費の比重がさらに大きくなるため、より短 い期間で輸送できるようになると、コスト競争力は向上する(図 3.7.32)。

ー方コンテナ輸送では、北極海を航行可能な規模の船型とし て4,000TEU*3積み耐氷船を想定し、夏は北極海、冬はスエズ 運河を通る通年運航モデル、既往スエズ航路については現行規 模の船型(8,000–19,000TEU)を取り上げて検討した。この結 果、4,000TEU 耐氷コンテナ船による NSR*4/スエズ運河併用 による通年運航は、8,000TEU 級船による既往航路と同等の輸 送コストとなった(図 3.7.33)。このように北極海航路による コンテナ輸送は、今後の海運市場の動向によって、経済合理性 を持ちうるか流動的となっている。また、海氷勢力緩和による 運航環境の向上が進めば、適切な運航モデル、ビジネスモデル を構築することによって、競争力を持ちうる可能性はある。



図 3.7.32 砕氷 LNG 船によるヤマル LNG 輸送。各月の-1, -2 は、 それぞれ上半期、下半期を表す。



図 3.7.33 コンテナ通年輸送モデル(図中の NSR/SC)。

注

- *1本研究では、全航路において海氷密接度15%以上の海域に入ること なく航行できることを「航路の開通」と定義した。
- *2 ベーリング海峡からスカンジナビア半島北端までの航行日数。
- *3 Twenty-feet Equivalent Unit。コンテナ船の積載能力を、標準的な 20 フィートコンテナの個数で表したもの。
- *4 Northern Sea Route。ロシア側を通る北極海航路。

引用文献

- Zhang, J., Steele, M., 2007. Effect of vertical mixing on the Atlantic Water layer circulation in the Arctic Ocean. J. Geophys. Res., 112, C04S04. doi:10.1029/2006JC003732.
- 2) Roeske, T., Bauch, D., Rutgers, M., Loeff, V. D., Rabe, B. 2012. Utility of dissolved barium in distinguishing North American from Eurasian runoff in the Arctic Ocean. Mar. Chem., 132–133, 1–14. doi:10.1016/j.marchem.2012.01.007.
- Overland, J. E., 1990. Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures. Wea. Forecasting, 5, 62-77.
- 4) Kitagawa, H., Ono, N., Yamaguchi, H., Izumiyana, K., Kamesaki, K., 2001.The Northern Sea Route – The shortest route linking East Asia and Europe. SHIP & OCEAN FOUNDATION, The Nippon Foundation, ISBN 4-88404-027-9, http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2000/00967/mokuji.htm,
 - http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2000/00967/mokuji.htm, 93-110.

第4章

研究基盤、他

-

研究基盤・JCAR 事務局・国際連携推進について

1. 全体概要

実施体制

平成23年4月19日の北極研究戦略小委員会で定めた運用基本方針に基づいて、北極研究を強力に牽引するための研究設備として次の①から④の基盤について代表機関の国立極地研究所と参画機関の海洋研究開発機構は整備を行った。

①耐氷性能を有する海洋研究開発機構の海洋地球研究船 「みらい」 ②海氷域の変化を捉える観測を機動的に行う砕氷船と係留系
 ③雲の三次元構造を観測する雲レーダー
 ④北極域データアーカイブ

そして、代表機関の国立極地研究所は「北極環境研究コンソ ーシアム」の運営を効率的かつ効果的な活動が行えるよう支援 をすることが決定された。

また、平成26年度には上記運用基本方針が求める戦略研究 目標達成に向けて必要不可欠な国際連携の強化とこれを支える 人材の育成を図るべく、アメリカ合衆国とカナダの研究機関を 拠点として、若手研究者が主体的に実施する北極環境に係る国 際共同研究等を支援する仕組みを整えた。



事業実施体制図

2.海洋地球研究船「みらい」

基盤整備機関:海洋研究開発機構 執筆者:事務局



関根浜を出航する「みらい」(写真:山内恭)

(1) 目的

急激な海氷減少が進む北極海。海氷減少は水温や塩分・海の 流れなどの海水の物理的性質を変え、栄養分などの化学的性質 を変え、そこに棲むプランクトンや魚や動物などの生物にも影 響を及ぼす。年間を通して海氷最小期にあたる時期の季節海氷 域の北極海で、大気から海洋まで観測を行うことで北極域にお ける環境変動を明らかにし、その影響がどのように生態系や気 候システムに及んでいるのか調査することが求められた。

このような北極の海氷域で調査・観測するには、各種大型観 測装置や観測室・実験室を完備する海洋研究開発機構の海洋地 球研究船「みらい」が欠かせないため、参画機関の海洋研究開 発機構が基盤として整備した。

GRENE 北極事業「みらい」北極航海(MR12-E03) 採択課題 ・課題 3:北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響:大気

プロセスの包括的研究(非乗船)

・課題 5:北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明

・課題6:北極海環境変動研究:海氷減少と海洋生態系の変化

(2) 実施体制

- ・乗船課題の公募・選定と首席研究者の決定:国立極地研究所
- 航海準備・運航:海洋研究開発機構

・データ管理:海洋研究開発機構

2012年8月1日、本航海で取得したデータの取り扱いに関 する取り決めについて、国立極地研究所と海洋研究開発機 構の間で協定締結。

(3) 実施状況

・実施期間:2012年9月3日~10月17日
 9月3日:青森県関根浜港

- 9月4日:八戸港
 9月13日、10月4日:ベーリング海峡通過
 10月5~6日:アラスカ州ノーム
 10月16日:八戸港
 10月17日:関根浜港
- 航海名 :

2012 年度 GRENE 北極気候変動研究事業 海洋地球研究船「みらい」北極航海(MR12-E03) ・首席研究者:

海洋研究開発機構北半球寒冷圏プログラム 菊地隆チームリーダー(当時)

- ・乗船研究者(首席を除く):研究分担者、特任研究員及び研究協力者として次の機関から計29名の乗船があった。
 海洋研究開発機構1名 気象研究所1名 北海道大学10名 東京大学大気海洋研究所1名 ラバル大学1名 東京海洋大学2名 富山大学1名 国立極地研究所(北大) 1名 国立極地研究所(東大大気海洋研)1名
- 「みらい」搭載型係留系の回収と設置

第4章3項係留系のページ参照。なお、本航海とあわせ、 事業期間中にカナダ砕氷船「ローリエ号」や海洋研究開発 機構による他の「みらい」航海時に回収・再設置を実施。

・主な観測項目:詳細は次ページ参照。CTD/採水観測、XCTD 観測、光学観測、プランクトンネット観測、係留系回収・ 設置、マルチプルコアラ-採泥、ADCP・SeaBeam等連 続観測、目視観測、大気観測、衛星観測 等
・調査地点:北極海、ベーリング海、太平洋



「みらい」北極海航海の航跡図

- (4)利用課題と研究内容
- 北極海環境変動研究:海氷減少と海洋生態系の変化
 (課題6:担当-海洋研究開発機構)
- ①CTD/採水観測により、水温、塩分、溶存酸素、栄養塩、 炭酸系物質、及びクロロフィル a 調査。
- ②航路上で、船舶搭載 ADCP 観測、表層海水連続観測(水 温、塩分、溶存酸素、クロロフィル a、pCO₂、全炭酸の 測定)、XCTD 観測、測深(シービーム)、一般気象観測。
- ③インマルサット、イリジウム通信回線を用いて気象デー タ、予報データ、海氷データを取得し、現場観測に利用。
- ④バロー海底谷で3系の係留系の回収(BCW-10, BCC-10, BCE-10)と再設置(BCW-12, BCC-12, BCE-12)。また、
 砕氷船「ローリエ号」を使って7月にチャクチ海ホープ岬
 沖で設置した2系の係留系(SCH-12、SCH-12W)の再
 設置(SCH-12-2、SCH-12W-2)、同じくチャクチ海バロ
 ー岬沖で2系の係留系回収(BCH-12、BCH-12W)、再設置
 (BCH-12-2、BCH-12W-2)を実施。さらに、ノース
 ウインド深海平原では1系の係留系の設置(NAP-12)と
 1系のセジメントトラップの回収(NAP-11t)、再設置(NAP-12t)を、チャクチ深海平原では1系のセジメン
 トトラップの設置(CAP-12t)を行った。

※太字は本事業で整備した「みらい」搭載型係留系である。

- チャクチ海における植物プランクトン・基礎生産力の環境
 への応答(課題6:担当-北海道大学)
 - ①観測海域全体に渡って、日中に1日あたり2~3回分光放射(分光放射計 PRR-800)、及び後方散乱係数(後方散乱計 Hydroscat-6)の測定を実施。
 - ②ニスキン採水器を用いて、粒子、及び CDOM の吸収係 数、植物プランクトン色素組成(UHPLC)、サイズ分画 クロロフィルa、基礎生産力等を測定するための海水サン プルを採取する。また、船上で培養水槽を用いた基礎生産 力測定のための培養実験を実施。
 - ③ベーリング海峡北部、陸棚域中央部、及び陸棚斜面域に おいて、水温を2~3段階に調節した光合成-光曲線(P-E カーブ)の実験を実施。
- 3) 西部北極海における動・植物プランクトン群集構造の水平 分布(課題6:担当者-北海道大学)
 - ①ニスキン採水器を用いて、マイクロプランクトン群集解 析用セルカウント採水。
 - ②Twin NORPAC ネット、及び Closing NORPAC ネット を用いて、動物プランクトン採集。

③80cm リングネットを用いて、飼育実験用の動物プランク

トン採集を行い、船上で生鮮個体を用いた飼育実験(摂餌 実験)。

- ④マルチプルコアラーを用いて、堆積物より珪藻類の休眠 期細胞を採取。
- 4) 北極海の基礎生産を支える微量金属・化学成分の挙動とその起源(課題6:担当-北海道大学)
 - ①クリーンニスキン採水器を用いて、鉄、微量金属、CDOM 測定用の海水サンプルを採水。

③研究用海水から約3時間毎にハロカーボン濃度を測定。

- ④約6時間毎に大気サンプリング(キャニスター及び冷却 トラップ)を行い、船上及び陸上実験室でハロカーボン濃 度を測定。
- 5)海鳥・クジラ類目視調査(課題6:担当-北海道大学) ①北極海の調査海域、および日本から調査海域までの行き 帰りにおいて、航行中、双眼鏡で、日の出1時間後から日
 - 没1時間前まで、ブリッジから海鳥・クジラ類目視調査を 実施。
- 6) 北極海における微生物群集と有機物の空間分布と動態およびその支配要因に関する研究

(課題6:担当-東京大学大気海洋研究所)

- ①粒子測定装置 LISST-100X を用いて、0-300m までの懸 濁粒子のサイズスペクトルの測定。
- ②ニスキン採水器を用いて、原核生物数、ピコ植物プラン クトン数、ウィルス数、ロイシン取り込み速度、ウィルス 生産速度、及び細菌呼吸速度の測定用の海水サンプルを採 取する。また、コールターカウンターによる粒子計測用の 試料を採取し、船上分析。
- ③3H・ロイシンおよび 3H・チミジンの取り込み測定のため に RI コンテナ (アイソバン)を利用。
- ④ニスキン採水器を用いた大量採水により、微生物群集構造の解析用試料、及び懸濁態炭素・窒素の濃度と安定同位体比の測定用の海水サンプルを採取。また、サンプル水約2リットルをポリカーボネート容器に入れ、異なる温度と有機物添加条件下で培養し、微生物群集の生物量、群集組成、活性の応答を調査。培養は暗条件で実施。
- 7) チャクチ海における炭酸系・窒素循環の研究(課題6:担当-東京海洋大学)
 - ①ニスキン採水器を用いて海水を採取し、全炭酸、アルカ リ度濃度を測定。また、富山大メンバーと連携して酸素同 位体比測定試料を採取。

②ニスキン採水器を用いて、ハロカーボン測定用の海水サ ンプルを採水。

- ②チャクチ海大陸棚および斜面にて、マルチプルコアラーを用いた採泥。観測点6点で5.5本のコア採取。3本で脱窒・アナモックス速度測定用の培養実験、2本で直上水へのフラックスを見積もる培養実験、0.5本(富山大と分割して使用)で間隙水中の栄養塩測定。
- 8) 複合型化学指標による北極海淡水寄与の解析および陸起源 物質輸送の実態解明(課題6:担当-富山大学)
- ①ニスキン採水器を用いて、希土類元素、ネオジム同位体 比、ストロンチウム及び酸素同位体比測定用の試料採取。
 ②マルチプルコアラーを用いて、計8点で堆積物試料の採 取を希望。採取した堆積物から間隙水を絞り、希土類元素、 及び栄養塩濃度の分析。
- 9) 北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明 (課題5:担当-東北大学、気象研究所)
 - ①大気中 CO₂、CH₄、CO 濃度の連続観測を行う。測定に はキャビティーリングダウン分光分析計(CRDS)を用い、 CRDS と大気吸引用のポンプユニット、除湿ユニット、 標準ガス導入ユニットからなる連続観測システムを「みら い」の汎用観測室に設置し、右舷船首側の操舵室上に設置 されたインレットより大気試料を引き込むことで連続観 測を実施。航海海域全域。
 - ②汎用観測室に大気採取装置を設置して 50 本の大気採取 容器に大気の採取を航海海域の全緯度帯で実施。
 - ③八戸出港から帰港までの全航程で、表層海水分析室において、大気・海洋表層の CO2 分圧、全炭酸濃度、溶存酸素濃度、クロロフィル蛍光、水温、塩分の航走観測を実施。
- 10)船舶型スカイラジオメーター観測から得られる北極海のエアロゾルの光学的特性(課題3:担当一富山大学) ※非乗船
 - スカイラジオメーターを用いてエアロゾルの光学特性の 連続測定を行った。



セジメントトラップの引 き揚げ。(写真:菊地隆)

(5) 成果

2012 年度は北極海の海氷面 積が観測史上最少記録を更新し た年であった。本航海において 海氷を見ることもホッキョクグ マを見ることもなかったが、海 氷がなくなったあとの北極海に おける様々な観測データが取得 できた。またいくつかの観測点では、活発な生物活動とそれ に関連した特徴的な物理・化学環境の様子が観測されており、 これらの観測データから、海氷減少が物理・化学環境の変化 を通して生物活動に至るまでの包括的な解釈が進められ、過 去の北海道大学「おしょろ丸」や「みらい」の観測結果など と比較することで、進行しつつある北極海の経年環境変化が 明らかになってきた。

本航海で設置した本事業研究基盤の係留系4系、これら係 留系による観測データから、2012-2013年の冬季を含む通年 でのチャクチ海のホットスポットでの水温・塩分・溶存酸素・ クロロフィル・プランクトン動態及び海生哺乳類の活動など に関する時系列データを取得し、これまでは知ることができ なかった海氷の消長に伴う環境要素の変動に関する知見を得 ることができた。

(6) みらい航海本事業関係記録

本事業では研究基盤以外に研究課題単位で海洋研究開発 機構実施の「みらい」航海へ公募で乗船した。事業期間中 の乗船に関係する全航海については次の通りである。

MR12-E03 GRENE 北極航海

2012年9月4日--2012年10月17日

チャクチ海、ベーリング海、北太平洋

- MR12-02 航海 2012 年 6 月 3 日-2012 年 7 月 12 日 北太平洋
- MR13-06 北極航海 2013 年 8 月 28 日-2013 年 10 月 21 日 太平洋側北極海、ベーリング海、北太平洋みらい
- MR13-04 航海 2013 年 7 月 10 日-2012 年 7 月 29 日 北太平洋
- MR14-05 北極航海 2014 年 8 月 27 日-2014 年 10 月 10 日 太平洋側北極海、ベーリング海、北太平洋
- MR15-03 北極航海 2015 年 8 月 24 日-2015 年 10 月 22 日 太平洋側北極海、ベーリング海、北太平洋



2012 年 9 月 10 日、低気圧とそこからのうねりに遭遇 MR12-E03 GRENE 北極航海(写真: 菊地隆)

3. 外国砕氷船·係留系

基盤整備機関:国立極地研究所 執筆者:事務局



2014年 LSSL 号乗船(写真:田中康弘・星野聖太)

(1) 目的

北極海航路の利用可能性を評価するうえで、海氷分布の動態 を把握することが欠かせない。また、海洋生態系の変化を知る ためには海氷下及び海氷の消長に伴う海洋物理・化学環境や生 態系の動態などの通年変化を明らかにする必要がある。

このような北極海域の調査のためには、観測のプラットフォ ームとして海氷域に入っていける砕氷船が必要であり、海氷減 少が激しい海の中でどのような変化が起きているのかを知るた めには、係留系を使った通年データの取得が必須である。この ような背景から外国砕氷船の庸船と係留系による通年観測が行 える体制を整備した。

(2) 実施体制

外国砕氷船

- ·整備機関:国立極地研究所
- ・契約:カナダ海洋漁業省(Department of Fisheries and

Oceans Canada : DFO)

2011 年、DFO と **2012** 年の庸船に関する MOU 締 結の準備を開始以後、毎年契約を更新。

・ 庸船: カナダ沿岸警備隊

(Canadian Coast Guard : CCG) 所属

(Louis S. St-Laurent : LSSL 号)

「ローリエ号」

(Sir Wilfrid Laurier : S.W.L 号)

・ 庸船区間と航海日数

カナダ海盆(LSSL号)とチャクチ海(S.W.L号) 2012年 LSSL号:3日 S.W.L号:0.5日 2013年 LSSL号:4日 S.W.L号:1日 2014年 LSSL号:4日 S.W.L号:1日 2015年 LSSL号:2日 ※北西航路部分についても課題乗船枠確保を基盤契約と ともに進めた。



図:2012年から2015年のLSSL号の航跡図 2012年航海は紫線。2013年航海は赤線。2014年航海は黄緑線。2015 年航海は水色線。本事業では、各年度の赤丸海域内で一部庸船経費 を負担、係留系設置・回収作業を実施。また、課題7-1は課題経費 で青線の北西航路部分に乗船。

·利用課題:課題6、課題7

係留系

海氷下のデータ取得のため、3 種類の係留系を整備し、関係 課題での利用に提供した。

- 1)カナダ海盆横断観測用係留系(LSSL 号用)
- ・整備機関:国立極地研究所
 ウッズホール海洋研究所(Woods Hole
 Oceanographic Institution:WHOI)
- ・製作内容:鉛直連続観測係留系2系(右図)
 (自動昇降式水温円分流速計を搭載)
- ・実施状況:
 2012年度にWHOIと製作、設置回収作業に関するMOU
 を締結し、利用開始。以後、毎年航海時の作業について契約更新。2013年度~2015年度は4)係留系実施一覧参照。
- 利用課題:課題7
- ・観測項目

①水温・塩分の鉛直プロファイルの時系列データ②海氷漂流速度、海氷厚の時系列データ

(ADCP、IPS計測)

③上層流速の時系列データ(ADCP計測)

- ・設置場所:カナダ海盆西部からノースウィンド深海平原 2012年設置(LSSL:2013年回収) GAM-1 75°59.9965'N, 160°10.0083'W GAM-2 77° 0.0166'N, 170°0.0132'W
 2014年設置(LSSL:2015年に回収) GAM-1 76°00.145'N, 160°08.749'W GAM-2 77°00.031'N, 170°03.051'W
- 2)「みらい」搭載型係留系
- ・整備機関:国立極地研究所・実施体制:海洋研究開発機構所属
- 海洋地球研究船「みらい」とカナダ 沿岸警備隊所属砕氷船 S.W.L.号で 設置、回収を実施。
- ・製作内容:次頁構成図を参照。





WHOI 型係留系構成図



- 実施状況:
- 2011 年度:観測機器の購入及び整備
- 2012年度~2015年 設置、回収。(詳細は4)を参照)
- ・利用課題:課題6
- ・観測項目
- 水温・塩分・溶存酸素時系列データ (係留式水温塩分計・溶存酸素計)
- 流向流速時系列データ
 (音響式流向流速計)
- ③ プランクトンの鉛直分布時系列データ (多周波数音響式プロファイラー)
- ④ クロロフィルa及び濁度時系列データ
 (蛍光光度計・濁度計)
- ⑤ 魚類から海獣(鰭脚類・鯨類) に至る海中生物の動態観

測(水中音響モニタリング装置)

・設置場所:チャクチ海ホープ岬沖(SCH)、

バロー海底谷 (BCH) 2012年:SCH-12 67° 42.35' N, 168° 49.52' W SCH-12W 67° 43.09' N, 168° 50.01' W BCH-12 71° 19.64' N, 157°39.69' W BCH-12W 71° 20.46' N. 157°36.45' W SCH-12-2 68° 02.00' N, 168°50.03' W SCH-12W-2 68° 03.01' N, 168° 50.00' W BCH-12-2 71° 19.63' N, 157°39.67' W BCH-12W-2 71° 20.49' N, 157°36.36' W 2013年:SCH-13 68° 02.00' N, 168°50.03' W SCH-13W 68° 03.01' N, 168° 50.00' W BCH-13 71° 18.92' N, 157°08.80' W 2014年:SCH-14 68° 02.00' N, 168°50.04' W SCH-14W 68° 02.98' N, 168° 50.01' W BCH-14 71° 19.76' N, 157°36.01' W

3) 共通基盤係留系

- ·整備機関:国立極地研究所
- ・実施状況:課題間で共通して利用することを目的に整備
 2011年度:観測機器の購入及び整備
 2012年度~2015年 設置、回収。(詳細は4)を参照)
- ・利用課題:課題6、7
- ・観測項目
- ①水温、塩分データ(課題6、7)
 ②流向流速データ(課題6、7)
 ③溶存酸素量(課題6)
 ④クロロフィル濃度、濁度(課題6)
 ⑤AZFPによるプランクトン動態(課題6)
 ⑥海棲哺乳類(クジラ等)の音響モニタリング(課題6)
 ・設置場所:カナダ海盆西部からマカロフ海盆(課題7)
 韓国砕氷船アラオン号(課題負担)を利用して2012年設置、2013年回収。 74°59.534'N, 175°51.659'E
 チャクチ海ホープ岬沖、バロー海底谷(課題6)

2014年、「みらい」搭載型に統合して設置

第4章 研究基盤

4) 係留系実施一覧 WHOI 型 2011年 購入·整備 2012年 設置(LSSL 号): GAM1、2 2013年 回収 (LSSL 号): WHOI で整備 2014年 再設置 (LSSL 号): GAM1、2 2015 年 回収(1 系 Araon 号、1 系 LSSL 号秋季航海で WHOI が回収)

共通基盤

■WHOI 型

- 2011年 購入·整備 2012年課題7設置 (アラオン号)
- 2013年 課題7回収 (アラオン号)
- 2014 年 課題 6 設置・回収(みらい)

「みらい」搭載型係留系

2011 年 購入·整備

2012 年 設置 (S.W.L 号)・回収 (みらい): SCH-12、

12w/BCH-12、12w 再設置: (みらい): SCH-12-2、12-2w/BCH-12-2、

12-2w

- 2013年回収(S.W.L号): SCH-12-2、12-2w 再設置 (S.W.L 号): BCH-13 (13w を結合) 回収(みらい): BCH-12-2、12-2w
- 2014年回収(S.W.L号): SCH-13、13w/BCH-13 (13w 統合)
 - 再設置 (S.W.L 号): SCH-14、14w/BCH-14、14w
- 2015年 回収 (みらい): SCH14(亡失)、14w/BCH-14、14w



- (3)利用課題と研究内容1)研究課題6:北極海環境変動研究:海氷減少と海洋生態系の変化
- S.W.L 号利用
 - ダッチハーバー(乗船)~ベーリング海峡~チャクチ海南 部ホープ岬沖~バロー沖~バロー(下船)
 - 2012年7月、2013年7月、2014年7月
- LSSL 号利用
 - 2015年9月~10月:カナダ海盆
 - (実施項目)
 - ①チャクチ海ホープ岬沖「みらい」搭載型係留系設置・回収 物理係留系1系、音響モニタリング係留系1系、
 - ②バロー海底谷「みらい」搭載型係留系設置・回収 物理係留系1系、音響モニタリング係留系1系
 - ③チャクチ海共通基盤係留系設置・回収
- 2)研究サブ課題 7-1:北極航路利用のための海氷予測および航 行支援システムの構築
- LSSL 号利用
 - 2012 年 7 月~8 月:北西航路区間海氷観測 (セントジョンズ~クグルクツク)
 - 8月~9月:カナダ海盆、(課題 7-3 参照)
 - 2013年7月~8月:北西航路区間海氷観測
 - (セントジョンズ~クグルクツク)
 - 8月~9月:カナダ海盆、(課題 7-3 参照)
 - 2014年9月~10月:カナダ海盆(課題7-3参照)
 - (実施項目)
 - ①目視、電磁誘導式氷厚計及びマイクロ放射計の氷厚観測②加速度センサーによる船体挙動観測
 - ③SPC、超音波風向風速計による着氷観測
 - ④氷況観測:目視観測、前方カメラ、EM 氷厚観測、マイクロ波放射計観測
 - ⑤気象·海象観測:船上気象計
- (主な観測項目)
- 航走観測
- ・電磁誘導式氷厚計(EM-31/ICE)+レーザー距離計を左 舷に設置し、10Hzの頻度で氷厚を測定。
- ・可搬型マイクロ波放射計(三台:6GHz、18GHz、36GHz)
 を左舷に設置し、放射輝度温度を測定して氷厚を推定。
 ・艦橋上に飛沫計(SPC)と超音波風向風速計を設置し、
- 海水飛沫と船体着氷量を測定。

- ・3 軸加速度計+GPS+カメラ (マリンステーション)を3
 箇所に設置し、船体の動揺を測定。
- ・艦橋にて目視による氷況観測と航行記録を実施。
- 研究サブ課題 7-3:北極海における海洋変動と急激な海氷減 少メカニズムの解明
 LSSL 号利用
 - 2012年7月~9月:カナダ海盆 2013年8月~9月:カナダ海盆 2014年9月~10月:カナダ海盆 2015年8月~10月:カナダ海盆 (実施項目) ①カナダ海盆横断観測用基盤係留系2系設置・回収
 - ②太平洋側北極海カナダ海盆における海洋観測
 - CTD、CTD による海洋観測
 - ・メルトポンドのサイズや深さとアルベド・マイクロ波放 射特性、熱収支の関係を見る
 - (主な観測項目)
 - 氷上からの連続海洋観測
 - ADCP、メモリー式 CTD、水温ロガー、UCTD を用いた
 氷上からの連続海洋観測
 - ・Work Horse ADCP(600kHz)、Sea Bird SBE19 CTD、 Sea Bird SBE56 水温ロガー
 - ・UCTD を用いた連続海洋観測
 - 航走観測
 - ・電磁誘導式氷厚計(EM-31/ICE)+レーザー距離計を左 舷に設置し、10Hzの頻度で氷厚を測定。
 - ・可搬型マイクロ波放射計(三台:6GHz、19GHz、36GHz) を左舷に設置し、放射輝度温度を測定して氷厚を推定。
 - ・短波・長波放射収支計を船首に設置し、開放水面・海氷 のアルベドを測定。
 - ・艦橋上にインターバルカメラ(KADEC-EYEII)を設置 し、前方の海氷被覆率を10分間隔で撮影。

氷上観測

- ・携行型電磁誘導式氷厚計(EM31-SH)を用いて、氷上観 測点上の測線に沿って氷厚を測定。
- ・携行型分光放射計(FieldSpec3)を用いて、氷上観測点 上の測線に沿って海氷、再凍結メルトポンドのアルベドを 測定。海氷コアサンプリングやメルトポンドのサイズや深 さとアルベド・マイクロ波放射特性、熱収支の関係に焦点 を当て、データを総合的に解析し、衛星観測のメルトポン ド推定アルゴリズムの開発・改良、予測モデル検証を進め

た。

韓国砕氷船アラオン号利用による共通基盤係留系設置・回収 2012年~2013年:カナダ海盆、マカロフ海盆観測

(実施項目)

海洋ボーフォート循環流量をモニタし、海盆スケールの海 運動変動と海洋循環変動の関連を理解する。

(主な観測項目)

ADCP、係留式 CTD・CT、水温ロガー

(4) 成果

海氷面積最小の記録を更新した 2012 年のデータや前後過去 6 年間で最も厚い氷況を捉えることができるなど、衛星観測で はわからない海氷自体の物理・化学的解析を進めることができ た。ボーフォート海洋循環と貯熱量の変動を捉える CTD 観測 網および係留系配置が実現し、太平洋側北極海の変動を調べる 国際的基盤データになった。基盤としての目的である、「海洋循 環の変動」、「海洋貯熱量変動(=海洋熱の開放)」、「貯淡水量分 布の変動」を直接観測で捉えることができ、海氷面積最小とな った 2012 年の海氷減少の解明に資するデータを得たことは大 きな成果である。

また、日本で初めて北西航路区間における EM 観測等を行い、 航路上の氷厚分布、船体の挙動、海水飛沫等のデータを取得で きた。

一方、海洋生態系研究に関する部分(研究課題 6)では、チ ャクチ海南部ホープ沖の生物学的ホットスポットでの係留系観 測から、海氷融解期の春季に加えて秋季にもブルームが起きて いることが明らかになった(Nishino et al., 2016)。また音響記 録装置によるナガスクジラの鳴音観測データを各種データと比 較した結果から、ナガスクジラの回遊と海氷の融解・結氷やそ の他の条件(水温・塩分・動物プランクトン量の変化)との関 係を調べた(Tsujii et al., 2016)。またバロー沖の係留観測デー タからも、海氷の消長に伴う物理・化学・生物に関する変化が 見られることが分かった。研究成果の詳細については、第3章・ 研究課題 6 の項に記載する。

我が国の研究活動においては、自国の砕氷船が無いため、北 極海での観測や調査にもどかしい思いが募ったことは拭えない が、北極海太平洋側一帯で総合的な観測・調査が行えた経験と データ取得は大変意義のあるものであり、航行予測や海洋生態 系の解明にとって大きな成果をもたらしたと言える。

(5) その他

外国砕氷船を基盤として提供するにあたり、順風満帆に進ん だわけではない。外国砕氷船への相乗りとなるため不自由さが あった。なかでも大きな課題となったのがシップタイムの交渉 だった。船側からは余裕を持った航海を要求されたが、1日違 うだけでも燃料負担額が膨らむ。為替相場の変動の影響を受け て契約時と精算時での為替差損が大きくなり、結果として、予 備費から差損分の補填を強いられた。また、船員の体調不良や 機器トラブル(本基盤係留機器に関するトラブルではない)が 発生し、航海変更の煽りをうけてシップタイムが失われ、観測 規模の縮小を強いられたことがあった。

北西航路部分に関しても乗船枠を基盤の契約の中で確保し、 課題での利用に使われた。2012年に日本初となる観測も行った が、年によってはカナダ当局の都合により航路が変わる、外国 人の乗船が制限されるなど、乗船ぎりぎりまで見通しが立たな かったりした。



2012 年 8 月 LSSL 号での WHOI 型係留系設置作業 (写真: 舘山一孝)



2012年8月カナダ海盆での氷上観測作業(写真:小野純)

4. 雲レーダー

基盤整備機関:千葉大学·国立極地研究所 執筆者:鷹野敏明

(1) 目的

気候に大きな影響を与える雲の役割を正確に把握するため、 雲物理量の3次元内部構造(雲粒の大きさ、密度、水と氷の割 合など)や雲中の鉛直運動構造(雲内の風の流れ・雲粒の動き) を明らかにできる「95 GHz ミリ波雲観測用ドップラレーダー」 を開発して、ニーオルスンに設置し定常観測を実施した(図 4.4.1)。



図4.4.1 ノルウェー スバールバル諸島ニーオルスンの国立極地研究 所北極観測基地 (78.9°N, 11.9°E) に設置された FALCON-A (右写 真) とコンテナ(左写真、緑のコンテナ)。コンテナ天井のテフロン窓 を通して、冬期もふくめ常時連続観測を行っている。

(2) 実施体制

本事業の基盤整備・雲レーダーFALCON-A の開発・運用は、 千葉大学と国立極地研究所との間で共同研究に係る協定書を 締結し、千葉大学・鷹野敏明と国立極地研究所・塩原匡貴が 担当した。雲レーダーの設計・製作および運用は千葉大学が 担当し、必要に応じてユーザーである他の研究課題の関係者 等とも打合せを持ちつつ、試験観測や解析、較正・評価作業 を進めた。

(3)実施状況(スペック含む)

本事業の雲レーダー(通称: FALCON-A: <u>FM</u>-CW (Frequency Modulated Continuous Wave) R<u>a</u>dar for <u>Cloud Observations - Arctic</u>)は、千葉大学で設計開発され 運用されている雲レーダーFALCON-Iを改良発展させた装 置で、高い感度と空間分解能を備えているのが特徴である。 FALCON-A は直径 1m のパラボラアンテナ 2 台で構成され、 一方から 95GHz の電波を放射し、雲で反射した電波をもう 一方のアンテナで受信する。この FALCON-A は、十数か国 が基地を置くニーオルスンにおいて唯一の W バンド(95GHz 帯) 雲レーダーであり、最も高い周波数の気象レーダーであ ることから、他のレーダーでは捉えることができない淡い高 層の雲を観測することが可能である。

本基盤整備の期間中の実施概要は、以下であった。 2011 年度:仕様検討と確定・設計および物品等調達 2012 年度:製作・開発、FALCON-Aの完成、テスト観測 2013 年度:テスト観測・校正、梱包、現地への運搬・設置、 テスト観測・校正、定常観測開始、調整、データ

解析

2014年度:定常観測、機器調整、データ解析、集中観測 2015年度:集中観測、定常観測、データ解析

FALCON-A の諸元を図 4.4.2 にまとめた。FM-CW 型の レーダーであるため、通常のパルス型レーダーに較べて 3 桁 程度低い送信出力にもかかわらず高い感度をしめしているこ と、高度分解能など空間分解能が極めて高いこと、などが特 長である。

レーダー諸元						
中心周波数	94.84GHz					
送信出力	約 1W					
観測高度	15km (通常時)					
高度分解能	48m(最小 9m)					
ビーム幅	0.2 度(15m at 5km)					
ドップラ速度幅	±3.16m/s(通常時)					
時間間隔	10 秒毎に1 データ(最小1秒)					

図 4.4.2 FALCON-A の装置諸元。FM-CW 型のレーダーであるため、通常のパルス型レーダーに較べて 3 桁程度低い送信出力にもかかわらず高い感度をしめしていること、高度分解能など空間分解能が極めて高いこと、などが特長である。

(4)利用課題と研究内容

本基盤整備 雲レーダー FALCON-A を用いた研究として、

以下を行ってきた。

課題 3:北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響:大気 プロセスの包括的研究

- ① FALCON-A の高空間分解能強度およびドップラー計測 による北極雲の詳細観測
- Fog Monitor (FM120; 東大・小池)、 Meteorological Particle Spectrometer (MPS; 東大・小池)、 Cloud Particle Microscope (CPM; 山梨大・小林) などの in situ 観測 による雲粒子データと FALCON-A データ の比較研究による雲微物理解析
- ③ CloudSAT/CPR による衛星観測データと FALCON-A データの比較解析による北極雲の内部構造解析と広域観 測解析

 ④ Micro Pulse Lidar (MPL)、Polarization MPL (PMPL)
 (極地研・塩原) と FALCON-A のデータ比較による雲微 物理解析

(5) 成果

1) 北極雲の詳細観測

FALCON-A によって 2013年9月16日に観測されたうろ こ雲の様子を 図 4.4.3 に示す。FALCON-A のデータを見る と、高度 4-6 km にある雲は、4-5 km の下層と 5-6 km の 上層の雲が異なった構造を示していることがわかる。上層の 雲は、厚さ 1 km 程度で、時間軸で 数分の持続時間で見え ており、雲の水平速度を 数 m/s 程度と仮定すると水平方向 のサイズが約1km となり、図の右上に掲げたカメラ画像で 見えるうろこを見ていることがわかる。このうろこは、上 下方向の動きはほとんどなく、安定した塊で存在しているこ とが FALCON-A の画像でわかる。一方、下層の雲は、拡散 した構造をしており、下方に落ちてきていることが FALCON-A の画像でわかる。この下層の雲は、上層のうろ こ雲の中で粒径が大きく成長した粒子が降ってきている様子 をしめしていると考えられる。また、これらの層はいずれも MPL でよく見えており、淡い雲であることから、 FALCON-A の高感度性能が十分に発揮されていると言って よい。



図 4.4.3 2013 年 9 月 16 日に ニーオルスンで観測されたうろこ雲の FALCON-A による強度の高度・時間図(左最上。その下は dBZ ス ケールの強度図)。下の 2 段は、Micro-Pulse Lidar の観測結果。淡い雲の詳細が一致しているが、両者の見え方が異なる部分もある。





図4.4.4 2014年12月11日の FALCON-A 観測データ。 下段が 強度図で、高度 1-5 km に雲があることがわか る。上段(左)はドップラー速度の図で、雲は -0.5 m/s で、 ゆっくりと下降している。上段(右)の図は ドップラースペ クトルマップで、縦軸が高度 0-15 km, 横軸はドップラー 速度で $-3.16 \sim +3.16$ m/s を示している。この図を見る と、雲内部の 100m 程度の薄い層で、上昇・下降の運動を 示す場所が存在することがよくわかる。

図 4.4.4 は、FALCON・A での雲のドップラー観測の例であ る。下段が 強度図で、高度 1-5 km に雲があることがわかる。 上段(左)の図はドップラー速度の図で、雲は -0.5 m/s で、ゆっ くりと下降している。上段(右)の図はドップラースペクトルマ ップで、縦軸が高度 0-15 km、横軸はドップラー速度で -3.16 -+3.16 m/s を示している。この図を見ると、雲内部の 100m 程 度の薄い層で、上昇・下降の運動を示す局所的場所が存在する ことがよくわかる。これらの結果は、北極雲の内部構造を解明 するために役立つ。

2) FM120, MPS と FALCON-A の比較観測結果

大気課題グループ(研究課題3)の小池真(東大)らが設置 した、粒径カウンター FM120 とのデータ比較を行った。 FM120 は雲粒子直径 2-50µm の粒径分布を測定できる装置 で、FALCON-A が設置されているニーオルスンの日本基地か ら 2.5 km 離れた、ツェッペリン山の頂上に設置され、2013 年11月より定常観測を行っている(図 4.4.5)。2014年6月 の雲内温度が 0℃ を超えていて、降雨(降雪)のない日時の データについて、FM120 で得られた雲粒子の粒径分布を用い て、レーダー反射因子 dBZ を算出し、これを FALCON-A の 観測データと比較した (図 4.4.6)。この図を見ると、FM120 で 得られている粒径分布の有効粒子半径が安定して 10µm 程度 以下である水雲の場合(図で黒枠で囲った部分)には、両者は 0-5 dB 程度以内で一致していることがわかる。これより大き い雲粒子を含む雲などの場合は、FALCON-A で観測された dBZ は、FM120 のデータから算出した dBZ より 10-20 dB も大きくなる。このことは、FM120 が直径 50 µm までの雲 粒しか測定できないが、それを超える雲粒子が存在しているこ とを示唆していると解釈できる。

