

GRENE 北極気候変動研究事業

研究成果報告会

講演予稿集

日時 2016年3月3日(木) 10:00-17:30 (開場 9:20)
3月4日(金) 09:30-16:30 (開場 9:00)
場所 国立国語研究所 2F 講堂
主催 国立極地研究所

Final Symposium on GRENE-Arctic Climate Change Research Project

Abstracts

Date 3-4 March, 2016
Venue National Institute for Japanese Language and Linguistics (NINJAL)
Host National Institute of Polar Research (NIPR)

GRENE-Arctic

目次

3/3 事業概要の報告		
O00-00	山内恭 (国立極地研究所)	事業概要の報告－5年間の取り組みについて
3/3-4 研究課題 口頭発表		
O01-02	飯島慈裕 (海洋研究開発機構)	北極気候変動にともなう東シベリア陸域環境の変化
O02-02	大澤晃 (京都大学)	周極域亜寒帯林の現存量・構造変化の歴史と気候変動に対する反応
O03-02	鄭俊介 (国立極地研究所/北海道大学)	年輪解析と生態系モデルによる周極域森林生態系の過去・現在・将来
O04-02	齊藤和之 (海洋研究開発機構)	モデル－観測連携GTMPの成果と将来に向けて
O05-05	森本真司 (東北大学)	スバルバル諸島ニールズン及びカナダ・チャーチルにおける大気中の温室効果気体および関連気体の変動
O06-05	石井雅男 (気象庁気象研究所)	チャクチ海とカナダ海盆域における海洋表層の二酸化炭素とメタンの分布及び変動要因
O07-05	町田敏暢 (国立環境研究所)	北極域上空における温室効果気体の変動
O08-05	Prabir K. Patra (海洋研究開発機構)	Modelling of greenhouse gases and related species in the Arctic environment
O09-ADS	矢吹裕伯 (国立極地研究所)	北極域データアーカイブの開発と課題
O10-04	榎本浩之 (国立極地研究所)	北極圏の氷河群変動と気候影響
O11-04	津滝俊 (国立極地研究所/北海道大学低温科学研究所)	グリーンランド北西部における溢流水河の質量減少
O12-04	堀雅裕 (宇宙航空研究開発機構)	北極域の広域積雪観測と気候影響
O13-04	東久美子 (国立極地研究所)	北極域積雪中のブラックカーボン及びダストに関する研究
O14-03	小池真 (東京大学)	北極気候に関わるブラックカーボン・エアロゾルと雲微物理量
O15-03	岡本創 (九州大学)	北極域の雲と特性と海水相互作用研究
O16-03	山崎孝治 (国立極地研究所/北海道大学)	北極域の海水減少が中緯度に及ぼす影響と対流圏－成層圏結合
O17-01	大石龍太 (国立極地研究所/東大気海洋研究所)	雪氷新過程導入によるGCM地表気温バイアスの改善
O18-01	廣田淳郎 (国立極地研究所/東大気海洋研究所)	CMIP5気候モデルにおける夏季北ユーラシアの降水再現性
O19-01	Laine Alexandre (国立極地研究所/東大気海洋研究所)	Seasonal evolution of surface temperature changes over the Arctic Ocean under global warming in CMIP5 models
O20-07	羽角博康 (東京大学大気海洋研究所)	北極海水海洋のモデリングと予測システム
O21-07	木村詞明 (国立極地研究所/東京大学)	衛星データを用いた北極海の海水中期予測
O22-07	吉澤枝里 (東京海洋大学)	衛星観測データから計算された海水運動ベクトルを利用した力学的な積み重なりによる海水厚増大の推定
O23-07	平野大輔 (国立極地研究所)	アラスカ沖パロ－沿岸ポリニヤに関する観測・衛星・モデル融合研究
O24-07	館山一孝 (北見工業大学)	北極海航路上の海水厚モニタリング技術の開発
O25-07	川合美千代 (東京海洋大学)	チャクチ海における海洋酸性化:底層における長期の炭酸カルシウム未飽和
O26-07	藤原周 (海洋研究開発機構)	海水減少に対する基礎生産者の応答
O27-07	松野孝平 (国立極地研究所/北海道大学)	北極海に輸送された太平洋産プランクトンの運命
3/4 戦略研究目標 口頭発表		
O28-T1	野沢徹 (岡山大学)	北極域における温暖化増幅メカニズムの解明
O29-T2	杉本敦子 (北海道大学)	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
O30-T3a	浮田甚郎 (新潟大学)	北極－中緯度気候リンクの理解に向けて
O31-T3b	菊地隆 (海洋研究開発機構)	北極海環境変動研究:海水減少と海洋生態系の変化
O32-T4	島田浩二 (東京海洋大学)	北極海航路の利用可能性評価につながる海水分布の将来予測
3/4 総括		
O33-00	山内恭 (国立極地研究所)	GRENE北極事業における5年間の成果
3/4 ポスター発表		
研究課題1. モデル		
P01-001	保坂征宏 (気象研究所)	陸面モデルHALにおける氷床域の取り扱いの改善
P01-002	高田久美子 (国立極地研究所/国立環境研究所)	トップダウン法とボトムアップ法によるCO2フラックス推定値の比較－シベリア・ヤクーツクの試み－
P01-003	吉森正和 (北海道大学)	将来予測における北極域温暖化増幅の季節性と大きさを決める支配的要因
研究課題2. 陸域		
P02-004	鷹野真也 (北海道大学)	東シベリアインディギルカ川低地における積雪空間分布
P02-005	新宮原諒 (北海道大学)	東シベリアインディギルカ川低地におけるCH4放出フラックスの年々変動と $\delta^{13}C$ 、 δD -CH4から見たプロセス
P02-006	FAN Rong (北海道大学)	Ecology of willow in the Arctic for reconstruction of Indigirka river condition and its tributaries.
P02-007	両角友喜 (北海道大学)	High resolution vegetation mapping for GRENE-TEA observation sites and Estimation of CH4 emission in Taiga-Tundra boundary
P02-008	村瀬潤 (名古屋大学)	北東シベリアタイガ・ツンドラ境界域湿地土壌のメタン酸化ポテンシャル
P02-009	小谷亜由美 (名古屋大学)	東シベリアカラマツ林でのフラックス観測と湿潤イベントへのカラマツ林の応答
P02-010	松浦陽次郎 (森林総合研究所)	Comparative study on forest soil properties among circumpolar regions
P02-011	森下智陽 (森林総合研究所)	周極域の森林におけるイワダレゴケの分布と成長速度
P02-012	藤井一至 (森林総合研究所)	カナダ永久凍土の炭素蓄積量に対する凍結かく乱と排水条件の影響
P02-013	鳥山淳平 (森林総合研究所)	アラスカ内陸部クロトウヒ林における有機物層の発達程度の空間変動とその要因
P02-014	野口享太郎 (森林総合研究所)	アラスカ内陸部の活動層厚の異なるクロトウヒ林における細根現存量
P02-015	田中(小田)あゆみ (森林総合研究所)	アラスカ内陸部のクロトウヒの成長と葉の $\delta^{15}N$ の関係
P02-016	田中憲蔵 (森林総合研究所)	内陸アラスカにおける広葉樹の葉の機能的形質と生活形
P02-017	佐々木正史 (北見工業大学)	アラスカ北極圏の湖沼におけるメタンフラックスと永久凍土融解の影響
P02-018	早坂洋史 (北海道水文気候研究所)	Recent Severe Forest Fire in Alaska and Weather Conditions
P02-019	内田雅己 (国立極地研究所)	高緯度北極ツンドラ生態系炭素循環に及ぼす温暖化影響
P02-020	増本翔太 (国立極地研究所)	植物病原菌がツンドラ生態系における炭素循環に及ぼす影響
P02-021	伊勢武史 (京都大学)	データ同化による陸域植生モデルと観測と融合
P02-022	永井信 (海洋研究開発機構)	Accurate detection of year-to-year variability of growing season in a boreal forest in eastern Siberia
P02-023	町屋広和 (国立極地研究所/海洋研究開発機構)	陸域観測-モデル連携: GTMP stage 1入力・検証用データセット (Kevo・Tiksi)

P02-024	森淳子 (国立極地研究所/海洋研究開発機構)	北極陸域モデル相互比較プロジェクトGTMP stage1 -積雪・凍土・土壌水分再現性比較-
研究課題3. 大気		
P03-025	鷹野敏明 (千葉大学)	雲レーダー FALCON-A による北極ニーオルスンでの雲観測
P03-026	小林拓 (山梨大学)	雲粒子顕微鏡ゾンデによるニーオルスンでの係留気球観測
P03-027	Puna Ram Sinha (東京大学)	Measurement of refractory black carbon mass concentrations in falling and deposited snow in the Arctic
P03-028	大島和裕 (海洋研究開発機構)	シベリア三大河川における大気-陸域水循環の解明と、北極の大気-海洋-陸域相互作用研究への展望
P03-029	相澤拓郎 (筑波大学)	Three Dimensional Structures of the Arctic Cyclones
P03-030	田村美奈 (筑波大学)	北半球の自然変動が十年スケールの地上気温変動に及ぼす影響についての研究
P03-031	小松謙介 (三重大学)	The moisture updrafts on the cold pool captured by the continuously radiosonde observation passing through the marginal ice zone in Laptev Sea
P03-032	安藤雄太 (三重大学)	初冬の日本に影響を与える大気循環と周辺の海面水温の季節変化
P03-033	川崎健太 (三重大学)	The role of the cold Okhotsk Sea in the strengthening the Pacific subtropical high and Baiu precipitation
P03-034	春山哲範 (新潟大学)	大気における極向きエネルギー輸送に関する南北風の再評価
P03-035	星一平 (新潟大学)	北極域海水域変動の成層圏対流圏結合系への影響
P03-036	中村哲 (国立極地研究所/北海道大学)	北半球冬期気候変動の要因分析のためのHindcast実験の概要と初期解析結果
P03-037	西井和晃 (東京大学)	オホーツク海の海水減少に対する大気応答
P03-038	富川喜弘 (国立極地研究所)	北極海水変動がもたらす大気への局所的な影響 - 3次元波活動フラックスと3次元残差循環を用いた解析 -
研究課題4. 雪氷		
P04-039	金尾政紀 (国立極地研究所)	Greenland Ice Sheet Dynamics and Glacial Earthquake Activities
P04-040	豊国源知 (東北大学)	グリーンランド氷床における広帯域連続地震波記録を用いた地震波干渉法解析
P04-041	松野智 (北海道大学)	グリーンランド北西部における氷床から海洋への融解水流出
P04-042	榊原大貴 (北海道大学)	グリーンランド北西部における溢流水河の末端位置と流動速度の季節変化
P04-043	大橋良彦 (北海道大学)	グリーンランド氷床北西部Thule地域沿岸における高濃度海水域の変動
P04-044	箕輪昌紘 (北海道大学低温科学研究所)	Water properties and circulation in front of tidewater glaciers in northwestern Greenland
P04-045	箕輪昌紘 (北海道大学低温科学研究所)	Short-term variations in the dynamics of Bowdoin Glacier in northwestern Greenland
P04-046	Podolskiy Evgeny (北海道大学低温科学研究所)	Seismic emissions from a tide-water calving glacier (Bowdoin Glacier, Greenland)
P04-047	的場澄人 (北海道大学低温科学研究所)	グリーンランド氷床北西部の積雪堆積環境の時空間変動
P04-048	杉山慎 (北海道大学低温科学研究所)	グリーンランド北西部における近年の水質量損失 - GRENE グリーンランドプロジェクトの成果とArCS プロジェクトへの展望 -
P04-049	竹内望 (千葉大学)	北極圏の氷河・氷床の生物学的暗色化過程とその融解への効果
P04-050	大沼友貴彦 (千葉大学)	グリーンランドの積雪における雪氷藻類の繁殖とそのアルベド効果のモデル化
P04-051	田中聡太 (千葉大学)	北極圏氷河の雪氷藻類群集の経年変動とその要因
P04-052	大畑哲夫 (国立極地研究所)	東シベリア・スタラルハヤタ山塊のNo. 31 氷河の長期変動に関する考察
P04-053	白川龍生 (北見工業大学)	東シベリア・スタラルハヤタ氷河における気象観測 (2012-2014)
P04-054	平沢尚彦 (国立極地研究所)	Snowfall observations at Yakutsk in East Siberia and at Poker Flat Research Range in Alaska
P04-055	杉浦幸之助 (富山大学)	定点観測による北方林の着雪氷が大気に及ぼす影響
P04-056	Nuerasimuguli Alimasi (国立極地研究所/北見工業大学)	航空機搭載マイクロ波放射計を用いたアラスカ積雪域観測
P04-057	永塚尚子 (国立極地研究所)	Sr-Nd 同位体比を用いた北極域の積雪中ダストの供給源推定
P04-058	塚川佳美 (国立極地研究所)	アラスカ積雪中のブラックカーボン及び固体微粒子の空間分布
P04-059	張勇 (国立極地研究所)	Surface mass balance of Arctic glaciers: past and future trends
P04-060	紺屋恵子 (海洋研究開発機構)	Application of a distributed surface mass balance model to ice caps in northwestern Greenland
P04-061	Ralf Greve (北海道大学低温科学研究所)	グリーンランド北西部カナック地域ボードン氷河の流動に関する数値実験
P04-062	齋藤冬樹 (海洋研究開発機構)	Structural Uncertainties in Simulated Projection of Greenland ice sheet
研究課題5. 温室効果気体		
P05-063	伊藤昭彦 (国立環境研究所)	将来の気候変動が北半球高緯度域の陸域炭素収支に与える影響: ISI-MIP データを用いた解析
P05-064	Shamil Maksyutov (国立環境研究所)	High-resolution CO2 flux inversion model for regional study in Siberia
P05-065	Dmitry Belikov (国立極地研究所/国立環境研究所)	Simulation of CO2 and CH4 in the subarctic using coupled Eulerian-Lagrangian model
P05-066	Kunchala Ravi Kumar (国立極地研究所/海洋研究開発機構)	Assessment of ACTM global model performance using CONTRAIL aircraft observations of greenhouse gases
P05-067	石島健太郎 (海洋研究開発機構)	Analysis of atmospheric methane from Siberian tower observation using chemistry transport model
P05-068	笹川基樹 (国立環境研究所)	西シベリアにおけるタワー観測ネットワークを用いた二酸化炭素・メタンの連続測定
P05-069	後藤大輔 (国立極地研究所)	スヴァールバル諸島ニーオルスンにおける酸素/窒素および大気ポテンシャル酸素の高精度連続観測
P05-070	吉川久幸 (北海道大学)	Variations in atmospheric CO2, CH4, CO and BC on Rishiri Island, northern Japan
P05-071	豊田栄 (東京工業大学)	北極域における大気中N2O isotopoculeの時空間分布
P05-072	豊田栄 (東京工業大学)	北極海における溶存メタンおよび一酸化二窒素の濃度と isotopocule の分布
P05-073	遠嶋康徳 (国立環境研究所)	Atmospheric CH4 distributions observed during Arctic cruises of R/V Mirai in 2012-2015
P05-074	安中さやか (海洋研究開発機構)	北極海CO2フラックスの推定: 広域分布と季節・経年変化
P05-075	石戸谷重之 (産業技術総合研究所)	北極域における大気ポテンシャル酸素と大気海洋間酸素フラックスの船舶観測
研究課題6. 海洋生態系		
P06-076	中野渡拓也 (国立極地研究所/北海道大学低温科学研究所)	北極海の海水変動予測における海洋熱の重要性
P06-077	伊東素代 (海洋研究開発機構)	北極海パロ-海底谷における流量、淡水、熱輸送量の長期変動
P06-078	西野茂人 (海洋研究開発機構)	Water mass characteristics and their temporal changes in a biological hotspot in the southern Chukchi Sea
P06-079	溝端浩平 (東京海洋大学)	Wintertime variability of the Beaufort Gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations
P06-080	漢那直也 (北海道大学低温科学研究所)	A role of sea ice melt water on iron supply to surface water in the polar and the sub-polar Ocean
P06-081	近藤能子 (長崎大学)	Transport of trace metals (Mn, Fe, Ni, Zn and Cd) in the western Arctic Ocean (Chukchi Sea and Canada Basin) in summer 2012
P06-082	大木淳之 (北海道大学)	Distributions of volatile organic iodine compounds in the western Arctic Ocean (Chukchi Sea and Canada Basin) in summer 2012 - a possibility of production in relation to the degradation of organic matter
P06-083	内宮万里央 (国立極地研究所/東京大学大気海洋研究所)	Strong wind events resulted in enhanced bacterial production in the Chukchi Shelf, western Arctic Ocean
P06-084	夫津木亮介 (北海道大学)	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

P06-085	平譚享 (北海道大学)	北極海環境変動研究:海水減少と海洋生態系の変化 おしよる丸によるベーリング・チャクチ海観測航海報告
P06-086	藤原周 (海洋研究開発機構)	海水減少に対する基礎生産者の応答
P06-087	和賀久朋 (北海道大学)	Distributional shifts in size structure of phytoplankton community
P06-088	喜多村稔 (海洋研究開発機構)	チャクチ海南部における動物プランクトン量の季節変動
P06-089	松野孝平 (国立極地研究所/北海道大学)	Characteristics of the summer decapod larvae community through Bering and Chukchi Seas
P06-090	佐々木裕子 (国立極地研究所/北海道大学)	北部ベーリング海およびチャクチ海における 北極海産・太平洋産カイアシ類の分布とその環境について
P06-091	河野唯 (北海道大学)	北部ベーリング海・チャクチ海における ホッキョクダラ(Boreogadus saida)仔魚の分布と海洋環境との関係
P06-092	西沢文吾 (北海道大学)	海洋生態系のカギ種と汚染を海鳥から探る
P06-093	西沢文吾 (北海道大学)	ベーリング海北部およびチャクチ海におけるホッキョクダラの食性と栄養状態
P06-094	國分互彦 (国立極地研究所)	ベーリング海の水温構造とハンストウミガラスの採餌行動の年変動
P06-095	佐藤信彦 (総合研究大学院大学)	The jellyfish buffet: jellyfish enhance seabird foraging opportunities by concentrating prey
P06-096	渡邊英嗣 (海洋研究開発機構)	Arctic NEMUROモデルの開発と海水域生態系研究への応用

研究課題7. 海水・北極海航路

P07-097	小野純 (海洋研究開発機構)	Prediction System for the Pan-Arctic sea ice with the MIROC Climate Model
P07-098	Waruna Arampath De Silva (国立極地研究所/東京大学)	Short-term sea ice prediction for ice navigation in the Arctic sea routes using TIGGE data
P07-099	柏瀬陽彦 (国立極地研究所/北海道大学低温科学研究所)	季節海水域化する北極海における海水-海洋アルベドフィードバック効果
P07-100	川崎高雄 (国立極地研究所/東京大学大気海洋研究所)	北極海への大西洋水流入のモデリング研究
P07-101	澤村淳司 (大阪大学)	氷海船舶の水荷重推定と構造・運動性能評価に関する研究
P07-102	尾関俊浩 (北海道教育大学)	船体着氷の成長指標と着氷対策の検討
P07-103	嶋原達也 (工学院大学)	船舶と単独氷塊との衝突に関する安全性評価手法の検討
P07-104	高木敏幸 (釧路工業高等専門学校)	船舶レーダ画像を用いた砕氷船の能力に応じた航路選択
P07-105	佐川玄輝 (株式会社ウェザーニューズ)	北極海航路に求められる海水情報の現在と展望
P07-106	今井克哉 (東京大学)	北極海航路における最適航路探索に関する研究
P07-107	大塚夏彦 (北日本港湾コンサルタント株式会社)	北極海航路における氷海航行と経済合理性

8. 北極域データアーカイブ(ADS)

PADS-01	照井健志 (国立極地研究所)	極域を対象とした衛星データ可視化Webサービスの開発と解析
PADS-02	杉村剛 (国立極地研究所)	データ特性の視覚化を目的としたオンライン可視化アプリケーションVISIONの開発

事業概要の報告-5年間の取り組みについて

プロジェクト・マネージャー 山内 恭^{1,2}、サブ・プロジェクト・マネージャー 深澤理郎^{3,1}
¹ 国立極地研究所; ² 総合研究大学院大学; ³ 海洋研究開発機構

Summary report of the 5-year Project

Takashi Yamanouchi (Project Manager)^{1,2}, Masao Fukasawa (Sub Project Manager)^{3,1}

¹National Institute of Polar Research; ²Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI); ³JAMSTEC

グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE) 北極気候変動研究プロジェクト「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である。国内39の研究機関から延べ300人の研究者が参加し、国立極地研究所が代表機関、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が参画機関を担い共同研究を実施した。その他、研究基盤を整備構築し提供したとともに、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。

本プロジェクトでは4つの戦略研究目標が提示された:

1. 北極における温暖化増幅メカニズムの解明、
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、
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水分布の将来予測。

その解明を目指して公募された22件の中から7つの研究課題を採択した:

- (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、
- (2) 環北極陸域システムの変動と気候への影響、
- (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、
- (4) 地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割、
- (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、
- (6) 北極海環境変動研究: 海氷減少と海洋生態系の変化、
- (7) 北極海航路の利用可能性評価につながる海水分布の将来予測。

このように、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であった。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ことも、本プロジェクトの特徴としている。

プロジェクトでは、2011年開始以来、北極を周る様々な場所、スバルバルから、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。特に、スバルバル・ニーオルスンには、高精度の雲レーダー (95 GHz) を設置し、大気の集中観測が行われている。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。

1957/58年の国際地球観測年 (IGY) での北海道大学中谷宇吉郎のグリーンランド氷床氷の研究から始まったわが国北極研究であるが、その後の細々とした活動、そして冷戦終結以後、活発化したものの、機関毎であったり、どうしても個別・小規模にとどまりがちであった。こうした流れの中で、本事業では様々な分野にわたる多くの研究者を糾合し、国際的にも種々の関わりを持ち、極めて画期的なプロジェクトを構築することができたと考えている。

まもなく、プロジェクト期間を終了するが、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も整備することができた。さらなる、今後の研究に期待したい。

北極気候変動にともなう東シベリア陸域環境の変化

飯島慈裕¹、朴昊澤¹、Alexander N. Fedorov²

¹ 海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター

² ロシア科学アカデミーシベリア支部・永久凍土研究所

Terrestrial environmental change in eastern Siberia in relation to Arctic climate change

Yoshihiro Iijima¹, Hotaek Park¹ and Alexander N. Fedorov²

¹Institute of Arctic Climate and Environment Research, JAMSTEC

²Melnikov Permafrost Institute, SD RAS

In eastern Siberia, the abrupt soil warming within upper permafrost layer has observed under wet hydro-climatic conditions during the warming period after 2000s. According to climatological analyses, the large positive anomalies of both rainfall and snow accumulation in eastern Siberia are caused by strengthened cyclonic pattern in these years which induce more water vapor advection. These anomalies are more enhanced than those before 1990s. The precipitation increase in the last decade led to deepening active layer accompanying with remarkable increase in soil moisture. The perennially waterlogged conditions had exacerbated the boreal forest habitat; that is, larch trees had widely withered and died in eastern Siberia detected by field observation and satellite (ALOS-PALSAR) remote sensing analyses. The change in hydro-thermal regime could have important consequences on permafrost degradation with ecosystem and landscape changes in eastern Siberia.

21 世紀に入り、東シベリアでは地温の上昇と地表付近の永久凍土の融解（活動層の深化）が進行している。この地温上昇は土壌水分の増加と同調しており、気温上昇の効果に加えて、気候変動にともなう大陸上の水文気候変化が大きく影響していることが示されている。GRENE 北極研究事業期間における、現地観測、陸面モデルおよび、大気場の解析を通じて、近年の気候湿潤化の特徴とその永久凍土環境に与える影響が明らかになってきた。

気候データ解析によって、東シベリアでは、2004～2008 年にかけて、7～9 月の夏季降水量の大幅な増加と、引き続き積雪の増大が連続して進行したことが示された (Iijima et al., accepted)。これは、北極海上に現れる気圧場のダイポール構造にともなう、シベリア沿岸域の低気圧活動の強まりと対応していた。ダイポール指標の長期変化から、低気圧強化は 1998 年以降に顕著であり、2004～2008 年の 5 年間にピークとなっていた。合わせて、東シベリア上での水蒸気フラックスの収束が強まり、夏季降水および初冬の積雪の増加となったと考えられた。1997 年以前の東シベリアの夏季湿潤年と比較すると、低気圧強化域と水蒸気収束域は北極海沿岸から東シベリアに広がっており、降水増加地域の拡大と対応していた。

20 世紀後半から現在にかけて、降水量と地温変動との関係を現地観測結果から見たところ、冬季積雪とは常に正の相関（積雪による冬季の地温低下抑制が永久凍土地域で顕著に効く：Park et al., 2014）であるのに対し、夏季降水とは、1990 年代を境として前半は負相関、後半は正相関となる変化を示した。20 世紀中は降水の多→寡はその夏の冷→暑と対応しており、気温による影響を反映しているものと考えられ、2000 年以降は、多降水年がかつ暑夏年となる事例が増加しており、土壌水分の異常増加と合わせて気温上昇と複合して地温上昇に寄与しているものと考えられた。環北極域を対象にした陸面過程モデル (CHANGE) による、地温と夏季降水量との関係を見たところ、東シベリアの広範囲（永久凍土域）で、同様に負相関から正相関へ転じた地域が広がっており、降水に対する陸面環境応答が変化した地域が無視できない規模で広がっていることが示された。

このような、気候湿潤化による陸面環境変化として、現地に広く分布する永久凍土の表層（活動層：地表面の夏季の融解層）が多年にわたり過湿・湛水状態となり、その後、カラマツを主要樹種とするタイガ（北方林）のいたるところで、樹木の葉が枯れ、枯死する現象が広く現れた。水域・森林バイオマス・土壌水分に感度を有する ALOS-PALSAR を用いて、この地域の広域変化の特徴を検出したところ、レナ河中流域全体の約 7% が湿潤ストレスによる影響を受けて、森林荒廃が進んだとみなされる変化域として抽出された。森林変化域は、サーモカルスト湖が発達する地域や、段丘の谷沿いに沿って分布しており、永久凍土荒廃に伴う地形変化域とよく対応することが示された。以上の結果から、2000 年代以降の北極気候変動に伴う東シベリアでの水文気候変化が、陸域表層の永久凍土景観に広域かつ長期的に影響を及ぼす実態が明らかとなった。

References

Iijima, Y., T. Nakamura, H. Park, Y. Tachibana, and A. N. Fedorov, Enhancement of Arctic storm activity in relation to permafrost degradation in eastern Siberia, *International Journal of Climatology*, accepted.

Park H., A.B. Sherstiukov, A.N. Fedorov, I.V. Polyakov and J.E. Walsh, An observation-based assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in Russia, *Environmental Research Letters*, 9, 064026, 2014.

周極域亜寒帯林の現存量・構造変化の歴史と気候変動に対する反応

大澤晃^{1,2}、藤井創一朗²、芳賀祐馬²、安江恒³、松浦陽次郎⁴、藤井一至⁴、梶本卓也⁴、森下智陽⁵、田村行宏¹、Juha Metsaranta⁶、Leena Finer⁷、Raisa Makipaa⁸、Jukka Pumpanen⁹、Shinya Sugita^{10,2}、Margus Pensa¹⁰、Olga Zyryanova¹¹、Anatoly Prokushkin¹¹、Mouctar Kamara¹

¹ 京都大学大学院地球環境学堂、² 京都大学大学院農学研究科、³ 信州大学農学部、⁴ 森林総合研究所、⁵ 森林総合研究所四国支所、⁶ Northern Forest Research Centre, Forestry Canada、⁷ Natural Resources Institute Finland(LUKE), Joensuu、⁸ Natural Resources Institute Finland(LUKE), Vantaa、⁹ Department of Forest Sciences, University of Helsinki、¹⁰ Institute of Ecology, Tallinn University (Estonia)、¹¹ Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences

気候温暖化が急速に起こりつつあるとされる北半球高緯度地域では、亜寒帯林の成長減少と構造の急変が危惧されている。気温上昇とともに乾燥化が進んでいる地域で森林現存量の成長が減少傾向にあることが、約 80 年間の毎木調査データを用いてカナダ南部地域で近年示され(Ma et al. 2012)、その危惧が現実になりつつあることが明らかにされた。しかし、人口密度の低い高緯度地域で長期的な森林測定データの蓄積があることはまれであり、広範囲の周極域亜寒帯林がどのように反応しつつあるかを知ることは容易でない。本研究では、過去の毎木調査データに頼らずに任意の森林群落の過去の地上部現存量、林分密度、現存量増加速度(成長量)などを推定することのできる林分構造復元法(Osawa, et al. 2000; 2005)を用いることにより、過去のデータが存在しないマツ、トウヒ、ポプラなどが優占する森林の過去数十年から百数十年にわたる林分構造とその変化の推定をおこなった。

今回の報告に含まれる解析対象はカナダ北西準州 Fort Smith(60°N,112°W)近郊にあるバンクスマツ(*Pinus banksiana*)林 4 林分、マリアナトウヒ(*Picea mariana*)林 3 林分、ポプラ(*Populus tremuloides*)林 2 林分、および中央シベリアのトゥラ(64°N, 100°E)郊外のグメリンカラマツ(*Larix gmelinii*)林 1 林分の合計 10 林分である。中期間(10 年程度のスケール)および短期間(1 年スケール)の森林成長変動が気候変動とどのように対応しているか、年平均気温を用いた相関分析とともに、月ごとのデータを用いた多変量回帰分析による応答関数解析をおこなった。中期間の成長変動(中期的現存量偏差)は、林分復元法によって 5 年または 10 年ごとに推定した地上部現存量と、この現存量推定値に Hozumi の *u-w* 解析を適用してあてはめた長期的な林分現存量の成長曲線とのある年における差(現存量偏差)を計算し、この中期的現存量偏差と年平均気温との相関を解析した。年々の成長変動は、林分復元法から得られた毎年の地上部現存量から計算した年間現存量成長量と、これに 10 年程度の傾向を表すスプライン 10 曲線をあてはめて得られた傾向曲線との現存量成長量の差として定義し、この短期的現存量成長偏差と月ごとの気温または降水量データとの関係を多変量回帰分析により解析した。

中期的現存量偏差と年平均気温との関係は樹種または地域によって異なった。この現存量偏差はバンクスマツで有意な($p < 0.05$)正の相関、マリアナトウヒで有意な負の相関が観察された。一方、シベリアのグメリンカラマツでは無相関($p > 0.05$)だった。ポプラでは安定した傾向は認められなかった。つまり、中期的な現存量成長は気温が高いとバンクスマツでは促進され、マリアナトウヒでは減少し、カラマツとポプラでは気温と特別な関係を示さなかった。短期的現存量成長偏差は、バンクスマツもマリアナトウヒも共に前年夏(6、7、または 8 月)の降水量および当年 6 月の降水量と有意な($p < 0.05$)正の相関を示した。これに対し、当年 2 月の気温とは負の相関を示した。つまり、成長期の夏に降水量が多いと現存量成長が促進され、厳冬期(2 月)の気温がマイルドだと成長阻害が起こる。前者は理解しやすい。一方、後者の理由はすぐには理解が難しい。

気候の温暖化が中期的現象だと考えると、気温上昇が現存量成長に及ぼす影響は樹種ごとに異なることを今回の解析は示唆している。温暖化の進行に伴いカナダ北西部ではマリアナトウヒの現存量成長が低下する可能性がある。周極域亜寒帯林の他の地域(フィンランド、エストニア、中央シベリア、アラスカ、カナダ北西部の他地域)を含めて、得られた樹木サンプルを用いた林分構造復元作業が現在進行中であり、これら約 50 林分の成長解析に基づく総合的な分析結果が待たれる。

References

- Ma, Z., C. Peng, Q. Zhu, H. Chen, G. Yu, W. Li, X. Zhou, W. Zang, and W. Zhang. Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests, PNAS 109: 2423-2427, 2012.
- Osawa, A., A.P. Abaimov, and O.A. Zyryanova. Reconstructing structural development of even-aged larch stands in Siberia, Canadian Journal of Forest Research 30: 580-588, 2000.
- Osawa, A., N. Kurachi, Y. Matsuura, M. Jomura, Y. Kanazawa, and M. Sanada. Testing a method for reconstructing structural development of even-aged *Abies sachalinensis* stands, Trees 19: 680-693, 2005.

Past and possible future tree growth over circumpolar forest ecosystems deduced from tree-ring width, delta-¹³C and a DGVM

Shunsuke Tei^{1,2}, Atsuko Sugimoto^{1,3}, Liang Maochang⁴, Yojiro Matsuura⁵, Akira Osawa⁶, Hitoshi Yonenobu⁷, Hisashi Sato⁸, Ayumi Kotani⁹, Shin Nagai⁸, Trofim Maximov^{10,11}

¹*Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University,*

²*National Institute of Polar Research*

³*Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University,*

⁴*College of Horticulture and Gardening, Yangtze University*

⁵*Forestry and Forest Products Research Institute*

⁶*Graduate School of Global Environmental studies, Kyoto University,*

⁷*College of Education, Naruto University of Education*

⁸*Department of Environmental Geochemical Cycle Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

⁹*Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University*

¹⁰*Institute for Biological Problem of Cryolithozone*

¹¹*North-Eastern Federal University*

Arctic and boreal ecosystems are exposed to rapid and strong increases in temperature and related environmental changes under Arctic amplification. Yet, there is uncertainty how trees in these ecosystems respond to the changes due to an insufficiency of such long term records and this is where tree-rings can provide an advantage. Early dendrochronological studies in the region focused on the positive growth of trees to warmth (D'Arrigo and Jacoby, 1993). However, A number of more recent studies have demonstrated a reduced sensitivity of tree growth to rising temperatures (now referred to as “ divergence problem ”) at least since the 1960s (e.g., Wilson et al., 2007). Although several studies (e.g., Barber et al., 2000) suggested that temperature-induced drought may limit tree growth under the limited availability of soil moisture, the underlying processes for the phenomenon are not well understood.

We here investigated past tree response to climate changes, especially to warming, using retrospective analyses from tree-ring width and carbon isotope ratios (delta-¹³C) of three genera (*Larix*, *Picea* and *Pinus*) in 6 forest sites with a strong gradient of temperature and precipitation, reaching from northern Europe to northern America; Kalina (59N, 27E), Yakutsk (62N, 129E), Ust'Maya (60N, 133E), Chokurdakh (70N, 148E), Inuvik (68N, 133W) and Fort Smith (60N, 112W). The results suggest that tree response to past climate changes have varied with regions. The tree responses to warming are negative in eastern Siberia forests, resulting in decreasing trend of tree growth over past 60 years. On the other hand, the negative effect of warming is not seen in European and Canadian forests, where no decrease trend of growth is observed. The results then have been used in testing a dynamic global vegetation model (SEIB-DGVM, Sato et al., 2007). The simulated annual net primary productions (NPP) show no decreasing trend over the study period and discrepancy from tree-ring based long-term (more than half-decadal) growth variations in eastern Siberian forests, although relatively better reproductions of the model for the variations are obtained in European and Canadian forests.

The observed discrepancy in eastern Siberian forest may become more severe for future projection. We developed a climate-driven statistical growth equation that uses regional climate variables to model tree-ring width values for each site and then applied these growth models to predict how tree growth will respond to twenty-first-century climate change (RCP8.5 scenario). Although caution should be taken when extrapolating past relationships with climate into the future, we observed future continues reduction of the growth in central part of eastern Siberia, which is opposite trend from the DGVM based estimate. Our results imply that the negative effect of warming override the expected positive effects i.e., warming-induced lengthened growing season and increase in photosynthetic ratio, in arid region such as eastern Siberia, suggesting further reduction of tree growth by future warming, and no reproduction of the negative effect in the DGVM seems to be a cause for the observed discrepancy between tree-ring and DGVM estimates. The negative effect of warming for tree growth is a key process for accurate future projection of ecosystem functions and therefore further field and modeling investigations are essential to deep understanding of the underlying processes for the phenomenon.

References

- Barber, V. A., G. P. Juday and B. P. Finney, Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress, *Nature* 405, 668-673, 2000.
- Darrigo, R. D. and G. C., Jacoby, Secular trends in high northern latitude temperature reconstructions based on tree-rings, *Clim. Change* 25, 163-177, 1993.
- Sato, H., A. Itoh and T. Kohyama, SEIB-DGVM: a new dynamic global vegetation model using a spatially explicit individual based approach. *Ecol. Model.* 200, 279–307, 2007.
- Wilson, R., R. D'Arrigo, B. Buckley, U. Buntgen, J. Esper, D. Frank, B. Luckman, S. Payette, R. Vose and D. Youngblut, A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data. *J. Geophys. Res.* 112, doi:10.1029/2006JD008318, 2007.

モデル-観測連携 GTMIP の成果と将来に向けて

斉藤和之¹、森淳子^{2,1}、宮崎真³、町屋広和^{2,1}、山崎剛⁴、伊勢武史⁵、末吉哲雄²、GTMIP グループ
¹海洋研究開発機構, ²極地研究所, ³ソニック (株), ⁴東北大学, ⁵京都大学

Outcomes of and outlook from the Modeling-Field Collaboration GTMIP

Kazuyuki Saito¹, Junko Mori^{2,1}, Shin Miyazaki³, Hirokazu Machiya^{2,1}, Takeshi Yamazaki⁴, Takeshi Ise⁵, Tetsuo Sueyoshi²,
 The GTMIP group
¹JAMSTEC, ²NIPR, ³SONIC (Inc.), ⁴Tohoku U, ⁵Kyoto U

As part of the terrestrial branch of the Arctic Climate Change Research Project (GRENE-TEA), which aims to clarify the role and function of the terrestrial Arctic in the climate system and assess the influence of its changes on a global scale, this model intercomparison project (GTMIP) is designed to a) enhance communication and understanding between the modeling and field scientists (cf. Fig 1), and b) assess the uncertainty and variations stemming from variability in model implementation/design and in model outputs using climatic and historical conditions in the Arctic terrestrial regions (Miyazaki et al. 2015). GTMIP consists of two stages. The stage 1 is site simulations for the last 3 decades driven by statistically fitted data created through model-field collaborations with use of the observation data for four GRENE-TEA sites of different eco-climate background (i.e., Fairbanks, Kevo, Tiksi, and Yakutsk) (Sueyoshi et al. 2016). The stage 2 is $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ circum-Arctic simulations for 1850 to 2100 driven by outputs of the MIROC-ESM simulations for IPCC AR5 (historical and RCP8.5 scenarios), with bias-corrected by Reanalysis data. The target metrics for the model evaluation cover key processes in both physics and biogeochemistry, including energy and water budget, snow, permafrost, phenology, and carbon budget.

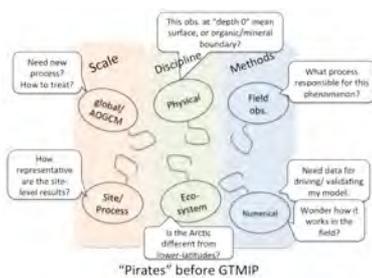


Figure 1. Collaborative schematic before and after the GTMIP.

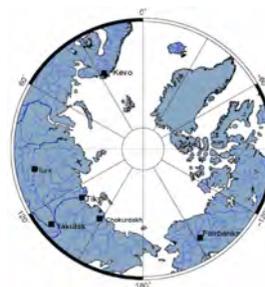


Figure 2. Sites for stage 1.

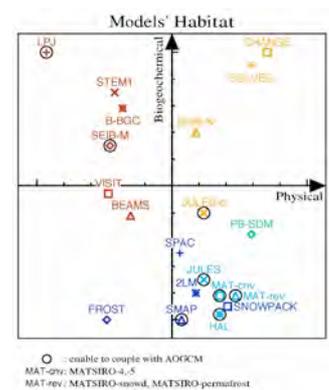


Figure 3. Participating models.

19 models of different complexity and disciplinary characteristics, ranging from detailed processes physical models to GCM-compatible land surface models to versatile physical-biogeochemical models, submitted the simulated results for the stage 1 (fig 3), and 5 models (namely, Biome-BGC, SEIB-Noah, MATSIRO-permafrost, MATSIRO-ssnowd and VISIT) for the stage 2, as of early January, 2016. Energy and water budget analysis for the stage 1 showed that latent heat flux (Q_{le}) had smaller inter-model differences than other energy fluxes—e.g., sensible (Q_h), and net radiation (R_n)—did (fig 4 shows an example for Fairbanks). Storage of water within the top 1-m soil was almost in balance, with slight increase (wetting) for Fairbanks, Kevo, and Tiksi, while small decrease (drying) for Yakutsk.

Reproducibility of snow depth largely correlates with the complexity of the physics and numbers of snow layers implemented, although no model succeeded in reproducing wind crust in Tiksi. With respect to subsurface thermal regime, importance of the snow insulation process, which was found strongly associated with realistic snow density dynamics (and hence, snow compaction processes), was demonstrated. Carbon budget was larger for the taiga sites while they are limited for the tundra site. Relative inter-model variations in the carbon budget components—especially those for exchanges between the atmosphere, i.e., gross primary production (GPP), and auto- and heterotrophic respirations (R_A and R_H , respectively)—were smallest for the Yakutsk site, primarily owing to at the site (fig 5). Since all of the participating ecosystem models assign only one plant function type that is dominant at a site, this is speculated to owe to the site's characteristics that one vegetation type (larch in

this case) dominates the budget. Net ecosystem production (NEP) largely showed positive values (sink for CO₂), but individual values varied even for the sign.

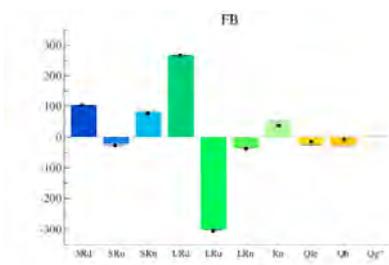


Figure 4. Energy budget (Fairbanks; W/m²). *SR* and *LR* are Short- and longwave radiation, and suffices *d* and *u* denote down- and upward. *Qg** is heat flux to the ground obtained as residual.

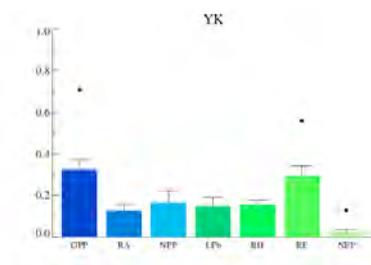


Figure 5. Carbon budget (Yakutsk; KgC/m²/year). NPP, LFB, RE are net primary production, litter fall, total respiration, total respiration.

Despite a simple seesaw pattern in temperature and precipitation increase projected under the RCP8.5 scenario between the Atlantic and Pacific sectors in the circum-Arctic (fig 6a-b), the terrestrial hydrological response, revealed by evapotranspiration and soil water storage, showed more complex spatial patterns influenced by regional to local geography and topography; drier in the continental interiors while wetter along the coastal (fig 6c-d).

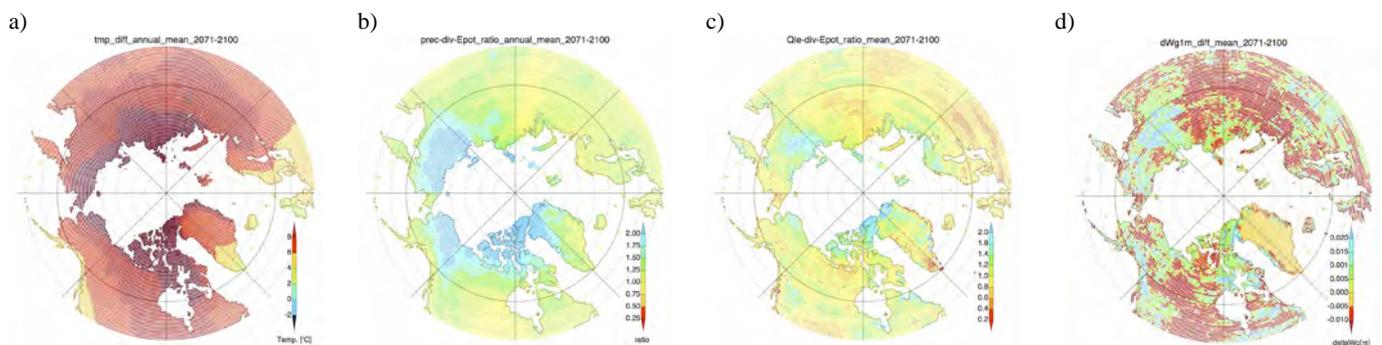


Figure 6. Projected changes in a) temperature, b) wetness index, defined as precipitation divided by the potential evaporation, c) evapotranspiration efficiency, defined by latent heat flux divided by the potential evaporation, and d) soil water storage in the upper 1-m layer for 2071-2100. Changes are shown in terms of difference from the baseline (the 1981-2010 average) for a) and d), while shown in terms of ratio to the baseline for b) and c).

Other than the scientific outcomes mentioned above, the GTMIP brought qualitative and transformative progresses on the following five aspects; i) establishment of communications and a common community between domestic modeling and field scientists working on the terrestrial Arctic, ii) deepening mutual understanding among modeling scientists, bridging different disciplines (physics, biogeochemistry, and ecosystem) and scales (plot/local to regional to global) of interest, iii) conduct of collaborations between the above two communities as a team, iv) creation of observation-fitted, quality-controlled, open-access common forcing data through the collaboration, and v) creation of standardized, ready-to-use validation data sets compiled from different sources that had followed different protocol and conventions among sites, research groups and disciplines.

It is an apparent trend in the international Arctic research that groups and projects consisting of the modeling and field science communities of different domains (e.g., disciplines or geographical locations) collaborate together to produce substantial outcomes. This GTMIP activity has been one of the forerunners in the area of terrestrial research with distinct scope in target and unique range of participants. This momentum is being inherited to the currently conducted and/or planned activities, not limited to the Arctic.

References

- Miyazaki et al. 2015: The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIP): overview and experiment protocol for Stage 1. *Geosci. Model Dev.*, 8, 1–16, doi:10.5194/gmd-8-1-2015.
- Sueyoshi et al. 2016: The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIP) stage 1 forcing dataset. accepted, *ESSD*.