レーダー反射因子 dBZ は粒径の6乗の積算であり、大きい 雲粒子の寄与が大きい。従って 50µm 以上の粒径の測定が不 可欠である。小池らは、2014年10月より粒子直径 25–1500µm



図 4.4.5 粒径カウンター FM120 は、FALCON-A から 2.5km 離れたツェッペリン山頂(高度約 450m)に設置された。



図 4.4.6 2014 年 6 月 21 日の FALCON-A で得られたレーダー反射 強度図 (上段)と、FM120 で得られた雲粒子の有効粒径半径(下段)。 中段は、FALCON-A で得た高度 450m でのレーダー反射因子 dBZ と、FM120 で得た粒径分布から算出した dBZ の比較。有効半径が 10µm 程度以下で穏やかな水雲の場合(図中の黒枠)には、両者は 0-5 dB 程度で一致しているが、それ以外では FALCON-A の dBZ が 10 dB 以上大きくなる場合が多い。

の測定が行える装置(MPS)をツェッペリン山に設置し観測を 開始した。このデータを用いて dBZ を算出したところ、粒径 300µm 程度までの雲粒子を考慮して算出した dBZ は FALCON-A の観測データに近づく結果となった。

3) FALCON-A と CloudSAT の同時観測データ比較

W バンド 94 GHz 雲レーダーを搭載している観測衛星 CloudSAT は、ニーオルスンから 数 km 以内を 16日に一度、 北行および南行の軌道で通過する。図 4.4.7. は 2013 年 9 月の FALCON-A の定常観測以降で、CloudSAT が FALCON-A から 2 km 程度以内を通過した際の CloudSAT のデータポ イント中心を示している。CloudSAT のフットプリントは 1.3

FALCON-A周辺のCloudSat観測点

CloudSat フットプリント: 長軸 (進行方向) 1.7km × 短軸 1.3km



図4.4.7 2013年9月の FALCON-A 定常観測開始以降で、地球観測衛星 CloudSAT が FALCON-A から 2km 程度以内を通過した際の、フットプリント中央の点を黄 色いピンで示してある。左図は北行 (Ascending passes)、右図は南行 (Descending passes) である。赤丸の中心に FALCON-A が位置していて、赤丸の半径は 500 m である。また、オレンジの楕円は、CloudSAT フットプリントの大きさである 1.3 km × 1.7 km の楕円を FALCON-A を中心として描いたものである。

× 1.7 km であり広い範囲の雲を観測するのに対して、 FALCON-A の観測ビームは 0.18°であり高度 5 km では 15 m と極めて細いビームであり、平面域で 1 万分の 1 の高分解 能であることになる。

図 4.4.8 は CloudSAT のデータ中心が FALCON-A から 544 m であった 2013 年 11 月 14 日の両者のデータを比較し たものである。dBZ のプロファイル比較を見ると、CloudSAT では高度 1–2 km に一層で見えている雲が、FALCON-A では 内部構造が分解されて 3 層に見えている。また CloudSAT で は空間分解能が低いため周囲の雲も含めた広い範囲を観測して おり、これが FALCON-A の強度との違いの原因と推測できる。



図 4.4.8 2013 年 11 月 14 日の CloudSAT 通過時の FALCON-A とのデータ比較。この時のデータ点間の距離は 544m であり、 CloudSAT のフットプリントに FALCON-A が入っている。左下図 の強度の高度プロファイルを見ると、CloudSAT で見える高度 1–2 km の 1 層の雲は、FALCON-A では 200m 程度の厚さの 3 層の 雲に分解されて見えていて、雲の内部構造詳細が観測できているこ とがわかる。また、右下図の FALCON-I の強度の高度・時間図を見 ると、雲の構造が時間的あるいは空間的に激しく変化していること がわかる。



図 4.4.9 2014年4月23日の CloudSAT 通過時の FALCON-A と のデータ比較。この時のデータ点間の距離は 約 3 km であり、 CloudSAT のフットプリントは FALCON-A から大きく離れてい る。FALCON-A のレーダー反射因子強度 dBZ の高度・時間図(右 下図)を見ると、3層の雲があることがわかる。

図4.4.9 は 2014年4月23日の FALCON-A と CloudSAT のデータ比較である。この通過では CloudSAT は FALCON-A から 3 km 余り離れた位置を通過したので、両者 は別の体積範囲を観測しているが、5 分前に通過した MODIS の可視画像を見ると薄い均一な雲が両者にかかっていることが わかる(右上図)。両者のレーダー反射因子強度 dBZ プロフ ァイルを比較すると、高度 1 km および 5 km の雲は、それ ぞれの強度がよく一致しているが、高度 3-4 km の雲は FALCON-A の強度の方が 5 dB 程度強い。また、FALCON-A の強度 dBZ の高度・時間図(右下図)を見ると、3 層の雲が見 えて、そのうち上下 (1 km および 5 km) の層は空間・時 間的変化が少ない均一な雲であるのに対して、高度 3-4 km の 雲は変化が激しいことが見て取れる。また、この層の内部の微 細な構造も、FALCON-A でよく捉えられている。

4) MPL、PMPL と FALCON-A の同時観測データ比較

図 4.4.10 は 2014 年 12 月 12 日の FALCON-A と MPL のデ ータ比較である。MPL、PMPL と FALCON-A は、ともに感 度のよいアクティブセンサーであり、また後方散乱に寄与する 物理量が異なるため、両者の同時観測データの比較により、雲 粒径や水・氷粒子の混合相解析など、雲微物理量の解明が可能 である。

FALCON-A MPL比較 2014/12/12 0-24UT



図 4.4.10 2014 年 12 月 12 日の FALCON-A (上段) と MPL(下 段) のデータ比較。

以上、1)~4)の成果は、本事業基盤整備として新たに開発・ 設置した雲レーダー FALCON-A が、2013年9月の定常運用 開始以来、一部期間の不調はあったものの、冬期も含めて安定 して質の良いデータを出し続けてきたことによるところが大き い。本事業期間に得られたデータは、引き続いての詳細な解析 により、北極雲についてさらに重要な知見をもたらすことが期 待できる。また、本事業終了後についても、継続して観測する ことにより、その長期変動など研究対象が拡がることが期待で きる。 5. 北極域データアーカイブ (ADS)

基盤整備機関:国立極地研究所 執筆者:矢吹裕伯

(1) 目的

北極域データアーカイブ(Arctic Data archive System : ADS) は、本事業で得られる観測データやモデルシミュレーション等 のプロダクトを保全・管理し、地球科学コミュニティー内でそ れらが円滑に利用できるための仕組みを提供する。また同時に、 多くの人々が多種多様な目的に応じて科学データを利用するこ とが可能となる供用システムとしての運用することを目的とし た。

受入れ対象のデータとしては、本事業の成果に加え、過去に 日本の公的資金で行われた北極地域の研究や、山岳・高所の寒 冷圏の研究の成果も視野に入れている。ADSは、データリポジ トリ機能、データ可視化システムおよび様々な形態のデータ公 開サービスの開発を推進し、規模としては、ICSU が提唱す る、"System of data systems"のなかの Regional や、 Interdisciplinary といったデータセンターとなることを目指し た。

ADSの構築及びその運用は、各分野間でのデータの相互利用 を図り、現場観測、収集データ、衛星データ、数値実験データ 等の分野融合データセットの構築を通して北極域の大気-海洋 --陸域システムの変動の実態とプロセスを解明、地球温暖化に おける北極域の環境変動の影響を評価、将来予測精度の向上に 貢献することを目的とした。

(2) 実施体制

ADS は国立極地研究所の国際北極環境研究センター内で整備しており、センターの特任メンバーが担当した。構想・推進・ 構築・運用に関する役割分担は下記のとおりである。 構想・推進:特任准教授 矢吹裕伯(2011年8月~) 構築・運営:特任技術専門員 川本温子(2011年11月~2013

年1月)

構築・運営:特任研究員 杉村剛(2013年4月~)

構築・運営:特任研究員 照井健志(2014年4月~)

(3) 実施状況

データ取扱規定およびデータポリシーの策定

本事業では取得した観測データの相互利活用を目的としてい る。その目的を遵守するために、観測データの提出や公開に関 する規則として、『「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により得られた調査観 測データの取扱要項』を制定した。特に重要な取決め事項とし て、データの提出時期、公開猶予期間、提出すべきデータの品 質レベルについて、GRENEデータワーキンググループや国立 極地研究所国際北極環境研究センターの教員の意見を取りまと めた。なおこの文書は、本事業の代表機関である国立極地研究 所の研究所会議を経ることにより、所が認定する要項として運 用した。

また、ADS では、様々なデータを取得しかつ、そのデータを 一般に公開することから、北極域データアーカイブの Web サー ビスを利用するすべての利用者が守るべき規則『北極域データ アーカイブデータポリシー』を策定した。データポリシーでは、 メタデータおよびデータの提出方法、それらのダウンロードに 関する合意事項、データ提供者の権利、引用などのルールを明 文化した。

衛星データ利用推進

ADS では極域の衛星データの利用推進を目的として JAXA と「地球観測衛星データ利用実証及びデータ処理技術開発に関 する基本協定」を締結し、JAXA-EORCより ALOS やALOS2、 AMSR2 等のデータの利用を可能にした。また AMSR2 の極域 プロダクトは準リアルタイムでの配信を受けることで北極研究 のための利用推進を行った。

(4) システムの概要

ADSでは、本事業で収集・公開するデータアーカイブを構築 するために、本事業の研究分担者を対象として ADS に取得す る既存データおよび観測データのアンケート調査を実施し、 ADS に実装必要なデータ容量かつデータの種類等 ADS の設計 のための情報を収集した。また、データを公開するために必要 となる、メタデータの構造を国内外の機関との連携が行いやす い形へ再定義を行い、ADS メタデータスタンダードの設計をし た。また受け入れるデータの種類を①In-situ (AWS, 定点ブイ など)、②Photo (写真・ビデオ)、③Image (マップ、ラスタ・ ベクタ・シェープ)、④Sample (分析データ)、⑤Radar (地上 レーダー観測)、⑥移動体 (移動ブイ)、⑦船舶 (XCTD,スポッ ト観測)、⑧航空機、⑨model (モデルシミュレーション)、⑩grid (観測値をグリッド化)の計 10 種類とした。これらのアンケ ートの集計をもとに、ADS のハードウェアー及びアプリケーシ ョンの設計を行った。

また、ADS では『「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により得られた調査 観測データの取扱要項』に則り、一般公開前のデータへ内部ア クセス権を設定するため、データダウンロード時のアクセス制 限を個人認証する機能を実装した。また JAXA データ等のデー タセットをダウンロードしたユーザー情報の入手を希望するデ ータ提供者には、それらの情報をフィードバックする仕組みを 実装した。

ハードウェアー

ADS の全てのハードウェアーは国立極地研究所内のサーバ 一室に設置した。北極域データアーカイブのシステム本体は、 本事業で得られる観測データ、大容量の衛星・モデルシミュレ ーション等のプロダクトを保全・管理し、地球科学コミュニテ ィー内でそれらが円滑に利用できるための基本的かつ最重要サ ーバーである。ADS のサービス公開及びデータの保管管理する ために、システムは、複数のデータサーバーを仮想化ソフト (XEN Sever)を用いて1台のデータサーバーとして扱い、常 時複数のデータサーバー上のデータを安定的に保管する仮想化 システムを構築した。またそれらの大規模かつ常時収集するデ ータをデータサーバーを停止することなく、大容量のデータを 安定的にバックアップする機能を持たせるためにシステムの冗 長化を行っている。また、それらシステムやデータの安定的な 保管・管理を行うためにバックアップストレージを持たせ定期 的なシステム全体のバックアップを行うシステムを構築した。



ADS のハードウェアー構成

研究データ登録システム

AMS (ADS Metadata registration System)

AMSはメタデータとデータセットをADSに登録するための Web インターフェースである。全ての研究データ登録は AMS から行うことができる。AMS からメタデータテンプレートと 登録マニュアルの入手が可能である。メタデータ記入済みのテ ンプレートと実データを AMS にアップロードすることで AMS に登録される。登録されたメタデータとデータセットは 自動的に KIWA へ反映され Web 上に公開される仕組みである。 AMS のメタデータの入力は、マクロソフトエクセルファイ ル上で作成することができ、現地観測したその場でメタデータ の作成が行うことを想定しネットワーク接続のないオフライン 環境上でもメタデータの作成が行うことができる。

ADS メタデータは、ISO19139 を基本としつつ独自の拡張を 加えた約 500 要素からなる内部スキーマを定義した。このスキ ーマ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 ットがもつ情報の細かさによって、粒度の小さいものから大き い、かつモデル出力等のグリッドデータまでそれぞれにあう形 でのメタデータの登録を行うことが可能である。

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①ISO19139:2007 や地 球科学メタデータの標準になりつつある NASA-GCMD (Global Change Master Directory) のメタデータである② DIF 形式の format を持つ。これらのメタデータは国際的なメ タデータ交換ツール OAI-PMH2 や、GEOSS の標準メタデー タ交換ツールである GI-CAT を通じてアクセスが可能である。

ADS では、国際的には WMO のプロジェクトである GCW (Global Cryosphere Watch) とのメタデータの連携をはじめ として GEO-Potal や SAON とのメタデータの連携の協議を 始めている。また国内的には DIAS プロジェクトとの連携を開 始している。

また、データプロバイダーへのデータ提供するためのインセ ンティブを確保するために、ADS では 2015 年 10 月より研究 データへの DOI 付与を開始した。ADS で付与する DOI は、国 際 DOI 財団の 9 番目の登録機関 JaLC (Japan Link Center) を通して行い、データ DOI 付与を行う機関である DataCite にも登録され国際的に流通することになる。ただし、ADS で DOI を付与するデータセットは、品質管理済みのデータセット に限定することとした。



研究データ登録システム (AMS) のシステム構成

メタデータ検索システム「極」

KIWA (Key service for InterWorking Arctic data)

「極(KIWA)」は、ADS に登録されている多種多様なデー タの検索・閲覧・ダウンロード機能を担う Web サービスである。 InterWorking とは Interoperability と同義語で、日本語では相 互運用性のあるという意味をもち、ADS では、ADS が保有す る様々なデータを研究者だけでなく、国内外のデータセンター とも InterWorking できるようなしくみを整えることを目標に 開発を進めた。

「極」は、ADS に登録されている、多種多様なデータを地図 空間にデータの種別ごとに表示する機能を持つ。また ADS で はデータの取得期間ごとにデータを検索する機能を持っており、 時空間毎にデータの検索が可能なシステムである。ADS では、 GoogleEarthを用いてポーラステレオ表示することにより、環 北極域のデータの所在をユーザーの直観的に時空間検索するこ とが可能な仕組みを持っている。



「極 (KIWA)」による登録データの検索画面

オンライン可視化アプリケーション VISION

観測とシミュレーションといった分野間でのデータ相互利用 が進展しづらい一因として、データの内容が作成者本人以外に は理解しづらいという理由が挙げられる。ADSでは、ウェブ上 においてデータセットを容易に可視化するためのアプリケーシ ョンを下記の要件を満たすことで構築した。

- ・容易に操作可能な GUI インターフェースを備えている。
- ・ユーザーの直感的な操作に対応して、インタラクティブに可 視化結果を変更できる。
- ・1~3次元データを多様な可視化アルゴリズムを用いて可視化 する。またこれらを動的、かつシームレスに表示する。
- ・可視化結果を画像・動画・数値データなどといった形式で抽
 出できる。

1) グリッドデータ

VISIONでは、既存アプリケーションでは、解析するまでに 非常に手間がかかった衛星データやモデル出力等のグリッドデ ータに関して、オンラインで解析が可能になった。VISIONは 2 次元のグリッドデータに対して、横断データを取得できると 共に、時系列データの抽出が可能である。またそれらの抽出デ ータをテキストデータでダウンロード可能である。また空間デ ータのプロットを時系列処理することでアニメーションの作成 等、プレゼンテーション作成ツールとしても有効である。本 VISION は観測研究者にとって有益な解析ツールとなっている。



VISION による衛星データの可視化及び解析画面

2) 衛星データ

本事業では衛星観測データの利用推進が重要事項であるため に、JAXA 提供及び他の衛星データの実装を行った。

・JAXA 提供 AMSR-2 Polar Product

・センサー輝度温度(06GHz、7GHz、10GHz、18Hz、
 23GHz、23GHz、36Ghz、89GHz)データ、及び衛星プロダクト(積算雲水量、可降水量、海氷密接度、降水量、
 土壌水分量、積雪深、海水面温度、海面風速)

$\boldsymbol{\cdot} \text{ NSIDC SSM/I Polar Product}$

・センサー輝度温度(19Hz、37Ghz、91GHz)データ、
 及び衛星プロダクト(海氷密接度)

JAXA-NIPR 連携協定において公開される AMSR2 の極域プ ロダクトの他に、全球プロダクトの VISION による公開を行っ た。これまで極域プロダクトを利用することを念頭に開発され てきたが、全球プロダクトの実装により、データ利用の一層の 推進が図られる。特に極域プロダクトだけではカバーしきれな かった、山岳・高所の寒冷圏や、海洋・気象において連続して いる領域についてのデータ利用が期待される。



VISION による AMSR2 全球プロダクトの実装画面

3) モデル出力グリッドデータ

観測及びモデル研究者の連携を進めるために、連携コーディ ネーターを通して研究課題及1び研究課題2とモデル及び観測 データの共有方法及び連携方法に関して協議を行った。その結 果、観測研究者の要望の多かった、観測を行っている地点での 過去における地上気象観測データ等の再解析データやモデルの 切り出しについて検討を行い、再解析データ(NCEP1)及び オフライン実験結果を実装し、研究者自身がオンラインで格子 点データを切り出し、解析可能な環境を公開した。

- NCEP reanalysis data (NCEP1)
- ・地表面気温、長波放射量、短波放射量、降水量、海面気圧、
 相対湿度、水蒸気量、風速
- Climate research Unit (CRU3.2.1)
- ·月平均気温、月平均降水量、雲量、水蒸気圧
- ELSE (Ensemble Land State Estimator) : Offline forcing data (Kim et al., 2009) $^{1)}$
- ・2m 気温、降水量、積雪量、水蒸気量、下向き短波放射、下 向き長波放射、10m 高風速、海面気圧
- N14: MATSIRO land surface model output (Nitta et al., 2014)
- ・積雪水量、積雪被覆度、地温、土壤水分量、土壤含氷量



VISION により再解析データ(NCEP1)の可視化解析画面

4) 時系列データ

VISIONではグリッドデータだけではなく、時系列データに 関しても解析ツールをサポートしている。ADSでは陸域課題で 実施された GTMIP (GRENE-TEA Model Inter comparison Project)のモデル強制力データの可視化公開を行った。本デー タセットは、約35年間の30分インターバルの複数要素を含む 膨大なデータセットであり、デスクトップのPC上での解析、 可視化は困難である。システムではこれらのデータセットの可 視化や平均値処理等が可能なWebアプリを開発し公開した。



VISION による GTMIP 強制力データの可視化画面

5) リアルタイムモニター

本事業では北極域での陸域・氷床変動のプロセス解明のため、 データ空白域での気象データを取得している。これらは自動気 象観測装置を用いて ARGOS システムを用いて、日本でモニタ ーが可能になっている。ADS ではこれらの気象データをネット ワークを介して自動取得データの可視化を行うシステムを作成 した。

現在、下記の4サイトのデータで気象観測データのリアルタ イムモニターを開始した。

- * ウッドバファロー : Wood Buffalo National Park on Canada (60°09'03" N, 113°38'17" W, 270m a.s.l.)
- * SIGMA-A : northwest Greenland ice sheet (78°03'N, 67°38'W, 1,490 m a.s.l.)
- * SIGMA-B : northwest Greenland (77°31'N, 69°04'W, 950 m a.s.l.)
- * SIGMA-D : northwest Greenland ice sheet (77°38'N, 59°07'W, 2,100 m a.s.l.)



北極域気象観測リアルタイムモニターの実装 (カナダ Wood Buffalo の場合)

6) 雲レーダー

本事業の研究基盤としてスパールバルのニーオルスンに雲レ ーダー (FALCON-A) を設置した。ADS ではレベル 1 のデー タのオフラインでの可視化サービスを開始した。



FALCON-Aの可視化画面

準リアルタイム極域環境監視モニター VISHOP

ADS では、極域の状態を素早く配信できることを目的に VISHOP を開発した。VISHOP は、準リアルタイムで JAXA より配信を受けている極域の衛星の数値データをブラウザ上で 表示する可視化サービスを開発した。海氷や海水面温度、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、アニメーションによるダイナミックな動きを、Web サイトにアクセスするだけで参照可能である。また、研究者や 一般利用者による作図工程を削減させることも機能も充実して いる。現在 VISHOP では海氷密接度、積雪深、海水面温度、 海氷厚、海氷流動量、マイクロ波イメージの実装を行っている。 海氷流動量は海氷変動予測課題(課題 7-1)が作成したアルゴ リズムを用いて ADS で準リアルタイムに計算を行い可視化し ている。また同時に極域の海氷面積の数値及びそのグラフも公 開を行っている。またこのサイトでは、プロジェクト期間中、 海氷変動予測課題(課題 7-1)で実施された夏季海氷分布予測 の結果も公開した。



VISHOP による海氷密接度と海氷分布予報値表示



海氷面積のグラフ表示

船舶用衛星データ配信システム VENUS

衛星プロダクトの実利用を推進するために、極域で航海する 船舶に対して、衛星データの自動配信と可視化を行う、プッシ ュ型サービスである船舶航行支援システム(VENUS)の開発 を行った。このシステムは、安価な通信量・システムで簡易に 様々な船舶上に搭載可能であることを念頭に置いて開発した。 このサービスはJAMSTECの研究船舶である「みらい」の北極 公開や南極観測隊の「しらせ」及び海鷹丸において導入とデー タ配信を行い、良好な結果を得ることができた。今後、北極海 航路における船舶や国内の観測船への導入拡大が期待できる。



船舶航行支援サービス (VENUS) のシステム本体



VISHOP による海氷流動量表示



VISHOP による海氷厚表示



船舶航行支援サービス(VENUS)のサービス Web 画面

(6) データ利用

登録データ

北極域データーカイブの現在のデータセット登録数は,下記の通りである。(2016年2月25日)

		H27年度(2月28日時点) H28年度			H25	年度	H24	年度	H23	年度	課題別合計(5年)		
	PI名	メタデータ 登録歌	良データ 2000	メタザータ 登録家	87-5 288	メタデータ 登録歌	良データ 全部家	*97-9 288	87-5 288	メタザータ 登録歌	87-3 288	メタザータ 登録歌	87-3 288
1	野沢(モデル)	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	2	2
2	参本(曲坡)	16	4	29	5	1	0	1	1	0	0	47	10
3	洋田(大気)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
4	复本(日本)	8	8	15	15	41	16	0	0	0	0	64	39
5	青木(温室前景気)	0	0	7	6	4	0	0	0	0	0	-11	6
6	着地(海岸主曲系)	6	6	2	0	15	1#1	0	0	0	0	23	7
7-1	山口(海岸・海水)	1	1	17	9	0	0	2	0	0	0	20	10
7-2	羽角(海岸-海水)	1	1	5	4	3	3	0	0	0	0	9	8
7-3	島田(海岸・海水)	0	0	3	3	3	3	0	0	0	0	6	6
ミレーダー		2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	3	3
年度別合計		34	22	72	36	69	25	3	1	0	0	178	84
第1 我データへのリンクはあるが、数データそのものはADSに登録されていない。													

ADS へのデータ登録状況

ADS サービスのアクセス状況

ADS のサービス開始時からの月集計のアクセス状況を図に 示す。様々な新サービスの立ち上げと知名度の向上により、 ADS 全体の 2014 年 5 月以降の月間訪問者数は 1000 を超え始 めた。VISION の訪問者は、サービス開始時より月間 70 名程 度の安定的なユーザーを確保している。VISHOP は月間 400 名程度の訪問者を確保している。2014 年度以降は、SNS を通 じたプロモーションや、学会等におけるデモンストレーション、 及び YouTube を通じたチュートリアル動画の配信により、利用 者の増加につながった。また VISION は訪問者に対してヒット 数が大きいことから、固定ユーザーによる多大なデータ利用が なされていることを示している。この事から実際に研究に利用 する固定ユーザーの確保について確認できた。また 2015 年 3 月以降 VISHOP の訪問者が急激に増加した。これは IARC で 公開していた北極海海氷モニターのサービスが終了したことに よるもので、JAXA の北極海海氷プロダクト利用者の多くは ADS-VISHOP を利用していると考えられる。



ADS のサービス開始以降の a) 利用者数と b) ヒット数

(7) アウトリーチ

ADSでは、研究者だけでなく一般へのデータ利用の推進を図 るために京都大学大学院理学研究科の地球科学輻合部可視化グ ループが中心になって進めているダジック(Dagik)プロジェ クトが開発した、Dagikアースのアプリケーションを改良して ADS オリジナルのコンテンツ及びサービスを開発した。ADS の作成したコンテンツは ADS でデータ公開を行う、AMSR2 プロダクトを利用して全球の海氷密接度、海水面温度、積雪分 布を時系列で描画するものである。Dagik コンテンツを表示す る大型の4次元地球展示装置の自作も行い、国立極地研究所の 南極・北極科学館で常設展示として利用されている。また小型 の可搬型4次元地球展示装置の自作も行い、研究者向けイベン トの他に様々な一般向けイベントでのアウトリーチ活動を行っ た。



ADS オリジナルの4次元地球議コンテンツ (海氷密接度、積雪深、海水面温度)

ブース出展

- 2014年6月30日-. 南極·北極科学館, 立川.
- 2014年9月20-22日.雪氷研究大会,八戸.
- 2014 年 10 月 17 日. 情報・システム研究機構シンポジウム 2014, 一ツ橋.
- 2014年10月28-30日.日露北極研究ワークショップ,市ヶ谷.
- 2014年11月17日. 北極海航路の利用実現に向けて, 品川.
- 2014年12月2-5日. 極域科学シンポジウム, 立川.
- 2015 年 2 月 16-19 日. 北極域データアーカイブシステム (ADS) による極域プロダクトデータの公開:「オホー ツク海と流氷」に関する国際シンポジウム, 紋別.
- 2015年3月22--24日.日本海洋学会2015年度春季大会,品川.
- 2015年4月27--30日.ASSW2015,富山.
- 2015年5月24-28日. JPGU2015, 幕張.
- 2015年9月13-16日. 雪氷研究大会, 松本.
- 2015 年 11 月 6 日. 特別セミナー「北極海航路の持続的実現 に向けて」,品川.
- 2015 年 11 月 9 日. 海洋生態系シンポジウム「ここまで分かった海洋生態系の変化」,品川.
- 2015年11月18-19日. 極域科学シンポジウム, 立川.

本事業主催以外の講演

- 2014 年 8 月 22 日. 北極域データアーカイブにおける可視化
 アプリケーション VISION の開発, 第 64 回 CAVE 研究
 会, 横浜.
- 2014年8月29-31日. 北極域データアーカイブの取組と海洋 学分野への応用,海洋学会海洋若手会「夏の学校」,静岡.
- 2014年10月15日. 北極域データアーカイブによるデータ解 析・可視化サービスの開発, 統計数理セミナー, 立川.

- 2014年11月28日. 北極域データアーカイブの取組と海洋学 分野への応用,海洋学会若手武者修行セミナー,愛媛.
- 2015年2月20日. 北極域データアーカイブによるデータ解析・可視化サービスの開発,北海道大学環境科学院セミナー,札幌.
- 2015年2月27日.参加機関の取組み(2)国立極地研究所・ 北極域データアーカイブの紹介と今後の取組み、ジャパ ンリンクセンター活用のための対話・共創の場(第2回) ~研究データへのDOI登録.~,市ヶ谷.
- 2015年3月25日.北極域データアーカイブによるデータ解析・可視化サービスの開発,(独)水産総合研究センター(札幌事業所),札幌.
- 2015 年 7 月 3 日.参加機関の取り組み・国立極地研究所中間 報告,ジャパンリンクセンター研究データへの DOI 登録 実験プロジェクト中間報告会,東京.
- 2015年7月9日. ADS VENUS の紹介, GODI 本社, 横浜.

引用文献

 Kim, H., Yeh, P. J. F. Oki, T., Kanae, S., 2009. Role of rivers in the seasonal variations of terrestrial water storage over global basins. Geophys. Res. Lett., 36, 17402.

6. 計算機資源について

整備機関:国立極地研究所 執筆者:事務局

研究基盤として整備が求めらた体制は前述までの通りだが、 本事業の特徴として、モデルと観測の連携があった。特に研究 課題1や研究課題7の研究サブ課題7・2などは、課題名がモデ ルを主体としたものとなっているように、事業開始当初から参 加研究者からモデルの高度化・精緻化やメカニズム解明に向け た数値実験のため、また、観測データや数値実験結果の解析に とって充実した計算機資源の整備が求められていた。特に、大 規模モデルの数値実験には、各研究課題のモデル担当者が高速 の計算機資源を利用できるよう、参画機関である海洋研究開発 機構が所有する地球シミュレーター(ES)の利用に向けた整備 を行った。

研究基盤の位置づけとは異なるが、共通基盤としての計算機 資源について本事業内での実施概要は下記の通りである。

ES 利用申請概要

研究課題名:急変する北極気候システム及びその全球的な影響 の解明

代表者:小室芳樹(研究課題1・海洋研究開発機構所属)

研究概要:北極は温室効果気体の増加など気候変動に対するイ ンプットに対して高い気候感度をもち、現在も急激な温暖 化と海氷の減少が進行している。本課題では急変する北極 気候システム及びその全球的な影響の統合的解明を進める ことを目的として、全球気候モデル、大気大循環モデル、 氷床モデル、海氷短期予測モデルを用いて、寒冷域プロセ スの高度化と再現性検証、感度実験による北極気候変動の メカニズム解明や各地域への影響評価、氷床変動における 氷床力学の効果解明、北極海航路の利用可能性評価に繋が る海氷分布予測のためのモデル構築と検証を実施する。

本課題は、国立極地研究所等との共同研究である北極気 候変動事業において、モデルを用いた研究の中核部分を担 うものである。

2013年度(第二世代 ES) 26,000 ノード時間積 21 名 2014年度(第二世代 ES) 23,830 ノード時間積 29 名 2015年度(第三世代 ES) 762,400 ノード時間積* 26 名

注

*2015 年度より ES のシステムが更新され、1 ノードあたりのピーク性 能が約 30%になっており、システム全体のピーク性能は、ノード数の 増加により 10 倍になっている。



海洋研究開発機構の地球シミュレーター(写真:渡邉英嗣)

7. 北極環境研究コンソーシアム(JCAR)事務局

執筆者: JCAR 事務局長 兒玉裕二

(1) 概要

北極環境研究コンソーシアム Japan Consortium for Arctic Environmental Research (以下 JCAR と呼ぶ) は、2008 年以 降毎年開催してきた日本地球惑星科学連合大会での「北極域の 科学」セッションや 2008 年と 2010 年に開催した国際北極研 究シンポジウム (ISAR)を開催していた研究者グループが発 起人となって、我が国における北極環境研究の強化をオールジ ャパン体制で取り組むために、各分野の北極研究者の参加によ り、2011 年 5 月の地球惑星科学連合大会の期間中に設立され た。当初は 241 人が会員登録をした。本事業が始まると、代 表機関である国立極地研究所に JCAR 事務局が設置された。 本事業では JCAR 事務局の運用に対して支援をしたが、JCAR 事務局は JCAR 活動を補助する機能を果たしているので、こ の報告では JCAR 活動について記述する。

(2) 実施状況

設立時は、発起人を中心に、関連分野のバランスを考慮し 選出された 23 名の運営委員から成る運営委員会が JCAR を運 営することとなった。初代運営委員長は大畑哲夫(当時:海洋 研究開発機構)。JCAR では北極環境研究に関する長期計画策 定や研究・観測推進の基盤整備に関する検討、国際協力・連携 の推進・検討、人材育成の方策の検討を行うとともに、それら を社会に対して提案していくことを目的として規約を整えた。 運営委員の任期は2年(再任は妨げない)と規約に定め、 2011-12年を第1期とし、その後2年毎を期と呼ぶことにして いる。2013年春に新しい第2期の運営委員が決まり、秋には 榎本浩之(国立極地研究所)が代表となった。2015年度で本 事業からの事務局サポートが終了することから、その後の運営 体制について 2014 年春より議論を開始した。2014 年 11 月の 極域科学シンポジウムの際に臨時全体集会を開催し、会員を主 体とする「学会的」な運営の方針が了承された。その後、運営 委員及び運営委員長の選出方法が体制検討 WG で議論され、 2015 年春には、会員による選挙にて第3期の運営委員が15名 選出され、分野のバランスを考慮して 4 名が第 3 期運営委員 会によって追加された。その後、運営委員の選挙によって、青 木輝夫(現岡山大学/当時気象研究所)が第3期運営委員長 として選出され、現在に至っている。

JCAR では特定の活動についてはワーキンググループ(WG) を結成し、そこで議論、実施している。それらの目的は次の通り。

- ・長期構想作成 WG:北極環境研究の長期構想を作成し、出版 することを調整・推進する。なお、2016 年度中に『北極環 境研究の長期構想』の改訂を検討する WG を立ち上げる予 定である。
- ・体制検討WG: JCAR を持続的に運営していく体制を検討する。
- ・規約検討WG: JCAR の体制の変化に対応して、規約が合理 的となるよう、その改正案を作成する。
- ・研究交流WG:北極環境変動にかかわる複数の専門分野の研 究者が、北極という共通のキーワードの下に集結し、密な研 究交流により相互理解を深めることで、国際的な枠組みの中 での、総合的・学際的な北極環境研究の推進を支援する。
- 人材育成WG:北極環境研究に関する人材育成の実態を把握し、人材育成活動を推進していく方策の検討を行った上で、その方策を推進する。
- ・データWG:国内および国際的な推進状況等に関する情報を 共有し、国内および国際的な動静に働きかけることで日本の 北極研究コミュニティーにおけるオープンサイエンス推進を 図る。
- ・情報・コミュニケーション WG: JCAR に関係する様々な立 場の人々に対して適切に情報を伝達・共有する方策を検討・ 実施する。



JCAR 体制図 (2016年3月31日現在)

(3) 実績·成果

1) 『北極環境研究の長期構想』の作成

これまでの JCAR の最大の実績は『北極環境研究の長期構 想』を作成したことと言える。我が国で「北極環境研究」に特 化した長期構想はこれまでなく、現状の分析及び将来取るべき 方針を示すことは重要であった。

2013 年に検討から実施に向けて動き出し、これをまとめる ために編成された WG が作業の進め方や編集作業を行なった。 3 回の全体ワークショップの他、各分野の検討や、分野間共通 の研究基盤についての討論会等も開かれた。当初は長期構想執 筆に多大な時間を費やすこと、研究のアイデアを公開してしま うことの不都合が懸念されたこともあった。しかし、執筆には 140 名を超える会員が協力を表明した。WG をはじめとし、執 筆者だけでなく、査読に関わった方、またこの活動の必要性や あるべき姿についての意見を出した方、それら北極に関わる研 究者の多くの議論と JCAR 事務局の支援により作成活動が進 められた。

長期構想では今後10年~20年で取り組むべき課題を考え、 各分野の多くのテーマが盛り込まれた。執筆者は自らの興味と 活動だけを主張するのではなく、広い視野から、重要な分野、 日本の研究者が活動すべき対象についても盛り込んだ。そこで 扱われた多くのテーマは国内にとどまらず、国際的にも提言し ていける完成度の高いものである。

日本の北極環境研究者が自らの分野の課題や方向性を示し、 他の分野の動きを知り、それらと協働を模索することを可能に するのがこの『北極環境研究の長期構想』であり、JCAR が本 長期構想を作成できた事実は、その存在意義を確たるものにし たと言っても過言ではない。

『北極環境研究の長期構想』は要約版と全体版から成り、そ



れぞれ日本語版と英訳 版がある。それらは WEB からダウンロー ドできる。また、出版 後、執筆者が集まって、 作成手順や今後の活用、 改訂などについて総括 を行った。その報告も 上記ウェブサイトに掲 載されている。 http://www.JCAR.org/ longterm/

2) ASSW 誘致と共催実施



世界の北極研究者や関連機関の代表者にとって最も重要な 会合の一つとして位置づけられている北極科学サミット週間 (Arctic Science Summit Week: ASSW) 2015の日本への招致 は JCAR が推奨し、日本学術会議国際対応分科会国際北極科 学委員会(IASC: International Arctic Science Committee)小 委員会が招致の提案を IASC 評議員会へ行い、2012年4月に 開催された ASSW モントリオール大会において決定された。 日本での開催は初めてであった。これを受け、JCAR は、 2013年に ASSW2015組織委員会を設置し、開催の準備を進め た。また、2014年秋に、国立極地研究所内にて ASSW2015事 務局の活動が始動するまで、JCAR 事務局が ASSW2015 事務 局を担当し準備を進めた。

2013 年 7 月に開催された第 1 回組織委員会で開催都市を富 山市とする事、開催期間は 2015 年 4 月 23 日~30 日とする事、 及び会場を決定した。

ASSW2015 では、関連団体の business meeting のほか、 IASC 設立 25 周年記念式典、北極科学研究の 10 年計画を策定 する 10 年に 1 度の会議、第 3 回国際北極研究計画会議 (ICARPIII)、日本主導で実施してきた国際北極研究シンポ ジウム (ISAR)の第 4 回シンポジウムが併せて開催された。 その準備に際し、計 5 回の ASSW2015 組織委員会、6 回の ISAR-4 関連会合および IASC 事務局とのミーティングが開催 され、ASSW2015 事務局として活動した。また、富山県と富 山市からの助成、日本学術会議との共同開催にも尽力し、 ASSW2015 は JCAR を含めた 4 機関の共催、文部科学省、外 務省を含めた 11 機関の後援を得て開催された。また、Peter Wadhams 氏からの提案と橋渡しで、高円宮妃殿下に ASSW2015の名誉総裁にお成り頂いた。