スバルバル諸島ニーオルスン及びカナダ・チャーチルにおける 大気中の温室効果気体および関連気体の変動

森本真司¹、後藤大輔²、村山昌平³、石戸谷重之³、藤田遼¹、石島健太郎⁴、P.K.Patra⁴、青木周司¹、
¹東北大学、²国立極地研究所、²産業技術総合研究所、⁴JAMSTEC

Temporal variations of atmospheric greenhouse gases and related constituents in Ny-Ålesund, Svalbard and Churchill, Canada

S. Morimoto¹, D. Goto², S. Murayama³, S. Ishidoya³, R. Fujita¹, K. Ishijima, P.K.Patra and S. Aoki¹
¹Tohoku Univ., ²National Institute of Polar Research
³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
⁴JAMSTEC

北極域における温室効果気体の変動を明らかにし、その放出源・吸収源に関する情報を得るために、我々はスバルバル諸島・ニーオルスン(北緯 79.0 度、東経 11.9 度)とカナダ・マニトバ州チャーチル(北緯 58.8 度、西経 94.1 度)において、温室効果気体濃度・同位体比及び関連気体濃度の地上高精度時系列観測を継続している。それぞれの観測点における観測項目・観測データの時間分解能を表 1 に示す。

ニーオルスンでは、1991 年に週に 1 度の大気採取による CO₂、CH₄ 濃度観測を開始し、その後順次観測項目を増やしてきた。より詳細な温室効果気体及び関連気体の変動を明らかにするために、2012 年及び 2013 年からそれぞれ、大気中の O₂ 濃度 ($\delta(O_2/N_2)$ と表記する) と CO₂、CH₄、CO 濃度の連続観測を開始した。 $\delta(O_2/N_2)$ 連続観測からは、特に 5-6 月に数日周期の大きな (O₂ モル比換算で 10 ppm 以上の) O₂ 濃度変動が観測された。[O₂] + 1.1[CO₂]で定義される大気ポテンシャル酸素 (APO)、3 次元大気輸送モデルを用いたタグ・トレーサー実験、及び衛星海色データを用いた解析により、このような変動は主にグリーンランド海、ノルウェー海、バレンツ海における海洋生物のブルーミングによる海洋からの O₂ 放出に起因すること、そして APO 観測から海洋生物活動に関する情報が得られることが示された。一方、CO₂、CH₄、CO 濃度の連続観測によって、これらの様々な時間スケールでの変動が明らかにされた。12 月～3 月の冬期間にこれら 3 成分が同期して上昇する短周期変動が多数回観測されているが、これらの変動がヨーロッパ・シベリア域からの化石燃料漏洩・燃焼の影響を受けた気塊の流入に起因することが明らかになった。また、3 次元大気輸送モデルによるフォワード計算及びタグ・トレーサー実験により、CO₂ 濃度の季節変化が陸上生物圏による CO₂ 固定・放出量の季節変化に起因すること、冬期および夏期の CH₄ 濃度の変動には、それぞれ人為起源 CH₄、湿地起源 CH₄ の影響を強く受けていることが示された。

ニーオルスンおよびチャーチルにおいて、大気中 CH₄ 濃度と CH₄ の炭素・水素同位体比 ($\delta^{13}C-CH_4$ 、 $\delta D-CH_4$) の系統的な観測を実施した。CH₄ 濃度、 $\delta^{13}C-CH_4$ 、 $\delta D-CH_4$ は明瞭な季節変化を示し、さらに 2006 年以降 CH₄ 濃度の増加と $\delta^{13}C-CH_4$ の減少が観測された。¹³CH₄ と CH₃D それぞれについて収支式を解くことにより、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いることが示された。これは、タグ・トレーサー実験による推定と整合的である。また、微生物起源 CH₄ 放出の極大は、チャーチルがニーオルスンよりも約 1 ヶ月早いことも示唆された。ニーオルスンにおける CH₄ 濃度と $\delta^{13}C-CH_4$ の観測から、2006 年以降に観測された CH₄ 濃度の急増は、微生物起源 CH₄ 放出量の増加によって生じていたことが明らかになった。

Table 1. Observed components and frequencies at Ny-Ålesund and Churchill

Site	Components	Observation Frequency
Ny-Ålesund	CO ₂ , CH ₄ , CO, O ₂ /N ₂ ratio	continuous
	CO ₂ , CH ₄ , CO, N ₂ O, SF ₆ , O ₂ /N ₂ ratio, Ar/N ₂ ratio, Isotopes (CO ₂ , CH ₄)	weekly
Churchill	CO ₂ , CH ₄	continuous (by Meteorol. Service Canada)
	Isotopes (CH ₄)	twice a week

チャクチ海とカナダ海盆域における海洋表層の二酸化炭素とメタンの分布及び変動要因

石井雅男¹、笹野大輔¹、小杉如央¹、石戸谷重之²、遠嶋康徳³、安中さやか⁴、内田 裕⁴、村田昌彦⁴、西野茂人⁴、
菊地隆⁴、工藤久志⁵、豊田 栄⁵、亀山宗彦⁶、吉川久幸⁶

¹ 気象研究所、² 産業技術総合研究所、³ 国立環境研究所、⁴ 東京工業大学、⁵ 海洋研究開発機構、⁶ 北海道大学

Variability of carbon dioxide and methane in surface layer of the Chukchi Sea and Canada Basin

Masao Ishii¹, Daisuke Sasano¹, Naohiro Kosugi¹, Shigeyuki Ishidoya², Yasunori Tohjima³, Hiroshi Uchida⁴, Sayaka Yasunaka⁴,
Akihiko Murata⁴, Shigeto Nishino⁴, Takashi Kikuchi⁴, Kushi Kudo⁵, Sakae Toyoda⁵, Sohiko Kameyama⁶, Hisayuki Y. Inoue⁶

¹ Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan

² Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japan

³ National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

⁴ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan

⁵ Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan

⁶ Hokkaido University, Sapporo, Japan

海洋地球研究船「みらい」によるチャクチ海・カナダ海盆域への4航海（MR12E-03、MR13-06、MR14-05、MR15-03）に参加し、2012年から2015年の4年間、北極海で開水面積が季節的に最大になる毎年9月頃に、大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度とメタン(CH₄)濃度、海洋表層のCO₂分圧、CH₄分圧、全炭酸濃度、溶存酸素濃度、水温、塩分などの航走観測を行った。また、観測データから海洋表層の全アルカリ度の分布も計算で求め、その塩分分布との関係から、表層海水中の海氷融解水や河川水の混合比の分布についても評価した。これらの観測結果に基づいて、CO₂分圧やCH₄分圧の変化の実態や、生物活動や海氷融解の影響などを明らかにした。

大陸棚上のチャクチ海では、夏になると生物生産が活発になって海洋表層のCO₂分圧が著しく下がり（< 300 μatm）、大気CO₂の強い吸収域になっていた。一方、カナダ海盆域では、開氷後に海洋表層に海氷融解水が流入し、融解水が栄養塩を含まないために表面付近の生物生産が抑制されており、そのため海洋表層のCO₂分圧の低下もチャクチ海に比べると小さかった（図左）。このことは、今後、夏の開氷域の拡大がさらに進んでも、北極海のCO₂吸収が必ずしも大きくは増えないことを示唆する。

CH₄分圧の観測では、キャピティールリングダウン分光法の導入に成功した。これにより、ガスクロマトグラフによる従来の測定法に比べて高空間解像度の航走観測を行うことができた。チャクチ海やカナダ海盆域では、他の海域と同様に、海洋表層のCH₄は概して大気に対して過飽和の傾向にあったが、特にバロー岬付近の沿岸域では約6 μatm（飽和度~300%）に達する高いCH₄スポットが見つかった。この海域では、CO₂分圧も高いことなどから、このCH₄分圧スポットは、局所的な海底堆積物の巻き上がりに起因すると考えられる。一方、西経169度付近の大陸棚斜面上でも、およそ3 μatmのCH₄スポットが見つかった。この海域では、バロー沖とは反対にCO₂分圧が著しく低くなっており、高いCH₄は現場の生物生産に起因するものと推定される。

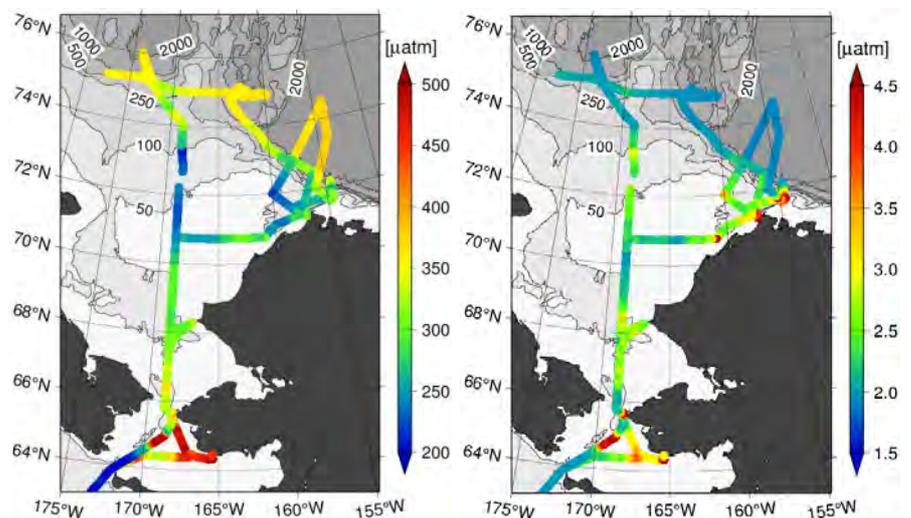


図 MR12-E03 航海（2012年9月～10月）で観測したチャクチ海とカナダ海盆域の海洋表層のCO₂分圧（左）とCH₄分圧（右）の分布

北極域上空における温室効果気体の変動

町田敏暢¹、澤庸介²、松枝秀和²、丹羽洋介²、坪井一寛²、勝又啓一¹、笹川基樹¹、
村山昌平³、森本真司⁴、豊田栄⁵、青木周司⁴

¹ 国立環境研究所

² 気象研究所

³ 産業技術総合研究所

⁴ 東北大学

⁵ 東京工業大学

研究課題「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：青木周司）では、北極域上空における温室効果気体の空間分布やその季節変動ならびに経年変動を明らかにするために、航空機観測サブグループを組織し、1) 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、2) 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温室効果気体の濃度を分析する方法で実施されている。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。また、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、亜酸化窒素(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。

一方民間航空機を使った観測は、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、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、N₂O、六弗化硫黄(SF₆)、一酸化炭素(CO)、水素(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)を用いて行われたが、ASEを搭載できる航空機が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継続した。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。

Figure 1は圏界面からの温位差($\Delta\Theta$)ごとのサンプルのCO₂濃度、CH₄濃度、N₂O濃度、SF₆濃度の時系列である(Sawa et al., 2015)。 $\Delta\Theta$ が負の値は対流圏の空気であることを、正の値は成層圏であることを示す。上部対流圏のCO₂濃度は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。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。N₂Oは対流圏での寿命が長いのために濃度の季節変動は見だしにくい。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方向の濃度差が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、上部対流圏では濃度の季節変動が見られず、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、今回成層圏で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37.5-50Kの下部成層圏大気は5月には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)。

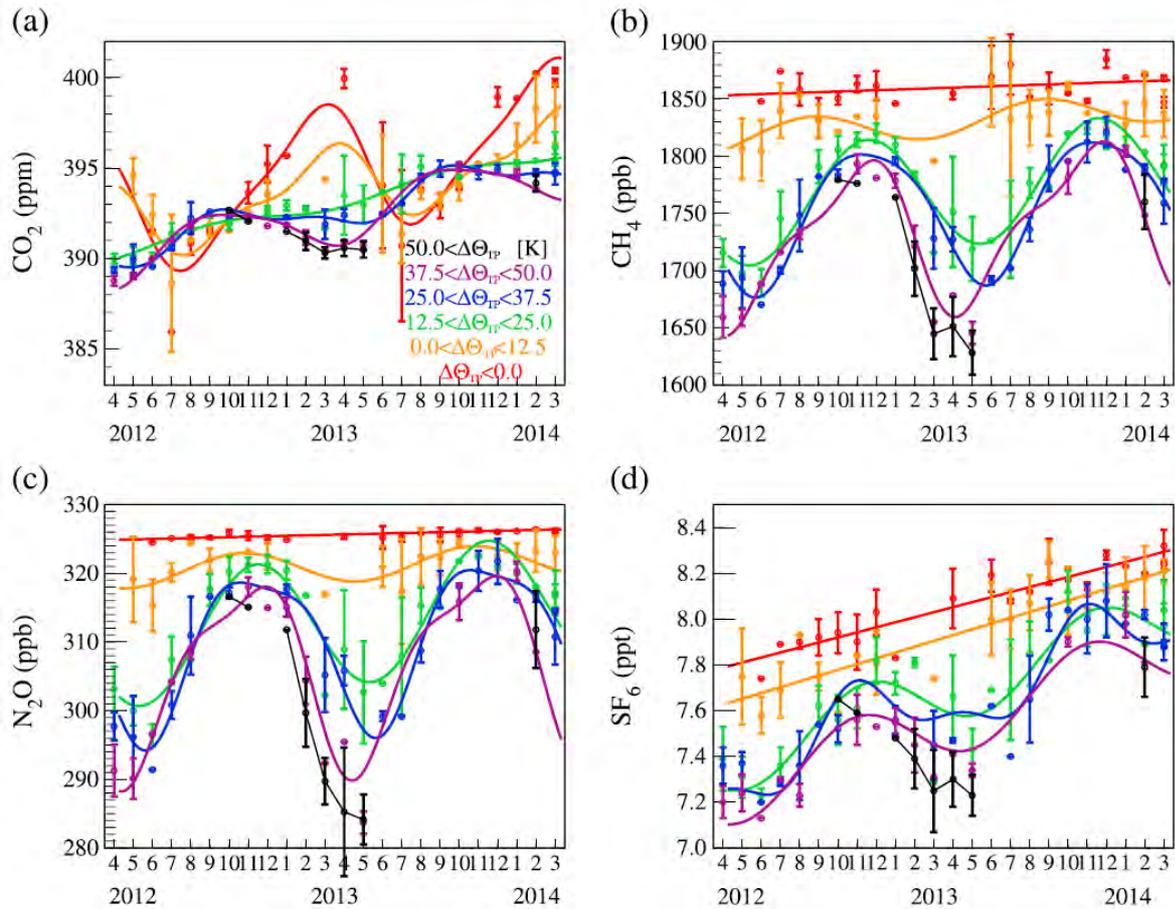


Figure 1. 2012年4月から2014年3月にかけて北極域上空の上部対流圏と下部成層圏で観測された(a) CO₂濃度、(b) CH₄濃度、(c) N₂O濃度、(d) SF₆濃度の時系列。色の違いは圏界面からの温位差を表す。実線はそれぞれの温位差のデータに対して直線と調和関数で最小二乗フィッティングしたもの。

References

Sawa, Y., T. Machida, H. Matsueda, Y. Niwa, K. Tsuboi, S. Murayama, S. Morimoto, and S. Aoki (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:10.1002/2014GL062734.

Modelling of greenhouse gases and related species in the Arctic environment

P. K. Patra¹, T. Saeki¹, K. Ishijima¹, K. Ravi Kumar², S. Taguchi³, D. Belikov⁴, S. Makyutov⁴, Y. Niwa⁵, T. Maki⁵,
D. Goto², Y. Tohjima⁴, S. Ishidoya³, S. Morimoto⁶, S. Aoki⁶, K. Takata²

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokohama, Japan

²National Institute for Polar Research (NIPR), Tokyo, Japan

³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Japan

⁴National Institute for Environmental Studies (NIES), Tsukuba, Japan

⁵Meteorological Research Institute (MRI), Tsukuba, Japan

⁶Tohoku University, Sendai, Japan

Numerical modelling of greenhouse gases (GHGs) has become an integral part for understanding amplitude and variability in their concentrations and sources/sinks, atmospheric transport and climate implication. Carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) are the three major species studied in the Arctic Green Network of Excellence (GRENE), a programme funded by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology-Japan (MEXT). In addition some of the ozone depleting substances, e.g., methyl chloroform (CH₃CCl₃), have provided strong constrain on the global mean abundance of hydroxyl (OH) radical and its relative abundance in the northern and southern hemispheres (NH/SH OH ratio; Patra et al., 2014). Being the main destroyer of many of the GHGs (e.g., CH₄, hydrofluorocarbons), accurate quantification of OH was needed for estimation of CH₄ sink in the troposphere, and thus the sources on the Earth's surface by inverse modelling (Patra et al., 2016). OH is also contributes to chemical production of CO₂, up to ~50% of land/ocean sink. The modellers are also required to verify the accuracy of model transport using tracers of short (e.g., ²²²Rn with 3.8 days) and long (SF₆ with 3200 yrs) lifetimes. For understanding of the carbon cycle science, analyses of oxygen (O₂/N₂) variability are also conducted. List of chemistry-transport models (CTMs) participating in the Arctic GRENE programme are given Table 1.

Table 1. Summary of atmospheric models participated in the Arctic-GRENE project (✓denotes forward simulation of concentrations, and ☑ denotes both forward simulations and regional sources/sinks inverse modeling using the model).

Model Name*	Institution	Chemical species simulated for carbon, nitrogen cycle studies and atmospheric transport						
		CO ₂	O ₂ /N ₂	CH ₄	N ₂ O	SF ₆	CH ₃ CCl ₃	²²² Rn
ACTM	JAMSTEC	☑	✓	☑	☑	✓	✓	✓
JMA-CDTM	MRI/JMA	☑				✓		✓
NICAM-TM	MRI	☑		✓		✓		✓
NIES-TMi8	NIES	☑	✓	☑		✓		✓
STAG	AIST	☑	✓			✓		✓
MJ98-CDTM	MRI/JMA	☑				✓		✓

*Detailed description of models can be found in Patra et al. (2014) for ACTM, Maki et al. (2013) for JMA-CDTM, Niwa et al. (2012) for NICAM-TM, Belikov et al. (2013) for NIES-TMi8, Taguchi et al. (2013) for STAG, Deushi and Shibata for MJ98-CDTM.

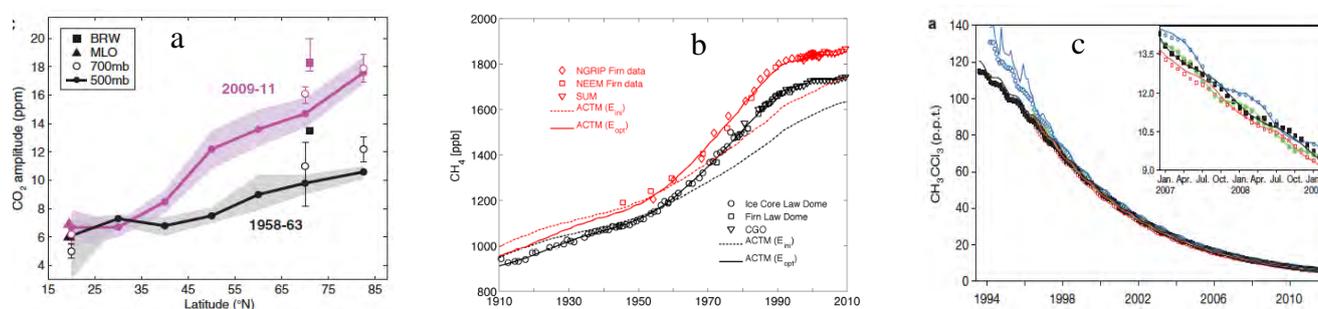


Figure 1. Examples of recent changes in GHGs and related species concentrations; left (a): observed CO₂ seasonal cycle amplitude change since the International Geophysical Year (from Graven et al., 2013; copyright Science), center (b): model - observation comparison of CH₄ over the past 100 years (Ghosh et al., 2015), right (c): simulation of observed CH₃CCl₃ decay for estimation OH in troposphere (Patra et al., 2014; copyright Nature). The detailed modelling capabilities of different participating groups are listed in Table 1.

Figure 1 shows examples of observed and model simulated concentrations of CO₂, CH₄ and CH₃CCl₃. Using the direct CO₂ measurements at the surface sites and aircrafts in the lower-middle troposphere during 1958 and 2011, an increase in seasonal amplitude of CO₂ throughout the troposphere is detected (Graven et al., 2013). The detection of longterm trends in GHGs is key to track the changes in

biospheric and anthropogenic activities on the Earth's surface, and it is suggested that the CO₂ seasonal amplitude increase with time is mainly caused by greater carbon assimilation in the summer months over the boreal latitudes. Using model simulations and analysis of ¹³C isotopic fractionation in atmospheric CH₄ over the past 100 years (Fig. 1b), the fastest increase rate during 1955-1990 is attributed to enhanced biomass burning (Ghosh et al., 2015). For modelling of atmospheric CH₄, the transport and chemistry in ACTM have been evaluated using SF₆ and CH₃CCl₃ (Patra et al., 2014). We are continuing to collaborate with various observational groups in Japan for further elucidating the variations in GHGs in the Arctic region, e.g., model results are being used for analysis of the observational data collected as a part of the Arctic GRENE project; e.g., O₂/N₂ (Goto et al.; Ishidoya et al., in prep.), CH₄ on the ship cruises (Tohjima et al., 2016).

Several inverse modeling schemes are also being developed using forward transport models developed in AIST, JAMSTEC, JMA, MRI and NIES. Figure 2b shows examples of CO₂ fluxes estimated for the arctic region in comparison with the global total fluxes for the land and ocean regions as estimated by ACTM in JAMSTEC. Analyses of CO₂ fluxes for different parts of the globe suggest that the difference between winter release and summer uptake is increasing in the boreal regions (Fig. 2c using NICAM-TM at MRI; Niwa et al., 2012, updated) and that the flux amplitude change is mainly governed by the summer uptake increase (Welp et al., 2016). A multi-model analysis of CO₂ inversion fluxes using the flux tower measurements at Yakutsk, in Siberia and biogeochemical cycle models is being conducted for understanding the trends in CO₂ fluxes due to climate variations (Takata et al., 2015, also in prep.).

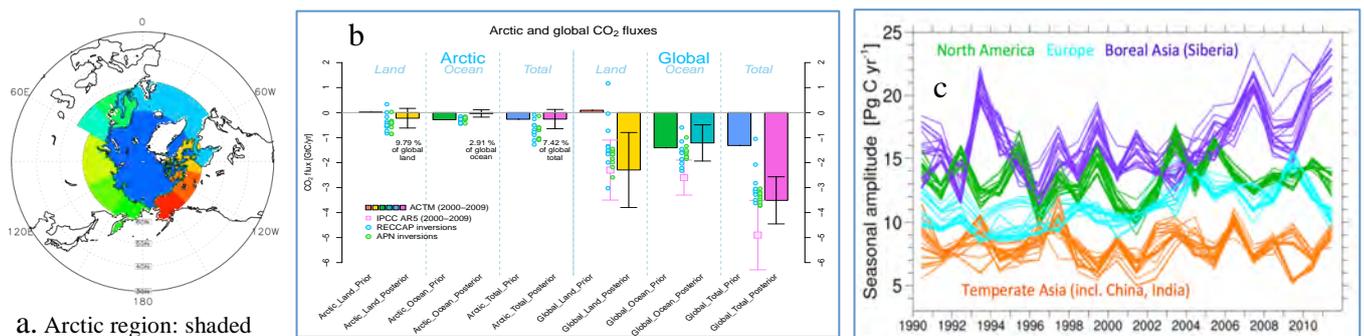


Figure 2. Distribution of CO₂ sources and sinks around the Arctic region (a) compared to the global totals as simulated by ACTM (b; middle panel), and CO₂ flux amplitude change for 4 major regions in the Northern Hemisphere by NICAM-TM (c: right panel).

References

- Belikov, D. A., S. Maksyutov, M. Krol, A. Fraser, M. Rigby, H. Bian, et al., Off-line algorithm for calculation of vertical tracer transport in the troposphere due to deep convection, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1093-1114, 2013.
- Ghosh, A., P.K. Patra, K. Ishijima, T. Umezawa, A. Ito, D.M. Etheridge, S. Sugawara, K. Kawamura, et al., Variations in global methane sources and sinks during 1910-2010, *Atmos. Chem. Phys.*, 2595-2612, 2015.
- Graven, H.D., R.F. Keeling, S.C. Piper, P.K. Patra, B.B. Stephens, S.C. Wofsy, L.R. Welp, et al., Enhanced seasonal exchange of CO₂ by northern ecosystems since 1960, *Science*, 341, 1085-1089, 2013.
- Maki, T., M. Ikegami, T. Fujita, T. Hirahara, K. Yamada, et al., New technique to analyse global distributions of CO₂ concentrations and fluxes from non-processed observational data, *Tellus*, 62B, 797-809, 2010.
- Niwa, Y., T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, T. J. Schuck, et al., Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO₂ fluxes using passenger aircraft based measurements, *J. Geophys. Res.*, 117, D11303, 2012.
- Patra, P.K., M.C. Krol, S.A. Montzka, T. Arnold, E.L. Atlas, B.R. Lintner, B.B. Stephens, B. Xiang, et al., Observational evidence for interhemispheric hydroxyl parity, *Nature*, 513, 219-223, 2014.
- Patra, P.K., T. Saeki, E.J. Dlugokencky, K. Ishijima, T. Umezawa, A. Ito, S. Aoki, S. Morimoto, et al., Regional emission and loss budgets of atmospheric methane (2002-2012), *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 94, 83-105, 2016.
- Taguchi, S., A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on analyzed winds: Model description and simulation results for TRANSCOM. *J. Geophys. Res.*, 101, 15099-15110, 1996.
- Takata, K., P.K. Patra, A. Kotani, D. Belikov, J. Mori, et al., Comparison of carbon fluxes estimated by top-down and bottom-up methods - a case study at Yakutsk, Siberia, The 6th Symposium on Polar Science (IAP27), NIPR, Tokyo, Nov. 2015.
- Tohjima, Y., K. Katsumata, J. Matsushita, D. Sasano, N. Kosugi, S. Ishidoya, K. Ishijima and P.K. Patra, Atmospheric CH₄ distributions observed during Arctic cruises of R/V Mirai in 2012-2015, This meeting, NIPR, Tokyo, Mar. 2016.
- Welp, L.R., P.K. Patra, C. Rödenbeck, R. Nemani, J. Bi, S.C. Piper, and R.F. Keeling, Increasing summer net CO₂ uptake in high northern ecosystems inferred from atmospheric inversions and remote sensing, *Atmos. Chem. Phys. (Discuss)*, submitted, 2016.
- Deushi, M., and K. Shibata, Development of an MRI Chemistry-Climate Model ver. 2 for the Study of Tropospheric and Stratospheric Chemistry. *Pap. Meteor. Geophys.*, 64, 1-46, 2011.

北極域データアーカイブの開発と課題

矢吹裕伯^{1,2}, 杉村 剛¹, 照井健志¹

¹ 国立極地研究所

² 海洋研究開発機構

北極域データアーカイブ(Arctic Data archive System : ADS)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」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内でそれらが円滑に利用できるための仕組みを提供し、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開発・運用を行った。

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” の中の 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を目指した。

ADS は、運用を始めて実質 4 年目を迎え、GRENE 北極プログラムの進行と共に様々な観測データだけではなく、北極域研究プロジェクトで研究解析された研究プロダクトが登録・公開されつつある。ADS では観測研究者がこれまであまり得意としてこなかった、グリッドデータ(衛星やモデルシミュレーション)の時系列データの可視化システム(VISION)を構築しサービスを開始している。広域の変動を解析するために必要なデータとして、衛星データやモデルシミュレーションデータがある、これらのデータはポイントスケールで解析を行う観測研究者にとっては得意な部分ではなかった。これらの空間変動を簡単に可視化できる VISION は、観測研究者にとっては、現象の理解だけでなく、さらには観測の設計にとっても有効なものとなり得ると共に、一般のユーザにとっても身近にグリッドデータの利用が可能になる。また ADS では JAXA と共同で地球観測衛星データ(AMSR2)を利用した、南北極域の海氷密接度、海面水温及び積雪状況を研究者だけではなく、一般の方々に広く紹介することを目的として準リアルタイム極域環境監視モニター(VISHOP: Visualization Service of Horizontal scale Observations at Polar region)のサービスを開始した。このサービスでは、衛星プロダクトの可視化だけでなく、GRENE 北極プロジェクトに参画する東京大学山口研究室提供の 2015 年の北極海の海氷分布予測の公開を行っている。このように、ADS は、現場観測、収集データ、衛星データ、数値実験データ等のデータセットの収集・公開をするだけでなく、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の解明、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統合的解析プラットフォームとして位置付けられるまでに開発が進んだと考えられる。

ADS では近年のオープンサイエンスのポリシーに従い、メタデータの国際的な流通を行うことを目的として、メタデータの連携を行うインターフェースとして OAI-PMH2 と GI-CAT の実装を行った。ADS では、GEO-Poral との連携研究を開始すると共に、WMO の GCW との連携を開始した。今後、様々なデータ機関との連携を推進しメタデータの国際的な流通を促進する予定である。また ADS では日本で唯一の DOI 発行機関である JaLC を通じてデータへの DOI 付与を行いサービスを始めている。これは、データ提供者のデータ登録へのインセンティブ確保につながると考えられる。

今後 ADS では GRENE 北極プロジェクトだけではなく、データ提供者へのメリットを確保すると共に、様々な北極域研究のデータの収集・公開を行い、研究者さらには一般の方々に見える北極情報を提供していく予定である。

北極圏の氷河群変動と気候影響

榎本浩之^{1,2}、張 勇¹、大畑哲夫¹、門田勤³、白川龍生⁴、杉山慎⁵¹ 国立極地研究所、² 総合研究大学院大学、³ 海洋研究開発機構、⁴ 北見工業大学、⁵ 北海道大学

Glacier Change in the Arctic and Connection to Climate

Hiroyuki Enomoto^{1,2}, Yong Zhang¹, Tetsuo Ohata¹, Tsutomu Kadota³, Tatsuo Shirakawa⁴ and Shin Sugiyama⁵¹ National Institute of Polar Research² The Graduate University for Advanced Studies³ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology⁴ Kitami Institute of Technology⁵ Hokkaido University

このプロジェクトの中では、シベリアとグリーンランドの氷河の現地調査、北極広域の氷河インベントリ情報による変動解析を行なった(Fig.1)。温暖化により夏季気温の増加により消耗が進むが、一方で温暖化は大気中の水蒸気量を増加させ、氷河を涵養する固体降水量を増加することも予想されている。氷河の存在する山岳域は観測情報が乏しいので、プロジェクトの中では、氷河域を含む地域での領域モデル及び気候モデルの出力を山岳地域の降水量の高度変化を取り込んで推定した。

グリーンランド氷床の融解は、近年加速しており、その消耗のメカニズムを明らかにすることが求められている。特に力学過程がよくわかっていない氷河末端のカービングについて、観測データの収集とモデルの改良を行った。

北極域の山岳氷河は個々の氷河の質量は小さいものの数が多く、また小型のものほど気候変化に早く応答して縮小しやすい。北極域の氷河研究の空白域となっている、シベリアの山岳域スナルハヤタに注目した。1957年のIGY 当時に多くの人員や機器を投入して観測が行われた観測の記録資料とそれから半世紀をすぎ、最新の観測に依り再調査された氷河の変化を確認した。予測される温暖化に対しては、氷河に関しては融解と降雪増加の微妙なバランスの上に将来の変化が起こりうることが示唆された。

- ・スナルハヤタ No. 31 の氷河が 1940 年代から 2012 年までの間に 500~600m 後退、
- ・HYOGA モデルを基に氷河質量収支を推定したところ、IGY 期からの質量損失は約 20m w.e. である。
- ・諸情報を総合すると、No.31 氷河は IGY 期から現在までの氷河縮小は、1990 年代半ば~2000 年代から現在の間急速に進んだと言える。北極地域の他の山岳・谷氷河の変化に比べると、中間的な変化をしていると言える。
- ・現地調査を行なった 2012 年から 2014 年にかけての氷河質量収支は、氷河上部まで質量収支がマイナスであり、全体が融解域になっていることが分かった。全表面が融解域（質量収支マイナス）という現象がシベリアの高所の氷河域でも起きていることがわかり、この傾向が続けば今後の急速な氷河縮小にいたることが予測される。
- ・氷河・気候データのそろっている環北極地域であるアルタイ山脈において、RCM によるデータを用いて HYOGA モデルの検証を行なった(Fig.2)。

In this project, Observations of glacier in Greenland and Siberia are focused, then analysis are is expanded to the wide Arctic regions by using world glacier inventory data. Although glacier ablation increases by warming of summer, increase of winter snow fall accumulate glaciers. Since enough observation information was not expected in the mountainous region around glacier, climate model data and regional climate model data around the glacier regions are used for projection of future glacier change. Greenland ice sheet has accelerating ice mass loss condition. Research of ice change dynamics was required for understanding and forecasting change.

Mountain glaciers on the Arctic are small but their number is large. As the mountain glacier are sensitive to reduce the ice mass by change of climate, this project used world glacier inventory data for monitoring glacier change in the entire Arctic region and focused detailed change patterns in Siberia and Altai mountains. The field research revealed glaciers in the Sunar-Khayata region is reducing ice mass in the last decades. Terminus of Glacier No. 31 retreated 500~600m between 1940s and 2012. Model calculation by HYOGA model estimated ca.20m w.e. of ice loss was occurred since IGY. The reduction of ice mass has occurred intensively after 1990s.

The field observation revealed, currently the entire part of glacier is dominated by melting. It causes to accelerate ice mass loss of glacier in in Siberia in the present climate.

Future projection of glacier mass change and melt water discharge from glacier area in Altai shows possibility of large variability, as the change is very sensitive to the summer temperature and winter precipitation which are expected to increase by warming climate.

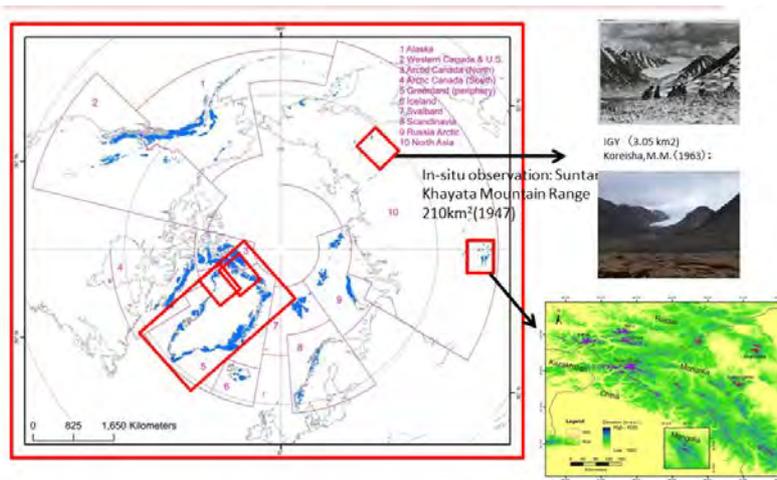


Fig. 1

世界氷河インベントリーに掲載されたおける北極域の氷河分布状況。グリーンランド、シベリア、アルタイでの観測との比較、全域の氷河変動の検討を行なった。

Glaciers monitored by the World Glacier Inventory, and focused area of Greenland, Siberia and Altai area in this project.

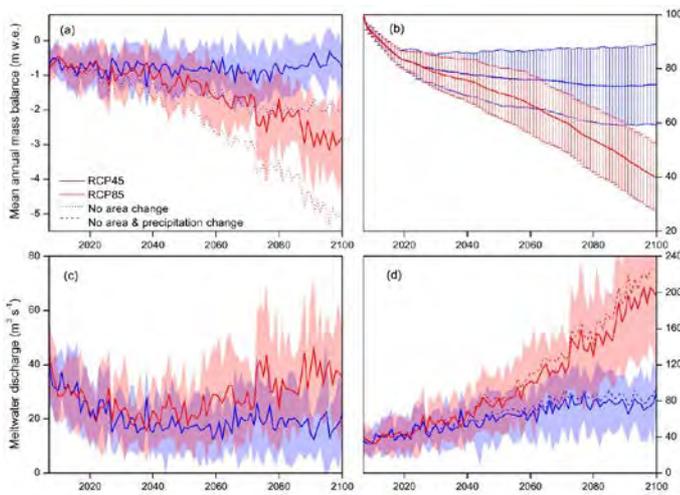


Fig. 2

21 世紀の気候変化予測 (RCP4.5 および 8.5) に対するよるアルタイ地域の氷河の将来変化予測 (Zhang et al., Climate Dynamics, in press)
(a)表面質量収支、(b)氷河面積変化、(c)融解水流出、(d)氷河面積が維持される場合の融解水流出予測。

Projected annual surface mass balance (a), changes in glacier area relative to the 2005 ice area (b), meltwater discharge (c), and meltwater discharge with an assumption of no change in glacier area (d) for RCP4.5 and RCP8.5. Shading in (a) and (c) and vertical hatching in (b) denote standard deviation.

References:

Zhang, Y., Enomoto, H., Ohata, T., Kitabata, H., Kadota, T., Hirabayashi, Y., (2016): Future projection of glacier mass balance in the Altai Mountains for the RCP climate scenarios. Climate Dynamics. (in press).

グリーンランド北西部における溢流水河の質量減少

津滝俊^{1,2}、杉山慎²、片山直紀^{2,3}、榊原大貴^{2,3}、澤柿教伸⁴

¹ 国立極地研究所国際北極環境研究センター

² 北海道大学低温科学研究所

³ 北海道大学大学院環境科学院

⁴ 法政大学社会学部

Ice mass loss from outlet glaciers in northwestern Greenland

Shun Tsutaki^{1,2}, Shin Sugiyama², Naoki Katayama^{2,3}, Daiki Sakakibara^{2,3} and Takanobu Sawagaki⁴

¹Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research

²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

³Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

⁴Faculty of Social Science, Hosei University

Ice discharge from calving glaciers has increased in the Greenland ice sheet (GrIS). This increase plays important roles in the volume change of GrIS and its contribution to sea level rise (van den Broeke et al., 2009). To investigate the mass loss of GrIS calving glaciers, ice surface elevation change has been studied by differencing digital elevation models (DEMs) derived by satellite remote-sensing. Advanced Land Observing Satellite (ALOS), Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) images have a spatial resolution of 2.5 m, which is fine enough to measure several meters of elevation change on glaciers (Sawagaki et al., 2012). The large spatial coverage of the images (1225 km²) is suitable for studying glaciers distributed over a large area.

In this study, we measured surface elevation change of 17 outlet glaciers near Inglefield Bredning in northwestern Greenland (77°47'–78°10'N, 65°00'–72°47'W). These glaciers flow into the ocean except for two land-terminating glaciers. We processed stereo pair of ALOS PRISM images acquired in summer 2007 and 2010 with a digital map plotting instrument (Leica Photogrammetry Suite) to generate DEMs with a 25 m grid mesh. Elevation data from ALOS DEMs were calibrated on ice-free terrain, and compared to calculate ice surface elevation change between 2007 and 2010.

The surface elevation of all the studied glaciers decreased and the rate of the elevation change increases downglacier. The mean elevation change rate ranged from -0.4 to -4.9 m a⁻¹. Marine-terminating Tracy and Bowdoin Glaciers thinned at rates of -4.9 and -4.1 m a⁻¹, which were larger than those at other glaciers. The rate at Tugto Glacier, a land-terminating glacier located near Bowdoin Glacier, was -2.8 m a⁻¹. This result confirms that recent thinning of GrIS outlet glaciers is more significant at marine-terminating glaciers as compared to land-terminating glaciers. Rapid thinning of marine-terminating outlet glaciers observed in this study suggests the importance of ice dynamics and/or ice-ocean interaction in the mass loss of GrIS.

References

- van den Broeke, M., J. Bamber, J. Ettema, E. Rignot, E. Schrama, W. J. van de Berg, E van Meijgaard, I. Velicogna and B. Wouters, Partitioning recent Greenland mass loss, *Science*, 326, 984, 2009.
- Sawagaki, T., D. Lamsal, A.C. Byers and T. Watanabe, Changes in surface morphology and glacial lake development of Chamlang South Glacier in the eastern Nepal Himalaya since 1964, *Global Environmental Research*, 16, 83-94, 2012.

北極域の広域積雪観測と気候影響

堀 雅裕¹、杉浦幸之助²、谷川朋範³、青木輝夫³、朽木勝幸³、庭野匡思³、榎本浩之^{4,5}、佐藤篤司⁶

¹JAXA/EORC

²富山大学

³気象研究所

⁴極地研究所,⁵総合研究大学院大学

⁶防災科学技術研究所

近年北極域では、地球温暖化の進行に伴う顕著な気温上昇や海水面積の減少が観測されており（IPCC/AR5, 2013）、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）の北半球の Weekly 積雪チャート（Armstrong and Brodzik, 2013）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傾向を示すことが指摘されている（Brown and Derksen, 2013）。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（Frei et al., 2012）。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。また、宇宙航空研究開発機構では、2016 年度に気候変動観測衛星 GCOM-C（光学放射計搭載）を打上げ、気候変動の兆候をとらえるための長期衛星データセットの構築を目指している。GCOM-C の観測データを過去の観測データと接続し、更なる長期トレンドを評価していく上でも、より高い空間分解能で長期積雪分布データセットを構築しておく必要がある。

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 シリーズに搭載されている AVHRR センサの GAC（4 km 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 搭載の MODIS センサの MOD02SSH（5 km 間引き放射輝度）データを用いた。あらかじめ放射輝度を 0.05° 間隔の全球等緯度経度格子座標に投影したものを 1 日毎に作成し、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行った。その際、異なるセンサ間の積雪検知性能を同一に保つため、AVHRR、MODIS 両データの解析には AVHRR が有する 5 つのチャンネル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、積雪被覆期間は、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求めた（以下、本研究で作成したデータを JAXA 版と呼ぶ）。積雪域の検出精度の評価には、NOAA/NCDC が公開している Global Historical Climatology Network-Daily (GHCND)（Menne et al., 2012）データに格納されている地上計測された積雪深（積雪深 2.5 cm 以上を積雪有り、日最高気温 2.5°C 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出精度を評価し、JAXA 版の性能と比較した。

GHCND の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 85% 前後で安定していたのに対し、NOAA 版は 80 年代～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る。また、季節毎の特徴を見ると、夏期に NOAA 版が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（少しでも可能性があれば積雪ありと安全側に判断）していることが原因と考えられる。

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見えてくる。図 1 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 日以上短縮化が進行していた。図 2 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、それ以外の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る。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る。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。

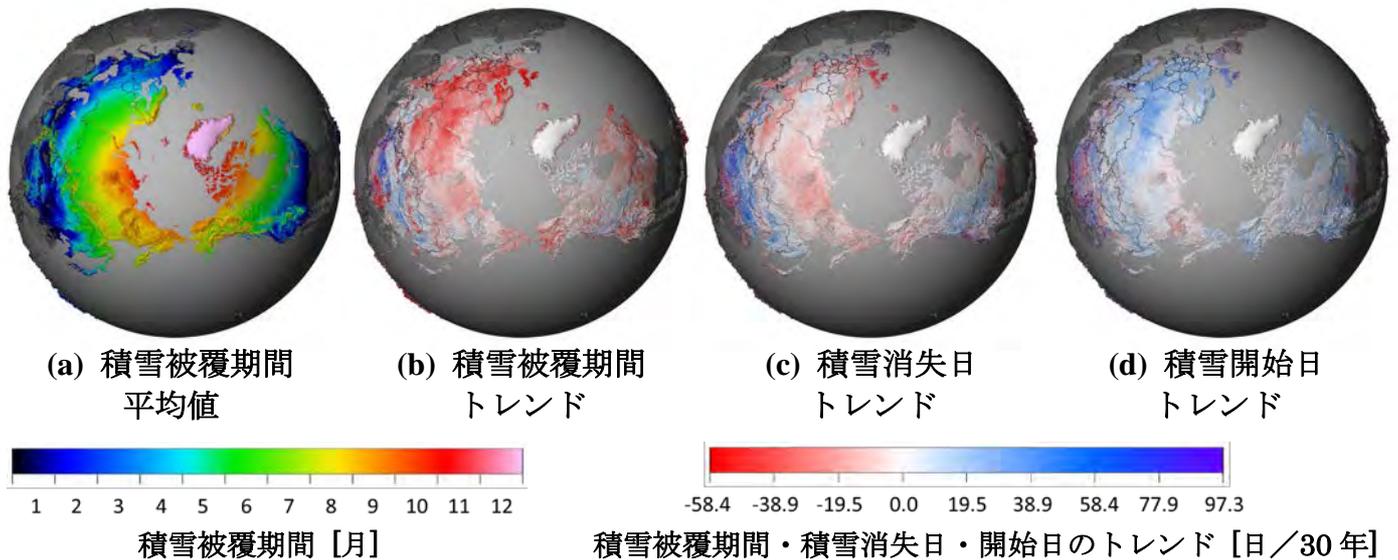


Figure 1. Spatial distribution of (a) 30-year averaged snow cover duration, (b) snow cover duration trend, (c) snow melt date trend, and (d) first snow date trend in the Northern Hemisphere.

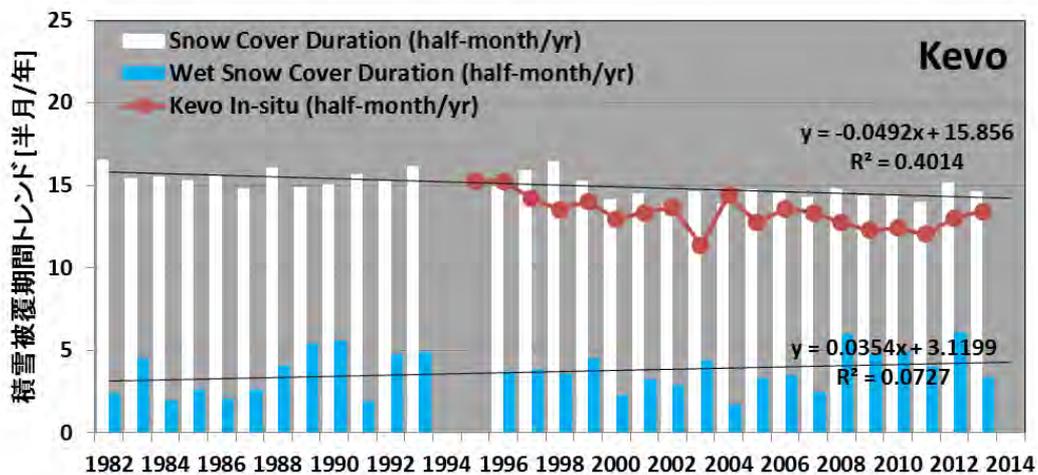


Figure 2. Year to year variations of snow cover durations at Kevo, Finland derived from satellite data (white bar) and in-situ snow depth (red solid line). Those of wet snow cover duration are also plotted as blue bars.