大会には、世界 26 の国と地域から 708 名が参加し、参加者 の数は過去最高となった。会期中には 13 件の IASC 関連会合、 17 件のサイドミーティング、及び 27 件の ISAR-4/ICARPIIIセ ッションが開催され、合計 511 件(口頭発表が 340 件、ポス ター発表が 177 件)の発表が行われた。ASSW2015 は大盛会 となり、我が国の研究成果を全世界の研究者に大きくアピール すると同時に、関係者に JCAR の存在を示すこととなった。 会の最後には、ICARPIIIの Steering group が中心となって作 成し、ISAR-4 の Science Steering Committee が了承した

「Toyama Conference Statement」(共同声明)が発表された。 この内容は、下記のサイトに掲載されている。

http://www.ASSW2015.org/program/pdf/ASSW_Conference_Sta tement_FINAL.pdf

3) ISAR-3、ISAR-4の実施

ISAR・3 は、2013 年 1 月 14 日~17 日、日本科学未来館で開 催された。主催は日本学術会議地球惑星科学委員会国際対応分 科会 IASC 小委員会と JCAR、共催は国立極地研究所、海洋研 究開発機構、北海道大学グローバル COE プログラム「総合フ ィールド環境科学の教育拠点形成」、アラスカ大学国際北極圏 研究センターであった。16 の国から約 270 名が参加した。7 件の一般セッションと 6 件の特別セッションが設けられ、ロ 頭 101 件、ポスター129 件の発表が行われた。また、優れた若 手研究者にポスター賞を授与した。1 月 14 日には公開講演会 を開催し、おりしも東京には珍しい大雪の中、65 名の参加が あった。ISAR・3 の運営は組織委員会が差配し、実施委員会が 作業を行った。また、国際助言委員会(International Advisory Committee)を設け、国際的な情報や助言を得た。

第 4 回国際北極研究シンポジウム (ISAR-4) については上記 2) を参照。

4) JpGU 開催中の活動(セッション、ブース出展、全体集会) 2007 年より毎年、日本地球惑星科学連合(JpGU)連合大 会で、複数の専門分野や学界が北極域という共通のキーワード の下に集結し、密な情報交換により相互理解を深めることを目 的として、「北極域の科学」のセッションが有志により開催さ れてきた。2011 年からは JCAR の研究交流 WG がその運営を 担っている。毎年代表コンビーナを決めて申請を行い、数人の サブコンビーナが補助した。50-80 人の参加があり、約 20 件 の口頭発表と 10 数件のポスター発表がある。

JCAR では JpGU の連合大会にて 2012 年より全体集会を、 2013 年からは全体集会に合わせてブース出展を行ってきた。 2012 年の全体集会では、約 40 名が参加し、事前に募集した質 間への回答や質疑応答を実施した。2013 年は活動報告および 活動計画について登録会員に説明を行った。2014 年は参加者 52 人を集め、活動報告に加え若手研究者派遣支援事業の説明 やベルモント・フォーラム公募に関する説明を行った。特に若 手研究者派遣支援事業に関しては、東京海洋大学の川合美千代 准教授より海外での研究についてお話しいただいた後、質疑応 答を行った。2015 年度は今後の JCAR 体制の方向性について など説明し質疑応答を行った。また、若手研究者派遣支援事業 にて平成 26 年度アメリカの IARC に派遣された Nuerasimuguli Alimasi 研究員から、活動について報告をいただいた。

ブース出展では、本事業や ADS グループと協力し、パンフ レットの配布などを通じて周知活動を実施し、大きな成果を上 げた。

5) 極域シンポジウムの共催

JCAR は 2015 年に開催された第 4 回極域科学シンポジウム 以降、本事業のセッションを共催している。2015 年には極域 科学シンポジウムに先立って開催された日米共同北極研究に関 するワークショップも共催し、日・アラスカ大学フェアバンク ス校の協力可能性を検討し、競争的資金への応募や政府への新 規予算提案を見据えた提言の取りまとめに一役買った。

6) 若手研究者派遣事業の審査

平成 26 年度に、アメリカ合衆国のアラスカ大学、カナダの ArcticNet 参加大学等を派遣支援対象機関として実施された北 極環境研究若手研究者派遣支援事業を国立極地研究所と共同し 実施した。具体的には、研究交流 WG が審査員を選任し、審 査を依頼。応募者の提出した研究計画の論理性、科学的意義・ 社会的意義などについて評価頂いた結果を WG で議論し、派 遣にふさわしい候補者を国立極地研究所へ推薦した。また、事 務局は、実施に必要な契約の締結に係る作業の補佐を行った。

7) 北極地図の作成

北極点を中心とした北極域を描き大判紙に印刷された地図は、 海外製のものはあるが日本製のものは普及していなかった。そ こで、北極研究に利用しやすい地図を提供するため、JCAR で 発案し、国立極地研究所予算使用の元、独自に北極域の地図を 作製した。

NOAA から公開されている ETOPO1 の陸上・海底の地形デ ータを使用して描いた地図に、氷河情報等を追加し、記載する 地名等は現在の日本の北極環境研究に重要と思われるものを優 先した。また、日本と北極との位置関係がわかりやすいよう、 地図下方に日本を入れて作図した。なお、作図作業は北海道地 図株式会社に発注した。

初版は、140cm×140cm 大のプリント用として作成し、その pdf ファイルを JCAR と国際北極環境研究センターのウェブサ イトより公開した。この地図は、2013 年度日本地図学会の 「地図展優秀地図選定」において、この年の選定対象地図 37 点のうちから 4 点選ばれたうちの一つとして、優秀賞を受賞 した。

2015 年には紙媒体での販売を開始するために改訂版を作製 し、ウェブサイトの pdf ファイルも更新した。2016 年 1 月現 在、国立極地研究所の南極・北極科学館売店で購入できる。フ ァイルのダウンロード用ホームペーシの URL は以下である。 http://www.nipr.ac.jp/aerc/map.html

8) AMAP 報告書の和訳



北極評議会 (Arctic Council) の6つの作業委員会 (Working Group) の一つである、Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) は4つ のプロジェクトにより活動して いる。そのうちの SWIPA (Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic) は、 北極の雪氷寒冷圏のアセスメン

トを行って報告書を多数発行している。そのうちの一つ Climate Change in the Arctic – A Hot Topic. SWIPA 2011には 北極における雪氷の最近の変化とその影響、今後取り組むべき 課題等が平易に記述されており、北極環境に関する教育や知識 の普及において有益であると判断して、SWIPA レポート翻訳 監修委員会を設置して和訳を行った。日本語版は、 http://www.amap.no/documents/doc/climate-change-in-thearctic-a-hot-topic/101からダウンロードできる。

9) ニュースレターの発行

第2期情報・コミュニケーションWGにより、コミュニケ ーションの活性化を目的とし、ニュースレターの制作が決定さ れ、2015年3月に第1号を発行した。JCARの活動報告や、 北極に関連する会合の参加報告などを主にWGが構成と編集 を担当している。2015年7月には第2号が発行された。ニュ ースレターの発行は第3期情報・コミュニケーションWGに 引き継がれ、2015年12月には第3号が発行された。今後は、 更なるコンテンツの充実を図りつつ継続していく予定である。

JCAR ニュースレターは登録会員へのメール配信とウェブサ イトからの公開を行っている。

http://www.JCAR.org/newsletter/

10) 人材育成

第3期人材育成 WG において、若手研究者に向けた情報ペ ージが作成された。

(http://wwwice.lowtem.hokudai.ac.jp/~sugishin/JCAR/information/information.html) $_{\circ}$

国際的なサマースクールやフェローシッププログラム、就職 に関する情報などがリストアップされており、人材育成に大き く貢献している。

国際的には、IPY2007/2008 時に IASC のバックアップによ り、APECS: Association of Polar Early Career Scientists (極域 若手研究者連合)が組織された。若手研究者が中心となって、 研究や就職機会の情報の交換などを活発に行っており、ASSW といった国際会議開催時に独自のワークショップを開いたり、 著名な研究者を招いてキャリアアップについてのパネルディス カッションを行ったりしている。しかしながら、日本ではこの ような活動は活発には行われてこなかった。そこで、人材育成 WG 協力の元、APECS Japan 設立に向けての活動が開始され、 2015 年にソフィア大学 (ブルガリア、ソフィア)において開 かれた APECS World Summit 2015 へ代表 1 名を派遣した。 日本独特の研究環境に起因する問題はまだ山積しているが、学 会イベントや、ASSW への派遣など、今後も人材育成検討 WG を通じ継続して APECS Japan の活動をサポートしていく。

(4) 事務局の機能について

JCAR 事務局は設立以降、JCAR の運営を支えてきた。 JCAR 設立後、定期的に運営委員会が滞りなく開催されたこと は、事務局なしにはあり得なかったであろう。また、登録会員 に向け、会合情報や研究報告など、北極環境研究に関する様々 な情報をメールにて配信している。これまで 500 件近くの情 報を配信しており、情報の周知に一役買ってきた。

上記でも述べた『北極環境研究の長期構想』の作成におい ては、20回以上に及ぶ WG 会合をはじめ、3回の全体ワーク ショップなど、数多くの会合の開催支援を行った。また、編集 作業も事務局にて行った。その結果、様々な専門分野の研究者 が協力と交流に大きく貢献した。

このように、様々な活動に携わり、JCAR も少しずつ周知され、JCAR 設立当初 241 人であった登録会員が、4 年を経過した現在、400 名を超えた。より大きな集団にするため、人文社会科学系の研究者や工学系の研究者の取り込み、南極関連の研究者への働きかけを検討している。

以上の実績を見ても、本事業のサポートをうけ、事務局が 作られ、活動費を得られたことは北極環境研究コミュニティー の活動に大きく影響を与えた。本事業なしには、短期のうちに これだけの実績を成し遂げることは不可能であったと言っても 過言ではない。

(5) 今後の取り組み

最近の北極を取り巻く情勢の変化や、これまでの成果が評価され 2015 年から北極域研究推進プロジェクト (ArCS) が始まるなど、研究者コミュニティーが果たすべき役割は大きくなっている。これらの変化を踏まえ、北極環境研究に携わる様々な学問分野の研究者を結集し、ボトムアップでコミュニティーの意見集約するシステムを有し、アカデミックな提言を積極的に行うことができる、会員及び関係機関にとって魅力的な組織となり、北極環境研究の発展に寄与することを継続して目指す。

第3期(2015–16)運営委員会や体制検討WGにおいてその 具体的な事項について検討している。以下にその検討項目を列 記する。

- ・異分野間の交流のために独自の研究集会を開催する
- ・JpGU「北極域の科学」セッションと全体集会の継続開催
- ・北極関連会合の共催を積極的に行う
- Researchmap を活用した会員相互の意見・情報交換と情報の発信
- ・ Journal (雑誌) の発行
- ・国内外の諸学術団体等との交流・協力と、国際集会の運営や 国際協力・連携
- APECS の国内活動サポートや ArCS、北極域研究共同推進 拠点(J-ARC Net)との連携

8. 国際連携推進

整備機関:国立極地研究所 執筆者:事務局

(1) 目的

北極研究体制に必要不可欠な国際連携の強化とこれを支える 人材の育成を図ることを目的として北極圏に位置する関係国の 主要研究機関への優れた若手研究者の派遣を支援し、国際共同 研究に参画する機会等を提供した。これにより我が国における 北極環境研究の将来を担う国際的視野に富む有能な研究者を養 成するとともに、新たな人的ネットワークを構築し、次代へ継 続する北極研究体制の創出に貢献した。

(2) 実施体制

2013年7月に行われた北極研究戦略小委員会の事前評価を経 て、2014年度に国際連携推進費が新たに認められ、北極環境研 究若手研究者派遣支援事業、拠点整備、専門家派遣を実施した。

1) 北極環境研究若手研究者派遣支援事業

- 実施・募集:国立極地研究所国際北極環境研究センター
- 募集・審査:北極環境研究コンソーシアム (JCAR) 人材育成 ワーキンググループ
- 協力機関:アメリカ・アラスカ大学、カナダ・ArcticNet 参加 機関

2) 拠点整備

- ①NIPR-Office in IARC (NIPR-Office)
 - 実施機関:国立極地研究所国際北極環境研究センター 協力機関:アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研

センター (IARC: International Arctic Research Center) 所在地:アメリカ・アラスカ州フェアバンクス市

整備内容: 2014 年 7 月から IARC との契約により IARC 内 に 4 つの執務ブースを借用。IRAC に滞在する日本人研究 者へオフィススペースとして提供した。

②Sophie Plaza Apartment (SPA-NIPR)

実施機関:国立極地研究所国際北極環境研究センター 協力機関:IARC

所在地:アメリカ・アラスカ州フェアバンクス市

整備内容:IARC管理下にあるフェアバンクス市内のソフィ アパートメント(2ベッドルーム・定員3名)1室を借り 上げ、アラスカに滞在する日本人研究者に宿泊施設として 居室を提供した。

3) 国際会議への専門家派遣

近年の北極を取り巻く状況の変化に対応すべく、諸会議へ 専門家を派遣した。

実施機関:国立極地研究所国際北極環境研究センター

(3) 実施状況

1) 北極環境研究若手研究者派遣支援事業

2014 年度に 10 名の若手研究者の派遣支援を実施した。対象 機関はアラスカ大学フェアバンクス校、カナダの ArcticNet 参 加大学等であった。整備時間は短かったが、本制度の継続を求 める声が大きく、研究支援として実りの多い事業であった。

公募・審査

募集要項に基づき、3回の公募と審査を行った。

	申請期間	審查結果通知日
第1回公募	平成26年5月中旬	平成26年6月6日
第2回公募	7月上旬	8月8日
第3回公募	10月上旬	11月7日

② 申請と採択状況

各回別

	申請数	採択数	不採択数
第1回公募	3	2	1
第2回公募	9	6	3
第3回公募	4	4	0
合 計	16	12	4

国別

	申請数	不採択数	
アメリカ	12	8	4
カナダ	4	4	0
合 計	16	12	4

③ 採択者一覧

次ページの表に掲載

④ サポート制度の整備

派遣支援者の現地(アラスカ)での活動支援のため、IARC に所属する日本人研究者の協力を得た。

- 2) 拠点整備
- 1 NIPR-Office

北極環境研究若手研究者派遣支援事業による派遣支援者を含めた我が国の北極研究に携わる研究者にオフィススペースとして提供した。

利用実績:8件 504人日

(2014年8月11日~2015年5月26日)

② SPA-NIPR

フェアバンクスを訪れる北極環境研究若手研究者派遣支援事 業による派遣支援者を含めた我が国の北極研究に携わる研究者 に宿泊施設として提供した。

利用実績 : 15 件 358 人日

(2014年7月3日~2015年4月21日)

- 3) 国際会議への専門家派遣
 - ①派遣内容

北極評議会(AC: Arctic Circle)等北極研究に関する国際 会議等へ研究者等を機動的に派遣し、我が国の研究知見を持 って国際的な貢献を行った。主な派遣会議は右記の通りであ る。 ・AC 北極圏植物相・動物相保存作業部会

(CAFF: Conservation of Arctic Flora and Fauna) 開催地: ケンブリッジベイ (カナダ)

2014年8月 1名

 AC 北極圏監視評価プログラム作業部会(AMAP: Arctic Monitoring and Assessment Programme)
 開催地:ホワイトホース(カナダ)
 2014年9月 3名

(派遣支援開始日順)

- Arctic Circle
 開催地:レイキャビック(アイスランド)
 2014年10月 1名
- Arctic Biodiversity Congress (CAFF 主催)
 開催地:トロンハイム (ノルウェー)
 2014年12月 1名

通し 番号		氏名	所属機関	役職		派遣先	受入担当者	派遣支援期間	研究計画名	申請回
т	紺屋:	恵子	海洋研究開発機構 地球表層循環分野	技術研究員	アメリカ	アラスカ大学 フェアバンクス校 Geophysical Institute	Regine Hock	2014年7月5日~ 2014年8月9日	グリーランド北東部氷帽群の近年の質量収支	第1回
2	伊勢:	武史	京都大学 フィールド科学教育研究センタ—	准教授	カナダ	カルガリー大学 Ecosystem and Public Health	Alessandro Massolo	2014年9月21日~ 2014年10月6日	フィールド観測・リモートセンシング・シミュレーションの統 合に向けて:高効率の光学観測を用いたデータ取得	第2回
3	藤野	匠	京都大学大学院情報学研究科	修士課程1年	アメリカ	アラスカ大学 フェアバンクス校 Institute of Arctic Biology	Knut Kielland	2014年10月9日~ 2015年3月31日	北方林における植物の光合成の変化:冬季は完全な休眠 期か?	第2回
4	星一	平	新潟大学大学院自然科学研究科	博士前期課程1年	カナダ	マニトバ大学 Center for Earth Observation Science	Masayo Ogi	2014年11月1日~ 2015年1月31日	北半球高緯度の海氷域変動による大気循環場への影響	第2回
5	箕輪	昌紘	北海道大学大学院環境科学院	博士後期課程1年	アメリカ	アラスカ大学 フェアバンクス校 Geophysical Institute	Martin Truffer	2014年12月1日~ 2015年2月28日	北極圏におけるカービング氷河と海洋や湖との相互作用 の解明	第2回
6	松野:	孝平	国立極地研究所 国際北極環境研究センター (受入機関:北大水産科学研究院)	特任研究員	カナダ	ラバル大学 Departement of Biologie	Louis Fortier	2014年12月8日~ 2014年12月26日	西部北極海における動物プランクトンの経年変動およびそ の影響	第3回
7	Nueras Alimas	simuguli ii	国立極地研究所 国際北極環境研究センター (受入機関:北見工業大学)	特任研究員	アメリカ	アラスカ大学 フェアバンクス校 IARC	Larry Hinzman	2015年1月15日~ 2015年4月15日	融雪及び春の凍結地表面変化過程に関するリモートセン シング研究	第3回
8	大東	忠保	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	特任助教	カナダ	マギル大学 Department of Atmospheric and Oceanic ScienceS	Pavlos Kollias	2015年2月24日~ 2015年8月24日	レーダーによって観測される北極域混層雲の特徴とその 発生環境場	第2回
9	大野:	浩	北見工業大学社会環境工学科	助教	アメリカ	アラスカ大学 フェアバンクス校 JARC	Larry Hinzman	2015年2月26日~ 2015年3月19日	永久凍土地下氷の物理化学解析:エドマ(アイスコンプレッ クス)の構造および形成過程解明に向けて	第2回
10	北原:	裕二郎	富山大学大学院理工学教育部	修士課程1年	アメリカ	アラスカ大学 フェアバンクス校 JARC	Larry Hinzman	2015年3月1日~ 2015年5月30日	永久凍土域での地上集中観測に基づいた積雪過程のパ ラメタリゼーションの高精度化	第3回
п	相澤	拓郎	筑波大学生命環境科学研究科	博士後期課程3年	アメリカ	アラスカ大学 フェアバンクス校 JARC	Larry Hinzman	辞退	北極低気圧と北極振動に関する研究	第1回
12	藤原	周	国立極地研究所 北枢観測センター (受入機関:北大水産科学研究院)	特任研究員	アメリカ	アラスカ大学 フェアバンクス校 Institute of Marine Science	Terry Whiteledge	辞退	チャクチ海南部生物学的ホットスポットにおける底層溶存 酸素濃度と基礎生産量の関係の評価	第3回

北極環境研究若手研究者派遣支援事業 採択者一覧

第5章

結語
全体まとめと今後の展望

プロジェクトマネージャ:山内 恭

全体まとめ

GRENE 北極気候変動研究事業は、本年3月末をもって終了 した。第2章から3章、4章がその成果のエッセンスである。 第2章で見ていただいたように、掲げられた戦略研究目標に向 け多くの科学的成果が得られたことで、目標が達成されたもの と考える。特に、目標毎にバラバラな成果が並んだ訳ではなく、 各々が有機的関係をもって連関していることも読み取っていた だけたかと思う(第2章図2.5.5)。北極温暖化増幅について、 相当程度の知見をまとめることができた。さらに第3章では、 目標達成の基礎固めとして貢献した多くの高度な研究成果を得 ており、北極研究の広がりを示している。そして第4章に記し た研究基盤は本事業遂行にあたって重要なベースを与えたもの であり、雲レーダーや北極域データアーカイブ(ADS)など、 一部は今後も引き続き研究に役立たせるものとなっている。

研究業績一覧で見ていただけるように、本事業によって得ら れた成果は、出版された査読付き原著論文だけでも360編を越 える数となっており、多くは一流の国際誌に掲載されており、 大変優れた業績を得ることができたと評価している。そして、 未だ論文として投稿されていない成果も多く散見し、今後数年 間は、これらの成果発信が続くものと期待している。観測・解 析データの多くは ADS 上にて公開されているので、今後は本 事業のメンバー以外によっても新しい視点での研究がなされる ことも十分に期待できる。一般向けの講演や新聞・ラジオ・テ レビ等の記事、プレスリリースの数の多さも特徴的で、単に専 門的な発信に止まらず、アウトリーチ活動も極めて活発であっ たことが証明される。期間中、多くの特任研究員が研究に従事 することで事業の研究水準が高められたとともに、若手研究者 への研究環境の提供の役割を果たした。そしてこれらの研究員 が、新しい次の職に移っていくことで、人材育成の観点からも 大いに貢献した。事業後半の1年間ではあるが、若手研究者の 海外派遣を実施する枠組みが得られたことで、人材育成にも国 際交流にも貢献することができた。

国際交流の面からは、さらに富山での北極科学サミット週間 ASSW 2015/国際北極科学シンポジウム ISAR-4/ ICARPIIIの 開催があった。その成功は、本事業の進展に裏付けられていた と言えよう。GRENE のセッションがもたれたとともに、全体 会議でのキーノート講演、その他多くのセッションでの本事業 の成果が発表されたことは、わが国北極研究のプレゼンスを内 外にしめすことになったと自負している。

観測活動も多岐にわたり、環北極に観測網を展開することが できた。これなどは、北極圏の一国では成されない幅の広い広 域の活動がなしとげられたもので、むしろ非北極圏国であるわ が国ならではの特徴となった。国立極地研究所が古くから観測 所を維持してきたスパールバル・ニーオルスン観測基地、フィ ンランドの観測網、北海道大学や名古屋大学、海洋研究開発機 構が長く観測フィールドとしてきたシベリア、東シベリア域、 多くの機関が観測・研究活動を続けてきていたアラスカ大学国 際北極圏研究センターを含むアラスカ域、同様に散発・分散的 ではあったが多くの機関がフィールドとしてきたカナダ北部、 そして北海道大学や気象研究所などが足跡を残していたグリー ンランド。いずれもが、密接な国際連携によって実現したもの である。また、「みらい」や「おしょろ丸」で航海した北極海 開水域、カナダや韓国砕氷船に同乗しての海氷域航海。さらに は、商業航空機による温室効果気体の観測も行った。というこ とで、オールジャパンで統合して活動したために、その及ぶ範 囲は北極全域と極めて広くなった。全ての観測網をこのまま、 今後も継続的に維持し続けることは不可能であろうが、代表的 な場所、北極研究に要と成る場所はより効率的な共同研究拠点 として維持・発展させていく必要があろう。

わが国初の分野横断、観測-モデル連携の融合的ネットワー ク型北極研究を、オールジャパンに近い形で実現できた。特に、 トップダウンの目標設定に対し、ボトムアップの研究課題で答 えるという、プロジェクト研究の理想的な形式をとるユニーク なものとすることができたことは幸いであった。これらは、形 にはなり難いが、ある意味、本事業で最も貴重な、誇れる成果 ではないかと思っている。

展望

今後、これらの研究成果の上に、さらなる研究を積み上げて 進展して行くことを期待したい。具体的な研究内容については、 既に第2章V.「まとめと今後の課題」に記したので繰り返さな いが、今後の方向性・可能性について記すこととする。モデリ ングにおいては、確度の高い観測から得られた様々な気候プロ セスを組み入れ、新しい地球システムモデルを構築できること を期待する。観測に関しては、既に記した様に、限られた点で 良いから代表性のある要となる観測拠点を維持し、モニタリン グ的な長期観測を継続したい。特に今後、北極海航路や資源探 査など経済的活動が盛んになることに伴う脆弱な北極環境の監 視という意味からも、環境汚染物質も含めたモニタリングが望 まれる。北極圏に領土を持たない非北極圏国としてはなかなか 難しい課題ではあるが、わが国の得意分野でもあり、地道な継 続観測が最後は重要になってくる。

いまもって観測点の空白となっている北極海中央部の観測実 現も課題である。過去、ソ連・ロシアは海氷上に漂流基地を作 って観測を担った。1937年の第1号(NP-1)以来、最近のNP-41 まで、欠測期間はあるものの、長年にわたって広い北極海から 貴重な観測データを提供してきた。氷山を使った(アメリカに よる氷島 T-3 など) 例もあるが、今や温暖化の中、氷上基地は 直に寿命になりあまり有効ではない。最近は、船舶を氷漬けに して長期観測を行う例が多い。カナダ砕氷船を使った 1997/98 年のアメリカを中心とした SHEBA(北極海表面熱収支計画) に始まり、大型のヨット(Tara, 2007; Vagabond)を使ったヨ ーロッパ連合のプロジェクト DAMOCLES (長期環境研究のた めの北極モデリング・観測可能性開発)、2015年半年間のノル ウェー耐氷船ランセを使った観測(N-ICE 2015)、そして今 2018 年後半に計画されているドイツ砕氷船 Polarstern を1年 間氷に閉じ込める計画 (MOSAiC=北極気候研究のための分野 横断漂流観測基地計画)などがある。わが国では、北極海観測 用の砕氷船の導入について根強い希望があるが、一方、地味で はあるが、このような氷に閉じ込められる船舶の用意・提供も 科学的には価値が高いのではないだろうか。一国だけでは無理 が多いかもしれない。むしろ国際協力による、かような観測を 主導することを考えるべきではないか。そういう目的では、南 極観測の任務を終えた旧砕氷船を活用する可能性もあると考え られる(初代「しらせ」は手遅れであるが、各国更新は続いて いるので候補は少なくない)。さらには、海氷ブイと自立航行 型潜水艇 (AUV、ROV) を合体したような、ブイよりも大型 の「自動観測漂流基地」(Automatic Drifting Station)を開発・ 展開することがあり得る方向ではないだろうか。海氷の上でも 良いし、開水面でも使える海洋観測、気象観測装置を併設した、 究極的には自動高層ゾンデ放球装置も備えたものが望ましい。 わが国の進んだ技術の貢献する方向かと思う。しかし、旧船舶 の利用にしろ、自動観測漂流基地にしろ、その設置、運用、補 給には砕氷船が欠かせない。氷上基地を砕氷船自身で担うこと も一方向であろう。いずれにしろ、自前の砕氷船が必須である。 国際的にも、極めて高い要請がある。

わが国の貢献という点からは、もう一つ、GCOM-W 衛星搭 載マイクロ波放射計 AMSR2 に触れざるを得ない。古くは 1980 年代のわが国最初の地球観測衛星である MOS-1 に搭載された マイクロ波放射計 MSR に端を発する測器であるが、連綿とわ が国の技術が継承発展されてきたもので、いまや世界中で北極 研究に欠かせない基本的な海水分布を導出する手段となってい る。本事業でも、各課題の中でそのデータが使われてきた。こ の衛星・測器は 2012 年の打ち上げ以来活躍してきているもの だが、その後継機の計画が決まっていない。設計寿命5年なら ば直に、かつてのAMSR-Eは9.5年の長寿命を保ったことを考 慮に入れても、なお、早急に開発を始め、衛星計画をかためな ければ成らない時である。しかるに、わが国の予算状況の厳し さから、未だ計画が定まっていないことは由々しき事態である。 わが国の北極への最大の貢献とも言えるこの衛星測器を今後も 引き続き実現することが極めて緊急度の高い課題である。

本事業の後継としては、すでに北極域研究推進プロジェクト (ArCS)が始まっている。これは単に自然科学の成果を上げ るだけではなく、人文・社会系の学問とも連携し、得られた科 学的成果をより分かりやすく一般社会に還元し、北極域に生き る先住民をはじめ、産業界、政府にも役立つよう情報提供して いくという役割を担う課題である。従って、科学の部分は、必 ずしも本事業の分野全てを受け継ぐものではなく、一部を発展 的に受け継いだものと言える。その意味から、ArCS にとどま らず、他にも本事業の科学を受け継ぐ研究が多く出現する事が 待ち望まれる。

北極環境研究コンソーシアム (JCAR) について、本事業開 始前は、北極研究計画の樹立などの役割を期待され、その役割 は大変重く位置づけられていた(第1章参照)。本格的に発足 後、本事業開始とともに本事業の一部としての支援を受け、わ が国初の北極研究者を集めたコミュニティーの代表組織として 活動し、数々の貴重な働きをなしてきた。今後も、貴重な役割 に期待し、大規模プロジェクトからは支援が望まれる。今、本 事業を終わるにあたり、改めて JCAR 自身の今後の方向性も考 えていかねばならない。学会的な組織を目指し、より独立性の 高い組織としていこうという動きがある。これも貴重な方向性 であるが、経済的な裏付けなどに確かな保証は得られにくい。 ArCS が始まって、その指向もあり、多くの目が北極に向けら れる必要が求められる中、JCAR もさらなる役割が期待されよ う。JCAR を単なる研究者集団ではなく、もっと広い、北極に 関心がありその影響を受ける人々に加わってもらうのはどうで あろうか。即ち、北極海航路や資源利用に関心がある経済界、 わが国北極政策の立場から密接に関係する政・官界、そして関 心の強い一般社会の人々まで含む、より広い北極コミュニティ ーの集合体とする。そのことで、個人会員以外からは賛助会員 として経済的支援を期待できることも経済的基盤を確立し独立 の組織としていて生きていく上で大きい支えではないだろうか。 情報発信・提供から意見集約など、働きは公汎に広がろう。市 民参加の新しい学の創出にもつながろう。学会化とは幾分異な る方向ではあるが、このような側面を兼ね備えることも一つの 方向ではないだろうか。事業報告としては趣旨にもとるものか もしれないが、これからの北極研究の展望としての提案である。

最後にあたり、本事業で築いてきた、分野横断、観測モデル 連携の北極研究グループを大切にしていきたい。わが国の中で、 これだけ多くの分野が集まることができたのは前例のない、画 期的なことであり、諸外国にも例を見ない。まさに、北極研究 だから実現したのであり、北極研究にこそ、その意義が深い。 これまで、わが国の行ってきたものは「国内プロジェクト」が 中心で、国際プロジェクトであっても一員として参加するのに とどまっていた。今後は、GRENE 北極気候変動研究事業で築 いた、横断的な貴重な繋がりを Legacy として大切にしつつ、 わが国がリードする真の「国際プロジェクト」を樹立すること も目指して、さらなる北極研究を進めていただきたい。 研究業績

究

下線は本事業に参加した研究代表者、研究分担者、特任研究員等を示す。末尾の○数字は論文が特に関係する研究課題番号等を示す。

2016年8月現在

1. 原著論文(査読有)

- Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kawamura, K., Raymo, M., Okuno, J., Takahashi, K., Blatter, H., 2013. Insolation driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice sheet volume. Nature, 500, 190–193. ①
- <u>阿部彩子</u>, <u>斎藤冬樹</u>, <u>吉森正和</u>, <u>小室芳樹</u>, <u>大石龍太</u>, <u>渡部雅浩</u>, 大垣内るみ, 高橋邦夫, 鈴木香寿恵, <u>川村賢二</u>, <u>野沢徹</u>, 2013. 気候変化における北極と南極の応答と役割: 過去と将来. 天気, 60, 901-908. ①
- Abe, Y., Natsuike, M., <u>Matsuno, K., Terui, T., Yamaguchi, A.</u>, Imai, I., 2013. Variation in assimilation efficiencies of dominant Neocalanus and Eucalanus copepods in the subarctic Pacific: consequences for population structure models. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 449C., 321-329, doi:10.1016/j.jembe.2013.10.023. 6
- Adachi, Y., Yukimoto, S., Deushi, M., Obata, A., Nakano, H., Tanaka, T.Y., <u>Hosaka, M.</u>, Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Shindo, E., <u>Tsujino, H.</u>, Mizuta, R., Yabu, S., Koshiro, T., Ose, T., Kitoh, A., 2013. Basic performance of a new earth system model of the Meteorological Research Institute (MRI-ESM1). Pap. Meteor. Geophys., 64, 1-18. ①
- Aguilar-Islas, A.M., Rember, R., <u>Nishino, S., Kikuchi, T., Itoh, M.</u>, 2013. Partitioning and lateral transport of iron to the Canada Basin. Polar Science, 7, 2, 82-99, doi:10.1016/j.polar.2012.11.001. ⁽⁶⁾
- Aizawa, T., Tanaka, H. L., 2016. Axisymmetric structure of the long lasting summer Arctic cyclones. Polar Science, 10, 192-198, in press. ③

Aizawa, T., <u>Tanaka, H. L.</u>, Saitoh, M., 2013. Rapid arctic cyclogenesis simulated by the cloud resolving global model NICAM. Meteor. Atmos. Phys., 126:105-117. doi:10.1007/s00703-013-0272-6. ③

- Akiyoshi, H., Nakamura, T., Miyasaka, T., Shiotani, M., Suzuki, M., 2016. A nudged chemistry-climate model simulation of chemical constituent distribution at northern high-latitude stratosphere observed by SMILES and MLS during the 2009/2010 stratospheric sudden warming. J. Geophys. Res. Atmos., 121, 1361-1380. ①
- <u>Alimasi Nuerasimuguli</u>, 榎本浩之, Jessica Cherry, Larry Hinzman, <u>亀田貴雄</u>, <u>杉浦幸之助</u>, <u>堀 雅裕</u>, 2016. 航空機搭載 6GHz マイクロ波放射計 による冬季アラスカの地表面状態の観測. 雪氷,78 (4), 185-203. ④
- Amano-Sato C, Akiyama, S., Uchida, M., Shimada, K., Utsumi, M., 2013. Archaeal distribution and abundance in water masses of the Arctic Ocean, Pacific sector. Aquat Microb Ecol, 69, 101-112. 🗇
- Amamo-Sato, C., Akiyama, S., Uchida, M., Li, Q., Utsumi, M., 2013. Archaeal and bacterial abundance, cell volume, and biomass in the Pacific sector of the Arctic ocean. J. Bioind. Sci., 2, 1-7. 2
- Ando, Y., Ogi, M., <u>Tachibana, Y.</u>, 2015. Abnormal winter weather in Japan during 2012 was controlled by large-scale atmospheric and small-scale oceanic phenomena. Mon. Wea. Rev., 143, 54–63. doi:10.1175/MWR-D-14-00032.1. ③
- Anna K., Liljedahl, J., Boike, Daanen, Fedorov, A. N., Frost, Grosse, G. V., G., Hinzman, L. D., <u>lijma,Y.</u>, Jorgenson, J. C., Matveyeva, N., Necsoiu, M., Raynolds, M. K.,Romanovsky, V. E., Schulla, J., Tape, K. D., Walker, D. A., Wilson, C. J., <u>Yabuki, H.</u>, Zona, D., 2016. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. Nature Geoscience 9, doi:10.1038/ngeo2674. ADS
- Aoki, T., Matoba, S., Yamaguchi, S., Tanikawa, T., Niwano, M., Kikuchi, K., Adachi, K., Uetake, J., <u>Motoyama, H., Hori, M.</u>, 2014. Light-absorbing snow impurity concentrations measured on Northwest Greenland ice sheet in 2011 and 2012, Bulletin of Glaciological Research, 32, 21-31. doi: 10.5331/bgr.32.21. ④
- Aoki, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Matoba, S., Uetake, J., Masuda, K., Ishimoto, H., 2013. Numerical Simulation of Spectral Albedos of Glacier Surfaces Covered with Glacial Microbes in Northwestern Greenland, Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean (IRS2012), Robert Cahalan and Jürgen Fischer (Eds), AIP Conf. Proc. 1531, 176. doi: 10.1063/1.4804735. ④
- Applegate, P.J., Kirchner, N., Stone, E.J., Keller, K., <u>Greve, R.</u>, 2012. An assessment of key model parametric uncertainties in projections of Greenland Ice Sheet behavior. The Cryosphere, 6 (3), 589-606. ④
- Arai, M., Tayasu, I., Komatsuzaki, M., Uchida, M., Kaneko, N., 2013. Changes in soil aggregate carbon dynamics under no-tillage with respect to earthworm biomass revealed by radiocarbon analysis. Soil Tillage Res., 126, 42-49. doi: 10.1016/j.still.2012.07.003. ②
- Belikov D.A., Bril, A., Maksyutov, S., Oshchepkov, S., Saeki, T., Takagi, H., Yoshida, Y., Aoki, S., Yokota, T., 2014. GOSAT retrievals and NIES transport model simulation of column-averaged CO₂ concentrations in the subarctic. Polar Science, 8, 129-145. doi:10.1016/j.polar.2014.02.002.
- Belikov, D. A., Maksyutov, S., Krol, M., Fraser, A., Rigby, M., Bian, H., Agusti-Panareda, A., et al., 2013. Off-line algorithm for calculation of vertical tracer transport in the troposphere due to deep convection. Atmos. Chem. Phys., 13, 1093-1114. doi:10.5194/acp-13-1093-2013.
- Belikov, D.A., Maksyutov, S., Sherlock, V., S., Aoki, S., Deutscher, N.M., Dohe, S., Griffith, D., Kyro, E., et al., 2013. Simulations of column-average CO₂ and CH₄ using the NIES TM with a hybrid sigma–isentropic (σ–θ) vertical coordinate. Atmos. Chem. Phys., 13, 1713-1732. doi:10.5194/acp-13-1713-2013. (5)
- Bindschadler, R.A., Nowicki, S., <u>Abe-Ouchi, A.</u>, Aschwanden, A., Choi, H., Fastook, J., Granzow, G., <u>Greve, R.</u>, Gutowski, G., Herzfeld, U.C., Jackson, C., Johnson, J., Khroulev, C., Levermann, A., Lipscomb, W.H., Martin, M.A., Morlighem, M., Parizek, B.R., Pollard, D., Price, S.F., Ren, D., <u>Saito, F.</u>, Sato, T., <u>Seddik, H.</u>, Seroussi, H., Takahashi, K., Walker, R., Wang, W.L., 2013. Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea level (the SeaRISE project), Journal of Glaciology, 59 (214), 195-224. ①④
- Bohn, T.J., Melton, J.R., <u>Ito, A.</u>, Kleinen, T., Spahni, R., Stocker, B.D., Zhang, B., Zhu, X., Schroeder, R., Glagolev, M.V., <u>Maksyutov, S.</u>, Brovkin, V., Chen, G., Denisov, S.N., Eliseev, A.V., Gallego-Sala, A., McDonald, K.C., Rawlins, M.A., Riley, W.J., Subin, Z.M., Tian, H., Zhuang, Q., Kaplan, J.O., 2015. WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia. Biogeosciences, 12, 1907-1973. doi:10.5194/bgd-12-1907-2015.
- Buizert, C., Martinerie, P., Petrenko, V.V., Severinghaus, J.P., Trudinger, C.M., Witrant, E., Rosen, J.L., Orsi, A.J., Rubino, M., Etheridge, D.M., Steele, L.P., Hogan, C., Laube, J.C., Sturges, W.T., Levchenko, V.A., Smith, A.M., Levin, I., Conway, T.J., Dlugokencky, E.J., Lang, P.M., Kawamura, K., Jenk, T.M., White, J.W.C., Sowers, T., Schwander, J., Blunier, T., 2012. Gas transport in firn: multiple-tracer characterisation and model intercomparison for NEEM, Northern Greenland. Atmos. Chem. Phys., 12, 4259-4277. ⁽⁵⁾
- Cho, J., Kim, W., Miyazaki, S., Komori, D., Kim, H., Han, K. S., Kanae, S., Oki, T., 2013. Difference in the Priestley–Taylor coefficients at two different heights of a tall micrometeorological tower. Agric. For. Meteorol., 180, 97-101. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.05.007. ⁽²⁾
- Choi, M., Chung, H., Yamaguchi, H., Nagakawa, K., 2014. Arctic sea route path planning based on an uncertain ice prediction model. Cold