References

- Armstrong & Brodzik, Northern Hemisphere EASE-Grid 2.0 Weekly Snow Cover and Sea Ice Extent. Ver. 4. NSIDC, 2013.
- Brown, R. D., and C. Derksen, Is Eurasian October snow cover extent increasing? Environ. Res. Lett. 8 024006. doi:10.1088/1748-9326/8/2/024006, 2013.
- IPCC/AR5 : Climate Change 2013. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2013.
- Frei et al, A review of global satellite-derived snow products, Advances in Space Res., doi:10.1016/j.asr.2011.12.021, 2012
- Menne, M.J., I. Durre, R.S. Vose, B.E. Gleason, and T.G. Houston, 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, 2012.

北極域積雪中のブラックカーボン及びダストに関する研究

東久美子^{1,2}、塚川佳美¹、近藤豊¹、杉浦幸之助³、永塚尚子¹、大畑祥⁴、森樹大⁴、
茂木信宏⁴、小池真⁴、平林幹啓¹、Remi Dallmayr¹、榎本浩之^{1,2}

¹ 国立極地研究所

² 総合研究大学院大学

³ 富山大学

⁴ 東京大学

Studies on black carbon and dust in the Arctic snow

Kumiko Goto-Azuma^{1,2}, Yoshimi Ogawa-Tsukagawa¹, Konosuke Sugiura³, Naoko Nagatuska¹, Sho Ohata⁴, Tasuhiro Mori⁴,
Nobuhiro Moteki⁴, Makoto Koike⁴, Motohiro Hirabayashi¹, Remi Dallmayr¹ and Hiroyuki Enomoto^{1,2}

¹National Institute of Polar Research

²SOKENDAI (The Graduate University of Advanced Studies)

³ University of Toyama

⁴ University of Tokyo

ブラックカーボンは、急激な温暖化が進行している北極域において、放射強制力に大きな影響を与える可能性がある物質として注目されている。大気中での加熱作用だけでなく、雪氷表面に沈着するとアルベドを低下させ融雪を促進する効果があり、温暖化に対して正のフィードバックを与える。このため、近年、大気や積雪中のブラックカーボンに関する研究が盛んに行われるようになった。しかし、従来のブラックカーボン測定法には様々な問題があり、積雪中の濃度や堆積量のデータの不確実性が大きかった。ブラックカーボンが放射強制力に及ぼす影響を正しく評価するには、北極域積雪中のブラックカーボンの濃度と堆積量を高精度で求める必要がある。一方、ダストはブラックカーボンに比べて一粒子あたりのアルベド低下効果は小さいが、積雪中の濃度は通常ブラックカーボンに比べてはるかに高いため、ブラックカーボンと同様に、積雪中の濃度や堆積量を正確に求める必要がある。しかし、北極域積雪中のダストの分析データはこれまで殆どなかった。そこで、GRENE 北極事業では、研究課題（4）「地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割」（研究代表者：榎本浩之）において、衛星データや輸送モデルの検証データとして用いることのできる高精度のブラックカーボンとダストのデータを取得すること、及び、ブラックカーボンやダストの発生源や輸送経路に関する情報を得ることを目的として研究を行った。

本研究では 2012 年～2015 年の 2 月～3 月にかけて、アラスカ、フィンランド、シベリア、モンゴルの多地点で一冬分の積雪を採取し、その中に含まれるブラックカーボンと固体微粒子の分析を行った。ブラックカーボンの分析は、GRENE 北極事情の研究課題（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」（研究代表者：浮田）において東京大学を中心とする研究グループが開発した Wide-range SP2 (Mori et al., 投稿中) を用いて実施した。SP2 は、レーザー誘起白熱法を用いた分析法であるが、本研究で用いた Wide-range SP2 は、市販の SP2 を改造し、大粒径のブラックカーボンを測定できるようにした装置である。固体微粒子は、Coulter Multisizer 4 を用いて濃度と粒径分布を測定した。一部のサンプルについては、走査型電子顕微鏡でブラックカーボンの形状とサイズの観察を実施した。この他、一部のサンプルについては、ダストの Nd と Sr の同位体を分析し、起源の推定を行った。

本研究により、北極域積雪中のブラックカーボンとダストの濃度を高精度で求めることができた。本研究で得られた北極域積雪中のブラックカーボンの濃度は、全般的に先行研究に比べて低かったが、シベリア、フィンランド、アラスカの順で高かった。フィンランドとアラスカでは、都市部や油田の付近で濃度が高かった。また、粒径分布にも地域によって特徴が異なっていた。ダストについては、現在、分析データを解析中である。Nd と Sr の同位体からは、それぞれの地域に飛来するダストの発生源の違いが明らかになった。本研究の結果の詳細は、永塚他および塚川他がポスター発表を行う。

北極気候に関わるブラックカーボン・エアロゾルと雲微物理量

小池真^{1,2}、近藤豊²、P.R.Sinha¹、大畑祥¹、茂木信宏¹、東久美子²、大島長³、松井仁志⁴、塩原匡貴²、
小林拓⁵、浮田甚郎⁶

¹ 東京大学

² 国立極地研究所

³ 気象研究所

⁴ 名古屋大学

⁵ 山梨大学

⁶ 新潟大学

Black carbon aerosols and cloud microphysics in the Arctic

M. Koike^{1,2}, Y. Kondo², P.R.Sinha¹, S. Ohata¹, N. Moteki¹, K. Goto-Azuma², N. Oshima³, H. Matsui⁴, M. Shiobara²,
H. Kobayashi⁵, and J. Ukita⁶

¹University of Tokyo

²National Institute of Polar Research

³Meteorological Research Institute

⁴Nagoya University

⁵Yamanashi University

⁶Niigata University

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、その見積り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。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。さらに BC に限らず人為起源のエアロゾルが北極に輸送されることにより、雲微物理量に影響し、雲の放射効果や降水過程に影響する可能性についても大きく理解が遅れていた。

このような研究背景から GRENE 北極事業では、研究課題 (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」(研究代表者：浮田甚郎)において、BC の動態解明などが行われた。第 1 に、東京大学が開発してきた COSMOS 測定器を使った観測を、北極大気の代表的な観測拠点である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 2012 年から 3 年間にわたり実施した。COSMOS は従来の BC 測定で問題となっていた揮発性エアロゾル成分の干渉を加熱除去して測定可能な、高精度の BC 全質量濃度の連続自動測定装置である。この観測の結果、両観測地点とも冬に濃度が高い季節変化を示し、またニーオルスンの方がバローよりも濃度が低いことなどが確認された。この両観測地点では、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) およびストックホルム大学により CLAP /PSAP 測定器を使ったエアロゾルの光吸収係数測定が 20 年以上実施されている。このエアロゾルの光吸収係数から BC 質量濃度に変換するためには、単位質量あたりの BC による光吸収係数の値 (質量吸収係数) が必要となる。本研究では COSMOS との同時観測との比較から、これら長期観測で使用されている測定結果から BC 質量濃度の値付けをすることが可能となった。これは今後の北極 BC の動態解明やアセスメントにおいて、大きな貢献といえる。

本研究では第 2 に、降水・降雪による 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。降水・降雪過程は、北極大気中の BC が雪氷面に沈着する主要な過程と考えられるが、これまで信頼性の高い測定技術がなかった。降水・降雪による BC 除去過程は、BC の大きな発生源があるアジアから北極への輸送中での除去効率を推定する上でも、重要な知見である。本研究では降雪・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 BC を BC 測定装置で測定する手法を理論的・実験的な研究により確立した。そして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。この結果、降水中の BC 濃度と、この BC 濃度と降水量の積である BC 沈着フラックスは、冬季・春季に高く夏季には低くなっていることがわかった。これは大気中 BC 濃度の季節変化と整合的である。本研究で初めて明らかとなった BC 沈着量は、今後の数値モデル計算の検証などで重要な役割を果たすものである。

本研究では第 3 に、北極への BC 輸送に関わるエアロゾルモデル研究をおこなった。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。暖かい雨による 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。この結果、詳細なエアロゾルプロセスの表現に基づき、BC 混合状態観測の特徴を数値モデルにより世界で初めて再現することに成功した。また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。これらの先進的なエアロゾ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。

本研究では第 4 に、北極圏で初めて雲微物理量の連続直接観測を実施し、雲粒数濃度が冬季に比べて夏季に増加する季節変化などを明らかとした。観測はニーオルソンのゼッペリン山山頂の観測所（標高 450m）において、2013 年から 2 年間にわたり実施した。ゼ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（後者は夏季のみ）。雲粒数濃度は雲凝結核数濃度の指標として採用した乾燥直径 100 nm 以上のエアロゾル数濃度と正の相関をもつことが明らかとなり、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。本研究ではまたニーオルソンにおける 2 回の観測キャンペーンを実施し、係留気球により雲粒の直接測定を成功させた。この結果、北極下層雲の氷晶の形状などについて多くの知見を与えることができた。これは雲レーダやライダーなどのリモートセンシングの雲測定の検証においても重要な結果である。

なお本研究は国際共同研究として実施しており、ノルウェー極地研究所、ドイツのアルフレッド・ヴェーゲナー研究所、アメリカの NCAR をはじめとする多くの研究機関の研究者の協力のもとに実現した。またバローの BC 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、ゼッペリン山のデータはストックホルム大学の J. Strom 氏と P. Tunved 氏と NILU の O. Hermansen 氏、ゼッペリン山山麓データは ISAC/CNR の V. Gobetti 氏とフィレンツェ大学の R. Udusti 氏と A. Lupi 氏に提供いただいた。また GRENE 北極研究を含め国内の多くの研究者のご協力をいただいた。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。

北極域の雲と特性と海氷相互作用研究

岡本 創¹、佐藤可織¹、田中健太¹、浮田甚郎²、岩本勉之²、塩原匡貴³、矢吹正教⁴、鷹野敏明⁵、小池 真⁶

¹九州大学

²新潟大学

³極地研

⁴京都大学

⁵千葉大学

⁶東京大学

Study of interaction between Arctic cloud properties and sea-ice

Hajime Okamoto¹, Kaori Sato¹, Kenta Tanaka¹, Jinro Ukita², Katsushi Iwamoto², Masataka Shiobara³, Masanori Yabuki⁴,
Toshiaki Takano⁵, Makoto Koike⁶

¹*Kyushu University, Fukuoka, Japan*

²*Niigata University, Niigata, Japan*

³*National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan*

⁴*Kyoto University, Kyoto, Japan*

⁵*Chiba University, Chiba, Japan*

⁶*University of Tokyo, Tokyo, Japan*

We examined relationship between vertical structure of cloud properties and sea-ice in the Arctic. Cloud frequency of occurrence and phase were derived by the analysis of CloudSat radar and CALIPSO lidar data for four years from June 2006 to December 2010. We first applied cloud mask scheme (KU-mask) to determine cloud three-dimensional location [Hagihara et al., 2010]. Then cloud particle classification scheme (KU-type) was applied to distinguish cloud water and ice from CALIPSO [Yoshida et al., 2010]. Ice microphysics was also examined by the ice microphysics algorithm (KU-micro) [Okamoto et al., 2010]. Water vapor and temperature were retrieved by infrared sounder AIRS on Aqua [Ishimoto et al., 2014]. For the sea-ice extent, JAXA-L2 product of sea-ice concentration from microwave radiometer AMSR-E on Aqua was used to derive sea-ice pixels in Arctic regions. When sea-ice concentration is larger than 15%, the sea ice is assigned for the latitude >65N. We found the total cloud cover has a local maximum in May, local minimum in July and local maximum in September to October periods. Cloud particle type classification showed that water cloud cover exceeded between May and October than that of ice clouds and ice cloud cover exceeded between November and March than that of water clouds. The maximum of cloud cover corresponds to the minimum of sea-ice area. Analysis of vertical structure of water clouds indicated that cloud cover at low-level was the largest among the three height categories and low level clouds was smallest in July and largest in September and October. Therefore it was suggested that the decrease of water cloud cover at low-level increased of solar radiation at the surface, leading to decline the sea-ice extent in September due to the accumulation of surface heating. And the open water might help generation of water clouds. We recently introduced a method to estimate ice super-saturation inside clouds by combined use of ice water content retrieved from CloudSat and CALIPSO and water vapor amount from AIRS. In summer, RH_{cr} was as large as 120% over Arctic regions and the values were generally higher than other regions except for some land areas, e.g., over west part of United States, near west part of south Africa and east part of Asia. Higher values of RH_{cr} were also found in the Arctic than other regions in DJF periods.

Ground-based 95GHz cloud radar (Falcon-A, developed by Chiba University) and micro pulse polarization lidar observations have been conducted to investigate the cloud generation mechanism and cloud life time. Analysis of cloud particle type based on the lidar depolarization ratio and attenuation with cloud radar signals showed the super-cooled water cloud layers often persisted for more than several hours and were accompanied ice precipitation below. The horizontally oriented ice particles were also frequently identified, which was consistent with the analysis of CALIPSO [Yoshida et al., 2010, Hirakata et al., 2014]. Radar reflectivity factor showed very large values (>0dBZ_e) and the retrieval effective radius by radar-lidar algorithm adapted from CloudSat-CALIPSO one was very large (exceeded 200μm), which was unexpected.

References

Okamoto, H., K. Sato, and Y. Hagihara (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., H. Okamoto, and R. Yoshida (2010), Development of combined CloudSat/CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, *J. Geophys. Res.*, 115, D00H33, doi:10.1029/2009JD012344.

Hirakata, M., H. Okamoto, Y. Hagihara, T. Hayasaka, Comparison of global and seasonal characteristics of cloud phase and horizontal ice plates derived from CALIPSO with MODIS and ECMWF, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31, 10, 2114- 2130, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00245.1>, 2014.10.

Yoshida, R., H. Okamoto, Y. Hagihara, and H. Ishimoto (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.

Ishimoto, H., K. Okamoto, H. Okamoto, K. Sato, One-dimensional variational (1D-Var) retrieval of middle to upper tropospheric humidity using AIRS radiance data. *J. Geophys. Res. Atmosphere*, 119, DOI: 10.1002/2014JD021706, 2014.06.

北極域の海氷減少が中緯度に及ぼす影響と対流圏-成層圏結合

山崎孝治^{1,2}、中村哲^{1,2}、浮田甚郎³、岩本勉之^{1,3,6}、本田明治³、三好勉信⁴、小川泰信^{1,5}、富川喜弘^{1,5}

¹ 国立極地研究所

² 北海道大学

³ 新潟大学

⁴ 九州大学

⁵ 総合研究大学院大学

⁶ 紋別市役所

Impact of Arctic sea-ice decline on mid-latitude climate and troposphere-stratosphere coupling

Koji Yamazaki^{1,2}, Tetsu Nakamura^{1,2}, Jinro Ukita³, Katsushi Iwamoto^{1,3,6}, Meiji Honda³, Yasunobu Miyoshi⁴,
Yasunobu Ogawa^{1,5}, and Yoshihiro Tomikawa^{1,5}

¹*National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan*

²*Hokkaido University, Sapporo, Japan*

³*Niigata University, Niigata, Japan*

⁴*Kyushu University, Fukuoka, Japan*

⁵*The Graduate University for Advanced Studies*

⁶*Mombetsu City Government*

This study examines the possible linkage between the recent Arctic sea-ice decline and the winter climate in mid-latitudes, especially, the Arctic Oscillation (AO). Observational analyses reveal that a reduced sea-ice area in late autumn leads to more negative phase of the AO in winter. A high-top atmospheric general circulation model (AGCM for Earth Simulator, AFES version 4.1) is used to simulate the atmospheric response to observed sea-ice anomalies. The results from the simulation reveal that the recent Arctic sea-ice reduction results in cold winters in mid-latitude continental regions, which are linked to an anomalous circulation pattern similar to the negative phase of AO with an increased frequency of large negative AO events by a factor of over two. Associated with this negative AO phase, cold air advection from the Arctic to the mid-latitude increases. We found that the stationary Rossby wave response to the sea-ice reduction in the Barents Sea region induces this anomalous circulation. We also found a positive feedback mechanism resulting from the anomalous meridional circulation that cools the mid-latitudes and warms the Arctic. This feedback adds an extra heating to the Arctic air column equivalent to about 60% of the direct surface heat release from the sea-ice reduction.

The results from this high-top model experiment also suggest a crucial role of the stratosphere in affecting the tropospheric AO in winter through stratosphere-troposphere coupling. Although other recent studies also suggest the stratospheric role, the exact role remains elusive. With additional experiments in which the stratospheric wave-mean interaction is artificially weakened, it is clearly shown that the tropospheric AO response caused by the Arctic sea-ice reduction largely disappears. The results confirm a crucial role of the stratosphere in the sea-ice impacts on the mid-latitudes, particularly by interaction between the stratospheric polar vortex and planetary-scale waves and by resultant change in the zonal wind in the lower stratosphere. They also imply that realistic representation of both Arctic surface boundary conditions and stratospheric processes are critical for improving predictions of weather and climate in the mid-latitudes across sub-seasonal to decadal time scales.

当研究は近年の北極域の海氷減少と中緯度の気候、特に北極振動(Arctic Oscillation: AO)との間の関連を調べる。観測データの解析から晩秋の海氷減少が冬季に負の AO をもたらすことが明らかになった。ハイトップ大気大循環モデル(AFES version 4.1)を用いて観測された海氷減少に対する大気の応答を調べた。シミュレーション結果は、最近の北極域の海氷減少が中緯度の大陸域に寒い冬をもたらすことを示した。これは負の AO に似たパターンであり、AO 指数が大きな負となる頻度が倍以上に増加した。この負の AO に伴って北極から中緯度への寒気移流が増加する。バレンツ海の海氷減少が定常ロスビー波を励起し、この循環偏差をつくる。子午面循環偏差は中緯度を冷やし高緯度を暖める正のフィードバック効果をもつ。この子午面循環フィードバックによる北極域温暖化効果は海氷減少による海表面からの直接の熱フラックスによる北極域温暖化の 60%に相当する。

この AFES モデルの結果はまた成層圏・対流圏結合を通して対流圏の AO に影響する点において、成層圏が決定的に重要であることを示唆する。最近の他の研究も成層圏の役割を示唆するが、まだその正確な役割についてははっきりしていない。ここでは成層圏における波-平均流相互作用を人工的に弱める追加実験によって、対流圏の AO 応答は非常に弱くなることを示した。この結果は海水が中緯度に与える影響において成層圏、特に、極渦とプラネタリー波の相互作用およびその結果の下部成層圏の東西風変化が決定的に重要であることを確認するものである。また中緯度の気象や気候の季節内から 10 年規模の時間スケールでの予測精度を向上させるためには、北極域の境界条件と成層圏過程の現実的な表現が必須であることを意味している。

References

Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita (2015), A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, doi:10.1002/2014DJ022848.

雪氷新過程導入による GCM 地表気温バイアスの改善

大石龍太^{1,2}、新田友子²、末吉哲男¹、高田久美子^{1,3}、芳村圭²、阿部彩子^{2,4}、G. E. Liston⁵

¹ 国立極地研究所

² 東京大学大気海洋研究所

³ 国立環境研究所

⁴ 海洋研究開発機構

⁵ Colorado State University

The improvement of GCM land surface temperature bias by the introduction of new snow processes

First Author¹, Times New Roman 10pt² and Third Author²

¹Affiliation of First Author (Times New Roman 10 pt *Italic*)

²Affiliation of Second and Third Authors

Ryouta O'ishi^{1,2}, Tomoko Nitta², Tetsuo Sueyoshi¹, Kumiko Takata^{1,3}, Kei Yoshimura², Ayako Abe-Ouchi^{2,4} and G. E. Liston⁵

¹National Institute of Polar Research

²Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

³ National Institute for Environmental Studies

⁴ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

⁵Colorado State University

大気海洋大循環モデル MIROC は東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構によって共同で開発され、その温暖化シミュレーション結果は気候変動に関する政府間パネル(IPCC)に貢献してきた。しかしモデルは完全ではないため未だ系統的なバイアスが存在し、その低減は将来予測の信頼性向上にとって重要である。本研究では積雪に関する2つの新過程を MIROC 陸面に導入することで、陸上気温バイアスの低減を図った。ひとつはサブグリッド積雪被覆スキーム SSNOWD (Liston 2003)の導入で、陸上積雪の分布と季節性が向上した。その結果、中高緯度陸上の高温バイアスが、秋冬春の積雪期に低減された。その一方で、夏季の高温バイアスはわずかに悪化した。そこで、簡易湿地スキーム(新田ら 2015)を導入し、春先の融雪水が陸上に数ヶ月間滞留する効果を MIROC に取り入れた。その結果、土壌水分の増加により夏の中高緯度が寒冷化し、高温バイアスを緩和した。本研究の成果は時期 IPCC 報告書にむけて整備されている最新版の MIROC に採用され、温暖化予測に貢献する予定である。

The atmosphere-ocean general circulation model MIROC has been developed by the Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo, national Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth and Technology. The result of global warming experiment by MIROC contributed to the Intergovernmental Panel on Climate Change. However, MIROC still has biases due to many reasons and improvement of biases is necessary for accuracy of future projection. In the present study, we introduce two new snow schemes into the land submodel of MIROC to reduce the temperature bias on the land. One is a sub-grid snow distribution model (SNOWD; Liston 2003) which improves snow cover area and seasonality in MIROC. The warm bias in middle and high latitude land is reduced in autumn, winter and spring due to the introduction of SSNOWD. On the other hand, summer warm bias is slightly amplified. Then we introduced the other new process, a simple wetland scheme (Nitta et al. 2015), which represents a temporal pool of snow melt water. This effect increase soil wetness and sensible heat, cooling in middle and high latitudes in summer. These two new processes are introduced to the latest version of MIROC which is to contribute to the next IPCC report.

CMIP5 気候モデルにおける夏季北ユーラシアの降水再現性

廣田渚郎^{1,2}、高藪縁²、濱田篤²¹ 国立極地研究所² 東京大学大気海洋研究所**Reproducibility of summer precipitation over northern Eurasia in CMIP5 multi-climate models**Nagio Hirota¹, Yukari N. Takayabu² and Atsushi Hamada²¹ *National Institute of Polar Research*² *Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo*

Reproducibility of summer precipitation over northern Eurasia in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) climate models is evaluated in comparison with several observational and reanalysis datasets. All CMIP5 models under- and over-estimate precipitation over western and eastern Eurasia, respectively, and the reproducibility measured using the Taylor skill score is largely determined by the severity of these west–east precipitation biases. The following are the two possible causes for the precipitation biases: very little cloud cover and very strong local evaporation-precipitation coupling. The models underestimate cloud cover over Eurasia, allowing too much sunshine and leading to a warm bias at the surface. The associated cyclonic circulation biases in the lower troposphere weaken the modeled moisture transport from the Atlantic to western Eurasia and enhance the northward moisture flux along the eastern coast. Once the dry west and wet east biases appear in the models, they amplify because of stronger evaporation-precipitation coupling. The CMIP5 models reproduce precipitation events well over a time scale of several days, including the associated low-pressure systems and local convection. However, the modeled precipitation events are relatively smaller over western Eurasia and larger over eastern Eurasia compared to the observations, and these are consistent with the biases found in the seasonal average fields.

References

Hirota, N., Y. N. Takayabu, and A. Hamada, Reproducibility of summer precipitation over northern Eurasia in CMIP5 multi-climate models. *J. Climate*, in revision.

Seasonal evolution of surface temperature changes over the Arctic Ocean under global warming in CMIP5 models

Alexandre Laine^{1,2}, Masakazu Yoshimori^{3,2}, Ayako Abe-Ouchi^{2,1,4}

¹ National Institute of Polar Research (NIPR), Tokyo

² Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), University of Tokyo

³ Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo

⁴ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokohama

We present some results of Laine et al. (under review). It consists of a decomposition of multi-model ensemble mean surface temperature changes from 32 CMIP5 models, after 100 years of global warming under the rcp4.5 scenario. The decomposition derives from a surface energy budget analysis from which the radiative part is decomposed based on the radiative kernel method of Soden et al. (2008). The original article is considering different regional domains separately (land and oceanic domains for tropical and different Arctic sub-regions), whereas we present only the results for the Arctic Ocean (North of 60°N, excluding Greenland-Island-Norwegian-Labrador Seas).

We show that many different factors contribute to the Arctic Ocean surface temperature change and its seasonality (Fig. 1).

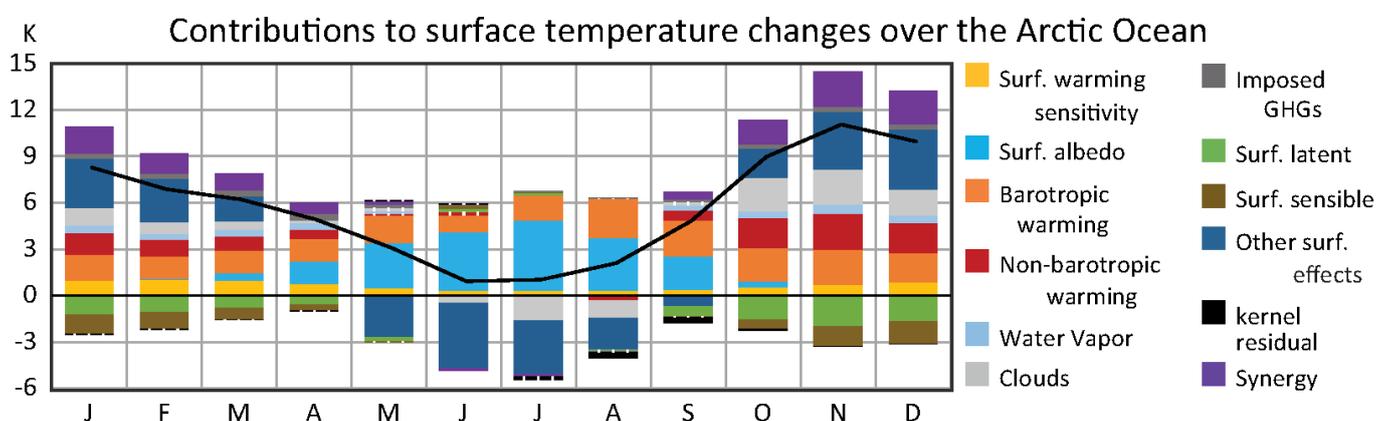


Fig. 1: Contributions (color bars) to surface temperature changes (black line) for the Arctic Ocean. Striped bars indicate contributions for which the sign of the ensemble mean is not statistically robust among models.

Going beyond the analysis by Laine et al. (under review), we show that the next step for better understanding the seasonal evolution of surface temperature changes over the Arctic Ocean would be to perform a similar surface temperature change analysis but for sea-ice and open-ocean portions of the grid cells separately.

References

- Laine A.; Yoshimori M.; Abe-Ouchi A. (under review) Surface Arctic Amplification Factors in CMIP5 Models: Land and Oceanic Surfaces, Seasonality. Submitted to Journal of Climate
- Soden B.J.; Held I.M.; Colman R.; Shell K.M.; Kiehl J.T. and Shields C.A. (2008) Quantifying climate feedbacks using radiative kernels. Journal of Climate, 21 (14), 3504-3520

北極海氷海洋のモデリングと予測システム

羽角博康¹

¹ 東京大学大気海洋研究所

本発表では、サブ課題 7-2「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」で得られた成果のうち、数値モデリングに関わる部分について紹介する。サブ課題 7-2 の最終目的は北極域海氷分布の中長期（中期：季節から十年スケール、長期：数十年スケール）変動に対する予測システムを構築することである。近年の北極海氷激減に対しては太平洋から夏季に流入する暖水の影響が大きいことにも代表されるように、中長期的な海氷分布変動においては周辺海域から北極海への海水流入や流入した海水の北極海内での挙動が考慮すべき重要な要素であるが、こうした海洋過程の既存の気候モデルにおける表現は満足と言うには程遠い状況である。その表現のためには境界流や中規模渦を解像できる数 km 以下の水平格子サイズの適用が本質的に必要である。一方、予測においては海氷海洋場の適切な初期値化が重要な要素であり、特に海氷の観測データを気候モデルに同化して予測を行うシステムの開発が必要である。サブ課題 7-2 における数値モデリング研究はこれら 2 点、すなわち高解像度北極海モデリングと予測システム開発を焦点として進めてきた。

高解像度北極海モデリングに関しては、特に大西洋から北極海への流入およびその流入海水の北極海内での変質をよく再現できるモデルの構築を目指してきた。メキシコ湾流を起源とする高温高塩分水はノルウェー沿岸を経た後にバレンツ海を通過する分枝とフラム海峡を通過する分枝に分かれて北極海外洋域に流入する。フラム海峡を通過する分枝は **Atlantic Water layer** と呼ばれる深さ 300 m 付近を占める高温水層を形成する。一方、バレンツ海を通過する分枝はバレンツ海大陸棚上で強い海面冷却を受けた後に外洋域に流出し、**Atlantic water layer** の上部に位置する **cold halocline layer** を形成する。フラム海峡では海峡を横断する密な係留観測が 1990 年代から継続されているが、ここで開発した高解像度北極海モデルはその観測に基づく平均場（水温・塩分・流速）・長期水温上昇トレンド・水温経年変動をいずれもよく再現することができた。この高解像度北極海モデルの結果を解析することにより、大西洋から北極海への熱流入の経年変動を支配する要因を特定し、それが海氷に及ぼす影響を評価した。

予測システムに関しては、アンサンブルカルマンフィルター（**EnKF**）手法によってデータ同化を行うものを開発した。**EnKF** ではモデルの内部変動性に基づいて同化を行わない変数に対しても修正を行うことができる。開発した予測システムでは海面水温と海面気圧のみを限定的にデータ同化するだけでも海氷場を適切に初期値化することができるが、海氷密接度データも同化することによりさらに精度の高い初期値化および予測が可能になっている。予測システムを用いて各月に初期値化した気候予測実験により、北極海氷分布が特定の季節に 1 年を超えて高い予測可能性を持つことが示された。一方、予測システムによって 2000 年状態（気候温暖化がある程度進行した状態）に初期値化した上で一定外力を与えて長期間行った気候実験の結果、2007 年に観測されたのと同レベルの海氷激減が 100 年に 1~2 回の頻度で気候内部変動としても起こり得ることが示された。

衛星データを用いた北極海の海氷中期予測

木村 詞明^{1,2}、山口 一²

¹ 国立極地研究所 国際北極環境研究センター

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

1. はじめに

北極海の夏季海氷面積は近年急速に減少してきており、それに伴って北極海での資源開発や航路利用がすすめられるようになってきた。それらを安全で効率的にすすめるためには、海氷分布の予測が不可欠である。GRENE 北極プロジェクトでは、長期（数十年）、中期（数ヶ月）、短期（1週間程度）それぞれの時間スケールでの海氷予測を目指して研究がすすめられてきており、本研究では夏季の海氷分布を春季に予測する数ヶ月予測と、その精度向上を目指した研究に取り組んだ。

2. 解析手法と成果

海氷中期予測は人工衛星による観測データを用い、過去十数年分のデータをもとに統計的手法によって行った。解析にはマイクロ波放射計 AMSR-E および AMSR2 によるデータから導出された 2002 年 12 月以降の毎日の海氷情報を用いた。これらのデータは国立極地研究所の Arctic Data archive System (ADS) を通じて取得した。また、海氷漂流速度は 36GHz チャンネルの画像から面相関法を用いて独自に計算したものをを用いた。

まず、海氷密接度と海氷漂流速度を用いた解析から、北極海の夏季の海氷分布は、冬季の海氷漂流パターンと関係があることが分かった (Kimura et al., 2013)。これは、冬季の海氷移流（収束・発散）により春季の厚さ分布が決定され、それが夏季の海氷分布を左右しているためと考えられる。本研究では、この関係をもとに春までの海氷の動きから夏季の海氷分布の予測を行った。具体的には、各年の 12 月 1 日の海氷域上に約 20000 個の仮想粒子を等間隔に配置した後、毎日の漂流速度を用いて 4 月末までのその動きを追跡した。こうして得られた 4 月末の仮想粒子密度と夏季の任意の日の海氷密接度との関係を導出し、それをもとに 7 月から 9 月の期間の海氷密接度分布を予測した。

GRENE 北極プロジェクトの期間中に、漂流速度の計算方法の改良、長期の減少傾向などローカルな特性の考慮、予測誤差の見積手法の検討などをすすめた。さらに、昨年の予測では Krishfield et al. (2014) の手法をもとに AMSR データから推定した 12 月 1 日の海氷厚を考慮することにより、特に長期減少傾向が見られる海域での予測精度を向上させることができた。このほか、海氷の厚さ分布予測 (2014 年)、4 月までのデータをもとにした秋季までの海氷予測 (2013 年)、夏季のデータを用いた秋季の海氷予測 (2015 年) などを試行した。

得られた予測結果は 5 月中旬に日本語版と英語版をウェブサイトで公開し (<http://www.1.k.u-tokyo.ac.jp/YKWP/2015arctic.html>)、さらに 6 月と 7 月に最新のデータを用いて修正版を出した。また、ADS でも予測結果を閲覧できるようにした。

3. 今後の課題

この予測の鍵となるのは春の海氷厚分布の正確な見積もりである。現在は春までの海氷の動きから間接的に海氷厚分布を推定しているが、直接的な方法で海氷厚を導出できることが望ましい。海氷の力学的変形による海氷厚変化をより現実的に再現できる数値モデルの開発と、それを用いた海氷厚の再解析データが整備できれば非常に有用である。

現在の予測では春季以降の気象条件が考慮されていない。春季から夏季にかけての特異な気象条件を春までに予測できれば、海氷中期予測精度の大幅な向上が期待できる。逆に、本研究による海氷中期予測の結果を、気象の中期予測に利用するための取り組みもすすめていきたい。

References

- Kimura, N. A. Nishimura, Y. Tanaka, H. Yamaguchi, Influence of winter sea ice motion on summer ice cover in the Arctic, *Polar Research*, vol. 32, 20193, <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v32i0.20193>, 2013.
- Krishfield, R. A., A. Proshutinsky, K. Tateyama, W. J. Williams, E. C. Carmack, F. A. McLaughlin and M. L. Timmermans, 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, 1271-1305, 2014.

Estimation of mechanical increase in sea ice thickness due to sea ice rafting using AMSR-E and AMSR2 derived sea ice velocity data

Eri Yoshizawa, Koji Shimada

¹*Graduate School of Tokyo University of Marine Science and Technology*

In recent years, the zonal ice band formed by rafted sea ice has often remained in coastal regions in the Arctic Ocean, even in the end of summer and blocks the Arctic Sea Route. In the present study, we assumed that mechanical increase in sea ice thickness due to sea ice rafting caused by convergence of sea ice motions is an key factor of the formation mechanism of such heavy sea ice bands, and developed a method to estimate the mechanical increase in sea ice thickness using satellite-derived sea ice velocities calculated from AMSR-E and AMSR2 data in 200-2011 and in 2013-2015. We also examined influences of mechanical increases in sea ice thickness on sea ice conditions in spring, which is an essential precondition of sea ice variations in the subsequent summer.

Mechanical increases in sea ice thickness due to sea ice rafting were estimated along Lagrangian sea ice trajectories that were tracked backward from 1 May to 1 November in the preceding year. Once sea ice rafting is caused by convergent sea ice motions, the increased sea ice thickness does not decrease even under influences of divergent sea ice motions. To take into account such non fluid-like properties of sea ice motions, in our estimation method, we assumed that mechanical increases occur in the case that the following two conditions were satisfied: (1) sea ice concentration (SIC) after a time interval of about 1 day exceeded 100 % due to the convergence of sea ice motions. (2) A parameter calculated from satellite-measured brightness temperature, a proxy of the sea ice type, fell below the threshold. Along Lagrangian sea ice trajectories, the amount of SIC that exceeded 100 % was integrated as the mechanical increase in sea ice thickness. The second condition enables us to estimate mechanical increases of only relatively thick sea ice such as multi-year ice by excluding the convergence of new ice that does not contribute to mechanical increase in sea ice thickness from the integration.

As a result, spring sea ice with large mechanical increases in sea ice thickness during winter tended to distribute in the subsequent spring in the following regions: the Alaskan coastal region, the East Siberian Sea near the Wrangel and New Siberian Islands and the region around the Franz Josef Land, which are known as choke-point of the Arctic Sea Route. With decreasing in advections of multi-year ice that traveled from the northern Canada Basin to the Atlantic sector along the sea ice Beaufort Gyre and the Transpolar drift stream, the amount of rafted sea ice in spring decreased around the Franz Josef Land. On the other hand, in the Pacific sector, spring sea ice thickness with large sea ice rafting during the preceding winter distributed in the Alaskan coastal region near Pt. Barrow and the East Siberian Sea even in the AMSR2 period during 2013 to 2015. These results suggest that spring sea ice conditions in these coastal regions was preconditioned by both sea ice rafting and redistributions of multi-year ice during the preceding winter.

アラスカ沖バロー沿岸ポリニヤに関する観測・衛星・モデル融合研究

平野大輔¹、深町康²、渡邊英嗣³、大島慶一郎²、岩本勉之⁴、Andrew Mahoney⁵、Hajo Eicken⁵、清水大輔¹、田村岳史¹
¹ 極地研

² 北大低温研、³ JAMSTEC-IACE、⁴ 紋別市役所、⁵ University of Alaska Fairbanks

A wind-driven, hybrid latent and sensible heat coastal polynya off Barrow, Alaska

Daisuke Hirano¹, Yasushi Fukamachi², Eiji Watanabe³, Kay I. Ohshima², Katsushi Iwamoto⁴, Andrew Mahoney⁵, Hajo Eicken⁵, Daisuke Simizu¹, and Takeshi Tamura¹

¹National Institute of Polar Research

²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,

⁴Mombetsu City, ⁵University of Alaska Fairbanks

The nature of the Barrow Coastal Polynya (BCP), which forms episodically off the Alaska coast in winter, is examined using mooring data, atmospheric re-analysis data, satellite-derived sea-ice concentration and production data, and results from tracer experiments by pan-Arctic ice-ocean model. We focus on oceanographic conditions such as water mass distribution and ocean current structure beneath the BCP. Two moorings were deployed off Barrow, Alaska in the northeastern Chukchi Sea from August 2009 to July 2010. For sea-ice season from December to May, a characteristic sequence of five events associated with the BCP has been identified (Figure 1); (1) dominant northeasterly wind parallel to the Barrow Canyon, with an offshore component off Barrow, (2) high sea-ice production, (3) upwelling of warm and saline Atlantic Water beneath the BCP, (4) strong up-canyon shear flow associated with displaced density surfaces due to the upwelling, and (5) sudden suppression of ice growth. A baroclinic current structure, established after the upwelling, caused enhanced vertical shear and corresponding vertical mixing. The mixing event and open water formation occurred simultaneously, once sea-ice production had stopped. Thus, mixing events accompanied by ocean heat flux from the upwelled warm water into the surface layer played an important role in formation/maintenance of the open water area (i.e., sensible heat polynya). The transition from a latent to a sensible heat polynya is well reproduced by a high-resolution pan-Arctic ice-ocean model. We propose that the BCP, previously considered to be a latent heat polynya, is a wind-driven hybrid latent and sensible heat polynya, with both features caused by the same northeasterly wind.

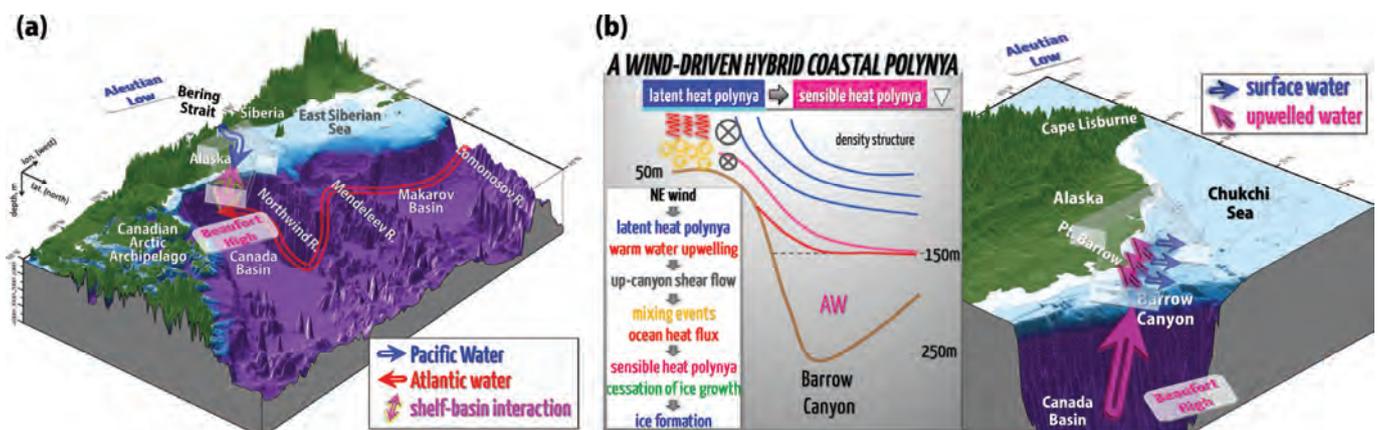


Figure 1

Schematics of "wind-driven hybrid latent and sensible heat polynya system" off Barrow. (a) Broad and (b) detailed views for the BCP system (Hirano *et al.*, 2016, in press).

References

Hirano D., Y. Fukamachi, E. Watanabe, K. I. Ohshima, K. Iwamoto, A. R. Mahoney, H. Eicken, D. Simizu, and T. Tamura, A wind-driven, hybrid latent and sensible heat coastal polynya off Barrow, Alaska, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **121**, doi:10.1002/2015JC011318, 2016 (in press).

北極海航路上の海氷厚モニタリング技術の開発

舘山一孝¹、田中康弘²、星野聖太²、徳留泰行¹

¹ 北見工業大学

² 北見工業大学大学院

Development of monitoring technique for sea ice thickness along the Arctic sea route

Kazutaka Tateyama¹, Yasuhiro Tanaka², Seia Hoshino² and Yasuyuki Tokudome²

¹ Kitami Institute of Technology

² Graduate school of Engineering, Kitami Institute of Technology

Algorithms which estimate sea ice thickness and melt pond fraction from the satellite passive microwave radiometers such as AMSR-E and AMSR2 had been developed based on the in-situ ice thickness derived from ice profiling sonars moored in the Canada basin during 2002-2015. This study validated these algorithms by comparing with another in-situ ice thickness data which derived from ice mass balance buoys and other satellite sensor.

1. 研究背景と目的

人工衛星による広域観測が開始された1979年以降、30年以上にわたって北極海の海氷面積の情報が蓄積されてきた。海氷厚については潜水艦や係留ブイのソナー（例えば Rothrock et al., 2008; Melling et al., 2005）、海氷質量収支ブイ（Richter-Menge et al., 2006）によって取得された現場観測データが存在し、近年の薄氷化傾向を示しているものの、データの取得期間は断続的・短期的であり、場所も限定されている。北極海航路を利用実現に向けて、北極海全域の氷厚分布をリアルタイムで監視する手法が必要とされている。人工衛星に搭載された光学センサやマイクロ波センサによる海氷厚分布の推定は、可視近赤外放射計やマイクロ波放射計を用いた薄氷厚の推定（Drucker et al., 2003; Tamura et al., 2008）や、レーダー高度計などを用いて海氷のフリーボード高さを測定し全氷厚を推定する手法が開発されている（Kwok et al., 2007; Laxon et al., 2013）。前者のアルゴリズムは積雪のない薄い氷に限定された手法であり、後者は北極海全域をカバーするのに1ヶ月かかってしまう欠点がある。本研究は、衛星搭載マイクロ波放射計を用いて北極海全域を準リアルタイムで毎日監視できる手法の開発を行った。

2. 海氷アルゴリズム

筆者らは、衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR-E および AMSR2 の輝度温度データ（*TB*: Brightness Temperature）と海氷密接度プロダクト（*ICO*: Ice COncentration）を用い、北極海に設置された係留系の氷厚データとの比較から海氷厚推定手法（Krishfield et al., 2014）を実験的に開発した。融解期の海氷は表面に水溜り（Melt Pond）が生じており、マイクロ波では Melt Pond を透過して下の海氷情報を得ることはできない。すなわち、融解期に Melt Pond が多く分布する海氷域では正しい厚さを推定することができない。従って、この海氷厚推定手法では、第一段階として海氷上の Melt Pond の割合（*MPF*: Melt Pond Fraction）を推定し、*ICO* が 80%以上かつ *MPF* が 20%以下の海氷域を抽出した（Fig.1）。第二段階として、改良を加えた NASA Team アルゴリズム（Cavarieli et al.）を使用して一年氷と多年氷に分類した。最終段階は、係留ブイの実測氷厚データと *TB* を比較して、一年氷は偏波比（*PR*: Polarization Ratio）、多年氷は周波数比（*GR*: Radiation Ratio）を用いた氷厚換算式をそれぞれ開発した。2002年から2014年にかけて毎年9月10日の北極海全体の海氷厚および *MPF* の分布図を Fig.2 に示す。

2. アルゴリズム推定精度の検証と改良

本研究は海氷厚の推定精度を検証するため、*MPF* の精度を可視近赤外放射計 MODIS から求めた値や漂流ブイ（*IMB*: Ice Mass Balance buoy）による実測値、海氷厚の推定精度は同じく *IMB* による実測値と CryoSat-2 のレーダー高度計から得られた氷厚値と比較した。図3は *IMB* の表面温度と AMSR-E で求めた *MPF* との比較、図4は *IMB* の積雪深と氷厚の実測値と AMSR-E による推定氷厚との比較をそれぞれ表している。*MPF* が 21%以上のときに最も *IMB* の表面温度が 0°C以上を示すときと良い一致を示した。海氷厚については AMSR-E の推定値は *IMB* の実測値よりも小さい値を示す傾向が見られた。*IMB* や CryoSat-2 の氷厚データと比較することで AMSR-E/AMSR2 の推定氷厚の時期や海域の違いによる誤差を評価し、アルゴリズムの改良について検討した。

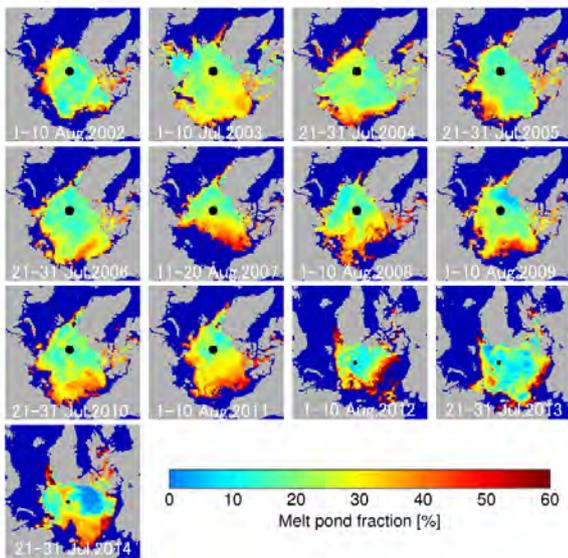


Figure 1. Distribution of MPF during 2002-2014 calculated from AMSR-E and AMSR2.