Regions Science and Technology, 109, 61-69. ⑦

- Choi, M., Chung, H., <u>Yamaguchi, H., De Silva, L.W.A.</u>, 2013. Application of Genetic Algorithm to ship route optimization in ice navigation.Proc. 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland. 15p. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756.7
- Clinton, J.F., Nettles, M., Walter, F., Anderson, K., Dahl-Jensen, T., Giardini, D., Govoni, A., Hanka, W., Lasocki, S., Lee, W.S., McCormack, D., Mykkelveit, S., Stutzmann, E., <u>Tsuboi, S.</u>, 2013. Real-time geophysical data enhance Earth system monitoring in Greenland, Eos Trans., AGU, 95 (2):13-14. doi:10.1002/2014E0020001,2014. ④
- Cook, J., Edwards, A., Takeuchi, N., Irvine-Fynn, T., 2015. Cryoconite The dark biological secret of the cryosphere. Progress in Physical Geography, 40,66-111. doi:10.1177/0309133315616574.
- De Silva, L.W.A, Yamaguchi, H., 2016. An assessment of short-term sea ice predictions in the Northern sea route, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31–June 3, 7. 7
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., Ono, J., 2015a. Ice-ocean coupled computations for the sea ice prediction to support ice navigation in the Arctic Ocean. Polar Research, 34, 25008. http://dx.doi.org/10.3402/polar.v34.25008, 1-18. 7
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2015b. Mechanisms of interaction between mesoscale ocean eddies and sea ice in high-resolution ice-ocean coupled model of the Laptev Sea in summer.Proc. 23rd Intern. Conf. Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC'15), June 14-18, Trondheim, Norway, ISSN 0376-6756, 10p. 7
- Ershova, E. A., Hopcroft, R. R., Kosobokova, K. N., <u>Matsuno, K.</u>, Nelson, R. J., <u>Yamaguchi, A.</u>, Eisner, L. B., 2015. Long-Term Changes in Summer Zooplankton Communities of the Western Chukchi Sea, 1945-2012, Oceanography, 28, 3, 100-115. doi: 10.5670/oceanog.2015.60. (6)
- Fedorov, A.N., Gavriliev, P.P., Konstantinov, P.Y., <u>Hiyama, T., Iijima, Y.</u>, Iwahana, G., 2014. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. Ecohydrology, 7, 188-196. doi: 10.1002/eco.1378. ②
- Fedorov, A.N., Ivanova, R.N., Park, H., Hiyama, T., Iijima, Y., 2014. Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia. Polar Science, 8, 114-128. doi: 10.1016/j.polar.2014.02.001. ②
- Fransson, A., Chierici, M., Nomura, D., Granskog, M.A., Kristiansen, S., Martma, T., Nehrke, G., 2015. Effect of glacial drainage water on the CO₂ system and ocean acidification state in an Arctic tidewater-glacier fjord during two contrasting years. J. Geophys. Res., 120, 2413-2429. doi:10.1002/2014JC010320.
- Fujiwara, A., Hirawake, T., Suzuki, K., Eisner, L., Imai, I., Nishino, S., Kikuchi, T., Saitou, 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. 6
- <u>Fujiwara, A., Hirawake, T., Suzuki, K.,</u> Imai, I., <u>Saitoh, S.-I.</u>, 2014. Timing of sea ice retreat can alter phytoplankton community structure in the western Arctic Ocean. Biogeosciences, 11, 7, 1705-1716. ⁽⁶⁾
- Fujiwara, A., <u>Hirawake, T., Suzuki, K., Saitoh, S.-I.</u>, 2011. Remote sensing of size structure of phytoplankton communities using optical properties of the Chukchi and Bering Sea shelf region. Biogeosciences, 8, 3567-3580. ⁽⁶⁾
- 古市正彦、<u>大塚夏彦</u>, 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,運輸政策研究学術研究論文, 19 (1).⑦ Furuichi, M., <u>Otsuka, N.</u>, 2014. Proposing a common platform of shipping cost analysis of the Northern Sea Route and the Suez Canal Route. Maritime Economics & Logistics, 17, 9-31, 10.1057/mel.2014.29.⑦
- Galanin, A.A., Lytkin, V.M., Fedorov, A.N., Kadota, T, 2013. Glacier reduces in Suntar-Hayata Range and methodological aspects of their estimations. Ice and Snow, 4 (124), 30-42. ④
- Galanin, A.A., Lytkin, V.M., Fedorov, A.N., <u>Kadota, T</u>, 2014. Age and extent of the last glacial maximum in Suntar-Hayata Range based on lichenometry and Schmidt Hammer test. The Earth Cryosphere, XVIII, 2, 72-82. ④
- <u>Ghosh, A., Patra, P.K., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A.</u>, Etheridge, D.M., <u>Sugawara, S., Kawamura, K.</u>, Miller, J.B., Dlugokencky, E.J., Krummel, P.B., Fraser, P.J., Steele, L.P., Langenfelds, R.L., Trudinger, C.M., White, J.W.C., Vaughn, B., Saeki, T., <u>Aoki, S., Nakazawa,</u> <u>T.</u>, 2015.Variations in global methane sources and sinks during 1910-2010. Atmos. Chem. Phys., 15, 2595-2612. ⁽⁵⁾
- Gillet-Chaulet, F., Gagliardini, O., Seddik, H., Nodet, M., Durand, G., Ritz, C., Zwinger, T., Greve, R., Vaughan, D.G., 2012. Greenland ice sheet contribution to sea-level rise from a new-generation ice-sheet model, The Cryosphere, 6(6), 1561-1576.
- Goto, D., Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T., 2013a. A high-precision continuous measurement system for the atmospheric O₂/N₂ ratio at Ny-Ålesund, Svalbard and its preliminary observational results. Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.) 57 (1), 17–27. ⁽⁵⁾
- <u>Goto, D., Morimoto, S., Ishidoya, S.</u>, Ogi, A., <u>Aoki, S., Nakazawa, T.</u>, 2013b. Development of a high precision continuous measurement system for the atmospheric O₂/N₂ ratio and its application at Aobayama, Sendai, Japan. J. Meteorol. Soc. Japan, 91, 179-192.
- Graven, H.D., Keeling, R.F., Piper, S.C., Patra, P.K., Stephens, B.B., Wofsy, S.C., Welp, L.R., Sweeney, C., Tans, P.P., Kelley, J.J., Daube, B.C., Kort, E.A., Santoni, G.W., Bent, J.D., 2013. Enhanced seasonal exchange of CO₂ by northern ecosystems since 1960. Science, 341, 1085-1089. (5)
- Greve, R., Herzfeld, U.C., 2013. Resolution of ice streams and outlet glaciers in large-scale simulations of the Greenland ice sheet, Annals of Glaciology, 54 (63), 209-220. ④
- Gueguen, 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. Front. Mar. Sci., doi:10.3389/fmars.2015.00078.6
- Gueguen, C., McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., <u>Itoh, M.</u>, Narita, H., <u>Nishino, S.</u>, 2012. The nature of colored dissolved organic matter in the southern Canada Basin and East Siberian Sea. Deep-Sea Res. II, 81-84, 102-113, doi:10.1016/j.dsr2.2011.05.004. ⁽⁶⁾
- Hachikubo, A., Yamaguchi, S., Arakawa, H., Tanikawa, T., Hori, M., Sugiura, K., Matoba, S., Niwano, M., Kuchiki, K., Aoki, T., 2014. Effects of temperature and grain type on time variation of snow specific surface area. Bulletin of Glaciological Research, 32, 47–53.
- Hagihara, Y., Okamoto, H., Luo, Z., 2014. Joint analysis of cloud-top heights from CloudSat and CALIPSO: New insights into cloud-top microphysics. J. Geophys. Res., 119, 4087-4106. doi:10.1002/2013JD020919. ③
- Hagihara, Y., Okamoto, H., 2013. Global Cloud Distribution Revealed by Combined Use of CloudSat/CALIPSO: Comparison of Using CALIPSO Version 2 and 3 Data, Current problems in Atmospheric radiation (IRS 2012), Proc. International Radiation Symposium. AIP Conf. Proc., 1531, 456-459. doi:10.1063/1.4804805. ③
- Harada, N., Sato, M., Oguri, K., Hagino, K., Okazaki, Y., Katsuki, K., Tsuji, Y., Shin, K.-H., Tadai, O., <u>Saitoh, S.-I.</u>, Narita, H., Konno, S., Jordan, R.W., Shiraiwa, Y., Grebmeier, J., 2012. Enhancement of Coccolithophorid blooms in the Bering Sea by recent environmental changes. Global Biogeochemical Cycles, doi:10.1029/2011GB004177.
- Haraguchi, T.F., Uchida, M., Shibata, Y., Tayasu, I., 2013. Contributions of detrital subsidies to aboveground spiders during secondary succession, revealed by radiocarbon and stable isotope signatures. Oecologia, 171, 935-944. doi: 10.1007/s00442-012-2446-1.2

- Hashino, T., Satoh, M., Hagihara, Y., Kubota, T., Matsui, T., Nasuno, T., Okamoto, H., 2013. Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO. J. Geophys. Res., 118, 7273-7292. doi:10.1002/jgrd.50564. ③
- Hayasaka, H., Tanaka, H. L., Bieniek, P. A., 2016. Synoptic-scale fire weather conditions in Alaska. Polar Science, 10, 217-226, in press. ⁽²⁾ Hayashi, K., Shimomura, Y., Morimoto, S., <u>Uchida, M.</u>, Nakatsubo, T., Hayatsu, M., 2016. Characteristics of ammonia oxidation potentials and

ammonia oxidizers in mineral soil under Salix polaris-moss vegetation in Ny-Ålesund, Svalbard. Polar Biol., 1-17. doi: 10.1007/s00300-015-1829-2, in press.②

- Hayashi, K., Cooper, E.J., Loonen, M.J.J.E., Kishimoto-Mo, A.W., Motohka, T., <u>Uchida, M.</u>, Nakatsubo, T., 2014. Potential of Svalbard reindeer winter droppings for emission/absorption of methane and nitrous oxide during summer. Polar Science, 8, 196-206. doi: 10.1016/j.polar.2013.11.002.
- Hinzman L.D., Ohata T., Polyakov I.V., Suzuki R., Walsh, J.E., 2013. JAMSTEC-IARC international collaboration enhancing understanding of the Arctic climate system. Polar Science, 7, 49-52. 2
- Hioki, N., Kuma, K., Morita, Y., Sasayama, R., Ooki, A., Kondo, Y., Obata, H., Nishioka, J., Yamashita, Y., Nishino, S., Kikuchi, T., Aoyama, <u>M.</u>, 2014. Laterally spreading iron, humic-like dissolved organic matter and nutrients in cold, dense subsurface water of the Arctic Ocean. Scientific Report, 4, 6775. doi:10.1038/srep06775. 6
- Hirakata, M., Okamoto, H., Hagihara, Y., Hayasaka, T., 2014. Comparison of global and seasonal characteristics of cloud phase and horizontal ice plates derived from CALIPSO with MODIS and ECMWF. J. Atmos. and Ocean. Tech., 31, 10, 2114-2130. doi:10.1175/JTECH-D-13-00245.1. ③
- Hirawake, T., Shinmyo, K., Fujiwara, A., Saitoh, S., 2012. Satellite remote sensing of primary productivity in the Bering and Chukchi Seas using an absorption-based approach. ICES Journal of Marine Science, 69, 1194-1204. 6
- Hirano, D., Fukamach, 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. J. Geophys. Res., 121, 980-997. doi:10.1002/2015JC011318. 7
- Hirota, N., Takayabu, Y.N., Hamada, A., 2016. Reproducibility of summer precipitation over northern Eurasia in CMIP5 multi-climate models. J. Climate, 29, 3317-3337. ①
- Hori, M., Aoki, T., Tanikawa, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Yamaguchi, S., Matoba, S., 2014. Dependence of thermal infrared emissive behaviors of snow cover on the surface snow type. Bulletin of Glaciological Research, 32, 33-45. ④
- Hu, A., Meehl, G.A., Han, W., Abe-Ouchi, A., Morrill, C., Okazaki, Y., Chikamoto, M.O., 2012. The Pacific-Atlantic Seesaw and the Bering Strait. Geophys. Res. Lett., 39, L03702. ①
- <u>Iida, T., Mizobata, K., Saitoh, S.-I.</u>, 2012. Interannual variability of coccolithophore Emiliania huxleyi blooms in response to changes in water column stability in the eastern Bering Sea. Continental Shelf Research, 34, 7-17. ⁽⁶⁾
- Iijima, Y., Nakamura, T., Park, H., Tachibana, Y., Fedorov, A. N., 2016a. Enhancement of Arctic storm activity in relation to permafrost degradation in eastern Siberia. Int. J. Climatol. doi: 10.1002/joc.4629, published online. 2
- Lijima, Y., Park, H., Konstantinov, P.Ya., Pudov, G.G., Fedorov, A.N., 2016b. Active layer thickness measurements using a handheld penetrometer at boreal and tundra sites in eastern Siberia. Permafrost Periglacial Process, doi:10.1002/ppp.1908. ⁽²⁾
- Lijima, Y., Ohta, T., Kotani, A., Feddorov, A.N., Kodama, Y., Maximov, T.C., 2014. Sap flow changes in relation to permafrost degradation under increasing precipitation in an eastern Siberian larch forest. Ecohydrology, 7, 177-187. doi: 10.1002/eco.1366. 2
- Ikawa, H., Nakai, T., Busey, R.C., Kim, Y., Kobayashi, H., Nagai, S., Ueyama, M., Saito, K., Nagano, H., Suzuki, R., Hinzman, L., 2015. Understory CO₂, sensible heat, and latent heat fluxes in a black spruce forest in interior Alaska. Agric. For. Meteorol., 214-215, 80-90. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.08.247. ②
- Ilicak, M., Drange, H., Wang, Q., Gerdes, R., Aksenov, Y., Bailey, D., Bentsen, M., Biastoch, A., Bozec, A., Böning, C., Cassou, C., Chassignet, E., Coward, A., Curry, B., Danabasoglu, G., Danilov, S., Fernandez, E., Fogli, P., Fujii, Y., Griffies, S., Iovino, D., Jahn, A., Jung, T., Large, W., Lee, C., Lique, C., Lu, J., Masina, S., Nurser, B., Roth, C., Salas y Mélia, D., Samuels, B., Spence, P., <u>Tsujino, H.</u>, Valcke, S., Voldoire, A., Wang, X., Yeager, S., 2016. An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part III: Hydrography and fluxes, Ocean Modell., 100, 141-161. ①
- Inoue, J., Yamazaki, A., <u>Ono, J.</u>, Dethloff, K., Maturilli, M., Neuber, R., Edwards, P., <u>Yamaguchi, H.</u>, 2015. Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route. Scientific Reports, 5:16868, 1-8. DOI: 10.1038/srep16868. ⁽⁷⁾
- Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Miyamoto, Y., Yoshida, Y., Yokota, T., <u>Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H.</u>, Sweeney, C., Tans, P.P., Andrews, A.E., <u>Patra, P.K.</u>, 2013. Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data. Atmos. Chem. Phys,13, 9771-9788. doi:10.5194/acp-13-9771- 2013. ⁽⁵⁾
- Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Miyamoto, Y., Saeki, T., Yoshida, Y., Yokota, T., Sweeney, C., Tans, P.P., Biraud, S.C., <u>Machida, T.</u>, Pittman, J.V., Kort, E.A., Tanaka, T., Kawakami, S., <u>Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H.</u>, 2014. Validation of XCH₄ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data. Atmos. Meas. Tech., 7, 2987-3005. doi:10.5194/amt-7-2987-2014.
- Inoue, T., Kudoh, S., <u>Uchida, M.</u>, Tanabe, Y., Inoue, M., Kanda, H., 2014. Effects of substrate differences on water availability for Arctic lichens during the snow-free summers in the High Arctic glacier foreland. Polar Science, 8, 397-412. doi: 10.1016/j.polar.2014.09.003. ②
- Irwin, M., Kondo, Y., Moteki, N., 2015. An empirical correction factor for filter-based photo-absorption black carbon measurements. J. Aerosol Sci., 80, 86-97.3
- Irwin, M., Kondo, Y., Moteki, N., Miyakawa, T., 2013. Evaluation of a heated-inlet for calibration of the SP2. Aerosol Sci. Technol., 47, 895-905. doi: 10.1080/02786826.2013.800187. ③
- Ishibashi, D., Shigihara, T., Konno, A., 2014, Experimental and numerical invesitigation of model-scale collision of ship with ice floe. Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice, Singapore, August 11-15, 495-502. doi:10.3850/978-981-09-0750-1_1180. 7
- 石橋大輔, 麻生 翔, 佐野翔太, 佐野元治, 金野祥久, 2013. 船舶と氷塊との衝突に関する模型実験および数値解析手法の検討. 寒地技術論文・報告集, 29,104-108. ⑦
- Ishidoya, S., Murayama, S., 2014. Development of a new high precision continuous measuring system for atmospheric O₂/N₂ and Ar/N₂ and its application to the observation in Tsukuba, Japan. Tellus B, 66, 22574, http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v66.22574. ⑤
- Ishidoya, S., Morimoto, S., Aoki, S., Taguchi, S., Goto, D., Murayma, S., Nakazawa, T., 2012. Oceanic and terrestrial biospheric CO₂ uptake estimated from atmospheric potential oxygen observed at Ny-Ålesund, Svalbard, and Syowa, Antarctica. Tellus B, 64, 18924, http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.18924.⁽⁵⁾
- Ishimoto, H., Okamoto, K., <u>Okamoto, H., Sato, K.</u>, 2014. One-dimensional variational (1D-Var) retrieval of middle to upper tropospheric humidity using AIRS radiance data. J. Geophys. Res., 119. doi: 10.1002/2014JD021706. ③
- Ito, A., Nishina, K., Noda, H.M., 2016. Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data. Polar Science10,346-355, in press. (5)

- Ito, M., Pickart, R.S., Kikuchi, T., Fukamachi, Y., Ohshima, K.I., Simizu, D., Arrigo, K.R., Vagle, S., He, J., Ashjian, C., Mathis, J.T., Nishino, S., Nobre, C., 2015a. Water properties, heat and volume fluxes of Pacific water in Barrow Canyon during summer 2010. Deep-Sea Res. I, 102, 43-54. doi:10.1016/j.dsr.2015.04.004. 67
- Ito, M., Ohshima, K.I., Fukamachi, Y., Simizu, D., Iwamoto, K., Matsumura, Y., Mahoney, A. R., Eicken, H., 2015b. Observations of supercooled water and frazil ice formation in an Arctic coastal polynya from mooring and satellite imagery. Ann. Glaciol., 56, 307-314. doi:10.3189/2015AoG69A839. 7
- Itoh, M., Nishino, S., Kawaguchi, Y., Kikuchi, T., 2013. Barrow Canyon volume, heat, and freshwater fluxes revealed by long-term mooring observations between 2000 and 2008. J. Geophys. Res., 118, (9), 4363-4379. doi:10.1002/jgrc.20290. ⁽⁶⁾
- Itoh, M., Shimada, K., Kamoshida, T., McLaughlin, F., Carmack, E., Nishino, S., 2012. Interannual variability of Pacific Winter Water inflow through Barrow Canyon from 2000 to 2006. J. Oceanogr., 68 (4), 575-592. doi: 10.1007/s10872-012-0120-1. 67
- Itoh, M., Inoue, J., Shimada, K., Zimmermann, S., Kikuchi, T., Hutchings, J., McLaughlin, F., Carmack, E., 2011. Acceleration of sea-ice melting due to transmission of solar radiation through ponded ice area in the Arctic Ocean: results of in situ observations from icebreakers in 2006 and 2007. Annals Glaciology, 52 (57), 249-260. ⁽⁶⁾
- Iwahana, G., Takano, S., Petrov, R.E., <u>Tei, S.</u>, Shingubara, R., Maximov, T.C., Fedorov, A.N., Desyatkin, A.R., Nikolaev, A.N., Desyatkin, R.V., <u>Sugimoto, A.</u>, 2014. Geocryological characteristics of the upper permafrost in a tundra-forest transition of the Indigirka River Valley, Russia. Polar Science, 8, 96-113. doi: 10.1016/j.polar.2014.01.005.
- Iwamoto, K., Ohshima, K.I., Tamura, T., 2014. Improved mapping of sea ice production in the Arctic Ocean using AMSR-E thin ice thickness algorithm. J. Geophys. Res., 119, 3574-3594. doi:10.1002/2013JC009749. 7
- Iwamoto, K., Ohshima, K.I., Tamura, T., Nihashi, S., 2013. Estimation of thin ice thickness from AMSR-E data in the Chukchi Sea. Int. J. Remote Sens., 34, 468-489. doi: 10.1080/01431161.2012.712229. 7
- Izumiyama, K., <u>Otsuka, N.</u>, 2013. Ice thickness calculation form partial concentration values. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756, 10p. 7
- 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. J. Geophys. Res., 121, 7564-7577. doi:10.1002/2015JD024679. ③
- Jin, M., Hutchings, J., Kawaguchi, Y., <u>Kikuchi, T.</u>, 2012. Ocean mixing with lead-dependent subgrid scale brine rejection parameterization in a climate model. J. Ocean Uni. China, 11(4), 473-480. doi:10.1007/s11802-012-2094-4. (6)
- Jin, Y., Kai, K., Okamoto, H., Hagihara, Y., 2014. Improvement of CALIOP cloud masking algorithms for better estimation of dust extinction profiles. J. Meteor. Soc. Japan, 92, 5, 433-455. doi:10.2151/jmsj.2014-502. ③
- Kanao, M., Tsuboi, S., Butler, R., Anderson, K., Dahl-Jensen, T., Larsen, T., Nettles, M., Voss, P., Childs, D., Clinton, J., Stutzmann, E., Himeno, T., Toyokuni, G., Tanaka, S., Tono, Y., 2012. Greenland Ice Sheet Dynamics and Glacial Earthquake Activities, In: Müller. J. and L. Koch (Eds.), "Ice Sheets: Dynamics, Formation and Environmental Concerns", ISBN 978-1-61942-367-1, Hauppauge, NY, Nova Science Publishers, Inc., Chap.4, 93-120. (4)
- Kanna, N., Toyota, T., <u>Nishioka, J.</u>, 2014. Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. Prog. Oceanogr., 126, 44-57. ⁽⁶⁾
- Kashiwase, H., Ohshima, K.I., Nihashi, S., 2014. Long-term variation in sea ice production and its relation to the intermediate water in the Sea of Okhotsk. Prog. Oceanogr., 126, 21-32. doi:10.1016/j.pocean.2014.05.004. 7
- Katsuki, K., Itaki, T., Uchida, M., Tada, R., 2014. Response of the Bering Sea to 11-year solar irradiance cycles during the Bølling-Allerød. Geophys. Res. Lett., 41 (8), 2892-2898. doi: 10.1002/2014GL059509.
- Kasurinen, V., Alfredsen, K., Kolari, P., Mammarella, I., Alekseychik, P., Rinne, J., Vesala, T., Bernier, P., Boike, J., Langer, M., Belellimarchesini, L., van Hussteden, K., Dolman, H., Sachs, T., <u>Ohta, T.</u>, Varlagin, A., Rocha, A., Arain, A., Oechel, W., Lund M., Grelle, A., Lindroth, A., Black, A., Aurele, M., Laurila, T., Lohila, A., Berninger, F., 2014. Latent heat exchange in the boreal and arctic biomes. Glob. Chang. Biol., 20, 3439-3456. doi: 10.1111/gcb.12640. 2
- Kawamura, K., Severinghaus, J.P., Albert, M.R., Courville, Z.R., Fahnestock, M.A., Scambos, T., Shields, E., Shuman, C.A., 2013. Kinetic fractionation of gases by deep air convection in polar firn. Atmos. Chem. Phys. 13, 11141–11155, doi:10.5194/acp-13-11141-2013.
- Kawasaki, T., Hasumi, H., 2016. The inflow of Atlantic water at the Fram Strait and its interannual variability. J. Geophys. Res., 121, 502-519. doi:10.1002/2015JC011375. 7
- Kawasaki, T., Hasumi, H., 2014. Effect of freshwater from the West Greenland Current on the winter deep convection in the Labrador Sea. Ocean Model., 75, 51-64. doi:10.1016/j.ocemod.2014.01.003. ⑦
- Kim, H-S., Maksyutov, S., Glagolev, M.V., Machida, T., Patra, P.K., Sudo, K., Inoue, G., 2011. Evaluation of methane emissions from west Siberian wetlands based on inverse modeling. Environ. Res. Lett., 6, 035201. doi:10.1088/1748-9326/6/3/035201.
- Kim, Y., Kim, S.D., Enomoto, H., Kishida, K., Kondo, M., Uchida, M., 2013. Latitudinal distribution of soil CO₂ efflux and temperature along the Dalton Highway, Alaska. Polar Science, 7, 162-173. doi: 10.1016/j.polar.2012.11.002. ⁽²⁾
- Kimura, N., Nishimura, A., Tanaka, Y., Yamaguchi, H., 2013. Influence of winter sea ice motion on summer ice cover in the Arctic. Polar Research, 32, 20193. http://dx.doi.org/10.3402/polar.v32i0.20193, 1-8. 7
- Kinase, T., Kita, K., Ogawa-Tsukagawa, Y., Goto-Azuma, K., 2016. Influence of the melting temperature on the measurement of the mass concentration and size distribution of black carbon in snow. Atmospheric Measurement Techniques, in press. ④
- Kobashi, T., <u>Goto-Azuma, K.</u>, Box, J.E., Gao, C.-C., Nakaegawa, T., 2013. Causes of Greenland temperature variability over the past 4000 years: Implications for Northern Hemispheric temperature change. Climate of the Past, 9, 2299-2317. ④
- Kobashi, T., <u>Kawamura, K.</u>, Severinghaus, J.P., Barnola, J.M., Nakaegawa, T., Vinther, B.M., Johnsen, S.J., Box, J.E., 2011. High variability of Greenland surface temperature over the past 4000 years estimated from trapped air in an ice core. Geophys. Res. Lett., 38.5
- Kobayashi, H., Yunus, A., Nagai, S., <u>Sugiura, K.</u>, Kim, Y., Dam, B.V., Nagano, H., Zona, D., Harazono, Y., Bret-Harte, S., Ichii, K., Ikawa, H., Iwata, H., Oechel, W., Ueyama, M., <u>Suzuki, R.</u>, 2016. Latitudinal gradient of spruce forest understory and tundra phenology in Alaska as observed from satellite and ground-based data. Remote Sensing of Environment, 177, 160-170. ④
- Kobayashi, H., Suzuki, R., Nagai, S., Nakai, T., Kim, Y., 2014. Spatial scale and landscape heterogeneity effects on FAPAR in an open canopy black spruce forest in interior Alaska. IEEE Geosci. Remote Sensing Lett., 11, 564-568. doi: 10.1109/LGRS.2013.2278426.
- Kokubun, N., Yamamoto, T., Sato, N., Watanuki, Y., Will, A., Kitaysky, A.S., <u>Takahashi, A.</u>, 2016. Foraging segregation of two congeneric diving seabird species (common and thick-billed murres) breeding on St. George Island, Bering Sea. Biogeosciences, 13, 2579-2591. doi:10.5194/bg-13-2579-2016. 6

- Komuro, Y., 2014. The Impact of Surface Mixing on the Arctic River Water Distribution and Stratification in a Global Ice-Ocean Model. J. Climate, 27, 4359-4370. ①, ⑦
- Komuro, Y., Suzuki, T., 2012. Impact of subgrid-scale ice thickness distribution on heat flux on and through sea ice. Ocean Modelling, doi:10.1016/j.ocemod.2012.08.004. ①, ⑦
- Komuro, Y., Suzuki, T., Sakamoto, T.T., <u>Hasumi, H., Ishii, M.</u>, Watanabe, M., <u>Nozawa, T.</u>, Yokohata, T., Nishimura, T., Ogochi, K., Emori, S., Kimoto, M., 2012. Sea-ice in twentieth-century simulations by new MIROC coupled models: a comparison between models with high resolution and with ice thickness distribution. J. Meteorol. Soc. Japan, 90A, 213-232. doi: 10.2151/jmsj.2012-A11. 7
- Kondo, Y., 2015. Effects of black carbon on climate: Advances in measurement and modeling. Monogr. Environ. Earth Planets, 3, 1-85. doi:10.5047/meep.2015.00301.0001. ③
- Konno, A., Nakane, A., Kanamori, S., 2013. Validation of numerical estimateon of brash ice channel resistance with model test. Proc. 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756, 8p. 7
- 金野祥久, 中根明裕, 2012. 船舶や海洋構造物と氷片の干渉解析を目的とした物理計算ライブラリの比較検討. 寒地技術論文・報告集, 28 1-6. ⑦
- Kono, Y., <u>Sasaki, H., Kurihara, Y., Fujiwara, A.</u> Yamamoto, J., <u>Sakurai, Y.</u> 2016. Distribution pattern of Polar cod (Boreogadus saida) larvae and larval fish assemblages in relation to oceanographic parameters in the northern Bering Sea and Chukchi Sea. Polar Biology, doi10.1007/s00300-016-1961-7, accepted. ⁽⁶⁾
- Konya, K., Kadota, T., Yabuki, H., Ohata, T., 2013. Fifty years of meteo-glaciological change in Toll Glacier, Bennett Island, De Long Islands, Siberian Arctic. Polar Science, 8, 86-95. ④
- Kotani, A., Kononov, A.V., <u>Ohta, T.</u>, Maximov, T.C., 2014. Temporal variations in the linkage between the net ecosystem exchange of water vapour and CO₂ over boreal forests in eastern Siberia. Ecohydrology, 7, 209-225. doi: 10.1002/eco.1449. ⁽²⁾
- Krishfield, R.A., Proshutinsky, A., <u>Tateyama, K.</u>, Williams, W.J., Carmack, E.C., McLaughlin, F.A., Timmermans, M.-L., 2014. Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle. J. Geophys. Res., 119. doi: 10.1002/2013JC008999. 7
- 久万健志,高田兵衛,北山紗織,小俣 紋,2013. 北太平洋・ベーリング海・北極海における鉄の挙動とその起源. 分析化学,62,12.1057-1069.6
- Kusunoki, S., Mizuta, R., <u>Hosaka, M.</u>, 2015. Future changes in precipitation intensity over the Arctic projected by a global atmospheric model with a 60-km grid size. Polar Science, 9, 277-292, http://dx. doi:org/10.1016/j.polar.2015.08.001. ①
- Laine, A., Yoshimori, M., Abe-Ouchi, A., 2016. Surface Arctic amplification factors in CMIP5 models: Land and oceanic surfaces, seasonality. J. Climate, 29, 3297-3316. ①
- Lambert, F., Kug, J.S., Park, R.J., Mahowald, N., Winckler, G., <u>Abe-Ouchi, A.</u>, <u>O'ishi, R.</u>, Takemura, T., Lee, J.H., 2013. The role of mineral-dust aerosols in polar temperature amplification. Nature Climate Change, 3, 487-491. ①
- Lee, Y.J., Matrai, P.A., Friedrichs, M.A.M., Saba, V.S., Antoine, D., Ardyna, M., Asanuma, I., Babin, M., Belanger, S., Benot-Gagne, M., Devred, E., Fernandez-Mendez, M., Gentili, B., <u>Hirawake, T.</u>, Kang, S.-Ho, <u>Kameda, T.</u>, Katlein, C., Lee, S.H., Lee, Z., Melin, F., Scardi, M., Smyth, T.J., Tang, Sh., Turpie, K.R., Waters, K.J., Westberry, T.K., 2015. An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color/in situ chlorophyll-a based models. J. Geophys. Res. Oceans, 120. doi:10.1002/2015JC011018.
- Liang, M., Sugimoto, A., Tei, S., Bragin, I.V., Takano, S., Morozumi, T., Shingubara, R., Maximov, T., Kiyashko, S., Velivetskaya, T. A., Ignatiev, A.V., 2014. Importance of soil moisture and N availability to larch growth and distribution in the Arctic taiga-tundra boundary ecosystem, northeastern Siberia. Polar Science, 8, 327-341. doi: 10.1016/j.polar.2014.07.008. 2
- Liljedahl, A., Boike, J., Daanen, R.P., Federov, A.N., Frost, G.V., Grosse, G., <u>Lijma, Y.,</u> Jorgenson, J.C., Matveyeva, N., Necsoiu, M., Raynolds, M.K., Romanovsky, V., Schulla, J., Tape, K.D., Walker, D.A., <u>Yabuki, H.,</u> 2016. Pan-Arctic modern sub-decadal permafrost ice-wedge degradation and hydrologic implications. Nat. Geosci., in press.⁽²⁾
- Liu, G., Kojima, K., <u>Yoshimura, K.</u>, Oka, A., 2014. Proxy interpretation of coral-recorded seawater δ¹⁸O using 1D model forced by isotope-incorporated GCM in tropical oceanic regions. J. Geophys. Res. Atmos., 119, 12021–12033. ①
- Liu, G., Kojima, K., <u>Yoshimura, K.</u>, Okai, T., Suzuki, A., Oki, T., Siringan, F., Yoneda, M., Kawahata, H., 2013. A model-based test of accuracy of seawater oxygen isotope ratio record derived from a coral dual proxy method at southeastern Luzon Island, the Philippines. J. Geophys. Res. Biogeo., 2012JG002266. ①
- Liu, H., Jin, H., <u>Miyoshi, Y., Fujiwara, H.</u>, Shinagawa, H., 2013. Upper atmosphere response to stratosphere sudden warming: Local time height dependence simulated by GAIA model. Geophys. Res. Letters, 40. doi:10.1002/grl.50146. ③
- Liu, X., Kondo, Y., Ram, K., Matsui, H., Nakagomi, K., Ikeda, T., Oshima, N., Verma, R. L., Takegawa, N., <u>Koike, M.</u>, Kajino, M., 2013. Seasonal variations of black carbon observed at the remote mountain site Happo in Japan. J. Geophys. Res., 118, 3709-3722. doi:10.1002/jgrd.50317. ③
- Liu, Z., Yoshimura, K., Kennedy, C.D., Wang, X., Pang, S., 2014. Water vapor δD dynamics over China derived from SCIAMACHY satellite measurements. Sci. China Earth Sci., 57, 813-823. (1)
- Liu, Z., Yoshimura, K., Bowen, G.J., Welker, J.M., 2014. Pacific–North American teleconnection controls on precipitation isotopes (δ¹⁸O) across the contiguous United States and adjacent regions: A GCM-based analysis. J. Clim., 27, 1046-1061. ①
- Liu, Z., Bowen, G.J., Welker, J.M., <u>Yoshimura, K.</u>, 2012. Winter precipitation isotope (δ¹⁸O) slopes of the contiguous USA and their relationship to the Pacific/North American (PNA) pattern. Climate Dynamics, 10.1007/s00382-012-1548-0. ①
- Machguth, H. and 31 others including Sugiyama, S., 2016. Greenland surface mass balance observations from the ice sheet ablation area and local glaciers. Journal of Glaciology, 1-27, doi:10.1017/jog.2016.75. ④
- Mahoney, A.R., Eicken, H., Fukamachi, Y., Ohshima, K.I., Simizu, D., Kambhamettu, D., Rohith, M.V., Hendricks, S., Jones, J., 2015. Both sides of the ice: comparison of ice thickness and velocity from moored, airborne and shore-based instruments near Barrow, Alaska. Ann. Glaciol., 56, 363-372. doi:10.3189/2015AoG69A565. 7
- Maksyutov, S., Takagi, H., Valsala, V.K., Saito, M., Oda, T., Saeki, T., <u>Belikov, D.</u>, Saito, R., <u>Ito, A.</u>, Yoshida, Y., Morino, I., Uchino, O., Andres, R.J., Yokota, T., 2013. Regional CO₂ flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations. Atmos. Chem. Phys., 13, 9351-9373. doi:10.5194/acp-13-9351-2013. ⁽⁵⁾
- Masuda, K., Ishimoto, H., Sakai, T., <u>Okamoto, H.</u>, 2016. Backscattering properties of nonspherical ice particles calculated by geometrical-optics-integral-equation method, 27th International Laser Radar Conference, in press. ③
- 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. (4)

- Matsui, H., Koike, M., Kondo, Y., Fast, J. D., Takigawa, M., 2014a. Development of an aerosol microphysical module: Aerosol Two-dimensional bin module for foRmation and Aging Simulation (ATRAS). Atmos. Chem. Phys., 14, 10315-10331. ③
- Matsui, H., Koike, M., Kondo, Y., Takami, A., Fast, J. D., Kanaya, Y., Takigawa, M., 2014b. Volatility basis-set approach simulation of organic aerosol formation in East Asia: implications for anthropogenic-biogenic interaction and controllable amounts. Atmos. Chem. Phys., 14, 1-21. ③
- Matsui, H., <u>Koike, M., Kondo, Y.</u>, Moteki, N., Fast, J. D., Zaveri, R. A., 2013. Development and validation of a black carbon mixing state resolved three-dimensional model: Aging processes and radiative impact. J.Geophys. Res., 118, 2304:2326. doi:10.1029/2012JD018446.
- Matsumura, Y., Ohshima, K.I., 2015. Lagrangian modelling of frazil ice in the ocean. Ann. Glaciol., 56, 373-382. doi:10.3189/2015AoG69A657. Matsumura, S., Zhang, X., <u>Yamazaki, K.</u>, 2014. Summer Arctic atmospheric circulation response to spring Eurasian snow cover and its possible linkage to accelerated sea ice decrease. J. Clim., 27, 6551-6558. doi:10.1175/JCLI-D-13-00549.1.
- Matsumura, S., <u>Yamazaki, K., Sato, T.</u>, 2015. Role of Siberian land-atmosphere coupling in the development of the August Okhotsk high in 2008. J. Meteorol. Soc. Japan, 93, 2, 229-244. doi: 10.2151/jmsj.2015-013. ③
- Matsuno, K., Landeira S. J. M., <u>Yamaguchi, A., Hirawake, T., Kikuchi, T.</u>, 2016. 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, in print. 6
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Fujiwara, A., Onodera, J., Watanabe, E., Harada, N., Kikuchi, T., 2015a. Seasonal changes in the population structure of dominant planktonic copepods collected using a sediment trap moored in the western Arctic Ocean. J. Natural History, 49, 2711-2726. doi:10.1080/00222933.2015.1022613. ⁽⁶⁾
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Hirawake, T., Nishino, S., Inoue, J., Kikuchi, T., 2015b. Reproductive success of Pacific copepods in the Arctic Ocean and the possibility of changes in the Arctic ecosystem. Polar Biology, 38, 1075-1079. doi:10.1007/s00300-015-1658-3. ⁽⁶⁾
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Nishino, S., Inoue, J., Kikuchi, T., 2015c. Short-term changes of the mesozooplankton community and copepod gut pigment in the Chukchi Sea in autumn. Biogeosciences, 12, 13, 4005-4015. doi: 10.5194/bg-12-4005-2015. 6
- Matsuno, K., Ichinomiya, M., Yamaguchi, A., Imai, I., Kikuchi, T., 2014a. Horizontal distribution of microprotist community structure in the western Arctic Ocean during late summer and early fall of 2010. Polar Biology, 37, 8, 1185-1195. doi:10.1007/s00300-014-1512-z. 6
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Fujiwara, A., Onodera, J., Watanabe, E., Imai, I., Chiba, S., Harada, N., Kikuchi, T., 2014b. Seasonal changes in mesozooplankton swimmers collected by sediment trap moored at a single station of Northwind Abyssal Plain in the western Arctic Ocean. J. Plankton Res., 36, 490-502. ⁽⁶⁾
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Imai, I., 2012a. Biomass size spectra of mesozooplankton in the Chukchi Sea during summers of 1991/1992 and 2007/2008: an analysis by optical plankton counter. ICES J. Mar. Sci., 69, 1205-1217. doi:10.1093/icesjms/fssl19. 6
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Shimada, K., Imai, I., 2012b. Horizontal distribution of calanoid copepods in the western Arctic Ocean during the summer of 2008. Polar Science, 6, 105-119. doi:10.1016/j.polar.2012.01.002. 67
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Hirawake, T., Imai, I., 2011. Year-to-year changes of the mesozooplankton community in the Chukchi Sea during summers of 1991, 1992 and 2007, 2008. Polar Biology, 34, 1349-1360. [®]
- Melnikov, V.P., Spektor, V.B., Sheinkman, V.S., Fedorov, A.N., Galanin, A.A., Spector, V.V., Pushkar, V.S., <u>Kadota, T.</u>, 2014. Experimental study of isotope composition in the glaciers of the Suntar-Hayata Range. The Earth Cryosphere, XVII, 4, 63-73. ④
- Miller, J., Lehman, S., Wolak, C., Turnbull, J., Dunn, G., Graven, H., Keeling, R., Meijer, H.A.J., Aerts-Bijma, A.T., Palstra, S.W.L., Smith, A.M., Allison, C., Southon, J., Xu, X., Nakazawa, T., Aoki, S., Nakamura, T., Guilderson, T., LaFranchi, B., Mukai, H., Terao, Y., <u>Uchida,</u> <u>M.</u>, Kondo, M., 2013. Initial Results of an Inter-comparison of AMS-based Atmospheric ¹⁴CO₂ measurements. Radiocarbon, 55, 1475-1483. doi: 10.2458/azu_js_rc.55.16382.
- Miller, L.A., Fripiat, F., Else, B.GT., Bowman, J.S., Brown, K.A., Collins, R.E., Ewert, M., Fransson, A., Gosselin, M., Lannuzel, D., Meiners, K.M., Michel, C., Nishioka, J., Nomura, D., Papadimitriou, S., Russell, L.M., Sørensen, L.L., Thomas, D.N., Tison, J.-L., van Leeuwe, M.A., Vancoppenolle, M., Wolff, E.W., Zhou, J., 2015. Methods for biogeochemical studies of sea ice: The state of the art, caveats, and recommendations. Elementa: Science of the Anthropocene, 3,1-53. doi:10.12952/journal.elementa.000038. 6
- Miyamoto, Y., Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Yokota, T., <u>Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H.</u>, Sweeney, C., Tans, P.P., Andrews, A.E., <u>Patra,</u> <u>P.K.</u>, 2013. Atmospheric column-averaged mole fractions of carbon dioxide at 53 aircraft measurement sites. Atmos. Chem. Phys., 13, 5265-5275. doi:10.5194/acp-13-5265-2013. (5)
- Miyazaki, S., Saito, K., Mori, J., Yamazaki, T., Ise, T., Arakida, H., Hajima, T., Iijima, Y., Machiya, H., Sueyoshi, T., Yabuki, H., Burke, E.J., Hosaka, M., Ichii, K., Ikawa, H., Ito, A., Kotani, A., Matsuura, Y., Niwano, M., Nitta, T., O'ishi, R., Ohta, T., Park, H., Sasai, T., Sato, A., Sato, H., Sugimoto, A., Suzuki, R., Tanaka, K., Yamaguchi, S., Yoshimura, K., 2015. The GRENE-TEA model intercomparison project (GTMIP): overview and experiment protocol for Stage 1. Geosci. Model Dev., 8, 2841-2856. doi:10.5194/gmd-8-2841-2015. ① ②
- Mizobata, K., Watanabe, E., Kimura, N., 2016. Wintertime variability of the Beaufort gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations. J. Geophys. Res. Oceans, 121. doi:10.1002/2015JC011218, 1-15. 7
- 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 II. Satellite Oceanography and Climate Change, Volumes 77-80, 62-69. 7
- Mohn, J., Wolf, B., <u>Toyoda, S.</u>, Lin, C-T., Liang, M-C., Brüggemann, N., Wissel, H., Steiker, A. E., Dyckmans, J., Szwec, L., Ostrom, N. E., Casciotti, K. L., Forbes, M., Giesemann, A., Well, R., Doucett, R. R., Yarnes, C. T., Ridley, A. R., Kaiser, J., Yoshida, N., 2014. Interlaboratory assessment of nitrous oxide isotopomer analysis by isotope ratio mass spectrometry and laser spectroscopy: current status and perspectives. Rapid Commun. Mass Spectrom. 28 (18), 1995-2007. doi: 10.1002/rcm.6982. ⁽⁵⁾
- Mori, K., Ise, T., Kondo, M., Kim, Y., Enomoto, H., Uchida, M., 2012. The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics. Open Journal of Ecology, 2, 90-95. doi:10.4236/oje.2012.22011.
- Mori, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Inoue, J., Kimoto, M., 2014a. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. Nature Geoscience, 7, 869-873. ①
- Mori, T., Moteki, N., Ohata, S., <u>Koike, M., Goto-Azuma, K.</u>, Miyazaki, Y., <u>Kondo, Y.</u>, 2016. Improved Technique for measuring the size distribution of black carbon particles in liquid water. Aerosol Sic. Technol., 50, 3, 242-254. DOI: 10.1080/02786826.2016.1147644.34
- Mori, T., Kondo, Y., Ohata, S., Moteki, N., Matsui, H., Oshima, N., Iwasaki, A., 2014b. Wet deposition of black carbon at a remote site in the East China Sea. J. Geophys. Res., 119. doi:10.1002/2014JD022103. ③
- Morishita, T., <u>Matsuura, Y.</u>, Kajimoto, T., <u>Osawa, A.</u>, Zyryanova, O.A., Prokushkin, A.S., 2014. CH₄ and N₂O dymanics of Larix gmelinii forest in a continuous permafrost region of central Siberia during the growing season. Polar Science, 8, 156-165. doi:10.1016/j.polar.2014.01.004.2

- Morishita, T., Noguchi, K., Kim, Y.W., <u>Matsurua, Y</u>., 2014. CO₂, CH₄ and N₂O fluxes of upland black spruce (Picea mariana) forest soils after forest fires of different intensity in interior Alaska. Soil Sci. Plant Nutr., 61, 98-105. doi: 10.1080/00380768.2014.963666.2
- Moteki, N., Kondo, Y., Adachi, K., 2014. Identification by single-particle soot photometer of black carbon particles attached to other particles: Laboratory experiments and ground observations in Tokyo. J. Geophys. Res., 119. doi:10.1002/2013JD020655.3
- Mudunkotuwa, D.Y., <u>De Silva, L.W.A, Yamaguchi, H.</u>, 2016. Data assimilation system to improve sea ice predictions in the Arctic Ocean using an ice-ocean coupled model, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31 – June 3, 8p. 7
- Nagai S., Nakai, T., Saitoh, T.M., Busey, R.C., Kobayashi, H., <u>Suzuki, R.</u>, Muraoka, H., Kim, Y., 2013. Seasonal changes in camera-based indices from an open canopy black spruce forest in Alaska, and comparison with indices from a closed canopy evergreen coniferous forest in Japan. Polar Science, 7, 125-135. doi: 10.1016/j.polar.2012.12.001. 2
- Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Uetake, J., Shimada, R., 2014. Mineralogical composition of cryoconite on glaciers in northwest Greenland, Bulletin of Glaciological Research, 32, 107-114. ④
- Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Nakano, T., Shin, K., Kokado, 2014. Geographical variations in Sr and Nd isotopic ratios of cryoconite on Asian glaciers, Environmental Research Letters, 9 (4), 045007. doi: 10.1088/1748-9326/9/4/045007.
- Nakada M., Okuno, J., Ishii, M., 2013. Twentieth century sea-level rise inferred from tide gauge, geologically derived and thermosteric sea-level changes, Quaternary Science Reviews, 75, 114-131.
- Nakai, T., Kim, Y., Busey, R.C., Suzuki, R., Nagai, S., Kobayashi, H., Park, H., Sugiura, K., Ito, A., 2013. Characteristics of evapotranspiration from a permafrost black spruce forest in interior Alaska. Polar Science, 7, 136-148. doi: 10.1016/j.polar.2013.03.003. ⁽²⁾
- Nakamura, T., Yamazaki, K., Iwamoto, K., Honda, M., Miyoshi, Y., Ogawa, Y., Tomikawa, Y., Ukita, J., 2016. The stratospheric pathway for Arctic impacts on mid-latitude climate, Geophys. Res. Lett., 43, 3494-3501. doi:10.1020/2016GL068330. ③
- Nakamura T., Oshika, M., Hara, M., <u>Tachibana, Y.</u>, 2015a. Impact of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) on the Western Pacific (WP) pattern in the following winter through Arctic sea ice and ENSO. Part II: Multi-model evaluation of the NAO-ENSO linkage. Clim. Dyn., 40. doi: 10.1007/s00382-015-2556-7. ③
- Nakamura, T., Yamazaki, K., Iwamoto, K., Honda, M., Miyoshi, Y., Ogawa, Y., Ukita, J., 2015b. A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn. J. Geophys. Res., 2015, 120, 3209-3227. doi:10.1002/2014JD022848.
- Nakamura, T., Akiyoshi, H., Deuchi, M., Miyazaki, K., Kobayashi, C., Shibata, K., Iwasaki, T., 2013. A multi-model comparison of stratospheric ozone data assimilation based on an ensemble Kalman filter approach. J. Geophys. Res. Atmos., 118, 3848-3868. (1)
- Nakano, T., <u>Matsuno, K.</u>, Nishizawa, B., Iwahara, Y., <u>Mitani, Y.</u>, Yamamoto, J., <u>Sakurai, Y.</u>, <u>Watanuki, Y.</u>, 2015. Diets and body condition of polar cod (Boreogadus saida) in the northern Bering Sea and Chukchi Sea. Polar Biology, doi: 10.1007/s00300-015-1769-x. (6)
- 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. Env. Res. Lett., 10. doi:10.1088/1748-9326/10/9/094023. 6
- Nakatsubo, T., <u>Uchida, M.</u>, Sasaki, A., Kondo, M., Yoshitake, S., Kanda, H., 2015. Carbon accumulation rate of peatland in the High Arctic, Svalbard: Implications for carbon sequestration. Polar Science, 9, 267-275. doi:10.1016/j.polar.2014.12.002. ②
- Nakayama, Y., Ohshima, K.I., Fukamachi, Y., 2012. Enhancement of sea-ice drift due to the dynamical interaction between sea ice and a coastal ocean. J. Phys. Oceanogr., 42, 179-192. doi: 10.1175/JPO-D-11-018.1. 7
- Nakazawa, F., <u>Uchida, M., Kondo, M., Kadota, T., Shirakawa, T., Enomoto, H.</u>, Fedorov, <u>A., Fujisawa,</u> Y., Konstantinov, P., Kusaka, R., Miyairi, M., <u>Ohata, T., Yabuki, H.</u>, 2015. Radiocarbon ages of insects and plants frozen in the No. 31 Glacier, Suntar-Khayata Range, eastern Siberia. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 361, 574-579. ④
- Nakazawa, F., Uetake, J., Suyama, Y., Kaneko, R., <u>Takeuchi, N.</u>, Fujita, K., <u>Motoyama, H</u>., Imura, S., Kanda, H., 2013. DNA analysis for section identification of individual Pinus pollen grains from Belukha glacier, Altai Mountains, Russia, Environmental Research Letters, 8, 014032. doi:10.1088/1748-9326/8/1/014032. ④
- Nakazawa, N., <u>Ono, J., Yamaguchi, H., Ohshima, K.I.</u>, Kurokawa, A., 2012. Numerical prediction of spilled oil behavior under sea ice conditions: Modification of the 2011 Model. Proc. OTC Arctic Technology Conf., Houston, Texas, USA, 3-5 Dec.,doi: 10.4043/23801-MS. 5p.7
- Natsuike, M., Nagai, S., <u>Matsuno, K.</u>, Saito, R., Tsukazaki, C., <u>Yamaguchi, A.</u>, Imai, I., 2013. Abundance and distribution of toxic Alexandrium tamarense resting cysts in the sediments of the Chukchi Sea and the eastern Bering Sea. Harmful Algae, 27, 52-59. (6)
- Nihashi, S., Ohshima, K.I., Kimura, N., 2012. Creation of a heat and salt flux dataset associated with sea-ice production and melting in the Sea of Okhotsk. J. Climate, 25, 2261-2278. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00022.1. 7
- Nishimura, S., <u>Kuma, K.</u>, Ishikawa, S., Omata, A., <u>Saitoh, S.</u>, 2012. Iron, nutrients and humic-type FDOM in the northern Bering Sea Shelf, Bering Strait and Chukchi Sea. J. Geophys. Res., 117, C02025. doi:10.1029/2011JC007355. ⁽⁶⁾
- 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. ⁽⁶⁾
- Nishino, S., Kawaguchi, K., Inoue, J., Hirawake, T., Fujiwara, A., Futsuki, R., Onodera, J., Aoyama, M., 2015. Nutrient supply and biological response to wind-induced mixing, inertial motion, internal waves, and currents in the northern Chukchi Sea. J. Geophys. Res., 120, 3, 1975-1992, doi: 10.1002/2014JC010407. ⁽⁶⁾
- Nishino, S., Itoh, M., Williams, W.J., Semiletov, I.P., 2013. Shoaling of the nutricline with an increase in near-freezing temperature water in the Makarov Basin. J. Geophys. Res., 118, 635-649, doi:10.1029/2012JC008234. 6
- Nishino, S., Kikuchi, T., Yamamoto-Kawai, M., Kawaguchi, Y., <u>Hirawake, T., Itoh, M.,</u> 2011a. Enhancement/reduction of biological pump depends on ocean circulation in the sea-ice reduction regions of the Arctic Ocean. J. Oceanogr., Vol. 67, 305-314. doi: 10.1007/s10872-011-0030-7. ⁽⁶⁾
- Nishino, S., Itoh, M., Kawaguchi, Y., Kikuchi, T., Aoyama, M., 2011b. Impact of an unusually large warm-core eddy on distributions of nutrients and phytoplankton in the southern Canada Basin during late summer/early fall 2010. Geophys. Res. Lett., 38, L16602. doi:10.1029/2011GL047885. 6
- <u>新田友子,芳村圭,高田久美子</u>,大石龍太,鼎信次郎,沖大幹,2012.陸面モデルにおけるサブグリッドスケールの積雪被覆率と積雪深の変化の表現. 水工学論文集,56.①
- <u>新田友子</u>, <u>芳村</u> 圭, Annan, J.D., Hargreaves, J.C., 鼎信次郎, 沖大幹, 2012. アンサンブル実験による全球陸域積雪シミュレーションの不確実性評価. 水工学論文集, 57. ①
- Nitta, T., Yoshimura, K., Takata, K., O'ishi, R., Sueyoshi, T., Kanae, S., Oki, T., <u>Abe-Ouchi, A.</u>, Liston, G.E., 2014. Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model: Offline validation. J. Climate, 27, 3318-3330. ①
- <u>新田友子, 芳村 圭</u>, <u>阿部彩子</u>, 2015. 陸域水循環の再現性向上と気温バイアス低減に向けた簡易湿地スキームによる感度実験. 水工学論文集, 59. ①

- Niwa, Y., Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H., Schuck, T.J., Brenninkmeijer, C.A.M., Imasu, R., Satoh, M., 2012. Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO₂ fluxes using passenger aircraft based measurements. J. Geophys. Res. 117, D11303. doi:10.1029/2012JD017474. (5)
- Noguchi, K., Dannoura, M., Jomura, M., Awazuhara-Noguvhi, M., Matsuura, Y., 2012. High belowground biomass allocation in an upland black spruce (Picea mariana) stand in interior Alaska. Polar Science, 6, 133-141. doi: 10.1016/j.polar.2011.12.002.
- Nowicki, S., Bindschadler, R.A., <u>Abe-Ouchi, A.</u>, Aschwanden, A., Bueler, E., Choi, H., Fastook, J., Granzow, G., <u>Greve, R.</u>, Gutowski, G., Herzfeld, U.C., Jackson, C., Johnson, J., Khroulev, C., Larour, E., Levermann, A., Lipscomb, W.H., Martin, M.A., Morlighem, M., Parizek, B.R., Pollard, D., Price, S.F., Ren, D., Rignot, E., <u>Saito, F.</u>, Sato, T., <u>Seddik, H.</u>, Seroussi, H., Takahashi, K., Walker, R., Wang, W.L., 2013. Insights into spatial sensitivities of ice mass response to environmental change from the SeaRISE ice sheet modeling project II: Greenland. J. Geophys. Res.(Earth Surface), 118 (2), 1025-1044. ④
- Ogawa, Y., Motoba, T., Buchert, S.C., Haggstrom, I., Nozawa, S., 2014. Upper atmosphere cooling over the past 33 years. Geophys. Res. Letters, 41, 5629-5635. doi:10.1002/2014GL060591. ③
- Ogi, M., Taguchi, B., <u>Honda, M.</u>, Barber, D.G., Rysgaad, S., 2015. Summer-to-winter sea-ice linkage between the Arctic Ocean and the Okhotsk Sea through atmospheric circulation. J. Clim., 28, 4971-4979. doi:10.1175/JCLI-D-14-00125.1. ③
- Ogura, T., Webb, M. J., Watanabe, M., Lambert, F.H., Tsushima, Y., Sekiguchi, M., 2014. Importance of instantaneous radiative forcing for rapid tropospheric adjustment. Clim. Dyn., 43, 1409-1421. ①
- Ohashi, Y., Iida, T., Sugiyama, S., Aoki, S., 2016. Spatial and temporal variations in high turbidity surface water off the Thule region, northwestern Greenland. Polar Science, 10, 270-277. in press. ④
- Ohata, S., Moteki, N., Schwarz, J., Fahey, D., Kondo, Y., 2013. Evaluation of a method to measure black carbon particles suspended in rainwater and snow samples. Aerosl Sci. Technol. 47, 1073-1082. doi:10.1080/02786826.2013.824067. ③
- Ohta, T., Kotani, A., Iijima, Y., Maximov, T.C., Ito, S., Hanamura, M., Kononov, A.V., Maximov, A.P., 2014. Effects of waterlogging on water and carbon dioxide fluxes and environmental variables in a Siberian larch forest, 1998 2011. Agric. For. Meteorol., 188, 64-75. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.12.012. ②
- O'ishi, R., Abe-Ouchi, A., 2013. Influence of dynamic vegetation on climate change and terrestrial carbon storage in the Last Glacial Maximum. Clim. Past, 9, 1571-1587. ①
- Okazaki, A., Satoh, Y., Tremoy, G., Vimeux, F., Scheepmaker, R., Yoshimura, K., 2015. Interannual variability of isotopic composition in water vapor over West Africa and its relation to ENSO. Atmos. Chem. Phys., 15, 3193-3204. doi:10.5194/acp-15-3193-2015. ①
- Okuno, J., Nakada, M., Ishii, M., Miura, H., 2014. Vertical tectonic crustal movements along the Japanese coastlines inferred from late Quaternary and recent relative sea-level changes. Quaternary Science Reviews, 91, 42-61. ④
- 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. J. Advances in Modelling Earth Systems, 8, 292-303. doi:10.1002/2015MS000552. 7
- Ono, J., De Silva, L.W.A, Yamaguchi, H., 2014. Numerical study on a short-term sea-ice prediction for the Northern Sea rote and Northwest Passage. Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice, Singapore, August 11-15, 955-962. doi:10.3850/978-981-09-0750-1_1255. ⑦
- Ono, J., Ohshima, K.I., Uchimoto, K., Ebuchi, N., Mitsudera, H., Yamaguchi, H., 2013. Particle-tracking simulation for the drift/diffusion of spilled oils in the Sea of Okhotsk with a three-dimensional, high-resolution model. J. Oceanogr., 69 (3), 1-16. 7
- Ooki, A., Kawasaki, S., <u>Kuma, K. Nishino, S., Kikuchi, T.,</u> 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. ⁽⁶⁾
- Ooki, A., Nomura, D., Nishino, S., Kikuchi, T., Yokouchi, Y., 2015. A global-scale map of isoprene and volatile organic iodine in surface seawater of the Arctic, Northwest Pacific, Indian, and Southern Oceans. J. Geophys. Res., 120,(6), 4108-4128. doi: 10.1002/2014JC010519 (6)7
- Oshchepkov, S., Bril, A., Yokota, T., Morino, I., Yoshida, Y., Matsunaga, T., <u>Belikov, D.</u>, et al., 2013. Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space. Part 1: Validation of PPDF-based CO₂ retrievals from GOSAT. J. Geophys. Res., 117, D12305, 2012. Part 2: Algorithm intercomparison in the GOSAT data processing for CO₂ retrievals over TCCON sites, J. Geophys. Res., 118. doi: 10.1029/2012JD018782. (5)
- Oshika, M., <u>Tachibana, Y., Nakamura, T.</u>, 2014. Impact of the winter North Atlantic Oscillation on the Western Pacific pattern in the following winter through Arctic sea ice and ENSO. Part I: Observational evidence. Clim. Dyn., 39. doi: 10.1007/s00382-014-2384-1. ③
- Oshima, N., <u>Koike, M., Kondo, Y.,</u> Nakamura, H., Moteki, N., Matsui, H., Takegawa, N., Kita, K., 2013a. Vertical transport mechanisms of black carbon over East Asia in spring during the A-FORCE aircraft campaign. J. Geophys. Res. Atmos., 118, 13,175-13,198. doi:10.1002/2013JD020262. ③
- Oshima, N., Koike, M., 2013b.Development of a parameterization of black carbon aging for use in general circulation models. Geosci. Model Dev., 6, 179-206. doi:10.5194/gmd-6-263-2013. ③
- Otomi, Y., <u>Tachibana, Y.</u>, <u>Nakamura, T.</u>, 2013. A possible cause of the AO polarity reversal from winter to summer in 2010 and its relation to hemispheric extreme summer weather. Clim. Dyn., 38. doi: 10.1007/s00382-012-1386-0. ③
- <u>大塚夏彦</u>, 古市正彦, 泉山 耕, 中野佑哉, 2014. 北極海航路によるバルク貨物の海上輸送コストの分析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 70 No. 2. ⑦
- Otsuka, N., Izumiyama, K., Furuichi, M., 2013. Study on feasibility of the Northern Sea Route from recent voyages. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland, 10p. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756. 7
- 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, 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, June 26 July 2, Rhodes, Greece., accepted.
- Ozeki, T., Sagawa, G., 2013. Field observation of seawater spray droplets impinging on the upper deck of an icebreaker. Proc. 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756, 7p. 7
- <u>尾関俊浩,安達聖</u>, 2012. 巡視船そうやにおける飛沫の発生と海水飛沫着氷の観測-2012年2月-. 寒地技術論文・報告集, 28, 157-160. ⑦
- Ozeki, T., Yamamoto, R., Izumiyama, K., Sakamoto, T., 2012. Ice adhesion tests on pliable polymer sheets for protection against sea spray icing. J. Adhesion Science and Technology, 26, 651-663. 7
- 尾関俊浩, 2011. 砕氷艦しらせにおける飛沫の発生と飛来に関する研究. 寒地技術論文・報告集, 27, 4pp. ⑦

- Park, H., Kim, Y., Kimball, J., 2016. Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. Remote Sens. Environ., 149, 349-358. doi: 10.1016/j.rse.2015.12.046. ②
- Park, H., Fedorov, A.N., Zheleznyak, M.N., Konstantinov, P.Y., Walsh, J.E., 2014. Effect of snow cover on pan-Arctic permafrost thermal regimes. Clim. Dyn., 44, 2873-2895. doi: 10.1007/s00382-014-2356-5. ②
- Park, H., Sherstiukov, A.B., Fedorov, A.N., Polyakov, I.V., Walsh, J.E., 2014. An observation-based assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in Russia. Environ. Res. Lett., 9, 064026. doi: 10.1088/1748-9326/9/6/064026.
- Park, H., Walsh, J., Fedorov, A.N., Sherstiukov, A.B., Ijjima, Y., Ohata, T., 2013. The influence of climate and hydrological variables on opposite anomaly in active-layer thickness between Eurasian and North American watersheds. The Cryosphere, 7, 631-645. doi: 10.5194/tc-7-631-2013. ②
- Patra, P. K., Saeki, T., Dlugokencky, E. J., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Aoki, S., Morimoto, S., Kort, E. A., Crotwell, A., Ravikumar, K., Nakazawa, T., 2016. Regional emission and loss budgets of atmospheric methane (2002-2012), J. Meteorol. Soc. Japan., 94, 91-113. ⁽⁵⁾
- Patra, P.K., Saeki, T., Dlugokencky, E.J., <u>Ishijima, K.</u>, Umezawa, T., <u>Ito, A.</u>, <u>Aoki, S.</u>, <u>Morimoto, S.</u>, Kort, E.A., Crotwell, A., Ravikumar, K., <u>Nakazawa, T.</u>, 2015. Regional emission and loss budgets of atmospheric methane (2002-2012). J. Meteorol. Soc. Japan. 94, 91-113.
- Patra, P.K., Krol, M.C., Montzka, S.A., Arnold, T., Atlas, E.L., Lintner, B.R., Stephens, B.B., Xiang, B., Elkins, J.W., Fraser, P.J., Ghosh, A., Hintsa, E.J., Hurst, D.F., <u>Ishijima, K.</u>, Krummel, P.B., Miller, B.R., Miyazaki, K., Moore, F.L., Mu^{*}hle, J., O'Doherty, S., Prinn, R.G., Steele, L.P., Takigawa, M., Wang, H.J., Weiss, R.F., Wofsy, S.C., Young, D., 2014. Observational evidence for interhemispheric hydroxyl⁻radical parity. Nature, 513, 219–223. doi:10.1038/nature13721. ⁽⁵⁾
- Petrich, C., Eicken, H., Zhang, J., Krieger, J., Fukamachi, Y., Ohshima, K.I., 2012. Coastal landfast sea ice decay and breakup in northern Alaska: Key processes and seasonal prediction. J. Geophys. Res., 117, C02003. doi:10.1029/2011JC007339. 7
- Podolskiy, E. A. Sugiyama, S., Funk, M., Walter, F., Genco, R., <u>Tsutaki, S.</u>, Minowa, M., Ripepe, M. 2016, Tide-modulated ice flow variations drive seismicity near the calving front of Bowdoin Glacier, Greenland, Geophys. Res. Letters, 43,1789-2336. doi: 10.1002/2016GL067743.
- Polyakov, I.V., Bolton, R., <u>Greve, R.</u>, Hutchings, J., Kim, S.J., Kim, Y., Lee, S.H., <u>Ohata, T., Saito, F., Sugimoto, A., Suzuki, R.</u>, 2014. Promoting international, multidisciplinary efforts in detecting and understanding high-latitude changes, and searching for their global impacts. Polar Science, 8, 53-56. doi: 10.1016/j.polar.2014.03.002. ⁽²⁾
- Popova, A.S., Tokuchi, N., Ohte, N., Ueda, U.M., Osaka, K., Maximov T.C., Sugimoto, A., 2013. Nitrogen availability in the taiga forest ecosystem of northeastern Siberia. Soil Sci. Plant Nutr., 59, 427-441. doi: 10.1080/00380768.2013.772495.
- Proshutinsky, A. and 28 co-authors (including Itoh, M., Kikuchi, T., Nishino, S.), 2012. Ocean, The Arctic, in "State of the Climate in 2011", edited by J. Blunden and D. S.Arndt. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93 (7), S142-S145. ⁽⁶⁾
- Rabe, B., Karcher, M., Kauker, F., Schauer, U., Toole, J.M., Krishfield, R.A., Pisarev, S., <u>Kikuchi, T.</u>, Su, J., 2014. Arctic Ocean basin liquid freshwater storage trend 1992–2012. Geophys. Res. Lett., 41. doi:10.1002/2013GL058121. ⁽⁶⁾
- Rabe, B., Karcher, M., Schauer, U., Toole, J.M., Krishfield, R.A., Pisarev, S., Kauker, F., Gerdes, R., <u>Kikuchi, T.</u>, 2011. An assessment of pan-Arctic Ocean freshwater content changes from the 1990s to the IPY period. Deep Sea Res. I, 58, 173–185. doi:10.1016/j.dsr.2010.12.002.
- Rogozhina, I., Hagedoorn, J.M., Martinec, Z., Fleming, K., Soucek, O., <u>Greve, R.</u>, Thomas, M., 2012. Effects of uncertainties in the geothermal heat flux distribution on the Greenland Ice Sheet: An assessment of existing heat flow models. J.Geophys. Res., 117 (F2), F02025. ④
- Sabrekov, A.F., Runkle, B., Glagolev, M.V., Kleptsova, I.E., <u>Machida, T., Maksyutov, S.S.</u>, 2014. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling. Env. Res. Letters, 9 (4), 045008. ⁽⁵⁾
- Saeki, T., Maksyutov, S., Sasakawa, M., Machida, T., Arshinov, M., Tans, P., Conway, T., Saito, M., Valsala, V., Oda, T., Andres, R., Belikov, D., 2013. Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements. J. Geophys, Res. 118. doi:10.1029/2012JD018462. (5)
- Saeki, T., Saito, R., <u>Belikov, D.</u>, <u>Maksyutov, S.</u>, 2013. Global high-resolution simulations of CO₂ and CH₄ using a NIES transport model to produce a priori concentrations for use in satellite data retrievals. Geosci. Model Dev., 6, 2215-2258. doi:10.5194/gmd-6-81-2013.
- Saeki, T., <u>Maksyutov, S., Sasakawa, M., Machida, T.</u>, Arshinov, M., Tans, P., Conway, T., Saito, M., Valsala, V., Oda, T., Andres, R., <u>Belikov,</u> <u>D.</u>, 2013. Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements. J. Geophys, Res. 118. doi:10.1029/2012JD018462. ⁽⁵⁾
- Saikawa, E., Prinn, R.G., Dlugokencky, E., Ishijima, K., Dutton, G.S., Hall, B.D., Langenfelds, R., <u>Tohjima, Y., Machida, T.</u>, Manizza, M., Rigby, M., O'Doherty, S., <u>Patra, P.K.</u>, Harth, C.M., Weiss, R.F., Krummel, P.B., van der Schoot, M., Fraser, P.B., Steele, L.P., <u>Aoki, S., Nakazawa, T.</u>, Elkins, J.W., 2014. Global and regional emissions estimates for N₂O. Atmos. Chem. Phys., 14, 4617-4641. doi:10.5194/acp-14-4617-2014. ⁽⁵⁾
- Saito, F., Abe-Ouchi, A., Takahashi, K., Blatter, H., 2016a. SeaRISE experiment revisited: sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice-sheet. The Cryosphere, 10, 43-63. ④
- 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, in press. ④
- Saito, K., Sueyoshi, T., Marchenko, S., Romanovsky, V., Otto-Bliesner, B., Walsh, J., Bigelow, N., Hendricks, A., Yoshikawa, K., 2013a. LGM permafrost distribution: How well can the latest PMIP multi-model ensembles perform reconstruction? Clim. Past, 9, 1697-1714. doi: 10.5194/cp-9-1697-2013. ②
- Saito, K., Zhang, T., Yang, D., Marchenko, S., Barry, R.G., Romanovsky, V., Hinzman, L., 2013b. Influence of the Physical Terrestrial Arctic in the Eco-climate System. Ecol. Appl., 23, 1778-1797. doi: 10.1890/11-1062.1. ②
- Saito, M., <u>Ito, A.</u>, <u>Maksyutov, S.</u>, 2014. Optimization of a prognostic biosphere model for terrestrial biomass and atmospheric CO₂ variability. Geoscientific Model Development 7: 1829–1840. doi: 10.5194/gmd-7-1829-2014. ⁽⁵⁾
- Saito, R., Patra, P., Sweeney, C., Machida, T., Krol, M., Houweling, S., Bousquet, P., Agusti-Panareda, A., Belikov, D., Bergmann, D., Bian, H., Cameron-Smith, P., Chipperfield, M., Fortems-Cheiney, A., Fraser, A., Gatti, L., Gloor, E., Hess, P., Kawa, S., Law, R., Locatelli, R., Loh, Z., <u>Maksyutov, S.</u>, Meng, L., Miller, J., Palmer, P., Prinn, R., Rigby, M., Wilson, C., 2013c. TransCom model simulations of methane: comparison of vertical profiles with aircraft measurements. J. Geophys. Res., 118, 3891–3904. doi:10.1002/jgrd.50380. ⁽⁵⁾
- 齊藤洋一,小林文明,桂 啓仁,高村民雄,<u>鷹野敏明</u>,操野年之,2013. 衛星(MTSAT-1R) ラピッドスキャンデータでみた孤立積乱雲の一生,天気, 60 (4), 247-260. 雲
- Sakai, O., Yamamura, O., <u>Sakurai, Y.</u>, Azumaya, T., 2012. Temporal variation in chum salmon, Oncorhynchus keta, diets in the central Bering Sea in summer and early autumn. Environ. Biol. Fish, 93, 319-331. ⁽⁶⁾