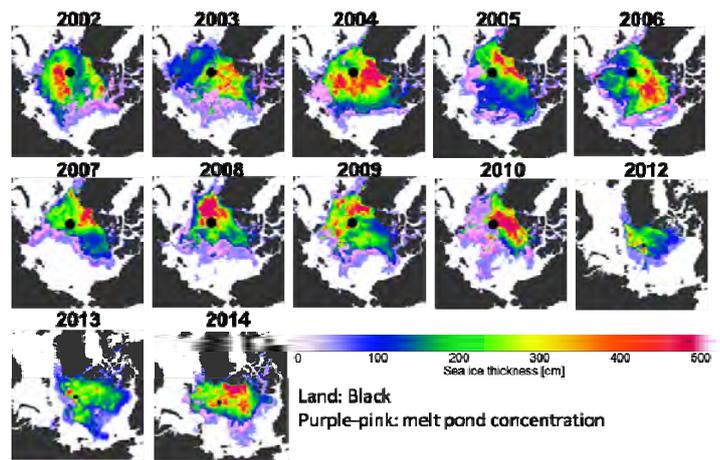


Figure 2. Distributions of ice thickness using AMSR-E/AMSR2 for every 10th of September during 2002 - 2014.

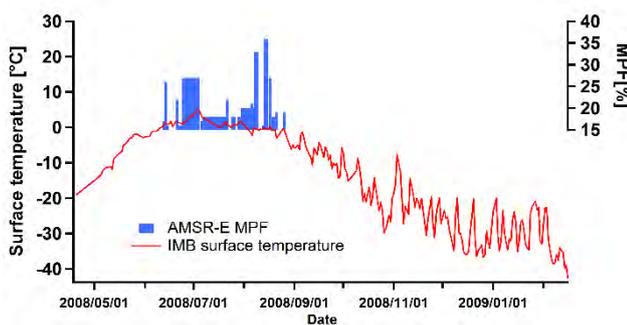


Figure 3. IMB surface temperature (red line) and AMSR-E MPF (blue bar) in 2008 summer.

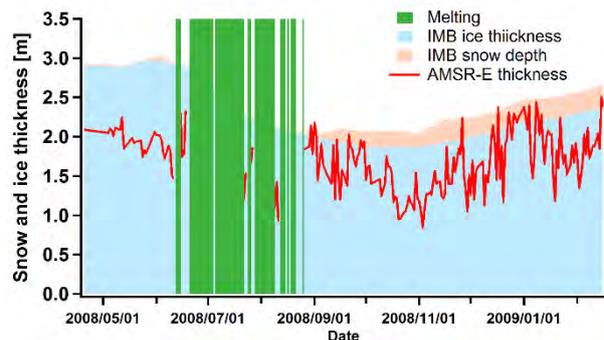


Figure 4. IMB snow (light orange area) and ice thickness (light blue area), melting (green bar) and AMSR-E thickness (red line) in 2008 summer.

References

- Drucker, R., S. Martin, and R. Moritz, Observation of ice thickness and frazil ice in the St. Lawrence Island polynya from satellite imagery, upward looking sonar, and salinity/temperature moorings, *J. Geophys. Res.*, 108(C5), 3149, doi:10.1029/2001JC001213, 2003.
- Krishfield, R. A., A. Proshutinsky, K. Tateyama, W. J. Williams, E. C. Carmack, F. A. McLaughlin and M.-L. Timmermans, 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(2), 1271–1305, 2014.
- Kwok, R., Cunningham, G., Zwally, H., and Yi, D, Ice, Cloud, and land Elevation Satellite (ICESat) over Arctic sea ice: retrieval of freeboard, *J. Geophys. Res.*, 112, C12013, doi:10.1029/2006JC003978, 2007.
- Melling H., D. A. Riedel and Z. Gedalof, Trends in the draft and extent of seasonal pack ice, Canadian Beaufort Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24501, doi:10.1029/2005GL024483, 2005.
- Richter-Menge, J. A., et al., Ice mass balance buoys: A tool for measuring and attributing changes in the thickness of the Arctic sea ice cover, *Ann. Glaciol.*, 44, 205 – 210, 2006.
- Rothrock, D. A., Y. Yu, and G. A. Maykut, Thinning of the Arctic sea-ice cover, *Geophys. Res. Lett.*, 26(23), 3469 – 3472, doi:10.1029/1999GL010863., 1999.
- Tamura, T., K. I. Ohshima, and S. Nishashi, Mapping of sea-ice production for Antarctic coastal polynyas. *Geophys. Res. Lett.* 35, L07606, 2008.
- Laxon, S. W., Giles, K. A., Ridout, A. L., Wingham, D. J., Willatt, R., Cullen, R., Kwok, R., Schweiger, A., Zhang, J., Haas, C., Hendricks, S., Krishfield, R., Kurtz, N., Farrell, S., and Davidson, M., CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 732–737, doi:10.1002/grl.50193, 2013.

チャクチ海における海洋酸性化：底層における長期の炭酸カルシウム未飽和

川合美千代¹、三船尊久¹、菊地隆²¹ 東京海洋大学² 海洋研究開発機構

北極海は、海洋酸性化により最初に炭酸カルシウム未飽和になる海として知られている。中でもチャクチ海底層は、豊富な底生生物を軸にした豊かな生態系で知られており、酸性化の影響が懸念されている。そこで本研究では、チャクチ海の底層における酸性化の実態を明らかにするため、2012年秋のみらいおよび2013年初夏のおしよ丸による航海観測を行い、底層水の炭酸カルシウム飽和度を調べた。その結果、2012年秋にはチャクチ海底層の観測点の半数以上でアラゴナイト未飽和、4分の1でカルサイト未飽和であった。一方2013年初夏の同海域の観測においては、未飽和な底層水は全く観測されなかった。考察の結果、炭酸カルシウム飽和度は水温、塩分、溶存酸素濃度と相関があり、2012年秋には底層水における酸素濃度が非常に低いことから、底層における有機物分解により溶存無機炭素が生じ、この炭素の蓄積がカルシウム飽和度を大きく低下していたことが明らかとなった。

次に、底層水の炭酸カルシウム飽和度が水温・塩分・溶存酸素の関数であることを利用し、炭酸カルシウム飽和度の季節変動の推定を行った。係留観測で得られた水温・塩分・溶存酸素のデータから、2年間にわたる炭酸カルシウム飽和度を計算した結果、秋と冬を中心に、数ヶ月以上の長期にわたってアラゴナイト未飽和であることが明らかとなった。人為起源二酸化炭素による海洋酸性化が進行すれば、未飽和の時期ならびに海域が増えることが予想される。このことは、チャクチ海底層の石灰化生物に大きな影響を及ぼす可能性があると考えられる。

海水減少に対する基礎生産者の応答

藤原 周¹、平譚 享²、鈴木 光次³、Lisa Eisner⁴、西野 茂人¹、菊地 隆¹、今井 一郎²、齊藤 誠一²

¹ 海洋研究開発機構

² 北海道大学大学院水産科学研究院

³ 北海道大学大学院地球環境科学院

⁴ NOAA-Fisheries, Alaska Fisheries Science Center

北極海の海水縁では、春季から夏季にかけての海水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。短い日照時間や海水によって、冬季の基礎生産がほぼ皆無に等しい北極海では、春季、夏季の基礎生産が一年間の海洋生態系の生産全体を支える重要な役割を持つ。しかしながら、近年の海水減少や海水後退時期の変化は、生物生産の原点となる基礎生産の起点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に関する研究は時空間的に断片的なものが多く、海水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。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、主に太平洋側北極海において、海水変動（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、様々な海域・時期で調べた。ここでは、衛星データおよび現場観測によって得た、海水融解タイミングの変化が基礎生産者に及ぼす影響について得た新しい知見中心に紹介する。

本事業で開発したこれらのアルゴリズム (Fujiwara et al., 2011, Hirawake et al., 2012) 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、海水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。海水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 5 μ m 以上）の割合が増加することを示した (Figure 1)。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。これらの結果は、北極海の昇温による海水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., in-press)。

一方、チャクチ海の北部海盆域においても、海水減少に対する植物プランクトンの群集構造の応答を、2008-2010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年よりも海水後退の時期が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 (Figure 2)。2008年におけるハプト藻類の優占は、海水後退が早く、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、夏季の海水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)。

北極海の海水は一様な減少傾向は見せておらず、ベーリング海のように冬季の海表面積が増加傾向をみせる海域もある。一連の研究は、海水分布と基礎生産者の空間的一般性を定量化することで、将来の海洋環境に対する海洋生態系の応答の予測の一助となることが期待される。

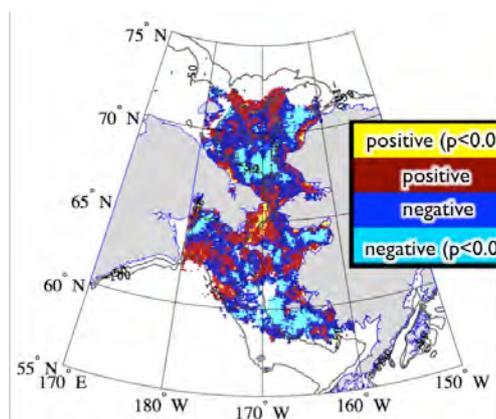


Figure 1. チャクチ海~ベーリング海陸棚域における海水融解タイミング (Julian-day) と春季ブルーム期の大型植物プランクトンサイズの順位相関係数分布。負の相関は海水融解日の早期化に伴い、春季ブルーム期に大型の植物プランクトンが増加することを表す。対象海域の7割の海域で有意な負の相関（18%の海域で有意：図中水色）を示した。

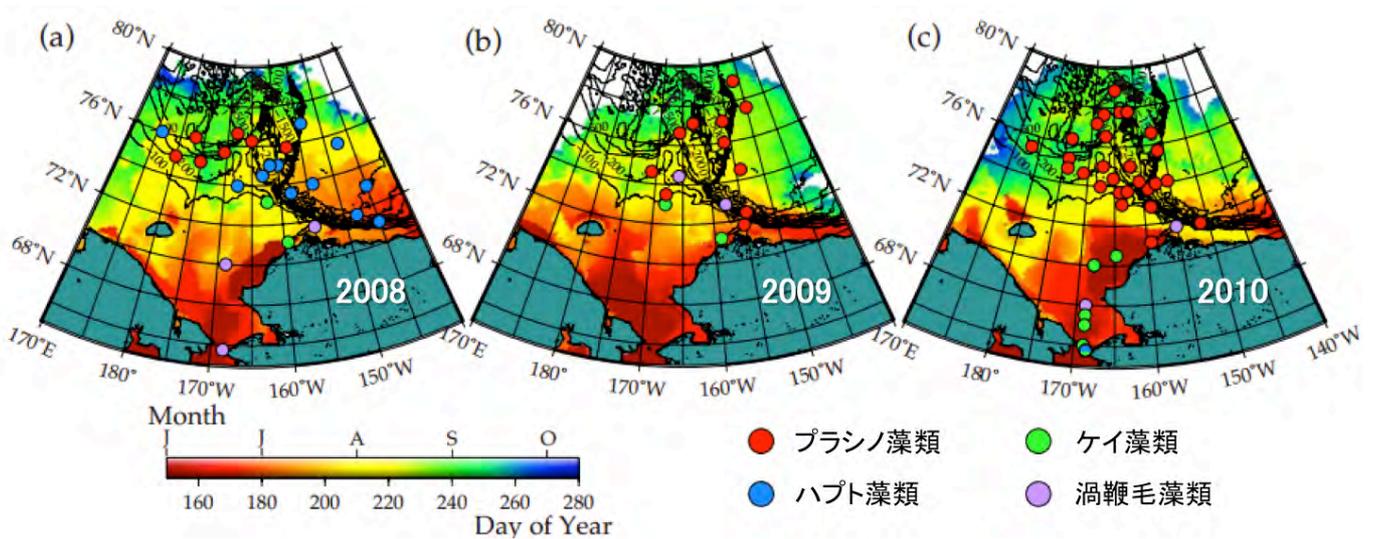


Figure 2. チャクチ海北部海盆域における、8-9月の優占植物プランクトン分類群と、海氷融解タイミング（カラーバー）分布の(a)2008、(b)2009、(c)2010年の比較図。2008年は1-2ヶ月早い海氷融解により高い表層水温が観測された。黒色コンターは水深を示す。

References

- Fujiwara, A., T. Hirawake, K. Suzuki, and S. -I. Saitoh. Remote sensing of size structure of phytoplankton communities using optical properties of the Chukchi and Bering Sea shelf region, *Biogeosciences*, 8, 3567-3580, 2011.
- Hirawake, T., K. Shinmyo, A. Fujiwara, and S. -I. Saitoh, Satellite remote sensing of primary productivity in the Bering and Chukchi Seas using an absorption-based approach, *ICES-J. Mar. Sci.*, 69, 1194-1204, doi:10.1093/icesjms/fss111, 2012.
- Fujiwara, A., T. Hirawake, K. Suzuki, I. Imai, and S. -I. Saitoh, Timing of sea ice retreat can alter phytoplankton community structure in the western Arctic Ocean, *Biogeosciences*, 11, 7, 1705-1716, 2014.
- Fujiwara, A., T. Hirawake, K. Suzuki, L. Eisner, I. Imai, S. Nishino, T. Kikuchi and S. -I. Saitoh, Influence of timing of sea ice retreat on phytoplankton size during marginal ice zone bloom period on the Chukchi and Bering shelves, *Biogeosciences*, in press.

北極海に輸送された太平洋産プランクトンの運命

松野孝平¹、山口 篤²、菊地 隆³

¹ 国立極地研究所

² 北海道大学大学院水産科学研究院、³ 海洋開発研究機構

Fate of transported Pacific plankton in the Arctic Ocean

Kohei Matsuno¹, Atsushi Yamaguchi², Takashi Kikuchi³

¹ National Institute of Polar Research

² Hokkaido University, Graduate School of Fisheries Sciences, ³ JAMSTEC

Zooplankton has an important role in energy transport from primary production to higher trophic organisms in marine ecosystem. Within the zooplankton community of the Arctic Ocean, copepods are the most dominant taxa. Copepod fauna is varied with the three oceans around Arctic Ocean (Atlantic, Arctic and Pacific Oceans). In the Arctic Ocean, *Calanus glacialis* (4 mm in total length) is dominated, while larger copepods (*Neocalanus cristatus*, *N. flemingeri*, *N. plumchrus* and *Eucalanus bungii*, all species are 5-9 mm in total length) are dominated in the Pacific Ocean. In the Chukchi Sea, Pacific sector of the Arctic Ocean, transported Pacific copepods have increased with the recent drastic sea-ice reduction (Matsuno et al. 2011). If this expatriated species can maintain their population in the Arctic Ocean, it induces greater changes in lower trophic levels of marine ecosystem. However, little information is available for probability of this change. In this study, we made ship-board incubation of Pacific copepods, which collected in the Chukchi Sea, revealed their reproduction, and discuss the probability of their immigration in the Arctic Ocean.

During September 2013, fresh zooplankton samples were collected by vertical hauls with ring net (mesh size: 0.33 mm) in the Chukchi Sea. From the fresh samples, live adult females of Pacific copepod *N. flemingeri* were sorted, and incubated at ambient temperature (0°C) in the dark. The presence of eggs was checked every day, and egg numbers were counted. The eggs were also incubated separately and checked daily for hatching during maximum ten days.

The abundance of adult females of *N. flemingeri* in the different samples ranged from 0 to 1.40 ind. m⁻³ (mean: 0.16 ind. m⁻³). It is notable that no adult males were detected throughout the study period. Through 100-day incubation, spawning was observed for all of the specimens (19 individuals) (Figure 1a-c), and nearly half (10/19) produced four or more clutches during the experiments. Spawning intervals were 11.5±5.6 days, which were longer than reported interval in Pacific Ocean because of low incubation temperature. The maximum clutch size was 1,005 eggs clutch⁻¹ (mean±SD: 377±79 eggs clutch⁻¹), and the clutch size decreased after 20 days of incubation (Figure 1d). The maximum number of clutches for a single specimen was ten. The total fecundity was 960±316 eggs female⁻¹ (mean±SD), and this range was similar with reported value in the Pacific Ocean. However, hatching success was 7.5±8.7%, which is extremely low compared with 93% in the Pacific Ocean. Low hatching success is considered to be caused by failures of fertilization. In the typical life cycle of *N. flemingeri* in the North Pacific and Bering Sea, mating and spawning both occur below a 250 m depth. Because the spawning adult females in the Chukchi Sea were collected at 0-49 m, they presumably had either matured prior to being transported by Pacific waters into the Chukchi Sea or they could not descend to a deeper layer because of the shallowness (ca. 50 m) of the Chukchi Sea in comparison to the Pacific Ocean. These abnormal conditions may affect the mating and reproduction of *N. flemingeri*, resulting in low hatching success. Concerning to the potential recruitment numbers (=female abundance [females m⁻²] × fecundity [eggs female⁻¹] × hatching success [nauplii eggs⁻¹]), 1,591,841 nauplii m⁻² for the Pacific Ocean, while 1,852 nauplii m⁻² of the Arctic Ocean in this study, which is about 1/800 of the Pacific Ocean. The potential recruitment number for *N. flemingeri* suggests that it is unlikely to establish expatriate Arctic population in the near future (Matsuno et al. 2015).

動物プランクトンは、海洋生態系において植物プランクトンによる一次生産を、魚類などの高次捕食者に受け渡す役割を担っている。北極海の動物プランクトン相で最優占する分類群はカイアシ類である。カイアシ類の種類相は北極海をめぐる3大洋(太平洋、北極海および大西洋)毎に異なっている。北極海には全長で4 mmと比較的小型な *Calanus glacialis* が優占するが、北太平洋やベーリング海では全長5-9 mmと大型な *Neocalanus cristatus*、*N. flemingeri*、*N. plumchrus* および *Eucalanus bungii* が優占する。太平洋側北極海に位置するチャクチ海では、近年の海氷衰退に伴い、太平洋から輸送されてきた太平洋産種が増加している (Matsuno et al. 2011)。この流入する太平洋産種がもし北極海内に定着すれば、海洋低次生態系構造の改変をもたらすことになるが、その可能性について

ては未だ不明な点が多い。本研究は、チャクチ海において採集された太平洋産種について船上で飼育実験を行い、その再生産について明らかにし、定着の可能性について考察を行ったものである。

2013年9月に、チャクチ海において、リングネット(目合い0.33 mm)による生鮮試料採集を行った。試料中から生きた太平洋産カイアシ類 *N. flemingeri* の雌成体をソートし、現場水温の0°Cで飼育した。毎日産卵の有無を観察し、産卵が見られた際には卵数を計測した。卵は別途飼育し、孵化の有無について毎日、最長10日間の観察を行った。

調査期間中に出現した *N. flemingeri* の雌成体は、0–1.40 ind. m⁻³ (平均で0.16 ind. m⁻³) であったが、雄成体は全く出現しなかった。チャクチ海で採集された全ての雌成体(19個体)において、産卵が確認された(Figure 1a-c)。およそ半分の個体(10個体/19個体)は、実験中に4回以上の産卵を行った。産卵間隔は11.5±5.6 daysであり、これは低水温のために北太平洋での結果と比べて長かった。最大産卵数は1,005 eggs clutch⁻¹ (平均±標準偏差: 377±79 eggs clutch⁻¹) であり、飼育開始から20日後に減少が見られた(Figure 1d)。一個体あたりの最大産卵回数は10回であった。生涯産卵数は、960±316 eggs female⁻¹ (平均±標準偏差) で、これは北太平洋の既報の値と同程度であった。しかし、孵化率は7.5±8.7%と北太平洋の93%に比べて非常に低かった。この非常に低い孵化率は、卵が未授精のまま産卵されているためと考えられる。北太平洋やベーリング海における *N. flemingeri* の通常的生活史では、交尾や産卵は水深250 m以深で見られる。本研究で産卵を行った雌成体は0–49 mと浅いチャクチ海で採集されていたため、彼らは恐らく成熟したのちに太平洋水によってチャクチ海に輸送されてきた、あるいはチャクチ海が北太平洋と比べて50 mと浅かったために深海に潜れなかった個体であると考えられる。このような通常の生息環境とは大きく異なる状況が、*N. flemingeri* の交尾と再生産に影響を与え、その結果として孵化率が低かったと考えられる。単位面積あたりの次世代回帰個体数(=雌成体出現個体数 [females m⁻²] ×生涯産卵数 [eggs female⁻¹] ×孵化率 [nauplii eggs⁻¹]) を計算したところ、北太平洋では1,591,841 nauplii m⁻²であったのに対し、本研究では1,852 nauplii m⁻²と北太平洋の800分の1であったことから、現時点では、北極海内で太平洋産種は次世代を残せず、死滅していると考えられる(Matsuno et al. 2015)。

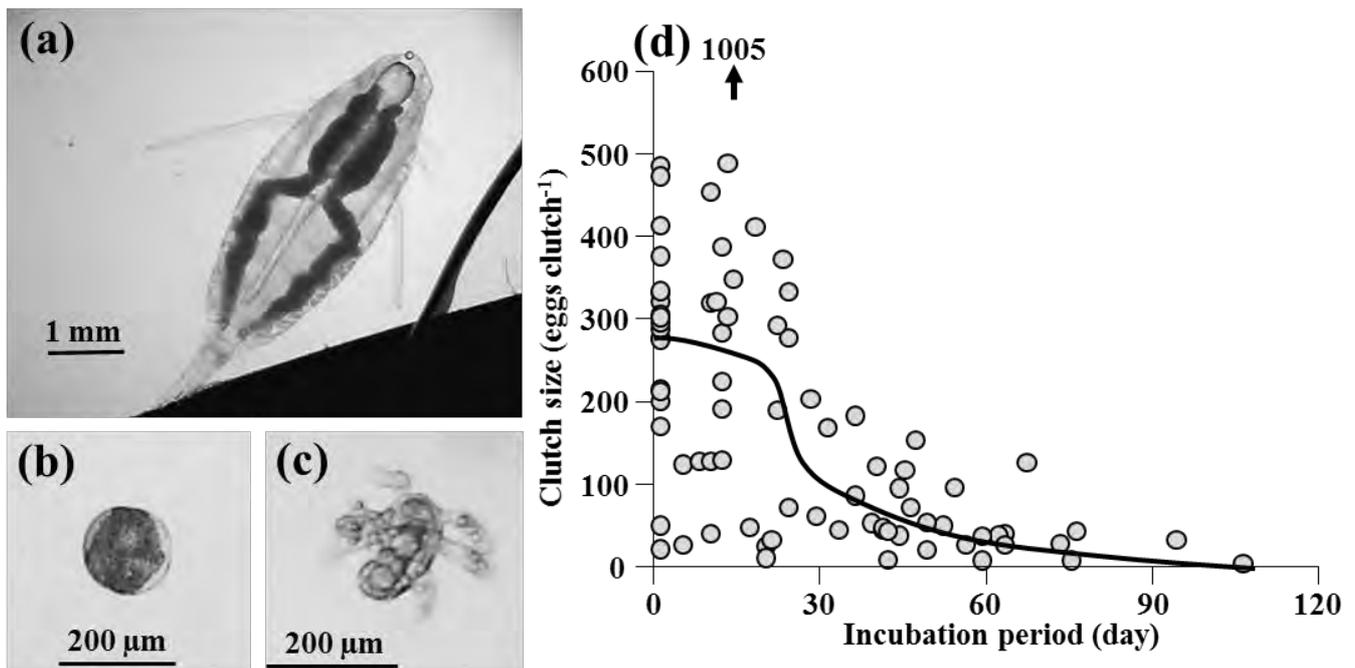


Figure 1. Adult female (a), reproduced egg (b) and nauplius (c) of *Neocalanus flemingeri* in the Chukchi Sea. Temporal changes in the clutch size of *N. flemingeri* during the incubation period (d). Solid lines indicate eye-fitted line.