- Sasakawa, M., Machida, T., Tsuda, N., Arshinov, M., Davydov, D., Fofonov, A., Krasnov, O., 2013. Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011. J. Geophys. Res., doi:10.1002/jgrd.50755. (5)
- Sasakawa, M., Ito, A., Machida, T., Tsuda, N., Niwa, Y., Davydov, D., Fofonov, A., Arshinov, M., 2012. Annual variation of CH₄ emissions from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005–2009): a case of high CH₄ flux and precipitation rate in the summer of 2007. Tellus B,64. doi: 10.3402/tellusb.v64i0.17514.⁽⁵⁾
- Sasaki, M., Kim, Y. -W., Uchida, M., Utsumi, M., 2016. Diffusive summer methane flux fro lakes to the atmosphere in the Alaskan arctic zone. Polar Science, 10, 303-311, in press. 2
- Sato, H., <u>Ito, A., Ise, T.</u>, Kato, E., 2014. Current status and future of land surface models. Soil Sci. Plant Nutr., 61, 34-47. doi: 10.1080/00380768.2014.917593. 2. ②
- Sato, N.N., Kokubun, N., Yamamoto, T., Watanuki, Y., Kitaysky, A.S., Takahashi, A., 2015. The jellyfish buffet: jellyfish enhance seabird foraging opportunities by concentrating prey. Biol. Lett., doi: 10.1098/rsbl.20150358. ⁽⁶⁾
- Sawa Y., Machida, T., Matsueda, H., Niwa, Y., Tsuboi, K., Murayama, S., Morimoto, S., Aoki, S., 2015. Seasonal changes of CO₂, CH₄, N₂O, and SF₆ in the upper troposphere/lower stratosphere over the Eurasian continent observed by commercial airliner, Geophys. Res.Lett., 42. doi:10.1002/2014GL06273. ⁽⁵⁾
- Sawa, Y., Machida, T., Matsueda, H., 2012. Aircraft observation of the seasonal variation in the transport of CO₂ in the upper atmosphere. J. Geophys. Res., 117, D05305. doi:10.1029/2011JD016933. ⁽⁵⁾
- Sawamura, J., Kioka, S., 2016. Numerical Modeling of Icebreaking and Ice-clearing for an Icebreaker Advancing in Sea ice, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31 - June 3. 7
- Sawamura, J., Senga, H., Imaki, K., Suga, K., Kim, H., 2016. Ice Resistance Test of Ship Advancing in Ice-covered Water using Synthetic Ice, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31 June 3.7
- Sawamura, J., Kioka, S., Konno, A., 2015. Experimental and numerical investing on ice submerging for icebreaker with 2D model test using synthetic ice. Proc. 23rd Intern. Conf. Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC'15), June 14 18, Trondheim, Norway, 12p. ISSN 0376-6756. 7
- Sawamura, J., 2014. Numerical study on ice force distributeon for plate ice failure and broken ice submerging for ship manueuver in level ice. Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice, Singapore, August 11-15, 171-178. doi:10.3850/978-981-09-0750-1_1118. ⑦
- Sawamura, J., Kim, H., 2014. A numerical study for ship-ice interaction simulated in 3D vertical ice terrain generated by fractal theory. Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice, Singapore, August 11-15, 418-425. doi:10.3850/978-981-09-0750-1_1157. ⑦
- 澤村淳司,山口一,志賀俊成,2014.砕氷船舶の砕氷航行時の氷板破壊の計測と砕氷パターンの考察.寒地技術論文・報告集,30,1-6.⑦
- Seddik, H., Greve, R., Zwinger, T., Gillet-Chaulet, F., Gagliardini, O., 2012. Simulations of the Greenland ice sheet 100 years into the future with the full Stokes model Elmer/Ice. Journal of Glaciology, 58 (209), 427-440. ④
- Semiletov, I.P., Shakhova, N.E., Pipko, I.I., Pugach, S.P., Charkin, A.N., Dudarev, O.V., Kosmach D.A., <u>Nishino, S.</u>, 2013. Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay and adjacent part of the Laptev Sea. Biogeosciences, 10, 9, 5977-5996. doi: 10.5194/bg-10-5977-2013.
- Shibata, H., Izumiyama, K., Tateyama, K., Enomoto, H., Takahashi, S., 2013. Sea ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980-2011. Annals of Glaciology, 54 (62), 139-148. 7
- Shibata, H., Izumiyama, K., Tateyama, K., Enomoto, H., Takahashi, S., 2012. Interannual changes in sea ice coverage on the Northwest Passage obtained by satellite microwave data. Proc. 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference, June 17-23, Rhodes, Greece. ISBN 978-1-880653-94-4, ISSN 1098-6189. 7
- 志賀俊成, <u>尾関俊浩</u>, <u>澤村淳司</u>, <u>山口一</u>, 2014. 砕氷艦しらせにおける飛沫の発生と飛来に関する研究その 2. 寒地技術論文・報告集, 30, 7-11. ⑦
- Shigihara, T., Ishibashi, D., Konno, A., 2015. Experimental and numerical investigation of a model-scale ship and ice floe (2nd report). Conf. Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC'15), June 14-18, Trondheim, Norway, 10p. ISSN 0376-6756. 7
- Shimada, R., <u>Takeuchi, N., Aoki, T.</u>, 2016. Inter-annual and geographical variations in the extent of bare ice and dark ice on the Greenland ice sheet derived from MODIS satellite images, Frontiers in Earth Sciences, 4(43), doi: 10.3389/feart.2016.00043.
- Shimada, U., Wada, A., <u>Yamazaki, K.</u>, Kitabatake, N., 2014. Roles of an upper –level cold vortex and low-level baroclinicity in the development of polar lows over the Sea of Japan. Tellus, 66, 24694. ③
- Shiogama, H., Watanabe, M., Ogura, T., Yokohata, T., Kimoto, M., 2014. Multi-Parameter Multi-Physics Ensemble (MPMPE): A new approach exploring the uncertainties of climate sensitivity. Atmos. Sci. Lett., 15, 97-102. ①
- Shirakawa, T., Kadota, T., Fedorov, A., Konstantinov, P., Suzuki, T., Yabuki, H., Nakazawa, F., Tanaka, S., Miyairi, M., Fujisawa, Y., <u>Takeuchi,</u> <u>N.</u>, Kusaka, R., Takahashi, S., <u>Enomoto, H.</u>, <u>Ohata, T.</u>, 2016. Meteorological and Glaciological observations at Suntar-Khayata Glacier No. 31, east Siberia, from 2012-2014, Bulletin of Glaciological Research, 34, 33-40. doi: 10.5331/bgr.16R01. (4)
- Simizu, D., Ohshima, K.I., Ono, J., Fukamachi, Y., Mizuta, G., 2014. What drives the southward drift of sea ice in the Sea of Okhotsk? Prog. Oceanogr., 126, 33-43. doi:10.1016/j.pocean.2014.05.013. 7
- Smith, I.J., Eicken, H., Mahoney, A. R., Van Hale, R., Gough, A. J., Fukamachi, Y., Jones, J., Surface water mass composition changes captured by cores of Arctic land-fast sea ice. Cont. Shelf Res., in press. doi: 10.1016/j.csr.2016.02.008. 7
- Sueyoshi, T., Saito, K., Miyazaki, S., Mori, J., Ise, T., Arakida, H., Suzuki, R., Sato, A., Iijima, Y., Yabuki, H., Ikawa, H., Ohta, T., Kotani, A., Hajima, T., Sato, H., Yamazaki, T., Sugimoto, A., 2016. The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIP) stage 1 forcing data set. Earth Syst. Sci., 8, 1-14. doi: 10.5194/essd-8-1-2016. @ADS
- Sugimoto, F., <u>Tamura, T.</u>, Shimoda, H., Uto, S., <u>Simizu, D., Tateyama, K.</u>, Hoshino, S., <u>Ozeki, T., Fukamachih, Y.</u>, Ushio, S., <u>Ohshima, K.I.</u>, 2015. Interannual variability in sea-ice thickness in the pack-ice zone off Lützow–Holm Bay, East Antarctica. Polar Science, doi:10.1016/j.polar.2015.10.003. ⑦
- Sugiura, K., Suzuki, R., Nakai, T., Busey, B., Hinzman, L., Park, H., Kim, Y., Nagai, S., Saito, K., Cherry, J., Ito, A., Ohata, T., Walsh, J., 2011. Supersite as a common platform for multi-observations in Alaska for a collaborative framework between JAMSTEC and IARC. JAMSTEC Report of Research and Development, 12, 61-69. doi: 10.5918/jamstecr.12.61. 2
- Sugiura, K., Takahashi, S., Kameda, T., Enomoto, H., Kononov, Y., Ananicheva, M., 2016. Spatial characteristics of rainfall at sparsely distributed station network over the high-latitude mountainous regions in eastern Siberia. International Journal of Earth and Environmental Sciences, 1 (104), http://dx.doi.org/ojees/2016/104.
- Sugiura, K., Nagai, S., Nakai, T., Suzuki, R., 2013. Application of time-lapse digital imagery for ground-truth verification of satellite indices in the boreal forests of Alaska. Polar Science, 7, 149-161. doi: 10.1016/j.polar.2013.02.003. ②

- Sugiyama, S., Sakakibara, D., Tsutaki, S., Maruyama, M., Sawagaki, T., 2015. Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland. Journal of Glaciology, 61 (226), 223-232. ④
- Sugiyama, S., Sakakibara, D., Matsuno, S., Yamaguchi, S., Matoba, S., Aoki, T., 2014. Initial field observations on Qaanaaq Ice Cap in northwestern Greenland. Annals of Glaciology, 55(66), 25-33. ④
- Sumata, H., Lavergne, T., Girard-Ardhuin, F., <u>Kimura, N.</u>, Tschudi, M.A., Kauker, F., Karcher, M., Gerges, R., 2014. An intercomparison of Arctic ice drift products to deduce uncertainty estimates. J. Geophys. Res., 119. DOI:10.1002/2013JC009724. 7
- Suzuki, K., Matsuo, K., Hiyama, T., 2016. Satellite gravimetry-based analysis of terrestrial water storage systems and their relationship to runoff from the Lena River in eastern Siberia. International J. Remote Sens., in press. ④
- Suzuki, R., Kim, Y., Ishii, R., 2013. Sensitivity of the backscatter intensity of ALOS/PALSAR to the above-ground biomass and other biophysical parameters of boreal forest in Alaska. Polar Science, 7, 100-112. doi: 10.1016/j.polar.2013.03.001.
- <u>鈴木力英</u>, 2013. 北半球寒冷地域におけるリモートセンシングによる広域植生の最近の研究動向. 『日本リモートセンシング学会誌』, 33, 1, 48-55. doi: 10.11440/rssj.33.48. ①②
- Takagi, T., Tateyama, K., Ishiyama, T., 2014. Obstacle avoidance and planning in ice sea using probabilistic roadmap method. Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice, Singapore, August 11-15, 510-517. doi:10.3850/978-981-09-0750-1 1259. ⑦
- <u>鷹野敏明</u>,高村民雄,2014. ミリ波雲レーダ FALCON-Iの開発— 現状と展望 —. 低温科学(北海道大学低温科学研究所),72,219-224. 雲 Takeuchi, N., Fujisawa, Y., <u>Kadota, T.</u>, Tanaka, S., Miyairi, M., <u>Shirakawa, T.</u>, Kusaka, R., Fedorov, A.N., Konstantinov, P., <u>Ohata, T.</u>, 2015.

The effect of impurities on the surface melt of a glacier in the Suntar Khayata Mountain Range, Russian Siberia. Frontiers in Earth Science. 3:82. doi: 10.3389/feart.2015.00082. ④

- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Uetake, J., Shimada, R., 2014. Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. Bulletin of Glaciological Research, 32, 85-94. doi: 10.5331/bgr.32.85. ④
- Takeuchi, N., 2013. Seasonal and altitudinal variations in snow algal communities on an Alaskan glacier (Gulkana glacier in the Alaska range), Environmental Research Letters, 8, 035002. doi:10.1088/1748-9326/8/3/035002. ④
- Tanaka, H. L., Tamura, M., 2016c. Relationship between the Arctic Oscillation and surface air temperature in multi-decadal time-scale. Polar Science, 10, 199-209, in press. ③
- Tanaka, H. L., Seki, S., 2013. Development of 3D spectral linear baroclinic model and the application to the baroclinic instability associated with positive and negative Arctic Oscillation Index. J. Meteorol. Soc. Japan, 91, 193-213. doi: 10.2151/jmsj.2013-207.
- Tanaka, S., <u>Takeuchi, N.</u>, Miyairi, M., Fujisawa, Y., <u>Kadota, T., Shirakawa, T.</u>, Kusaka, R., Takahashi, S., <u>Enomoto, H., Ohata, T., Yabuki, H., Konya, K.</u>, Fedorove, A., Konstantinove, P., 2016a. Snow algal communities on glaciers in the Suntar-Khayata Mountain Range in eastern Siberia. Russia, Polar Science, 10, 227-238, in press. ④
- Tanaka, Y., <u>Tateyama, T., Kameda, T.,</u> Hutchings, J. K., 2016b. Estimation of melt pond fraction over high-concentration Arctic sea ice using AMSR-E passive microwave data. J. Geophys. Res., in press. ⑦
- 田中康弘, <u>舘山一孝</u>, 高橋修平, <u>亀田貴雄</u>, <u>榎本浩之</u>, 2015. 北極海における氷況把握のための画像解析法の開発 –自動化した表面状態判別とその測 定結果–. 雪氷, 77(2), 173-190. ⑦
- Tei, S., Yonenobu, H., Sugimoto, A., Ohta, T., Maximov, T.C., OCT 2015. Reconstructed summer Palmer Drought Severity Index since 1850 AD based on δ¹³C of larch tree rings in eastern Siberia. J. Hydrol., 529, 442-448. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.085.⁽²⁾
- Tei, S., Yonenobu, H., Suzuki, S., Ohyama, M., Gotanda, K., Nakagawa, T., Sugimoto, A., 2015. Reconstructed July temperatures since AD 1800, based on a tree-ring chronology network in the Northwest Pacific region, and implied large-scale atmospheric-oceanic interaction. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 435, 203-209. doi: 10.1016/j.palaeo.2015.06.012. ②
- <u>Tei, S., Sugimoto, A.</u>, Yonenobu, H., <u>Ohta, T.</u>, Maximov, T.C., 2014. Growth and physiological responses of larch trees to climate changes deduced from tree-ring widths and δ¹³C at two forest sites in eastern Siberia. Polar Science, 8, 183-195. doi: 10.1016/j.polar.2013.12.002.
 2
- Tei, S., Sugimoto, A., Yonenobu, H., Yamazaki, T., Maximov, T.C., 2013. Reconstruction of soil moisture for the past 100 years in eastern Siberia by using δ^{13} C of larch tree rings. J. Geophys. Res.: Biogeosci., 118, 1-10. doi: 10.1002/jgrg.20110. 2
- Tei, S., Sugimoto, A., Yonenobu, H., Hoshino, Y., Maximov, T.C. 2013. Reconstruction of summer Palmer Drought Severity Index from δ¹³C of larch tree rings in East Siberia. Quat. Int., 290, 275-281. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.085. ②
- Terui, T., Kishi, M.J., Uneo, H., 2012. Lagrangian ensemble model of Copepodda (Neocalanus cristatus) in the northwestern subarctic Pacific. J. Oceanogr., 68, 727-741. ⁽⁶⁾
- Timmermans, M.-L., Proshutinsky, A., Golubeva, E., Jackson, J.M., Krishfield, R., McCall, M., Platov, G., Toole, J., Williams, W., <u>Kikuchi, T.,</u> <u>Nishino, S.</u>, 2014. Mechanisms of Pacific Summer Water variability in the Arctic's Central Canada Basin. J. Geophys. Res., 119, 11, 7523-7548. doi:10.1002/2014JC010273. ⁽⁶⁾
- Tohjima, Y., Kubo, M., <u>Minejima, C.</u>, Mukai, H., Tanimoto, H., Ganshin, A., <u>Maksyutov, S.</u>, Katsumata, K., <u>Machida, T.</u>, Kita, K., 2013. Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄/CO₂ and CO/CO₂ correlations observed at Hateruma Island. Atmos. Chem. Phys., 14, 1663-1677. doi:10.5194/acp-14-1663-2014.
- Tohjima, Y., Minejima, C., Mukai, H., Machida, T., Yamagishi, H., Nojiri, Y., 2012. Analysis of seasonality and annual mean distribution of atmospheric potential oxygen (APO) in the Pacific region. Global Biogeochem. Cycles, 26, doi:10.1029/2011GB004110. ⁽⁵⁾
- Toyoda, T., Fujii, Y., Yasuda, T., Usui, N., Ogawa, K., Kuragano, T., <u>Tsujino, H.</u>, Kamachi, M., 2016. Data assimilation of sea ice concentration into a global ocean-sea ice model with corrections for atmosphere forcing and ocean temperature fields. J. Oceanogr., 72, 235-262. (1)
- Toyoda, T., Fujii, Y., Yasuda, T., Usui, N., Iwao, T., Kuragano, T., Kamachi, M., 2013. Improved analysis of seasonal-interannual fields using a global ocean data assimilation system. Theoretical and Applied Mechanics Japan, 61, 31-48. ①
- Toyokuni, G., Kanao, M., Tono, Y., Himeno, T., <u>Tsuboi, S.</u>, Childs, D., Anderson, K., Takenaka, H., 2013. Japanese Contribution to the Greenland Ice Sheet Monitoring Network (GLISN), Ant. Record, 58 (1), 1-18. ④
- Tran, V.D., Osawa, A., Sato, T., 2015. Estimation of fine-root production using rates of diameter-dependent root mortality, decomposition, and thickening in forests. Tree Physiol. doi: 10.1093/treephys/tpv121. 2
- Tsujii, K., Otsuki, M., Akamatsu, T., Matsuo, I., <u>Amakasu, K., Kitamura, M., Kikuchi, T.</u>, Miyashita, K., <u>Mitani, Y</u>, 2016. The migration of fin whales into the southern Chukchi Sea as monitored with passive acoustics. ICES Journal of Marine Science, doi: 10.1093/icesjms/fsv271, published online. ⁽⁶⁾
- Tsukazaki, C., Ishii, K., Saito, R., <u>Matsuno, K., Yamaguchi, A.</u>, Imai, I., 2013. Distribution of viable diatom resting stage cells in bottom sediments of the eastern Bering Sea shelf. Deep-Sea Res. II, 94, 22-30. doi:10.1016/j.dsr2.2013.03.020. 6
- Tsutaki, S., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Sawagaki, T., 2016. Surface elevation changes during 2007-2013 on Bowdoin and Tugto Glaciers, northwestern Greenland. Journal of Glaciology. doi:10.1017/jog.2016.106, in press. ④

- Uchida, M., Muraoka, H., Nakatsubo, T., 2015. Sensitivity analysis of ecosystem CO₂ exchange to climate change in High Arctic tundra using an ecological process-based model. Polar Biol. doi:10.1007/s00300-015-1777-x. ②
- Uchida, R., Kuma, K., Omata, A., Ishikawa, S., Hioki, N., Ueno, H., Isoda, Y., Sakaoka, K., Kamei, Y., Takagi, S., 2013. Water column iron dynamics in the subarctic North Pacific and Bering Sea. J. Geophys. Res., 118: 1257-1271. doi:10.1029/2012JC008440. ⁽⁶⁾
- Uchimiya, M., Fukuda, H., Nishino, S., Kikuchi, T., Ogawa, H., Nagata, T., 2013. Vertical distribution of prokaryote production and abundance in the mesopelagic and bathypelagic layers of the Canada Basin, western Arctic: Implications for the mode and extent of organic carbon delivery. Deep Sea Res. I, 71, 103-112. doi: 10.1016/j.dsr.2012.10.001. (6)
- Uchiyama, A., Yamazaki, A., Shiobara, M., Kobayashi, H., 2014. Case study on microphysical properties of boundary layer mixed-phase cloud observed at Ny Ålesund, Svalbard: observed cloud microphysics and calculated optical properties on 9 June 2011. Polar Science, 8, 57-72. doi: 10.1016/j.polar.2013.11.001. ③
- Umezawa, T., <u>Machida, T., Aoki, S., Nakazawa, T.</u>, 2012. Contributions of natural and anthropogenic sources to atmospheric methane variations over Western Siberia estimated from its carbon and hydrogen isotopes. Global Biogeochem. Cycles, 26, GB4009. doi:10.1029/2011GB004232. (5)
- Uotila, P., Holland, P.R., Vihma, T., Marsland, S.J., <u>Kimura, N.</u>, 2014. Is realistic Antarctic sea ice extent in climate models the result of excessive ice drift. Ocean Modelling, 79, 33-42. 7
- Wang, Q., Ilicak, M., Gerdes, R., Drange, H., Aksenov, Y., Bailey, D., Bentsen, M., Biastoch, A., Bozec, A., Böning, C., Cassou, C., Chassignet, E., Coward, A., Curry, B., Danabasoglu, G., Danilov, S., Fernandez, E., Fogli, P., Fujii, Y., Griffies, S., Iovino, D., Jahn, A., Jung, T., Large, W., Lee, C., Lique, C., Lu, J., Masina, S., Nurser, A., Rabe, B., Roth, C., Salas y Mélia, D., Samuels, B., Spence, P., <u>Tsujino, H.</u>, Valcke, S., Voldoire, A., Wang, X., Yeager, S., 2016a. An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part I: Sea ice and solid fresh water. Ocean Modell., 99, 110-132. ①
- Wang, Q., Ilicak, M., Gerdes, R., Drange, H., Aksenov, Y., Bailey, D., Bentsen, M., Biastoch, A., Bozec, A., Böning, C., Cassou, C., Chassignet, E., Coward, A., Curry, B., Danabasoglu, G., Danilov, S., Fernandez, E., Fogli, P., Fujii, Y., Griffies, S., Iovino, D., Jahn, A., Jung, T., Large, W., Lee, C., Lique, C., Lu, J., Masina, S., Nurser, A., Rabe, B., Roth, C., Salas y Mélia, D., Samuels, B., Spence, P., <u>Tsujino, H.</u>, Valcke, S., Voldoire, A., Wang, X., Yeager, S., 2016b. Anassessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part II: Liquid freshwater. Ocean Modell., 99, 86-109. ①
- Ward, T., Trost, B., Conner, J., Flanagan, J., Jayanty , R. K. M., 2012. Source apportionment of PM2.5 in a subarctic airshed- Fairbanks, Alaska. Aerosol and Air Quality Research, 12, 536-543.
- <u>渡邉英嗣, 田村岳史</u>, 2015. 北極海ポリニヤ域における海氷生産量の衛星—モデル間比較. 日本リモートセンシング学会誌, 35 号, 2·9. ⑦
- 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. Biogeoscience, 12, 6147-6168. doi: 10.5194/bg-12-6147-2015. 6
- Watanabe, E., Onodera, J., Harada, N., Honda, M., Kimoto, K., <u>Kikuchi, T., Nishino, S., Matsuno, K., Yamaguchi, A., Ishida, A., Kishi, M.,</u> 2014. Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump. Nature Comm., 5, 3950, doi: 10.1038/ncomms4950. ⁽⁶⁾
- Watanabe, E., Ogi, M., 2013. How does Arctic summer wind modulate sea ice-ocean heat balance in the Canada Basin?, Geophys. Res. Lett., 40., pp1569-1574. doi:10.1002/grl50363. 67
- Watanabe, E., Kishi, M.J., Ishida, A., Aita, M.N., 2012. Western Arctic primary productivity regulated by shelf-break warm eddies. J. Oceanogr., 68, 703-718. doi:10.1007/s10872-012-0128-6.6
- Witrant, E., Martinerie, P., Hogan, C., Laube, J.C., <u>Kawamura, K.</u>, Capron, E., Montzka, S.A., Dlugokencky, E.J., Etheridge, D., Blunier, T., Sturges, W.T., 2012. A new multi-gas constrained model of trace gas non-homogeneous transport in firm: evaluation and behaviour at eleven polar sites. Atmos. Chem. Phys., 12, 1-19. ⁽⁵⁾
- Xue, B.L., Li, Z., Yin, X.A., Zhang, T., Iida, S., Otsuki, K., <u>Ohta, T.</u>, Guo, Q., 2015. Canopy conductance in a two-storey Siberian boreal larch forest, Russia. Hydrol. Process., 29, 1017-1026. doi: 10,1002/hyd.10213. ②
- Yamada, Y., Fukuda, H., <u>Uchimiya, M.</u>, Motegi, C., <u>Nishino, S., Kikuchi, T., Nagata, T.</u>, 2015. Localized accumulation and a shelf-basin gradient of particles in the Chukchi Sea and Canada Basin, western Arctic. J. Geophys. Res. Oceans, 120, doi:10.1002/2015JC010794. 6
- Yamaguchi, H., Nakano, Y., 2016. Research on navigation support system and optimum route search for the Northern Sea Route, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31 June 3, 8p. 7
- Yamaguchi, H., 2013. Sea ice prediction and construction of an ice navigation support system for the Arctic sea route. Proc. 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland, 8p. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756. ⑦
- Yamaguchi, S., Motoyoshi, H., <u>Tanikawa, T., Aoki, T.</u>, Niwano, M., <u>Takeuchi, Y.</u>, Endo, Y., 2014. Application of snow specific surface area measurement using an optical method based on near-infrared reflectance around 900-nm wavelength to wet snow zones in Japan. Bulletin of Glaciological Research, 32, 55-64. doi: 10.5331/bgr.32.55. ④
- Yamaguchi, S., Matoba, S., Yamasaki, T., Tsushima, A., Niwano, M., Tanikawa, T., Aoki, T., 2014. Glaciological observations in 2012 and 2013 at SIGMA-A site, Northwest Greenland, Bulletin of Glaciological Research, 32, 95-105. doi: 10.5331/bgr.32.95.
- Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., 2013. Ocean acidification in the three oceans surrounding northern North America. J. Geophys. Res., 118, 1-11. doi:10.1002/2013JC009157. 6
- Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., 2011. Effects of ocean acidification, warming and melting of sea ice on aragonite saturation of the Canada Basin surface water. Geophys. Res. Lett., 38, L03601. doi:10.1029/2010GL045501. 6
- Yamamoto, T., Kokubun, N., Kikuchi, D.M., Sato, N., <u>Takahashi, A.</u>, Will, A., Kitaysky, A.S., <u>Watanuki, Y.,</u> 2016. Differential responses of seabirds to inter-annual environmental change in the continental shelf and oceanic habitats of southeastern Bering Sea. Biogeosciences, 13, 2405-2414. doi:10.5194/bg-13-2405-2016, 2016. ⁽⁶⁾
- Yamamoto, T., Hoshina, K., Nishizawa, B., Meathrel, C.E., Phillips, R.A., <u>Watanuki, Y.</u>, 2014. Annual and seasonal movements of migrating short-tailed shearwaters reflect environmental variation in sub-Arctic and Arctic waters. Mar. Biol., 162, 413-424. doi:10.1007/s00227-014-2589-1. ⁽⁶⁾
- Yamashita, Y., <u>Akiyoshi, H.</u>, Shepherd, T.G., Takahashi, M., 2015. The combined influences of westerly phase of the Quasi-Biennial Oscillation and 11-year solar maximum conditions on the Northern Hemisphere extratropical winter circulation, J. Meteorol. Soc. Japan, 93 (6), 613-628. ①
- Yamazaki, T., Kato, T., Ito, T., Nakai, T., Matsumoto, K., Miki, N., Park, H., Ohta, T., 2013. A Common Stomatal Parameter Set to Simulate the Energy and Water Balance over Boreal and Temperate Forests. J. Meteor. Soc. Japan, 91, 273-285. doi: 10.2151/jmsj.2013-303. ⁽²⁾
- Yamaguchi, S., Iwamoto, K., Nakai, S., 2013. Interannual fluctuations of the relationship between winter precipitation and air temperature in the heavy-snowfall zone of Japan. Annal. Glaciol., 54, 183-188. doi:10.3189/2013AoG62A302. ③

- Yang, W., Kobayashi, H., Suzuki, R., Nasahara, K.N., 2014. A simple method for retrieving understory NDVI in sparse needleleaf forests in Alaska using MODIS BRDF data. Remote Sens., 6, 11936-11955. doi: 10.3390/rs61211936. ①②
- Yasunaka, S., Murata, A., <u>Watanabe, E.</u>, Chierici, M., Fransson, A., van Heuven, S., Hoppema, M., <u>Ishii, M.</u>, Johannessen, T., <u>Kosugi, N.</u>, Lauvset, S. K., Mzthis, J. T., <u>Nishino, S.</u>, Omar, A. M., Olsen, A., <u>Sasano, D.</u>, Takahashi, T., Wanninkhof, R., 2016. Mapping of the air-sea CO2 flux in the Arctic Ocean and its adajacent seas: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability. Polar Science, 10, 323-334, in press. ⁽⁵⁾
- Yiou, P., Servonnat, J., Yoshimori, M., Swingedouw, D., Khodri, M., Abe-Ouchi, A., 2012. Stability of weather regimes during the last millennium from climate simulations. Geophys. Res. Lett., 39, L08703. ①
- Yokoi, N., <u>Matsuno, K.</u>, Ichinomiya, M., <u>Yamaguchi, A.</u>, <u>Nishino, S.</u>, Onodera, J., Inoue, J., <u>Kikuchi, T.</u>, 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. ⁽⁶⁾
- Yoon, S., <u>Watanabe, E., Ueno, H.</u>, Kishi, M.J., 2015. Potential habitat for chum salmon (Oncorhynchus keta) in the Western Arctic based on a bioenergetics model coupled with a three-dimensional lower trophic ecosystem model. Prog. Oceanography, 131, 146-158. doi: 10.1016/j.pocean.2014.12.009. 6
- Yoshikawa-Inoue, H., Zhu, C., 2013. Ecosystem respiration derived from ²²²Rn measurements on Rishiri Island, Japan. Biogeochemistry 115, 185-194⁽⁵⁾
- <u>Yoshimura, K.</u>, 2015. Stable water isotopes in climatology, meteorology, and hydrology: A review. J. Meteor. Soc. Japan, 93. doi:10.2151/jmsj.2015-036. ①

芳村 圭, 三好建正, 金光正郎, 2013. アンサンブルカルマンフィルタを用いた水同位体比データ同化に向けた理想化実験. 水工学論文集, 57. ①

Yoshimori, M., Watanabe, M., Abe-Ouchi, A., Shiogama, H., Ogura, T., 2014a. Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM. Clim. Dyn., 42 (5-6), 1613-1630.

- Yoshimori, M., Abe-Ouchi, A., Watanabe, M., Oka, A., Ogura, T., 2014b. Robust seasonality of Arctic warming processes in two different versions of the MIROC GCM. J.Climate, 27 (16), 6358-6375.
- Yoshimori, M., Abe-Ouchi, A., 2012. Sources of spread in multimodel projections of the Greenland ice-sheet surface mass balance. Journal of Climate, 25, 1157-1175. ①
- <u>吉森正和</u>, 横畠徳太, 小<u>倉知夫</u>, 大<u>石龍太</u>, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田 暁, 千喜良 稔, 竹村俊彦, 佐<u>藤正樹</u>, <u>阿部彩子</u>, <u>渡部</u> <u>雅浩</u>, 木本昌秀, 2012. 気候感度 Part 1: 気候フィードバックの概念と理解の現状. 天気, 59, 5-22. ①
- <u>吉森正和</u>, 横畠徳太, <u>小倉知夫</u>, 大石<u>龍太</u>, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田 暁, 千喜良 稔, 竹村俊彦, <u>佐藤正樹</u>, <u>阿部彩子</u>, <u>渡部</u> 雅浩, 木本昌秀, 2012. 気候感度 Part 2: 不確実性の低減への努力. 天気, 59, 91-109. ①
- Yoshizawa, E., Shimada, K., Ha, H.K., Kim, T.W., Kang, S.H., Chung, K.H., 2015. Delayed responses of the oceanic Beaufort Gyre to winds and sea ice motions: influences on variations of sea ice cover in the Pacific sector of the Arctic Ocean. J. Oceanogr., 71, 187-197. doi: 10.1007/s10872-015-0276-6. 7
- Yuan, W., Liu, S., Dong, W., Liang, S., Zhao, S., Chen, J., Xu, W., Li, X., Barr, A., Black, T.A., Yan, W., Goulden, M.L., Kulmala, L., Lindroth, A., Margolis, H.A., <u>Matsuura, Y.</u>, Moors, E., van der Molen, M., <u>Ohta, T.</u>, Pilegaard, K., Varlagin, A., Vesala, T., 2014. Differentiating moss from higher plants is critical in studying the carbon cycle of the boreal Biome. Nat. Commun., 5, 4270. doi: 10.1038/ncomms5270.
 2
- Zhang, Y., Enomoto, H., Ohata, T., Kitabata, H., Kadota, T., Hirabayashi, Y., 2016a. Future projection of glacier mass balance in the Altai Mountains for the RCP climate scenarios. Climate Dynamics. doi: 10.1007/s00382-016-3006-x. ④
- Zhang,Y., Enomoto, H., Ohata, T., Kadota, T., Shirakawa, T., Takeuchi, N., 2016b. Surface mass balance on Glacier No.31 in the Suntar-Khayata Range, eastern Siberia, from 1951 to 2014. Journal of Mountain Science, accepted. ④
- Zhu, C., Yoshikawa-Inoue, H., Tohjima, Y., Irino, T., 2015. Temporal variations in black carbon recorded on Rishiri Island, northern Japan. Geochem. J., 49. doi:10.2343/geochemi.2.0356, in press. ⑤

2. 投稿中論文(查読有、submitted)

- Alimasi N., Enomoto, H., Hinzman, L., Cherry, J., Iwahana, G., <u>Kameda, T., Tateyama, K.</u>, Hoshino, S., <u>Sugiura, K., Hori, M., Yabuki, H.,</u> <u>Sugimura, T., Terui, T.</u>, 2016. Winter-spring transition of cryosphere observed by the microwave radiometer over Alaska. Cold Regions Science and Technology, submitted. ④
- Crasemann, B., Handorf, D., Jaiser, R., Dethloff, K., <u>Nakamura, T., Ukita, J., Yamazaki, K.,</u> 2016. Can preferred atmospheric circulation patterns on the Northern Hemisphere be associated with Arctic sea ice loss?, submitted to Env. Res. Lett., ③
- Konno, A., 2016. Toward the risk assessment of ship navigation in Arctic Sea Route under decreasing ice condition, "Safe and Sustainable Shipping in a Changing Arctic Environment" (ShipArc 2015), 8p, in review. 7
- Furuichi, M., <u>Otsuka, N.</u>, 2016. Container Quick Delivery Scenario between East Asia and Northwest Europe by the NSR/SCR-combined Shipping in the Age of Mega-ships, IAME, Maritime Economics & Logistics, in review. ⑦
- Hori, M., Sugiura, K. Kobayashi, K., Aoki, T., Tanikawa, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Enomoto, H., 2016. 37-year long (1979-2015) Northern Hemisphere snow cover extent product in 5-km spatial resolution derived with consistent objective criteria from AVHRR and MODIS radiances. Remote Sensing of Environment, submitted.
- Hoshi, K., <u>Ukita, J., Honda, M., Iwamoto, K., Nakamura, T., Yamazaki, K.,</u> Dethloff, K., Jaiser, R., Handorf, D., 2016. Characterizing the upward propagation of planetary waves associated with recent Arctic sea-ice loss, submitted to Geophys Res. Letters. ③
- Mudunkotuwa, D.Y., De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2016. Improving numerical sea ice predictions in the Arctic Ocean by data assimilation using satellite sea ice observations. Polar Research, in review. 7
- Nakamura, T., Yamazaki, K., Honda, M., Ukita, J., Jaiser, R., Handorf, D., Dethloff, K., 2016. On the atmospheric response experiment to a Blue Arctic Ocean, submitted to Geophys Res. Letters. ③
- Tanaka, K., Takesue, N., <u>Nishioka, J., Kondo, Y., Ooki, A., Kuma, K., Hirawake, T., Yamashita, Y.,</u> 2015. The conservative behavior of dissolved organic matter in surface waters of the southern Chukchi Sea, western Arctic Ocean, during early summer. Geophys. Res. Lett., submitted. (6)
- <u>塚川佳美, 東久美子, 近藤 豊, 杉浦幸之助</u>, 大畑 祥, 森 樹大, 茂木信宏, <u>小池 真</u>, 平林幹啓, Remi Dallmayr, <u>榎本浩之</u>, 2016.アラスカ積雪中のブ ラックカーボンの緯度分布. 雪氷, submitted. ④

3. 著書

- Deal, C. J., Steiner, N., Christian, J., Kinney, J. C., Denman, K. L., Elliott, S. M., Gibson, G., Jin, M., Lavoie, D., Lee, S. H., Maslowski, W., Wang, J., <u>Watanabe, E.</u>, 2014. Progress and Challenges in Biogeochemical Modeling of the Pacific Arctic Region, in: Grebmeier, J. M., Maslowski, W. (Eds.), "The Pacific Arctic Region, Ecosystem status and trends in a rapidly changing environment". Springer, Dordrecht Heidelberg New York London, pp.133-165. doi:10.1007/978-94-017-8863-2. 6
- 檜山哲哉, 2015. 第1章気候・凍土と水環境.『シベリア 温暖化する極北の水環境と社会』, 京都大学学術出版会, 3-29. ②
- 檜山哲哉, 2014. 第5章河川流出変動. 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動, 気象研究ノート, 第230号, 50・62.2
- 飯島慈裕, 佐藤友徳, 2014. 第1章最近 20 年間の寒冷圏陸域研究の進捗. 気象研究ノート, 第230 号, 1-11. ③
- 飯島慈裕,佐藤友徳編, 2014 年. 第4章北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動. 気象研究ノート, 第230号, 219. ②
- 飯島慈裕, 佐藤友徳, 2014. 第 16 章寒冷圏陸域研究の将来像. 気象研究ノート, 第 230 号, 212-216. ③
- ______ 石川 守, 2014. 第9章気候変動と永久凍土-全球規模での永久凍土観測網による知見-, 気象研究ノート,230号,114·130.2
- 岩崎俊樹,河宮未知生,<u>本田明治</u>,伊藤彰彦,立入郁,杉山昌広,2014. 第8章 温暖化で起こる地球表層の変化.『地球温暖化-そのメカニズムと不確 実性』,朝倉書店,97-117.③
- 松浦陽次郎, 2014. 第 10 章 植生(森林生態・土壌). 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動, 気象研究ノート. 第 230 号, 135-146. ②
- 三寺史夫、<u>中村 哲</u>、田口文明、<u>浮田甚郎</u>、星 一平、オホーツク海・北極域における大気海洋相互作用、気象研究ノート、22*、第8章、日本気象 学会、2016 刊行予定.③
- <u>岡本 創</u>, 2014. 衛星搭載アクティブセンサによる雲研究の現状と今後の展開. 雲とエアロゾルをつなぐ観測とモデリング, 『低温科学 Low Temperature Science』, 72, 231-239. ISSN 1880-7593. ③
- <u>斉藤和之, 宮崎 真</u>, 羽島知洋, 末吉哲雄, 2014a. 第15章 陸域モデル相互比較とモデルー観測連携. 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動, 気象研究 ノート, 230 号, 196・211. ②
- Sekiguchi, K., Jefferson, T. A., Iwahara, Y., Yoshioka, M., Mori, K., Ford, J. K. B., <u>Mitani, Y.</u>, Gorter, U, 2014. "An Infrequently-Occurring Anomalous Color Pattern on Pacific White-Sided Dolphins, *Lagenorhynchus obliquidens*" in: Joshua B. Samuels (Ed), "Dolphins: Ecology, Behavior and Conservation Strategies". Nova Science Publishers, Inc. 183-199. (6)
- <u>島田浩二</u>, 2011. 第4章北極海の海洋物理学. 北極の気象と海氷, 気象研究ノート, 第222号, 53-70. ⑦
- <u>島田浩二</u>, 2011. 第8章北極海の海洋変動と海氷変動. 北極の気象と海氷, 気象研究ノート, 第222号, 107-115. ⑦
- <u>島田浩二,2016.</u> 「5.2 北極海海氷からみた気候変動」. 『気候変動の事典』,朝倉書店,(2016年刊行予定)⑦
- 杉本敦子, 2015. 第2章シベリアの植生.『シベリア 温暖化する極北の水環境と社会』, 京都大学学術出版会, 31-48. ②
- <u>杉浦幸之助, 堀雅裕, 2014</u>. 近年の広域積雪面積の変動. 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動, 気象研究ノート, 第 230 号, 172-181.④
- 杉山 慎, 2015. I「低温科学便覧」I部6章氷河, 丸善出版, 95-107. ④
- <u>参木力英</u>, 2014. 第11章 植生変動の衛星リモートセンシングによる研究. 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動, 気象研究ノート, 第230号, 147-158. ②
- 鈴木力英,2014. リモートセンシングによってわかる陸上植生. 地球環境変動の生態学, 『現代の生態学』, 共立出版,41-60. ②
- 鈴木力英, 加藤知道, 2014. 陸域生態系研究における現地観測. 地球環境変動の生態学, 『現代の生態学』, 共立出版, 20-40. ②
- <u>高田久美子</u>, 2014. 植生と土壌. 『地球温暖化の事典』,丸善, pp.136-141. ①
- <u>舘山一孝</u>, 2015, PartII-6 海洋観測船の生活と調査研究の日々:海を見て、データを集める.『フィールドの見方 FENICS 100 万人のフィールドワ ーカーシリーズ 2』,古今書院, 214p. ⑦
- <u>浮田甚郎</u>, 本田明治, 2013. 第11章 ENSO-NAO のリンクについて. ENSO 研究の現在, 気象研究ノート, 第228号, 151-165. ③
- Williams, W. J., Shroyer, E., Kinney, J. C., <u>Itoh, M.</u>, Maslowski, W., 2014. Shelf-break exchange in the Bering, Chukchi and Beaufort Seas, in: Grebmeier, J. M., Maslowski, W. (Eds.), "The Pacific Arctic Region, Ecosystem status and trends in a rapidly changing environment". Springer, Dordrecht Heidelberg New York London, pp.133-165. doi:10.1007/978-94-017-8863-2. (6)
- Yamaguchi, H., et. al., 2015. Northern Sea Route Handbook, The Japan Association of Marine Safety, 2015, 223p. 7
- 山口 一、島田浩二, 2016. 『北極海航路ハンドブック 実務編(上巻)』,日本海難防止協会, 254p. ⑦
- 山口 一、島田浩二, 2015. 『北極海航路ハンドブック』, 日本海難防止協会, 124p. ⑦
- 山口 一, 2015. 北極海の航路利用と氷海航行支援システムについて. 『第 90 回船長教養講座』,日本船長協会, 86 p. ⑦
- <u>山口</u>,<u>木村詞明</u>,2012.5.1 節「氷海とその利用」.シリーズ<環境の世界>『海洋技術環境学の創る世界』,朝倉書店,122-132. ISBN978-4-254-18534-8.⑦
- Zhegusov, Y. I., Ksenofontov, S.M., Maximov, T.C., <u>Sugimoto, A.</u>, Iwahana, G., Dincer, I. et al. (eds.), 2013. Environmental Consciousness of Local People of Yakutia Under Global Climate Change. Causes, Impacts and Solutions to Global Warming, 251-260. doi: 10.1007/978-1-4614-7588-0_16. ②

4. 誌上発表(査読無し論文、一般雑誌記事、等)

- Abe, M., Nozawa, T., Ogura, T., Takata, K., 2015. Effect of retreating sea ice on Arctic cloud cover in simulated recent global warming, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 15, 17527-17552. doi:10.5194/acpd-15-17527-2015. ①
- <u>甘糟和男, 喜多村稔, 西野茂人, 菊地 隆</u>, 2013. チャクチ海南部における体積後方散乱強度の時系列変化. 海洋音響学会 2013 年度研究発表会講演 論文集, 69-72. ⑥
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2016. Influence of topographic interaction and numerical diffusion on the Arctic Ocean freshwater modeling. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 246-248.
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2015c. Study of mesoscale ocean eddies and its interaction with sea ice in the marginal ice zone using high-resolution ice-ocean coupled model. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 127-130. 7
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., Ono, J., 2014. A high-resolution hindcast study for the Northern Sea Route. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 177-180. 7
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., Ono, J., 2013. Preliminary results of sea ice prediction in northern sea route using high-resolution ice ocean coupled model. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 127-130. 7
- 榎本浩之, 金尾政紀, 杉山 慎, 齋藤冬樹, 坪井誠司, 永塚尚子, 2015. 温暖化とグリーンランド氷床・周縁氷河. 月刊地球, 37 (2), 3・8. ④
- <u>榎本浩之</u>, <u>Alimasi, N.</u>, <u>照井健志</u>, <u>杉村</u> 剛, <u>矢吹裕伯</u>, 2014. GRENE 北極気候変動研究事業の戦略研究目標と衛星観測への期待, 計測と制御. ADS

<u>榎本浩之</u>, <u>Nuerasimuguli ALIMASI</u>, 柴田啓貴, 田中康弘, <u>舘山一孝</u>, 高橋修平, 2012. 北極海氷変動の季節性と変調および環北極域の環境への影響. 環境科学会誌, 25 (6), 469-476. ④

Hasumi, H., 2014. A review on ocean resolution dependence of climate biases in AOGCMs. CLIVAR Exchanges, 65, 7-9. 7

Hinzman L.D., Ohata T., Polyakov I.V., Suzuki R., Walsh, J.E., 2013. JAMSTEC-IARC international collaboration enhancing understanding of the Arctic climate system. Polar Science, 7, 49-52. ⁽²⁾

平沢尚彦 他, 2012. 2011 年秋季極域・寒冷域研究連絡会の報告「北極温暖化の理解に向けて」. 天気, 63-66. ④

<u>平沢尚彦</u>他, 2012. 2012 年春季極域・寒冷域研究連絡会の報告「厳冬をもたらす大 気循環-2011/2012 の冬季をふりかえる-」. 天気, 852-854. ④ Hoshino S., <u>Tateyama, K.</u>, Ushio, S., <u>Tamura, T.</u>, 2016. Development and Verification of sea-ice thickness algorithm by AMSR2 data in the

Antarctic. The proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 109-112.

星野聖太, <u>舘山一孝</u>, 牛尾収輝, <u>田村岳史</u>, 2014. 南極リュッツォ・ホルム湾における 2013·2014 年の観測報告. 北海道の雪氷, 33, 65-68. ⑦ 星野聖太, <u>舘山一孝</u>, 牛尾収輝, <u>田村岳史</u>, 2013. 衛星および現場データを用いた南極昭和基地周辺の海氷厚モニタリング.北海道の雪氷, 32, 134-137. ⑦

Ishiyama, T., <u>Takagi, T.</u>, 2014. Growth Modes of Frost Flower and Comparison to Snow Crystal. Proceedings of the 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 146-149. ⑦

Ishiyama, T., <u>Takagi, T.</u>, Chisaka, M., 2013. Three-dimensional Pattern formation and growth mode of frost flower. Proceedings of the 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 87-90. 7

Ishiyama, T., <u>Takagi, T.</u>, 2012. Computer Simulation in Pattern Formation of Forest Flower at Coastal Area.Proceedings of the 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 14-17. 7

Ito, M., Ohshima, K.I., Fukamachi, F., Simizu, D., Iwamoto, K., Matsumura, Y., Mahoney, A.R., Eicken, H., 2014. A study of formation processes of supercooled water and frazil ice in a coastal polynya. Proceedings of the 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 138-141. 7

Jin, H., <u>Kimura, N., Yamaguchi, H.</u>, 2012. A melt process of coastal sea ice in the Arctic Ocean using satellite images. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 19-24, 40-42. 7

漢那直也, 西岡純, 村山愛子, 豊田威信, 2012. 南部オホーツク海域の海氷に含まれる栄養塩と鉄の定量評価.月刊海洋, 44, 9, 517-522. ⑥

- Kasai, H., Katakura, S., Hamaoka, S., <u>Tateyama, K.,</u> Murai, K., Nagata, R., 2016. Influences of change of sea-ice distribution on oceanographic environment in the coastal water around Mombetsu- 2: Results from the monitoring survey at Okhotsk Tower. The proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 189-191. 7
- Kasai, H., <u>Tateyama, K.</u>, Katakura,S., Nagata, R., Hamaoka, S., 2015. Influences of temporal change of sea-ice distribution on oceanographic environments in the coastal, region around Mombetsu, the southwestern Okhotsk Sea. The proceedings of the 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 28-30. 7
- Kayano, M., <u>Kimura, N.</u>, Nakano, Y., <u>Yamaguchi, H.</u>, 2014. Effect of sea ice on spatial and temporal variation of spring bloom in the Sea of Okhotsk. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 127-130. 7

Kim, H., <u>Sawamura, J.</u>, 2016. Simplified Random Ice Force Modeling for Ice-going Ships Navigating in Pack Ice based on Collision Test between Model Ship and Synthetic Ice, Proceeding of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 155-158.

Kim, H., <u>Sawamura, J.</u>, 2015. A Study on the Collision Response between Icebreaker and Ice Floe based on the Model Test using Synthetic Ice, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 21, 401-414. ⑦

Kimura, N., Yamaguchi, H., 2016. Medium-term forecast of the Arctic sea-ice, Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 186-187. 7

Kimura, N., Mori, T., Yamaguchi, H., 2015. Medium-range prediction of the Arctic sea ice area by considering processes controlling the ice-thickness change. Proc.30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 131-132. 7

Kimura, N., Nakano, Y., Yamaguchi, H., 2014. Factors controlling the summer sea-ice cover in the Arctic: a way to improve the accuracy of medium-range forecast of summer ice area. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 2014, 181-182. 7

Kimura, N., Nishimura, N. Yamaguchi, H., 2014. Medium-range forecast of summer sea-ice extent in the Arctic using satellite data.Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 19-24, pp.101-102. 7

Kimura, N., Nakano, Y., Nishimura, A., Yamaguchi, H., 2013. Medium-range forecast of summer sea-ice extent in the Arctic. Proc. 28th

International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 131-132. <u>Kimura, N.</u>, 2013. A factor controlling the summer sea-ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 190-191. (The summer sea-ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 190-191. (The summer sea-ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 190-191. (The summer sea-ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 190-191. (The summer sea-ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 190-191. (The summer sea-ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 190-191. (The summer sea-ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 190-191. (The summer sea Ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice cover in the Arctic. Proc. 28th

金野祥久,宇都正太郎, 2015. 氷工学分野における水槽試験及びシミュレーション技術の動向,第25回海洋工学シンポジウム論文集、日本船舶海 洋工学会/日本海洋工学会, 491-494. ⑦

<u>金野祥久</u>, 黒田翔也, 2015. 船舶の brash ice channel 航行時抵抗評価方法の開発と課題, 第25回海洋工学シンポジウム論文集、日本船舶海洋工学 会/日本海洋工学会, 583-587. ⑦

<u>人万健志</u>,中山雄太,藤田聡志,西村将太郎,石川聡子,小俣 紋,<u>島田浩二</u>,2012. 北東部ベーリング海大陸棚域及び西部北極海における鉄の挙動と その起源.月刊海洋,44,531-540.⑦

- 丸山篤志, <u>宮崎</u>真, 小谷亜由美, 栗林正俊, 斉藤 琢, 小野圭介, 2014. International Joint Conference of 11th AsiaFlux Inter- national Workshop, 3rd HESSS and 14th Annual Meet-ing of KSAFM "Communicating Science to Society: Coping with Climate Extremes for Resilient Ecological-Societal Systems"の報告. 生物と気象(Clim. Bios.), 14:D1-7. ②
- 丸山未妃呂, <u>津滝 俊</u>, 榊原大貴, <u>澤柿教伸</u>, <u>杉山 慎</u>, 2014. グリーンランド北西部カナック氷帽における 質量収支・流動速度・表面高度変化の観測. 北海道の雪氷, 33, 81–84. ④

松浦陽次郎, 2014. フィンランドとエストニアの北方林:永久凍土が無い場所の話. 『海外の森林と林業』, 91, 31-35. ②

松浦陽次郎, 2012. 北方林を再認識する:永久凍土の上にも森林がある. 『海外の森林と林業』, 85, 27-31. ②

Mori, T., <u>Kimura, N., Yamaguchi, H.</u>, 2015. Development of a method for medium-term prediction of the Arctic sea ice thickness. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 133-135. ⑦ 森下裕士, <u>舘山一孝</u>, <u>大塚夏彦</u>, 2015. 北極海航路の氷況と可航性に関する研究. 北海道の雪氷, 34, 43-46. ⑦

- Mudunkotuwa, D.Y., Yamaguchi, H., 2016. Data assimilation in an ice-ocean coupled model to improve sea ice predictions in the Arctic Ocean. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 235-238. 7
- Mudunkotuwa, D.Y., <u>De Silva, L.W.A</u>, <u>Yamaguchi, H.</u>, 2015. Parametric study of assimilating sea ice concentration in a coupled ice-ocean model using nudgng. Proc.30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 64-67. 7
- Nagakawa, K., <u>Otsuka, N.</u>, Sato, S., Yamaguchi, T., Miyata, K., Tsuzuki, T., Nakamura, T., Fukuuma, T., 2015. Shipping cost analysis of northern sea route; iron ore and PCC. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 163-166. 7
- Nagakawa, N., <u>Yamaguchi, H.</u>, <u>Ono, J.</u>, 2014. Numerical study on a self-melting system of sea ice through eddy formation. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 131-134. ⑦ 永塚尚子, 竹内 望, 植竹 淳, 2015. グリーンランド氷床の生物学的研究. 月刊地球, 426, 72-82. ④
- Nakano, Y., <u>Otsuka, N.</u>, Sumida, T., Mori, T., Koenuma, T., Shiotsubo, K., Uda, R., Maeoka, K., 2014. Ice concentration and navigability of the Northern Sea Route. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 213-217. ⁽⁷⁾
- Nakano, Y., <u>Yamaguchi, H., Kimura, N.</u>, 2013. Sea ice production and reduction in the Sea of Okhotsk.Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 220-222. 7
- <u>西岡純</u>, 2012. 海氷がオホーツク海の物質循環と生物生産に及ぼす影響-凍る海の豊かな生態系を支える機構の解明を目指して-. 月刊海洋, Vol.44, 9, 368-374. ⑥
- Nishimura, A., Yamaguchi, H., Kimura, N., 2012. Prediction of summer sea-ice extent in the Arctic based on the analysis of the winter ice motion. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 19-24, 36-39. 7
- Nishizawa, B., <u>Matsuno, K.</u>, Labunski, E., Kuletz, K., <u>Yamaguchi, A.</u>, <u>Watanuki, Y.</u>, 2015. Seasonal distribution of short-tailed shearwaters and their prey in the Bering and Chukchi Seas. Biogeosciences Discuss., 17721-17750, doi:10.5194/bgd-12-17721-2015. (6)
- Noda, T., Kimura, N., Fujiyoshi, Y., Yamaguchi, H., 2012. Prediction of the Okhotsk sea ice by high-resolution model. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 19-24, 2012, pp.7-9. 🗇
- 小倉知夫, 2013. 入門講座地球温暖化-第2講 気候モデルによる地球温暖化のシミュレーション-. 大気環境学会誌, 48, A11-A18. ①
- 大貫 伸, 山口 一, 2015. 北極海航路の安全航行のための運航実務書の作成, 第25回海洋工学シンポジウム論文集, 日本船舶海洋工学会/日本海洋 工学会, 115-118. ⑦
- 太田岳史,小谷亜由美,2014. 東シベリアにおける水・炭素循環に関する研究. 『海外の森林と林業』,89号,38-44.2
- <u>太田岳史</u>,小谷亜由美,2014. 東シベリア・カラマツ林における水・エネルギー・炭素循環:フラックスから流域,そしてモデル. 『水利科学』,340, 43-73. ②
- Ono, J., De Silva, L.W.A, Yamaguchi, H., 2014. Modeling study of sea ice for the Northern Sea Route: toward the short-term prediction. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 175-176. ⑦
- Ono, J., Tateyama, K., De Silva, L.W.A, Yamaguchi, H., 2013. Observation and modeling of sea ice in the Arctic Ocean: toward the short-term forecast for the Arctic sea route. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 125-126. 7
- Otsuka, N., Imai, K., Nagakawa, K., Furuichi, M., 2016a. Northern Sea Route transport scenarios for various cargoes. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 53-56. 7
- Otsuka, N., Izumiyama, K., Nagakawa, K., Imai, K. 2016b. Feasibility of LNG transport via the NSR by icebreaking LNG carrier. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 151-154. 🗇
- <u>Otsuka, N.</u>, Nagakawa, K., Ito, R., Iwasaki, K., Nakashio, Y., Araoka, K., Odagiri, T., Saito,, K., 2015. Shipping cost analysis of northern sea route; LNG and Naphtha. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 159-162. 7
- Otsuka, N., Morishita, H., <u>Tateyama, K.</u>, Izumiyama, K., 2015. Study on Navigability and Ice Condition of the Northern Sea Route from the 2014 Sailing Record. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea &Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 171-173. 7
- Otsuka, N., Nakano, Y., Adachi, Y., Iki, S., Kamiko, Y., Kaewngern, S., Hoshi, M., Yamashita, K., 2014. Cost analysis of Northern Sea Route shipping. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 218-222. 7
- Otsuka, N., Izumiyama, K., Furuichi, M. Kobayashi, W., 2013. Study on Feasibility of Northern Sea Route Shipping. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2014.2, Mombetsu, Japan. 7
- <u>Otsuka, N.,</u> Izumiyama, K., Shibata, H., Furuichi, M., 2012. Feasibility of Northern Sea Route based on the recent voyage. Proc. 27th International symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, Mombetsu, Japan. ⑦
- 大塚夏彦,田村 亨,古市正彦,2015. 北極海航路及び競合ルートによるLNG海上輸送路の経済的フィージビリティーの分析.第49回土木計画学研究 発表会,北九州.⑦
- <u>大塚夏彦</u>, 2015. 北極海航路の現状と将来. 科研費基盤 B: 「アジア・ヨーロッパ大陸間のマルチモード国際物流シミュレーションモデル構築と政策 分析」公開ワンデーセミナー,東京大学.⑦
- 大塚夏彦, 永川圭介, 森下裕士, 2015. 北極海航路の近年の航行動向と展望, 第25回海洋工学シンポジウム論文集, 日本船舶海洋工学会/日本海洋工 学会, 220-226. ⑦
- 大塚夏彦, 永川圭介, 森下裕士, 2015. 北極海航路の近年の航行動向と展望. 第25回海洋工学シンポジウム, 東京.⑥
- 大橋良彦, 飯田高大, 杉山 慎, 2014. グリーンランド氷床沿岸の海洋環境変動. 北海道の雪氷, 33, 85-88. ④
- 大塚夏彦, 泉山 耕, 古市正彦, 2011. 定期航路としての北極海航路NSRの可能性に関する考察. 第27回寒地技術シンポジウム論文・報告集,札幌. ⑦
- <u>尾関俊浩</u>, 八代裕平, <u>安達 聖</u>, 2015. SPC 型しぶき計と船舶用雨量計型しぶき計による飛沫量の比較計測, 寒地技術論文・報告集, 31, 134-139. ⑦
- Polyakov, I.V., Bolton, R., <u>Greve, R.</u>, Hutchings, J., Kim, S.J., Kim, Y., Lee, S.H., <u>Ohata, T., Saito, F., Sugimoto, A.</u>, <u>Suzuki, R.</u>, 2014. Promoting international, multidisciplinary efforts in detecting and understanding high-latitude changes, and searching for their global impacts. Polar Science, 8, 53-56. doi: 10.1016/j.polar.2014.03.002. ②
- Polyakov, I.V., Bolton, R., <u>Greve, R.</u>, Hutchings, J., Kim, S.J., Kim, Y., Lee, S.H., <u>Saito, F., Suzuki, R.</u> (eds.), 2014. Special Issue: The Third International Symposium on the Arctic Research (ISAR-3). Polar Science, 8, 53-216. ②

- Saiki, R., Mitsudera, M., Fujisaki-Manome, A., Toyota, T., <u>Kimura, N., Ukita, J., Nakamura, T.,</u> 2015. A mechanism of ice-band pattern formation due to resonant interaction between sea ice and internal waves. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 61-63. ⑦
- 斉藤 潤, <u>津滝 俊, 澤柿教伸, 杉山 慎,</u> 2014b. グリーンランド北西部における氷帽の表面高度変化. 北海道の雪氷, 33, 77-80. ④
- Sasaki, H., Matsuno, K., Fujiwara, A., Onuka, M., Yamaguch, A., Ueno, H., Watanuki, Y., Kikuchi, T., 2015. Distribution of Arctic and Pacific copepods and their habitat in the northern Bering Sea and Chukchi Sea. Biogeosciences Discuss., 12, 18661-18691,

doi:10.5194/bgd-12-18661-2015. 6

佐藤篤司, 大宮 哲, 對馬あかね, 2013. フィンランド積雪縦断観測 2013. 雪氷北信越, 33. ④

- Sawamura, J., 2016. Numerical simulation of local ice pressure distributions and structural response of ship hull for ship advancing in level ice, Proceeding of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, 175-178. 7
- 澤村淳司,金野祥久,木岡信治,2015. 砕氷片の沈み込み運動による船体氷荷重推定のための模擬氷を用いた2次元模型船実験.日本船舶海洋工学 会講演会論文集, Vol.20, 303-306. ⑦
- | 澤村淳司, 千賀英敬, 2015. 模擬氷を用いた模型船実験による砕氷船の流氷中での氷荷重の計測. 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 21, 395-399. ⑦
- Shiga, T., <u>Ozeki, T., Sawamura, J., Yamaguchi, H.</u>, 2015. Analysis of sea spray characteristics in large vessels Case study of the icebreaker Shirase. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 147-150. ⑦
- Shigihara, T., Konno, A., 2016. Risk Assessment Method for Collision of Ship with an Ice Floe, Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, 171-175. 7
- Shimada, K., Yoshizawa, E. 2016. Sea ice variation in a new state of the Arctic Ocean. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 1-4. 7
- Song, C., <u>Maksyutov, S., Belikov, D.</u>, Takagi, H., Shu, J., 2015. Simulating CO₂ profiles using NIES TM and comparison with HIAPER Pole-to-Pole Observations. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 6745-6770. doi:10.5194/acpd-15-6745-2015. (5)
- Sueyoshi, T., Saito, K., Miyazaki, S., Mori, J., Ise, T., Arakida, H., Suzuki, R., Sato, A., Iijima, Y., Yabuki, H., Ikawa, H., Ohta, T., Kotani, A., Hajima, T., Sato, H., Yamazaki, T., Sugimoto, A., 2015. The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIP) stage 1 forcing dataset. Earth Syst. Sci. Data Discuss., 8, 703-736. doi: 10.5194/essdd-8-703-2015. (2)
- Suga, K., Sawamura, J., Kim, H., 2016. Ice resistance test using synthetic ice for ship advancing into ice-covered water, Proceeding of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido , 163-166. 7
- <u>杉山 慎、津滝俊</u>, 榊原大貴, 斉藤 潤, 丸山未妃呂, <u>澤柿教伸</u>, 2015. グリーンランド北西部における氷帽およびカービング氷河の変動. 月刊地球, 37(2), 9–18. ④
- <u>杉山 慎</u>, <u>澤柿教伸</u>, <u>津滝 俊</u>, 榊原大貴,丸山未妃呂, 2014. グリーンランド北西部における氷床・氷帽・カービング氷河の変動. 北海道の雪氷, 33, 73-76.④
- Takagi, T., Tateyama. K., 2016, Ice navigation according to the ability of the icebreaker using ship radar images. Proceedings of the 31th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 179-181. 7
- <u>高木敏幸</u>, 2015. 船舶レーダを用いた航路選択アルゴリズムの開発. 巡視船「そうや」海氷観測速報, SIRAS-15, Cruise Report Volume 1, 71-72. ⑦ <u>Takagi, T.</u>, <u>Tateyama, K.</u>, <u>Ono, J.</u>, 2015. Arctic sea route path planning based on the sea ice edge prediction. Proc. 30th International

Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 140-141. ⑦

- Takagi, T., Tateyama, K., Ishiyama, T., 2014. Obstacle Avoidance and Path Planning in Ice Sea using Probabilistic Roadmap Method. Proceedings of the 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 183-186. 7
- Takagi, T., Tateyama, K., Ishiyama, T., 2013. Pack Ice Routing with Ant Colony Optimization using Radar Images. Proceedings of the 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 133-136. 7
- Takagi, T., Tateyama, K., Ishiyama, T., 2012. Pack Ice Routing with Ant Colony Optimization using Radar Images. Proceedings of the 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 105-108. 7

竹内望,2013. 雪に宿る生命:雪氷藻類. 極地,96,3-9.④

- 竹内 望, 2012. 氷河の暗色化とクリオコナイト. 低温科学, 70, 165-172. ④
- Tanaka, Y., <u>Tateyama, K., Kameda, T., Enomoto, H.,</u> 2015. Estimation of melt pond fraction on Arctic sea ice using satellite microwave data. The proceedings of the 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 73-75. ⑦
- Tateyama, K., Tokudome, Y., Tanaka, Y., <u>Ono, J., Kimura, N., Takagi, T.</u>, 2016. Validation and improvement of estimated sea ice thickness from AMSR-E/AMSR2 in comparison with in-situ observations. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 68-71. 7
- Tateyama T., Tanaka, Y., Kimura, N., Ono, J., 2015. Validation the sea ice thickness estimated from the satellite passive radiometer by comparing with the in-situ thickness. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 136-139. 7
- Tateyama, K., Tanaka, Y., Nakano, Y., Sagawa, G., Ono, J., Takagi, T., 2014. Observation of sea ice condition along the Northwest Passage using the satellite passive microwave radiometer AMSR2. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido.
- Tateyama, K., Ono, J., Yamaguchi, H., Shibata, H., 2013. Observation of sea-ice condition in the North West Passage and the Canada Basin from JOIS2012 cruise -. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 123-124. 7
- <u>舘山一孝</u>, 星野聖太, 中村和樹, 山川紘一, 戸村嘉実, 森 裕太, 2013. 電磁誘導式氷厚計を用いた 2013 年サロマ湖の湖氷観測. 北海道の雪氷, 32, 138-141. ⑦
- <u>鄭 峻介</u>, 2013. 樹木年輪から東シベリアタイガ林の過去を探る. 『北海道立北方民族博物館友の会季刊誌 アークティック・サークル』, 6月号, 14-17. ②
- 内田雅己, 2013. 野外研究サイトから(25)スバールバル諸島・スピッツベルゲン島. ノルウェー,日本生態学会誌, 63, 369-374. ②
- Watanuki, Y., Suryan, R., Sasaki, H., <u>Yamamoto, T.</u>, Hazen, E., Renner, M., Santora, J.A., Sydeman, W., 2015. Spatial ecology of marine top predators in the North Pacific: Tool for integrating across datasets and identifying high use areas. Report of marine and mammal advisory panel PICES Scientific Report. (6)
- 山口 一, 2015.北極海の航路利用の現状と課題. 総合物流情報誌『海運(KAIUN)』, No.1049, 日本海運集会所, 20-22. ⑦
- 山口一, 大塚夏彦, 2015. 北極航路の利用動向. 北極環境研究コンソーシアムニュースレター, 1, 4-5. ⑦
- 山口一, 2015. 北極海の商業航路利用に向けて. 『PETROTEC』, Vol.38 No.3, 176-179. ⑦

<u>ШП</u>, 2015. Development and use of the Arctic Sea Route for shipping. The Mariners' Digest, 37, 18-20. 🕖

山口一, 2015. 北極海航路開拓への取り組み. 『エネルギーレビュー』, 12月号, 19-22. ⑦

山口一,2015. 北極航路航行支援システムの研究プロジェクトについて. 第25回海洋工学シンポジウム論文集,日本船舶海洋工学会/日本海洋工学会,128-132. ⑦

Yamaguchi, H., 2016. Research on navigation support system for the Arctic sea routes. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 45-48. ⑦

Yamaguchi, H., 2012. Sea ice prediction and construction of ice navigation support system for the Arctic sea route. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 2p. (additional). ⑦

<u>Yamanouchi, T.</u>, 2016. Rapid change of the Arctic Climate System and its global influences. Adjacent Government, Febuary 2016.192-193.PM <u>Yamanouchi, T., Enomoto, H.</u>, Fujii, Y., 2015. Recent Activities and Selected Outcomes of the GRENE Arctic Climate Change Research Project.

<u>Tamanouchi, T., Enomoto, H.</u>, Fujii, Y., 2015. Recent Activities and Selected Outcomes of the GRENE Arctic Climate Change Research P Proceedings of the 30th International Symosium on Okhotsk Sea and Sea Ice, Monbetsu, Japan, 55-58. PM

山内 恭, 2015. 北極温暖化増幅と社会影響. アークトス, 46, 12-15. PM

山内 赤, 2016. 極域気象研究の系譜と極域・寒冷域研究連絡会. 天気, 63 (3), 157-171. PM

Yamamoto-Kawai, M., Mifune, T., <u>Kikuchi, T., S. Nishino</u>, 2016. Prolonged aragonite undersaturation in bottom water of a biological hotspot in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. Biogeosciences Discuss., doi:10.5194/bg-2016-74. 6

<u>川合美千</u>代, 2012. 北極海における生物化学的変化. 月刊海洋, Vol.44, 9, 541-547. ⑥

Yamazaki, T., 2013. Long-term simulation of soil condition and energy flux in eastern Siberian taiga forests. Proceedings of 2nd International Conference on Global Warming and the Human-Nature Dimension in Siberia, 35-38. (2)

Yoshida, R., Sawada, M., <u>Yamazaki, T. Ohta, T., Hiyama, T.</u>, 2013. Estimation of regional water cycle changes by various land-cover-change scenarios in eastern Siberia. Proceedings of 2nd International Conference on Global Warming and the Human-Nature Dimension in Siberia, 86-89. ⁽²⁾

吉森正和, 2014. 北極温暖化増幅. 日本気象学会北海道支部機関誌, 細氷, 60号. ①

Yoshizawa, E, Shimada, K. 2016. Estimation of mechanical increases in Arctic sea ice thickness due to sea ice rafting using satellite-derived sea ice velocities. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 135-137. 7

Zamora, L.M., Kahn, R.A., Cubison, M.J., Diskin, G.S., Jimenez, J.L., <u>Kondo, Y.</u>, McFarquhar, G.M., Nenes, A., Thornhill, K.L., Wisthaler, A., Zelenyuk, A., Ziemba, L.D., 2015. Aircraft-measured indirect cloud effects from biomass burning smoke in the Arctic and subarctic. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 15, 22823-22887. doi:10.5194/acpd-15-22823-2015. ③

5. その他

・学会での招待講演

- Hasumi, H., April 7, 2014. Resolution dependence of climate biases, variability and sensitivity in comprehensive Earth System Models. WGOMD Workshop on High Resolution Ocean Climate Modelling. Kiel, Germany. 7
- Hasumi, H., December 4, 2014. Toward coordinated observational and modeling studies on the polar oceans. The 5th Symposium on Polar Science, Tachikawa, Japan. 7

木村詞明, 2014 年 11 月 1 日. GRENE 北極プロジェクトでの北極航路研究と海氷予報. 日本航海学会第 131 回講演会, 函館. ⑦

木村詞明, 2015 年 12 月 3 日. 衛星リモートセンシングと海氷観測~北極海航路の航行支援~. 電子情報通信学会東北支部学術講演会, 八戸. ⑦

北川弘光, 2015 年 8 月 6 日. 温暖化影響が進む北極圏の諸問題. 第 25 回海洋工学シンポジウム,日本大学駿河台キャンパス.⑦

小池 真, 2013年11月18日. 航空機観測による下層雲のエアロゾルー雲相互作用研究. 日本気象学会第40回メソ気象研究会, 仙台. ③

小池 真, 近藤 豊, 塩原匡貴, 東 久美子, 鷹野敏明, 岡本 創, 浮田甚郎, 2013 年 10 月 21 日. Aerosol and Cloud Observations in the Arctic.Japan-Norway Polar Science Seminar, トロムソ, ノルウェー.③

近藤能子,小畑元,大木淳之,山下洋平,西岡純,久万健志,2014年9月.北極海における過酸化水素の分布.2014年度日本地球化学会,富山大学.⑥ 金野祥久,2014年11月1日.氷海航行の研究動向と関連話題.日本航海学会第131回講演会,函館.⑦

Miyoshi, Y., Fujiwara, H., Jin, H., Shinagawa, H., 27 June. 2015. Impact of stratospheric sudden warming on the general circulation in the MLT region simulated by a whole atmosphere model. 26th IUGG General Assembly, Prague Czech Republic. ③

Nomura, D., Delille, B., Dieckmann, D.S., Granskog, M.A., Tison, J.L., Meiners, K.M, Fransson, A., <u>Ohshima, K.I., Tamura, T.</u>, August 21, 2015. Mid-winter surveys of sea ice biogeochemistry in polar oceans. Goldschmidt 2015, Prague, Czech Republic. ⑦

Ohshima, K.I., August 1, 2014. Global view of sea ice production and its linkage with dense/deep water formation. Distinguished Lecture in 11th Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society, Sapporo, Japan. 7

大島慶一郎, 2014 年 10 月 9 日. 海氷がつくる海洋大循環とその変動. 国立大学附置研究所・センター長会議第1部会シンポジウム「激変する地球環 境の現状と未来像」, 札幌. ⑦

大塚夏彦, 9 May 2015. IMPLICATIONS FOR GLOBAL TRADE AND DISTRIBUTION SYSTEM Workshop on the Climate Change Impact on Oceans and Fisheries Resources. ASIA-PACIFIC ECONOMIC COOPERATION PHILIPPINES 2015, Philippines. ⑦

大塚夏彦, Masahiko, F., 1 June 2015. Effects of the Arctic Sea Routes (NSR and NWP) Navigability on Port Industry (Part 2). IAPH 29th World Ports Conference, Hamburg, Germany. ⑦

大塚夏彦, 24 June 2015. Recent Activities and Feasibility of the NSR. 2015 Shanghai Seminar of North Pacific Arctic Research Community, Shanghai, China. ⑦

大塚夏彦,2015年7月1日.北極海航路利活用戦略〜試論:北極海航路の拠点を目指して.北極海航路活用戦略セミナーin 苫小牧,苫小牧市.⑦ 大塚夏彦,2015年7月3日.地球温暖化の hotspot 北極〜保全と利用.北極圏のフィールド情報学,はこだて未来大学,函館市.⑦

大塚夏彦, 2015 年 8 月 31 日. 2015 年シーズンの北極海航路の利用動向および最近の各国の動向. 第 2 回北極海航路活用戦略セミナー, 札幌市. ⑦

大塚夏彦, 2015年9月3日, Navigability, cost effectiveness and feasibility of the NSR, Russia's Arctic Energy Policies in a new Political Context.

Joint Finnish-Japanese research project "Russia's Final Energy Frontier – Sustainability Challenges of the Russian Far North", Academy of Finland and JSPS, 2014-2016., Helsinki. ⑦

大塚夏彦、2015 年 9 月 19 日. 北極海航路輸送の現状と各国の動向. 北海道フィンランド協会セミナー,札幌市. ⑦

- 大塚夏彦, 2015 年 10 月 17 日. Asian NSR Shipping and Trade: A Commercial Feasibility Assessment, Arctic Circle 2015. Breakout session 2 "Building Arctic Resilience Asia and the Northern Sea Route (NSR): Trade, Logistics and Actors, Iceland. ⑦
- 大塚夏彦, 2015 年 11 月 11 日. the Northern Sea Route Trade, Today and the Future. Hokkaido University–Finnish Universities Joint Symposium : University Rolls of Contribution for Arctic Region stainability, Maritime activities and Innovation in the Arctic, Sapporo.

大塚夏彦, 2015 年 11 月 26 日. NSR Navigation and Feasibility of Trade, Perspectives of Japan. The 4th Ulsan International Arctic Seminar, Ulsan, Korea. ⑦

大塚夏彦, 2015 年 12 月 1 日. Northern Sea Route, infrastructure needs, ports, communication, "Arctic maritime challenges". AsiArctic seminar in Busan organized by KMI and FNI, Korea. ⑦

野沢 徹, 2013. 温暖化シグナルの検出とその原因特定. 化学工学会, 岡山. ①

- <u>澤村淳司</u>, 3 June 2016. Ship-ice interaction in Arctic and Antarctic sea ice. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA. ⑦
- Shimada, K., May 9, 2015. Arctic, as the Most Affected Ocean; Sea Ice Decline. Workshop on the Climate Change's Impact on Oceans and Fisheries Resources (APEC PROJECT proposed by JAPAN), Boracay Island, Philippines. ⑦
- <u>島田浩二</u>,吉澤枝里,2016年2月22日.新しい北極海の状態における海氷変動.第31回北方圏国際シンポジウム「オホーツク海と流氷」,紋別.⑦ <u>島田浩二</u>,2015年11月7日.北極海の海氷分布変動をもたらす要因 ~北極海航路利用に向けて~.日本航海学会海上交通工学研究会,東京.⑦

<u>島田浩二</u>,吉澤枝里,2013年11月26日.北極海海氷の実態と気候変動に及ぼす影響.第59回気候影響・利用研究会,東京.⑦

- <u>島田浩二</u>, 2013 年 5 月 25 日.地球温暖化:沈黙を破った北極海.東京都市大学環境学部開設記念公開講演会/環境経営学会公開講演会,横浜.⑦ <u>島田浩二</u>, 2011 年 11 月 17 日.北極域における大気・海洋・海氷相互作用に関する研究.「日本気象学会堀内賞記念講演」,日本気象学会秋季大会, 名古屋.⑦
- Tachibana, Y., 13-15 November 2013. A cause of the AO polarity reversal from winter to summer in 2010 and its relation to extreme hot summer associated with polar jet, summer AO and blocking. The Northern Hemisphere Polar Jet Stream and Links with Arctic Climate Change Workshop, Reykjavik, Iceland.³
- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Nakano, T., Ohte, N., Onuma, Y., Tanaka, S., Uetake, J. June 25 2015. Multi isotope approach to dynamics of impurities in snow and ice on the Greenland Ice Sheet. IUGG, Prague Czech Republic. ④
- <u>Takeuchi, N.</u>, Nagatsuka, N., Shimada, R., Uetake, J., Jan.16,2013. Biogenic impurities darkening the Greenland Icesheet. The third International Symposium on the Arctic Research, 東京,日本科学未来館.④
- Ukita, J., September 12-13, 2013. Arctic Influence on Weather and Climate in Japan. US National Academies Arctic Linkages Workshop, MD, U.S.A.⁽³⁾
- <u>矢吹裕伯</u>, <u>杉村</u> 剛, 2014 年 5 月 1 日. 北極域データアーカイブ. JpGU2014, 横浜. ADS
- Yabuki, H., Kawamoto, H., 23 May 2012. Toward a new phase of Arctic research data activity, Toward a New Framework of Global Data Activity. Japan Geoscience Union (JpGU), 幕張. ADS
- <u>µµ</u>, 9 March 2016. Navigation support system (including oil-spill pollution) and ice forecast using satellite data. Special Seminar in connection with the 6th Meeting of Japan-Finland Joint Commission for Science and Technology Cooperation, Mita Conference Center, Tokyo, Japan. <a>[7]
- <u>µµ</u>, 11 Nov. 2015. Development of navigation support system for the Arctic sea routes. Symposium1: Maritime activities and Innovation in the Arctic, Hokkaido University Finnish Universities Joint Symposium, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan. 7
- 山口一,中山由美,2014年2月19日. 北極と南極とオホーツク海の今. 第29回北方圏国際シンポジウム 子どもと親の流氷シンポジウム,紋別. ⑦
- 山口一, 2015年5月19日. 両極域の氷海航行に関する最近の話題について. 溶接接合工学振興会・国民工業振興会共催平成27年度総会:特別講演, ニューオータニイン東京, 大崎, 東京. ⑦
- 山口一,2014年12月12日.北極海の調査・研究開発に関する全般動向.日本船舶海洋工学会関西支部・KFR 共催シンポジウム「氷海分野におけ る技術動向と展望ー北極域の開発に向けてー」,神戸.⑦
- 山口一, 2014年10月27日. 北極航路研究に必要な砕氷観測船機能について. 研究集会「両極域における砕氷船を利用した観測研究」, 札幌. ⑦
- <u>山口</u>, 2014 年 10 月 17 日, 11 月 21 日. 北極海の航路利用と氷海航行支援システムについて. 第 90 回船長教養講座,日本船長協会, 10 月東京, 11 月神戸. ⑦
- 山口 —, 2014年8月15日. Recent Researches in Japan to Support Safe and Efficient Navigation along the Northern Sea Route. IAHR Symp. Ice 2014, Singapore. ⑦
- <u>||||| --</u>, 29 April 2015. Research on navigation support system for the Arctic sea routes. Invited lecture of the session "Navigation and Fisheries in the Arctic: Prospects, Problems and International Policies". Science Symposium ISAR-4/ICARP-III, Arctic Science Summit Week 2015, Toyama. ⑦
- 山口 一, 2014 年 4 月 19 日. 北極航路の課題について. 第 187 回舶用プロペラ研究会, 鉄鋼会館, 東京. ⑦
- 山口一, 2013年11月29日.北極海航路,氷海油拡散予測の現状と今後の課題について.氷海技術研究講演会,エンジニアリング協会,東京.⑦
- <u>шп</u>, 11 Nov. 2013. Transpolar Shipping / Sea Ice. Workshop on Japan-USA Collaborative Arctic Studies, National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan. 7
- 山口一, 2013年8月7日. 北極海の航路利用の現状と研究課題.「北極圏」プロジェクト勉強会, 東京大学. ⑦
- <u>山口</u>, 2013 年 1 月 14 日. 北極海を航路として使う. ISAR-3 公開講演会「今、北極がアツイ!」, Program and Abstracts of 3rd Intern. Symp. Arctic Research. 日本科学未来館, 東京. ⑦
- 山口一, 2012 年 7 月 6 日. 北極海航路の利用促進に向けて. 総合地球環境学研究所シベリアプロジェクトワークショップ, 総合地球環境学研究所, 京都. ⑦
- <u>ШП</u>, 17 May 2012. New Sea Status Index by Weather and Performance DB. The 15th TFMS Forum, SHIRASE, Funabashi, Japan, WNI.⑦
- <u>ШП</u>, 17 November 2011. Sea ice prediction and ice navigation systems for northern passages. The 14th TFMS Forum, SHIRASE, Funabashi, Japan, WNI. ⑦
- 山内 恭, 2015 年 5 月 21~24 日. 極寒連の系譜と極域気象研究. 極域・寒冷域研究連絡会特別講演,日本気象学会 2015 年春季大会, つくば. PM
- Yamanouchi, T., Takata, K., Enomoto, H., Fujii, Y., 23-30 April 2015. Current Status and Selected Outcomes of the GRENE Arctic Climate Change Research Project (Fy2011-2015) - Rapid Change of the Arctic Climate System and its Global Influences -. Keynote Speech at the Plenary Session, ISAR-4/ ICARP III, ASSW2015, Toyama, Japan. PM
- Yamanouchi, T., Takata, K., Enomoto, H., 16-19 November 2015. Aim of the Special Session "Warming in the Arctic and Its Influences" and Brief Overview of "GRENE Arctic Climate Change Research Project". Special Session [S], The Sixth Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research, Tokyo. PM
- Yamazaki, K., March 9-10, 2015. GRENE Arctic Climate Change Research Project, some research results, and possible collaboration with GREENICE. GREENICE Annual Meeting, Copenhagen, Denmark. (3)

・受賞

CONTRAIL チーム(町田敏暢、松枝秀和、澤 庸介、丹羽洋介、坪井一寛), 2015 年 4 月 15 日. CONTRAIL プロジェクト.フジサンケイグループ 第24回地球環境大賞審査委員特別賞. ⑤

De Silva Liyanarachchi Waruna Arampath, 2014年2月19日. A high-resolution hindcast study for the Northern Sea Route. 第29回 北方圏国際シンポジウム『オホーツク海と流氷』第1回青田昌秋賞. ⑦

羽角博康, 2014年10月22日. 海洋の数値モデル開発とプロセス研究を通した気候研究への貢献. 日本気象学会堀内賞. ⑦

<u>本田明治</u>, 2013 年 9 月 19 日. 海氷域変動が気象・気候に及ぼすメカニズムの解明. 日本雪氷学会平田賞.③

野村大樹, 2014 年 3 月 28 日. 海氷の生成と融解が極域海洋の物質循環に与える影響. 日本海洋学会岡田賞. ⑦

大島慶一郎, 2015 年 3 月 23 日. 海氷域の変動とその海洋循環に与える影響に関する研究. 日本海洋学会賞. ⑦

大島慶一郎, 2015 年 3 月 22 日, NHK スペシャル「流米"大回転"」,日本放送協会第 90 回放送記念日感謝賞,⑦

大塚夏彦, 2014, Furuichi, M. and Otsuka, N., Proposing a common platform of shipping cost analysis of the Northern Sea Route and the Suez CanalRoute. Maritime Economics & Logistics, Maritime Economics & Logistics Paper Award, (17, 9-31, 10.1057/mel.2014.29). 🗇

尾関俊浩, 2012 年 10 月. 北海道開発技術センター寒地技術シンポジウム 2012 年度寒地技術賞(学術部門). ⑦ 島田浩二, 2011 年 11 月 17 日. 北極域における大気・海洋・海氷相互作用に関する研究. 日本気象学会堀内賞. ⑦

田村岳史, 2014 年 3 月 28 日. 海氷生産量のグローバルマッピング及び深層水形成域の特定と変動解明. 日本海洋学会岡田賞. ⑦

山口 一, 2012. 船舶の安全運航のための個船の情報を利用した、実海域における貨物・船体ダメージリスクインデックスの検討.(財) WNI 気象 文化創造センター第二回気象文化大賞.⑦

・学位取得論文で参照されたもの

(博士)

榊原大貴, 北海道大学環境科学院雪氷寒冷圏コース, 2016. Ice front variations and velocity changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield and northwestern Greenland(南パタゴニア氷原およびグリーンランド北西部におけるカービング氷河の末端変動と流動 変化).④

(修士)

岩原由佳,北海道大学大学院水産科学院水圈生物化学専攻, 2013. Distribution of baleen whales in the northern Bering and the Chukchi Seas. (ベーリング海北部およびチュクチ海におけるヒゲクジラ類の分布について).6

<u>太田直紀</u>,北海道大学大学院環境科学院生物圏科学専攻, 2014. Interannual variation of solar heating in the Chukchi Sea, Arctic Ocean(チャク チ海における太陽放射加熱の経年変動).⑥

<u>大額実咲</u>, 北海道大学大学院環境科学院生物圏科学専攻, 2016. 太平洋側北極海(チャクチ海)における成層強度の時空間変動. ⑥

片山直紀, 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻, 2016. グリーンランド北西部におけるカービング氷河の表面高度変化.④

門田 萌, 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻, 2016. グリーンランド北西氷床(SIGMA-D)アイスコア解析に基づく小氷期以降の環境変動. (4)

田中和樹、北海道大学大学院環境科学院地球圏科学専攻、2014. チャクチ海・ベーリング海における溶存有機物の動態. ⑥

中野 翼, 北海道大学大学院水産科学院海洋生物資源科学専攻, 2014. ベーリング海北部およびチャクチ海における底生生物に関する研究. ⑥

<u>夫津木亮介</u>,北海道大学大学院水産科学院海洋生物資源科学専攻, 2014. Biological contribution to patial pressure of CO2 in the western Arctic region (西部北極圏海域における海水中の二酸化炭素分圧に対する生物活動の寄与).⑥

<u>三船尊久</u>, 東京海洋大学海洋環境保全学専攻, 2013. 北極チャクチ海における海洋酸性化. ⑥

吉野勇太,北海道大学大学院環境科学院地球圈科学専攻, 2014. Estimates of new production and its contributors in surface waters of the Bering and Chukchi Seas during summer (夏期のベーリング海およびチャクチ海表層における新生産とその寄与者の評価).⑥

和賀久朋,北海道大学大学院水産科学院海洋生物資源科学専攻, 2014. The response of phytoplankton community to the recent global climate change(近年の地球規模環境変動に対する植物プランクトン群集の応答).⑥

巻末資料

- 1. 北極研究検討作業部会報告書 --中間とりまとめ一
- 北極研究戦略小委員会
 中間評価票(北極気候変動分野)

-
蛮
资料
Ŧ
巻

資料1	
卷末	

I	
国家	
I	

I. F	衣		-
II.	北極	部研究の現状	-
	1.	鉄が国における北極圏研究の現状	-
	5.	比極圏研究の国際的枠組み	4
		诸外国における北極圏研究体制	4
III.	我	5国の北極圏研究の将来戦略	22
	1.	比極圏研究における戦略的重要課題	20
	2.	「北極圏研究コンソーシアム」の設置と体制整備	9
		「北極圏気候変動研究プロジェクト」の創設	L-
	4.	比極圏観測の強化	00
	2	比極圏研究における国際協力	6
IV.	結語	1	0

北極研究検討作業部会報告書 一中間とりまとめ一

町		∜ ∤	∜ 1	梁
00	a 語	彩	部	業
年	術	便	進	€
	孙	計	推	Ť
2			則	検
2	技術	画	観	既
成	影	究	球	函也
₽	科	臣	茗	光

北極は、地球温暖化による平均気温の上昇が最も大きく、地球上において気候変動による 影響が最も顕著に表れると予測される地域の1つである。また北極における変化は、大気・ 海洋循環の変化や雪米圏変化などを通して、全球的な気候システムにも大きな影響をもた らす可能性があることから、気候変動のメカニズム解明のため、北極における継続的な地 球観測を実施することは非常に重要である。 他方、我が国への影響という観点からは、特に最近の北極振動の振舞いに伴う異常気象の 発生などによりその重要性が改めて認識されるとともに、海米減少に伴う北極航路の活用 など経済活動の面からの関心も高まっている。また北半球に位置し、しかも気候・環境的 にも北極域・高緯度の影響を強く受けている日本としてはより組織的な北極圏研究をすべ きである。 「地球観測における推進戦略」(平成 16 年 12 月、総合科学技術会議決定)に基づく我が国の地球観測推進の取組において、地球観測連携拠点(温暖化分野)が、重要であるにもかかわらず依然不十分である極域及び雪氷圏の長期継続観測の実現に向けて、「雪氷圏観測の機関間連携に関する取組について」が平成 22 年 3 月にまとめられ、地球観測推進部会に報告された。

こうした状況を踏まえ、北極における我が国として組織的かつ継続的な観測・研究体制を整備し、関係府省庁・機関間の連携をより強化することにより、我が国の北極研究の一層の推進を図るため「北極研究検討作業部会」を設置し、我が国における北極研究の強化に向けた検討を実施した。なお、検討にあたっては北極に限らず広く雪米圏を視野に入れて議論を行った。

II. 北極圏研究の現状

1. 我が国における北極圏研究の現状

我が国の現在の北極圏研究を概観すれば各研究機関別に以下の通りとなっている。

a) 国立極地研究所 (NIPR)

NIPR は、長く南極観測を続けてきたが、1990 年、新たに北極環境研究センターを設置 し(2004年に北極観測センターと改称)、現在我が国における北極研究の中核研究機関と してノルウェーのスパールバル諸島の観測基地を中心とした観測施設を管理・運営して いる。同観測基地は大学等の研究者への共同利用施設として提供され、オーロラ・大気・ 雪米・陸上生態系等の観測を実施している。特に、南北両極の比較観測に重点をおき、 その分野においても実績がある。また、総合研究大学施成科学専攻の基盤機関と

して、大学院教育にもあたっている。

b) 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

JAMSTEC は、国際連携による現場観測、衛星データ収集を含む統合的データ解析及び 数値実験を組み合わせることにより、北半球寒冷圏の海洋・雪米・大気・陸岐システム の実態・変動とプロセスを把握する北半球寒冷圏研究プログラムを実施している。また、 様々な国際協力も活用しながら海洋地球研究船「みらい」をはじめとする船舶を用いた 海洋観測や現地調査協力による陸域観測を行っている。1997 年からはアラスカ大学に設 置された国際北極圏研究センター(IARC)と共同研究もしくは委託研究を実施している。

c) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

2009 年に策定された「日本の宇宙基本計画」において、アジア等の地域に貢献する陸域・ 俺洋観測衛星システム及び全球環境変動と気象観測衛星システムに関する衛星計画が研 究開発計画に取り込まれることとなった。

JAXA は、地球観測衛星長期計画に基づいて陸岐観測技術衛星「だいち(ALOS)」をはじめ、水循環変動観測技術衛星「Aqua」や温室効果ガス観測技術衛星「いぶき (GOSAT)」等の観測衛星を有しており、こうした衛星観測データを北極域の陸海域双方で提供・活用することで北極域観測に貢献している。1999 年からは IARC との共同研究も実施している。

d) 総合地球環境学研究所

総合地球環境学研究所では、人間と自然との相互作用のあり方を捉え直すべく、文理融合型のプロジェクト研究を行っている。北極域関連研究としては、①東北アジアの人間活動が北太平洋の生物生産に与える影響研究、②温暖化するシベリアの自然と人一水環境をはじめとする陸域生態系変化への社会の適応、③中央アジアの氷河を水源とする乾燥地の研究、の3 つが行われている。

e) 気象研究所

気象研究所においては、積雪変質アルベドモデルや海米モデリングを始めとする各種のモデルを研究するとともに、北極圏における大規模な観測は行っていないものの、衛星データの活用や札幌での現地観測を実施している。これらを通じて、北極圏温暖化のメカニズムの解明と影響評価の研究を行っている。

f) 国立環境研究所

国立環境研究所では、シベリアの拠点での観測活動に加え定期貨物船や旅客機を利用した温室効果気体観測を行っている。また、大気海洋結合モデルを検証するとともに気候再現シミュレーションを実施し、長期観測データと統計解析することで北極圏陸域の温

暖化及び降水量の変化の原因特定に関する検証を行っている。

g) 森林総合研究所

森林総合研究所は、これまで関心の高かった熱帯林に加えて、永久凍土の分布とも密接 に関連している周極域の森林生態系の研究を進めている。特に 1990 年代以降シベリアの 北方林の研究が進んだ結果、北方林における多様な植生・土壌分布が明らかになった。 北極域の温暖化に関しては、特にこうした多様性が北極域内の各地域におけるそれぞれ の温暖化シナリオに与える影響に着目して研究を進めている。

h) 北海道大学

北海道大学では、低温科学研究所をはじめとする多数の部局にて北極研究を行っている。 研究対象は、北米/ベーリング海、シベリア/オホーツク海、モンゴル・北欧/スラブ・ ユーラシア、北極海と幅広く、森林火災・海米に関しては IARC/JAXA との共同研究、 水循環・雪米変動については JAMSTEC との共同研究である。「おしょろ丸」による北極 海観測や留学生受入れによる人材育成も行っている。

i) 北見工業大学

北見工業大学では、個人的なネットワークを生かした多数の研究機関、他大学との連携研究を機動的に進めている。その研究内容は幅広く北極域の海陸双方を対象として多岐 にわたるものの、いずれも短期的な共同研究への参加が中心である。教育活動の観点か ら、若手研究者を派遣することで北極研究に携わる人材の育成も行っている。

東京大学大気海洋研究所

東京大学大気海洋研究所は、モデルによる研究を通じての将来予測や気候システムの振る舞いの理解に繋がる研究を行っている。北極域関連研究としては、①モデリングによる北極振動のメカニズムと予測可能性、②北極海の海洋と海米のモデリング、③グリーンランド米床の変動と気候感度、④過去の高緯度気候のモデリングの4つテーマに沿ったモデルの研究を行っている。

k) 東京海洋大学

東京海洋大学は、2008 年の国際極年を契機に北極研究として、海洋観測と Aqua などの 衛星観測データの高度利用を行っている。特に海洋観測に関しては、「みらい」・「おしょ ろ丸」を利用した観測に加え、2013 年まで担保されているカナダ砕氷船による観測や 2011 年より開始される韓国砕氷船による観測など海外砕氷船による観測も行っている。

1) アラスカ大学国際北極圏研究センター (IARC)

1997年に日米両国が共同して設置した北極圏の気候変動の研究機関で、日本からは上述の通り JAMSTEC 及び JAXA が、米国からは国立科学財団 (NSF)、エネルギー省 (DOE)、

航空宇宙局(NASA)、大気海洋庁(NOAA)が参加している。JAXA の衛星データを利用した北極圏森林火災の影響調査や JAMSTEC の観測データを活用して海陸域での様々な寒冷圏プロセスのモデルと観測による研究が行われている。

2. 北極圏研究の国際的枠組み

北極圏研究に関連する代表的な国際的枠組みとしては以下のものがある。

a) 国際北極科学委員会(IASC)

IASC は北極及び北極が全球システムに与える影響についての科学的理解を深めること を目的として 1990 年に設立され、現在我が国を含む 19 カ国が加盟している。IASC は 以下(b,c,d)の活動の支援も行っており、北極研究の中長期的な計画を提言している。

b) 国際北極科学計画会議(ICARP/ICARPII)

ICARP では、北極研究の関係諸機関がかかわる中期的な研究計画を作成している。10 年に 1 度北極研究計画に関する的を絞った提言書を作成し、10~15 年ぐらいのスパンでの国際協力の方向付けを行っている。2005 年には ICARPII 科学計画書"いが作成され、現在の北極研究における主要なガイドラインとなっている。

(*1) http://web.arcticportal.org/iasc/science-development/icarp

c)国際北極変化研究委員会(ISAC)

ISACは、北極システムの変化とそうした北極の変化が全球システムに及ぼす環境影響を研究するべく、学際的な長期計画を策定している⁽²⁰⁾。北極システムの変化への理解を促進・文書化し、科学的な要請に基づく観測とモデルの統合を行うなど、将来の影響の評価のための必要な科学的知識を提供すべく、網羅的な活動を展開しようとしている。

(*2) "ISAC Science Overview Document" & "ISAC Draft Science Plan":

<u>http://www.arcticchange.org/</u>

d) 持続的北極観測ネットワーク (SAON)

SAON は、2006 年の北極評議会の決議に基づき開始されたものであり、北極において、持続的で費用負担なく、公開された、かつタイムリーな質の高い観測データへのアクセスを可能とする北極観測活動をどのように実現するかについての提言を行っている。

3.諸外国における北極圏研究体制

北極圏に領土・領海を有する北極国においては、ノルウェーやロシアのように北極研究の 中核研究機関が強力に牽引するタイプや、米国のように国家戦略の観点から北極圏研究の 目標を設定する政府内委員会を置き複数の中核研究機関が研究を遂行するタイプに大別さ

-
क
ilm/
ЗШ,
₩
JK-
釈

卷末資料1

れるが、北極圏研究が国家として戦略的に推進されている。また、非北極国においても、ドインのように中核研究機関が設立されている国や、中国のように政府内委員会の管轄のもと北極圏研究を進める中核研究機関が設立されている国もある。このように、海外の北極圏研究の有力国においては、北極国・非北極国の区別なく北極圏研究の体制が機能面から十分に整備されている事例が多い。

III. 我が国の北極圏研究の将来戦略

1. 北極圏研究における戦略的重要課題

北極圏研究の重要性は、北極がもたらす全球の気候変動へのフィードバックや我が国への影響に基づいており、将来の変化を的確に予測し、必要な対策を講じるためには、気候モデルにおける北極地域の水・物質・エネルギー通程の精鍛化を図ることが優先順位の高い課題である。このモデリングの高度化のためには、未だに十分とは言えない古気候を含む観測データの方実が不可欠である。また、北半球高緯度の寒冷圏を含む北極圏での急激な気候変化のプロセスとメカニズムをより精確に評価し気候モデルと対話できる「北極圏システムモデル」の構築も重要であり、このための観測・プロセス研究の高度化も同時に必要である。

これらの気候モデルの特級化、および「北極圏システムモデル」の構築にあたっては、モデリング研究者が観測研究者と協力して、モデルの高度化・特級化に必要な観測情報を提示し、観測研究者側は、最適な観測データを提供しつつ、現実のプロセスにとって重要な新たな観測事実も提示するという観測研究者と気候モデル研究者の協働による進め方が適当と考えられる。

a) 北極圏気候モデルの改良・高度化

近年、北極において地球温暖化の影響と考えられる事象が増加している。すでにここ 20 年程度の間に北極域では気温上昇、そして顕著な雪米衰退が超こっているが、特に、2007 年夏期に北極海の海米が激減し、同年9月には海米面積が観測史上最小となったことは 記憶に新しい。しかしながら、現実に進行している北極圏の温暖化と、気候変動に関す る政府間バネル(IPCC)が予測している温暖化には乖離があり、その地域性や物理過程 なども含め、まだ大きな不確定性を残している。また、北極振動指数の変化により北極 圏の寒気が中緯度地域に流れ込み、地域的な寒波や我が国の不順な天候に影響与えるな ど、気候・気象の極端現象に、北極圏の変吸化がどう作用しているかについては、その重 要性にもかかわらず、十分に解明されていない。IPCC第4次評価報告書においても、「極 域の複雑な大気・海洋・陸岐凍土及び生態系に対する理解が不十分であり、また観測デ 気候モデルについては、北極海における海氷面積が、その後回復傾向を見せているとは

いえ、IPCCの予測を超える速度で減少したことは、気候モデルにおける北極領域の再現 性において大きな課題があることを示している。将来予測を改善し、どのような影響が 発生するかを見極めるためには、必要なデータの取得・整備など観測データを充実させ、 既存のシミュレーション結果を北極域の気候モデル研究者と観測研究者が協働して解 析・検証し気候モデルの改良・高度化を行うことが喫緊に取り組むべき北極圏研究にお ける戦略的重要課題である。

P) 観測研究を通じたプロセスとフィードバック過程の解明

気候モデルの改良・高度化が北極圏研究における最重要課題であるが、この課題に密接 に関連した以下に列記するプロセスとフィードバック過程の解明は、地球の水・物質循 環や生態系への影響も含めた重要な課題として位置付けられる。

① 北極海の急激な変化の発生と原因

海米の急激な減少や海水温の上昇及び海氷運動の活性化、海氷変化が大気の挙動を制約し海米変化を加速すること、海氷減少や海洋循環及び貯淡水量変化に伴う北極海生物化学過程への影響と海洋酸性化が起こっているが、いまだ総合的な理解はできていない。

② 北極圏の雲、エアロゾル、雪氷が放射収支に与える影響

北極圏の気候形成のもとになるエネルギー収支を支配する雲、エアログル、中でも放射強制力を弱め地球温暖化作用のあるブラック・カーボンは大気中においても、また積雪や海氷の表面においても大きな影響を与え得るものとしてその実態の把握が必要ある。

③ 氷床・氷河群の変化の実態とその機構

融解域が拡大し流速や流出が増大していると言われているグリーンランド、全面的に 後退しつつある北極域やユーランア・アラスカの氷河群の衰退の実態およびその水収 支や海水準への影響を早急に把握すると共に、古気候・古環境を研究を通じて過去の 地球環境の変化も把握する必要がある。

④ 永久凍土の融解過程とその影響

北半球寒冷圏の凍土融解が進行しているが、その水文学的影響、陸城生態系変化への 影響の解明は、陸坡からの温室効果気体放出・吸収の変化、その温暖化へのフィード バックも含めた評価が早急に求められている。特に、ユーラシア寒冷圏の凍土はタイ ガ(北方林)との共生的関係を有しており、温暖化によるこのシステムの変化は、北 極海域水循環や生物多様性にも大きな影響を与える可能性があり、その評価は重要で ある。

-
蛮
資
₩
粆

卷末資料1

2. 「北極圏環境研究コンソーシアム」の設置と体制整備

北極圏を巡る重要課題は、分野横断であってかつ総合的であるとともに、モデリングと観測の共同作業を含み、多くの研究者の連携を必要とすることから、適切な研究推進体制を整えることが的確な対応、効果的・効率的な成果創出につながる。

国内の研究推進体制という観点からは、我が国においては大学共同利用機関である国立極地研究所に北極観測センターが設置され、我が国の中核研究機関として位置付けられ、独立行政法人や様々な大学がその研究ポテンシャルや機関の有する特長を活かして、多様な研究活動に取り組んでおり、一定の存在感を示していることはすでに概観した通りである。しかしながら、我が国全体としての総合力や連携による相乗効果を十分に発揮しているというには未だ改善の余地がある。

ー方で、海外においては北極圏研究を中核研究機関が強力に牽引する、もしくは政府内委 員会により多数の中核研究機関を牽引して北極圏研究を一体的に推進する例が多く見られ、 これらも参考となる。

我が国において、北極圏研究における総合力を発揮するためには、モデリング及び観測双 方の分野の北極圏研究関係者が広く結集して議論を行い、戦略と方向性を見いだし、連携 していく、またデータ・研究成果を共有・発信し、さらには新たな研究に協調して取り組 んでいく、という共通ブラットフォームとなる組織を整備することが有効であると考えら れる。このため、「北極圏環境研究コンソーシアム」(仮称、以下コンソーシアムという) を設置し、多岐にわたる各研究機関間の連携を推進し、オールジャパン体制による北極圏 研究の強化に取り組むことが適当である。このことは、また限られた研究資源を共有する ことで、有効活用し、より大きい効果をもたらすことにつながる。 また、コンソーシアムは、広く研究者が結集する緩やかな連携組織であることから、より 焦点を絞ってモデルと観測の融合をはじめとする研究計画、持続的に強化する観測、国際 協力、人材育成など課題別に具体的な議論を行う場をコンソーシアムの中に設置すること が、コンソーシアムを北極圏研究の実質的な推進役として真に機能するものとするために は不可欠である。 コンソーンアムの事務局は、海洋研究開発機構の協力を得つつ、国立極地研究所が担うべきである。

また、日本として、現有の資源をもとに最大限の効果を発揮する体制を考える必要がある。 連携は一つの方法ではある。しかしながら現在、研究機関が分担している業務にみられる 重複と不足が見られ、このような視点から考えると、現在の状況は必ずしも妥当とはいえ ない。それを是正するには組織的調整が必要である。研究機関・グループの再編および構 築を実施することにより、日本として効率的・効果的に研究を行っていける体制を築くこ

とが重要である。

3.「北極圏気候変動研究プロジェクト」の創設

北極圏研究における重要課題は、北極の変動がもたらす全球の気候変動へのフィードバッ クや我が国への影響の解明及び将来予測であり、そのためのモデル研究とモデルの精緻化 に直結する観測研究をパッケージで推進する必要があることから、「北極圏気候変動研究プ ロジェクト」(仮称) を立ち上げることが適当である。

北極圏総合研究の実施にあたっては、モデルと観測をつなぐデータ同化研究、各機関・大 学等で取得されている観測データの統合も並行して推進することがモデル研究の一層の精 徹化には不可欠であり、パッケージの一環として取り込むことが重要。 また、これらの研究を国際研究計画として提案し、モデリングと観測が一体となった国際 共同研究を主導することも一案である。 プロジェクトの実施期間としては、概ね5年程度として、この期間に集中的に取り組み、 北極圏・ユーラシア寒冷圏の極めて大きな温暖化進行の精確な予測と、その雪氷圏や生態 系へのインパクトと気候フィードバックの評価等を当面の目標とすることが考えられる。 北極圏研究には、中長期的に取り組まなければならないことは自明であるが、解決すべき 課題を明確にし、各機関が連携して研究を行い、その成果を踏まえて、選択と集中による 重点化を図りつつ新たな研究計画を策定するという研究のPDCAサイクルを内在した取 り組みが求められる。

5年間の目標としては、まず観測とモデリングのインターフェースを促進して気候モデルを 精緻化し、北極における地球温暖化の影響を明らかにする。その後、精緻化された気候モ デルをベースとした上で地域モデル活用し、北極域の温暖化によってもたらされる地域的 な極端現象や北極振動等の変化を統計的に予測できるレベルを目指し、モデルを駆使して 北極における地球温暖化が日本の気候や社会に与える影響等を検証する。

4. 北極圏観測の強化

北極圏に関する観測データについては、各機関・大学が積極的に取得に努めているが必ず しも十分なデータが得られているとは言い難く、多面的な取り組みが必要である。 まず、北極圏環境研究コンソーシアムでの議論をもとに、既存の観測拠点の施設整備の選択的強化と相互利用の推進を行うことが望ましい。具体的には、国立極地研究所などが有する観測拠点を必要性と重要度を考慮し整備を強化するとともに、直接、海米が後退した北極痛の海洋観測が行える海洋地球研究船「みらい」を最大限活用することも視野にその観測能力の拡充などを進めることが望ましい。その際、これらの観測拠点等の相互利用も重要であり、人材交流・育成にも活用されることが期待される。

また、近年充実が図られている人工衛星 Aqua による海氷を含む水循環観測やだいち

卷末資料1

(ALOS)との連携による北方林観測、2011年に打上げが予定されている GCOM-W1 による海米変動を含む水循環観測、2014年GCOM-C1 による陸上・海洋生態系・積雪・雲・エアログルなどの極域環境観測、2013年に打ち上げが予定されている GPM(全球降水観測ミッション)による固体降水観測などの衛星データについても、地上観測データとの統合などを通じて一層の利活用が有効と考えられる。これらの既存および今後の持続的な観測データの取得、着実なアーカイプ化及び利活用しやすいデータセットの整備体制が求められる。

観測空白城の改善や観測項目の充実については、限られたリソースの中で優先順位を見極めることが重要であるものの、それでも必要な観測には国際協力や利用可能な既存の施設等を活用して取り組むべきである。

なお、北極海観測には、当面は耐氷性能を有する海洋研究開発機構の海洋地球研究船「み らい」を活用していくことが重要であるが、変化のプロセスを理解し予測するために必要 となる海氷域の変化を捉える観測をより機動的に行うべく、将来的には砕氷船の利用につ いても検討する必要がある。

5. 北極圏研究における国際協力

国際的な研究計画等の枠組みに基づいて推進されている国際協力の現状を見れば、各機関・大学等の努力によって、研究者・研究機関間のネットワークが構築されてきており、 国際的な情報発信や研究成果創出への貢献など一定の存在感を見せているといえる。しか し残念ながら、それらの活動は、個別の研究者・研究機関のレベルにとどまっており、国 内の機関・大学等の間での観測データや研究成果の共有など連携が十分ではない。コンソ ーシアムの活動を通じて、国内の連携を強化し、国際的な情報発信、個別の国際協力の充 実に努めることが重要である。

267

我が固は北極圏に領土領海を持たないため、観測データの取得をはじめ観測活動に制約が 生じることは避けられないが、国際協力を推進することにより我が国単独では得られない 観測データ、研究成果を協働して生み出すことが可能となる。我が国として重要な観測デ ータについては、国際研究コミュニティーに対して国際共同研究を提案し、主導すること も一案であり、我が国にとっても貴重な研究成果を得るとともに国際社会への貢献も行う ことが期待できる。更に、20間の協力プロジェクトではなく、多くの国が参画する国際 その際特に注意する必要があるのが、日本としてどのような情報を取得し、どのような知見を得ることが必要かを明確化し、それに治った国際協力を行うことである。一つの具体的方法は、国際委員会等への積極的参加を行い日本の研究コミュニティーにとって好ましい主張を通じて、日本にとって利益のある事項を国際計画に反映させることである。二つ目は、観測・データ整備等における他国との具体的関係である。この場合は、特に北極国との協力が重要になるであろうし、その場合には一国に偏ることなく、必要な諸国、機関、プロジェクトとの協調を保つことが重要であろう。

北極を巡る国際的な枠組みとして北極評議会がある。北極評議会は、北極圏の特続可能な 開発、環境保護などに関し、北極圏諸国間の協力・交流を促進することを目的として協議 を行っており、北極における研究、経済活動等に重要な影響力を有している。北極に領土 を有するカナダ・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 エーデン・アメリカの 8 カ国(いわゆる北極国)を加盟国とする他、フランス・ドイツ・ ボーランド・スペイン・オランダ・イギリスがオプザーバ資格を付与されている。北極評 議会のオブザーバとなることが、北極圏研究の円滑な推進につながるものと期待される一 方、オブザーバ資格の獲得には北極圏研究の実績が有力な根拠となりうる。現在、オブザ ーバ資格の申請中であるが、北極圏研究の実績が有力な根拠となりうる。現在、オブザ

なお、国際協力のひとつとして、アラスカ大学国際北極圏研究センター(IARC)は衛星データの活用拠点や寒冷圏観測拠点として実績があり、我が国の大学との連携により、北極圏システムモデル開発も含めた人材交流の機能も期待できることからその特長を活かした協力を進めることが適当である。

IV. 結語

北極圏究検討作業部会においては、北極圏研究の現状を踏まえつつ、ユーラシア寒冷圏を含む北極圏研究における重要課題、国内の研究推進体制、国際協力の在り方等に関して、精力的に議論を重ねた。その結果、我が国の北極圏研究の一層の活性化に向けた骨格を示した。本報告書は中間的なとりまとめであり、この骨格のさらなる具体化に向けた検討を引き続き行う必要がある。

結びに、本報告、また今後の検討を踏まえて、行政に対して適切な対応を要請するととも に、我が国における北極研究の飛躍をもたらす研究コミュニティーの奮起を促したい。

Ē

2
菜
資
₩
粆

中間評価票(北極気候変動分野)

(平成25年8月現在)

1.研究課題名:大学発グリーンイノベーション創出事業「グリーン・ネットワーク・
エクセレンス」(GRENE) 事業北極気候変動分野(23 年度~27 年度)
2. 評価結果
 (1) 課題の進捗状況
〔必要性に関する進捗度〕
前半期を終え、4つの戦略研究目標達成に向けた各取組に係る個別の成果が見えてきている。
また、これまで、個別に活動してきた国内北極研究者を、極域研究の共同利用・共同研究拠点
である国立極地研究所が中核となって一つにまとめ、連携コーディネーターの配置による観測
とモデルの連携支援など、我が国として横断的、統合的に活動する体制が構築されていると評
価できる。国際的にも、主要国へのアプローチが積極的に行われ、連携が強化されつつあると
評価できる。
ー方、観測とモデルへのフィードバックについては、現状、断片的な範囲にとどまっており、
また、並行して開発されている様々な制約条件を持つモデルが、後半期に相補する関係に至る
までのプロセスが不明確である。結果として、個々の取組がばらばらとなっており、4つの戦
略研究目標との関係も不明瞭になっている。
このため、観測とモデルに係る各取組の現状が、4つの戦略研究目標とどのように関連して
いるのか改めて検証し、各取組間の連携を強化しつつ、目標達成までのプロセスをより具体化
する必要がある。
「有効性に関する進捗度」
国立極地研究所が中核となり、35機関約300人の国内北極研究者が一定の方向性をもっ
て観測研究活動を行えるよう、17名の学識経験者からなる運営会議を独自に設置し、その進
捗管理を行っていることは評価できる。
ー方、北極域の気候変動への重要性を理解するためには、観測とモデルの連携から、陸域、
大気、海洋、雪氷等、各分野をまたがる統合的なアウトプットを創出することが求められるが、
現状、この連携が弱く、各分野がばらばらに進展しているように見受けられるため、この更な
る強化が必要である。
また、国際的に見て、我が国の北極研究がどのように評価され、各国とどのように連携を図
ることができるのか、我が国の独自性、優位性を明らかにして検証する必要もある。
なお、本事業により整備を進めるデータアーカイブは、国立極地研究所が我が国の極域研究

268

[効率性に関する進捗度]

4つの戦略研究目標達成に向けた各観測研究グループ間の連携が弱いことなどから、目標達

C

に係るデータセンターとして国際的な認知を得るためにも、引き続き、世界の研究者を対象と

してできる限り早期に公開することが望ましい。

成に向けた進捗状況が見えにくく、効率的な運営が行われているのか判断しがたい。限られた 予算の効率的かつ効果的な執行に資するよう、各グループ間における取組の統合化と目標達成 に向けた取組の明確化を早急に進め、定期的なPDCAサイクルの展開を徹底する必要がある。 これまで、我が国の北極研究は、個別の研究者が国際的な共同研究プログラムに参加するか たちで行われることが多く、国際的な認知度は必ずしも高くなかったが、本事業を通して、我 が国としての北極研究が見えやすくなったことは、今後、北極圏において様々な活動を行う上 でも良い影響を生むものと期待できる。 macronater (+======0)

特に27年度(本事業の最終年度)に開催されるThe Arctic Science Summit Week (ASSW)の国際大会において、画期的な観測研究成果を数多く提示することで本事業の国際的な評価が定まると思われる。

(2) 各観点の再評価と今後の研究開発の方向性

当初計画通り、ほぼ順調に進捗しており、水準以上の成果を上げていると評価できる面もあるが、4つの戦略研究目標との関係では、個々の取組間の連携が弱いことが指摘される。更には、本事業が最終的に目指すところの「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」に向け、4つの目標が全体として集約され、統合的な研究成果を創出するまでの道筋が不明瞭である。

今後、本事業の推進に当たっては、以下のことに留意する必要がある。

●北極城の気候変動への重要性を理解するためには、長期的な観測データの取得が重要であり、 我が国自らが取得したデータのみならず、世界各国がこれまでに取得してきたデータをよく発 掘することも必要である。このため、鍵となる国際連携を強化しつつ、我が国の強みを明確にし、我が国のプレゼンスを高めていく戦略性が必要である。

●4 つの戦略研究目標に向かって各観測研究グループが個別に活動している感があり、その意味で北極圏における地域・海域研究にはまだ成熟できていない。今後、観測の結果がモデルの改良に反映されると同時に、各モデル間の相補性が確保されて全体像が出てくるような事業の運営が必要である。

●北極気候システムの全球的な影響に係る総合的解明に向け、4つの目標が一体となった研究 への深化を図るため、観測とモデルの連携を着実に進展させ、本事業終了以降も機能する確固 たる共同体制とする必要がある。

(3) その他

数字で見る GRENE 北極気候変動研究事業



WEB版改訂2018年2月5日

編集・発行 2016年8月31日

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 国際北極環境研究センター GRENE 北極気候変動研究事業事務局 東京都立川市緑町 10-3

> ISBN: 978-4-906651-05-4 doi:10.15094/00013469


GRENE北極気候変動研究事業の観測・活動が行われた地域



ISBN: 978-4-906651-05-4 doi:10.15094/00013469