References

- Matsuno, K., A. Yamaguchi, T. Hirawake and I. Imai, Year-to-year changes of the mesozooplankton community in the Chukchi Sea during summers of 1991, 1992 and 2007, 2008, *Polar Biology*, 34(9), 1349-1360, 2011.
- Matsuno, K., A. Yamaguchi, T. Hirawake, S. Nishino, J. Inoue and T. Kikuchi, Reproductive success of Pacific copepods in the Arctic Ocean and the possibility of changes in the Arctic ecosystem, *Polar Biology*, 38(7), 1075-1079, 2015.

北極域における温暖化増幅メカニズムの解明

野沢 徹¹, 杉本 敦子², 浮田 甚郎³, 榎本 浩之⁴, 青木 周司⁵, 高田 久美子^{4,6}

¹ 岡山大学大学院自然科学研究科

² 北海道大学大学院地球環境科学研究院

³ 新潟大学大学院自然科学研究科

⁴ 国立極地研究所国際北極環境研究センター

⁵ 東北大学大学院理学研究科

⁶ 国立環境研究所地球環境研究センター

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記録した。地球全体の平均地上気温は1880年以降の百数十年間で約0.85°Cも上昇しているが、北極域では地球平均のおよそ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が及んでいる。

北極域は気候変動に対する感度が大きく、地球上の他の地域に先駆けて地球温暖化の影響が顕著に現れると考えられている。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、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 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、GRENE 戦略研究目標1においては、数値モデリングだけでなく陸域や大気、雪氷、炭素循環に関する研究課題が協力して、北極域における温暖化増幅メカニズムの解明に関する研究を推進してきた。本講演では、これらの成果をまとめた結果について報告する。

一点目は、北極温暖化増幅メカニズムの総合解析である。第5次気候モデル相互比較プロジェクト（CMIP5）に参画した大気海洋結合気候モデルによる数値シミュレーション結果32例に対して、地表面エネルギー収支に基づく気候フィードバック解析を適用し、地表面における北極温暖化増幅プロセスの相対的な寄与について解析を行った。北極温暖化増幅は夏季よりも冬季に顕著であり、北極海上のアイス・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、夏季における正味の温暖化増幅は小さいこと、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こと、陸上でのアイス・アルベドフィードバックは初夏に顕著であり、一部の熱量は蒸発冷却により大気中に放出されるものの、陸面による吸収は小さいため、海上ほど季節振幅が大きくはないこと、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と、などが分かった。

二点目は、個別フィードバックの解析および検討である。北極温暖化増幅メカニズムの総合解析により、秋季から冬季にかけての北極温暖化増幅においては、雲の変化による温室効果の増大が重要であることが分かったことから、MIROC5の過去再現実験を解析することにより、北極海の海氷減少にともなう雲量変化の気候影響について調べた。過去再現実験では、衛星観測結果と整合的な、長期的な海氷減少に起因すると思われる長期的な雲量増加が10月に見られた。対流圏下層では雲量の増加がみられるが、地表面により近い層では雲量の減少傾向もみられ、雲底高度が上昇していることを示唆している。雲の増加による下向き長波放射量への影響を調べた結果、地表面の下向き長波放射量において、CO₂や水蒸気の増加によると考えられる晴天時放射の増加に対し、追加的な雲による放射量増加が40~60%もあることが確認された。また、従来は認識されていなかったフィードバック過程として、大気循環（残差循環）の変化が北極温暖化増幅をもたらす可能性について新たな知見が得られた。残差循環は大気擾乱（運動量、熱）により駆動され、大気中での物質循環を近似していると認識されており、この循環は極域では下向きの流れを持つ。今回、AFESによる海氷減少実験の解析から、海氷が少ない状況下では残差循環が強化され、極域では下降気流が強化されることにより、北極域対流圏では断熱加熱をもたらすことが示唆された。この結果は観測（客観解析）データとも整合的であり、海氷減少と残差循環の強化に何らかの関係があることを示唆するとともに、力学的なプロセスによる新たな温暖化増幅メカニズムの存在を意味している。観測的な研究からは、積雪・アルベドフィードバックの定量化や、炭素循環フィードバックの影響についても検討を加えた。

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

杉本敦子¹、野沢徹²、浮田甚郎³、榎本浩之⁴、青木周司⁵、高田久美子^{4,6}

¹北海道大学・大学院地球環境科学研究所、²岡山大学・自然科学研究科、³新潟大学・自然科学系、⁴極地研究所・国際北極環境研究センター、⁵東北大学・大学院理学研究科、⁶国立環境研究所・地球環境研究センター

北極域では急激な温暖化が進行しているが、土壌、植生、雪氷、大気、海洋の炭素や水、そしてエネルギー循環がどのように変化し、そして全球にフィードバックするか、観測の困難さなどから不確実性が極めて大きい。GRENE 戦略目標 2 に対し、大気・海洋における温室効果ガス、陸域の生態系および積雪・氷河・氷床の観測、大気・エネルギー輸送に関する解析とともに、モデル研究を課題 1～5 で実施した。陸課題を中心としてこれまで長期にわたる観測が継続されてきた地点の観測データに基づき、課題を超えてモデル-観測間の連携を進め、モデル研究者間の連携とモデル-観測研究者間の連携体制を構築した。これらの研究成果により北極域で現在どのような変化が進行し全球に影響を及ぼすのかが少しずつではあるが明らかになってきた。北極域の変化が全球に及ぼす影響として、炭素循環、積雪変動、熱輸送、氷河・氷床の変化に分けて述べていく。

まず、高緯度域では大気 CO₂ 濃度は大きな季節変動を示すことが知られている。その季節変化の振幅は近年小さくなっていることから高緯度陸域の CO₂ 吸収が強まっていることが示唆されている。課題 5 の大気 CO₂ の観測に基づくインバージョンモデル、および課題 2 の陸上での CO₂ フラックス観測の結果は、北東ユーラシア陸域は現在 CO₂ の吸収源として機能していることを示している。一方で、その変化傾向は地域毎に異なる可能性が明らかとなった。

北極海を囲んで広がる周極域の生態系は、永久凍土の有無および状態や植生が地域毎に異なる。高緯度帯の生態系で CO₂ の吸収に大きな役割を担っていると考えられる高緯度森林生態系は、樹木年輪の解析により過去の生長速度の変化傾向を知ることができる。陸課題が観測を実施したサイトのうち、ヨーロッパの森林帯、東シベリアタイガ林 2 サイト、東シベリアタイガ-ツンドラ境界、カナダ森林帯と森林ツンドラの 6 サイトの樹木の年輪幅指数の過去 50 年の変化傾向は、ヨーロッパ (エストニア) とカナダ森林ツンドラでは上昇、東シベリアでは低下を示した。年輪幅が低下を示した東シベリアの森林帯の 2 地点では、気温が高いと樹木の生長が悪くなる傾向を示し、近年の温暖化により樹木の生長が低下していることを示している (Tei et al., 2013)。一方、これら 6 サイトの植生動態モデル (SEIB-DGVM) による過去 50 年間の計算結果は、エストニアとカナダ森林ツンドラでは樹木年輪幅の傾向と同様、樹木の純一次生産量は上昇傾向を再現したが、東シベリアの各サイトに対しては、樹木年輪幅と気温に見られた負の相関を再現できなかった。ITRDB (The International Tree-Ring Data Bank) の年輪幅データを用いて環北極全体を見ても、地域毎に特徴が見られ、東シベリア、アラスカ、カナダの内陸部で生長量の低下が見られた。

CMIP5 将来予測実験の MIROC の出力を用いた植生動態モデル (SEIB-DGVM) の 2100 年の予測結果は、北極域全域で純一次生産 (NPP) は増加となったが、一方で呼吸量も全域で増加するため、収支量として計算される CO₂ 吸収量である生態系一次生産 (NEP) は北極と北米西部で負 (CO₂ 放出) となった。東シベリアの森林帯では大きな生産量の増加が予想され、NEP も増加するという計算結果となったが、すでに述べたように、東シベリアは、現時点のモデルで気温上昇による NPP の低下が再現できていない地域である。現時点では北極域森林帯は CO₂ の吸収源として機能しているが、この機能が将来低下し、吸収源としての機能が弱まる可能性がある。東シベリアでは気温上昇に伴い、すでに NPP の低下が始まっている。

炭素収支の見積もりを精緻化するためにはモデルの改良が不可欠である。陸課題を中心に推進した GTMIP (Miyazaki et al., 2015) (GRENE-TEA Model Inter-comparison Project) に参加する生態系モデルと課題 5 の大気インバージョンモデルの NEP の計算結果を観測スーパーサイトであるヤクーツクのフラックス観測結果と比較した。月別のモデルのアンサンブル平均は概ね観測値と一致したが、インバージョンモデルでは冬期に CO₂ の放出となり年間の値が小さく見積もられた。また生態系モデルは現時点で植生または土壌有機物の分解のどちらかを重視して開発されており、光合成が卓越する夏期間は前者のモデルが、土壌呼吸が卓越する秋季は後者のモデルが観測結果を良く再現した。しかしながら、NEP を計算していくためにはどちらのプロセスも必要である。

CO₂ に次いで重要な温室効果であるメタンは、2000 年代に入って大気中の濃度の上昇が止まっていたが、2006 年頃から再び上昇が始まった。濃度上昇に伴い、大気メタンの炭素同位体比が低下を示したことから、この濃度上昇が放出量の増加によるとすれば、湿地からのメタンの放出量が増大したことを示している。また、メチルクロロホルムの南北半球間の濃度差と濃度比の関係から、OH ラジカル濃度がこれまで考えられていたものとは異なり、

南北半球間でほぼ同じであるという結果が得られた (Patra et al., 2014)。この結果は、メタン放出源の大きさを再考する必要があることを示している。

雪氷課題では、MODIS と AVHRR を用いて積雪面積と湿雪面積のデータセットを作成することに成功した。その結果 1982～2013 年の積雪面積の変化トレンドは地域により異なり、ユーラシアの西半分で積雪期間の顕著な短縮が明らかとなった。特にヨーロッパでは、1 ヶ月以上の積雪期間の短縮が見られる地域が広がっている。積雪期間の短縮は生長期間の延長をもたらす可能性がある。ITRDB の年輪データはヨーロッパの広い範囲に樹木の生長が良くなった地域が広がっている。多くの地域で夏の降水量と年輪幅指数が正の相関を示し、夏の降水量が多いと生長が良いという関係が見られる。一方、春の気温との関係を見ると、3～5 月の気温とも正の相関を示しており、このことは、融雪の早まりが生長を促進した可能性を示唆している。

北極域の変化が全球に及ぼす影響の一つとして、全球の熱収支構造の変化がある。中緯度帯から高緯度域への熱輸送は、課題 1 の研究成果から示されたように、北極域温暖化の原因の一つであり、近年この熱輸送量が増大している。課題 3 の解析結果は、80 年代から 2000 年代に増加した熱輸送は、定常 (長期) 成分の乾燥静的熱輸送であることを示している。また、緯度 70 度における年間の熱輸送量は、年々変動を示し、その変動は定常・乾燥静的熱輸送成分の変動によることがわかった。つまり、北極域の温暖化は、気温が上昇することだけではなく、温暖化によって大気循環場が変化することで全球の熱収支構造を変化させていると言える。このような大気循環場の変化は極端現象の原因にもなり得るため、生態系にも大きな影響を及ぼし、炭素循環を変化させて全球に影響を及ぼす可能性がある。

北極域の氷河・氷床融解は海水準を上昇させると考えられる。これまで、比較的不安定で数が多い山岳氷河の融解による淡水供給が重要であることが示されているが、近年グリーンランド氷床の融解による変化がこれに加わっている (IPCC, 2013)。グリーンランド氷床の変化のうち、力学過程がよくわかっていない氷河末端のカービングについて、観測データの収集とモデルの改良を行った。また、氷床表面の融解を促進する不純物や微生物の観測も行われた。グリーンランド氷床モデルの比較実験にも参加した。

References

- Miyazaki, S., et al., The GRENE-TEA model intercomparison project (GTMIP): overview and experiment protocol for Stage 1, *Geoscientific Model Development*, 8(9), 2841-2856, doi:10.5194/gmd-8-2841-2015, 2015.
- Patra, P. K., et al., Observational evidence for interhemispheric hydroxyl-radical parity, *Nature*, 513(7517), 219+, doi:10.1038/nature13721, 2014.
- Tei, S., A. Sugimoto, H. Yonenobu, T. Ohta, and T. C. Maximov, Growth and physiological responses of larch trees to climate changes deduced from tree-ring widths and delta C-13 at two forest sites in eastern Siberia, *Polar Science*, 8(2), 183-195, doi:10.1016/j.polar.2013.12.002, 2014.

北極-中緯度気候リンクの理解に向けて

浮田甚郎
新潟大学自然科学系・理学部

Towards understanding of the Arctic-mid-latitudes climate linkage

Jinro Ukita
Niigata University

近年、北極域と中緯度間の気候リンクの研究が非常に盛んである。これは、北極域の環境変動、とくに北極域の海氷減少と中緯度の気象・気候の間に統計的有意性以上の物理的関係がある事をさす (Honda *et al.*, 2009, Jaiser *et al.*, 2012, 2016, Cohen *et al.* 2014, King *et al.*, 2015, Nakamura *et al.*, 2015, 2016)。具体的には、夏から秋にかけて北極海それもバレンツ-カラ海の海氷が少ないと、続く冬季に、日本を含む極東・ユーラシアで寒冬・大雪が多い傾向があること、さらには中緯度陸域の広い範囲でも極端現象の増加が見られる事などが分かってきている。本発表では、この北極域と中緯度間の気候リンクについて、その研究背景からはじめて、本プロジェクトでどのような研究が行われたのか、また何が分かって、何がこれからの課題として残されているかについて述べる。尚、この研究発表では戦略目標 3a の「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」に関する研究内容を日本にとどまらず北半球中緯度全体に広く拡張する。

References

Cohen, J., J. A. Screen, J. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland, and J. Jones (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather (Review), *Nat. Geosci.*, 7, 627-637, doi: 10.1038/NNGEO2234.

Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane (2009). Influence of low Arctic sea ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08707. doi:10.1029/2008GL037079.

Jaiser, R., K. Dethloff, D. Handorf, A. Rinke, and J. Cohen (2012). Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation. *Tellus A* 64:11595. doi:10.3402/tellusa.v64i0.11595.

Jaiser, R., T. Nakamura, D. Handorf, K. Dethloff, J. Ukita, and K. Yamazaki (2016). Atmospheric winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations, submitted to *J. Geophys. Res.*

King, M. P., M. Hell, and N. Keenlyside (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.

Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita (2015). A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn, *J. Geophys. Res.*, 120, 3209-3227, doi:10.1002/2014JD022848.

Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita (2016). The stratospheric pathway for Arctic impacts on mid-latitude climate, submitted to *Geophys. Res. Lett.*

北極海環境変動研究：海水減少と海洋生態系の変化

菊地 隆¹、GRENE 北極 研究課題 6 の研究者

¹ 国立研究開発法人海洋研究開発機構

Ecosystem Studies of the Arctic Ocean with declining Sea ice (ECOARCS)

Takashi Kikuchi¹, and members of GRENE/Arctic research project No.6

¹Japan Agency for Marine Earth Science and Technology (JAMSTEC)

The recent drastic decrease in Arctic sea ice causes various changes in the Arctic climate and ecosystems. For instance, melting of sea ice improves light environment for phytoplankton growth but at the same time it increases surface stratification to suppress nutrient supply from lower layer. The benthic organisms are also threatened by changes in Arctic environments. Currently, they feed on the ice-edge bloom of phytoplankton that sinks to the seafloor (Pelagic-Benthic type). However, warming of the Arctic Ocean may increase the population of zooplanktons and fishes, which will feed on phytoplankton at the ice-edge (Pelagic-Pelagic type). Furthermore, reduction of sea ice also changes habitat distributions for species in the Arctic and sub-Arctic seas. For better understanding changes in Arctic marine ecosystems, we conduct multi-disciplinary studies examining not only biological but also physical and chemical aspects of the drastically changing Arctic environments.

The research project No. 6, “Ecosystem studies on the Arctic Ocean with declining sea ice (ECOARCS)”, was initiated in 2011 under the GRENE Arctic Climate Change Research Project in Japan as well as other GRENE/Arctic research projects. In the ECOARCS project, we mainly focus on the Pacific sector of the Arctic and sub-Arctic seas (Pacific Arctic region: PAR), where various environmental changes have already accompanied the sea ice reduction. Hydrographic surveys by R/V Mirai (JAMSTEC), TS Oshoro Maru (Hokkaido University), and various ice-breakers under international collaboration were carried out. We also conducted year-round mooring observations that are useful for obtaining hydrographic, chemical and biological data even in winter time. To clarify the feeding behavior of higher trophic levels, we use the techniques of bio-logging and monitor large areas of the Arctic Ocean via satellite throughout the year. Furthermore, we are developing sea ice and marine ecosystem models for the Arctic Ocean that can diagnose in detail the ongoing changes in the Arctic marine ecosystem and may predict its future.

Under the project, many scientific results have already published and more will be published soon. Nishino et al. (2011; 2013) shows responses of sea ice reduction to distribution of nutrients, biological pump and primary production in the PAR. Whereas enhanced Beaufort Gyre due to sea ice reduction and accumulated freshwater prevent biological production in the Canada Basin, nutrient supply from shelves and greater light penetration enhanced biological pump outside the Beaufort Gyre, i.e., western Canada Basin and Makarov Basin. First observational evidence of ocean acidification, which is described as aragonite under-saturation, was found in the surface layer in the Canada Basin of the Arctic Ocean due to melting of sea ice [Yamamoto-Kawai et al., 2009], and such aragonite under-saturation has continued with changes in ocean conditions. Mooring observation data in the southern Chukchi Sea suggests that bottom water was also under-saturated with respect to aragonite over half a year [Yamamoto-Kawai et al., 2015].

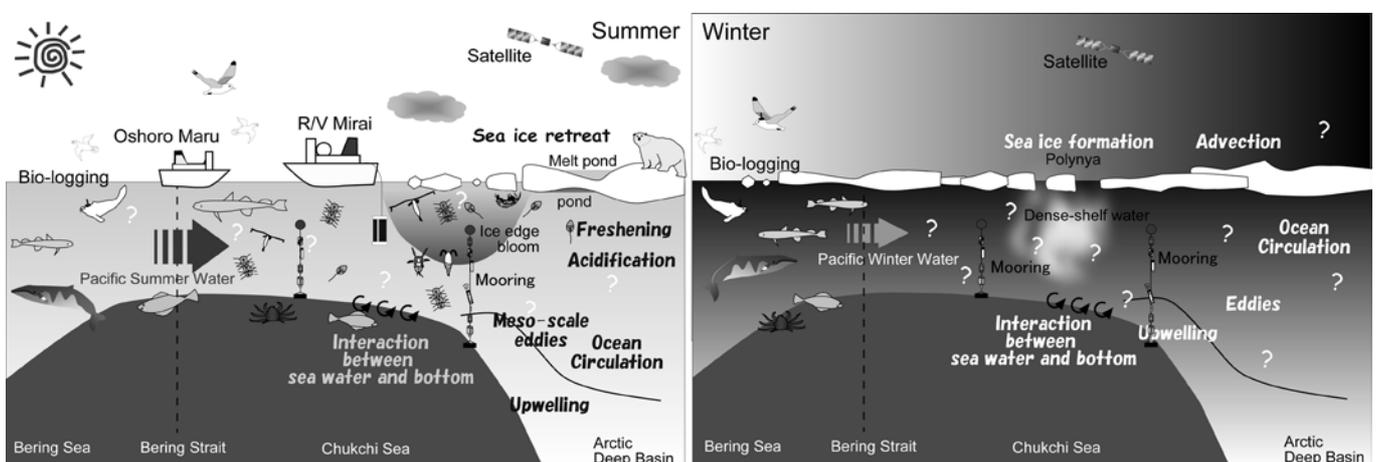


Figure 1. Schematics of marine ecosystem in the Pacific sector of the Arctic Ocean in summer (left) and winter (right).

There are clear evidences of linkage between recent sea ice reduction and increase in primary production in the PAR (e.g., Arctic Report Card 2014). Timing of sea ice retreat (TSR) is also one of the key factors to determine distribution, size, and community structure of phytoplankton. Fujiwara et al. (2015) examined influence of TSR on phytoplankton size during the period of marginal ice zone bloom. For example, earlier sea-ice retreat was associated with a dominance of larger phytoplankton in the period. Sea ice ecosystem model with ice algae was newly incorporated into the lower-trophic marine ecosystem model, which was previously coupled with a high-resolution general ocean circulation model. Using this model, Watanabe et al. (2015) examined seasonal and interannual variability of ice algal production and biomass in the PAR.

Regarding a change of dominant species in the PAR, some of observational evidences were reported. Fujiwara et al. (2014) showed a statistically significant difference in temperature between the haptophyte-dominated cluster and the other clusters, suggested that the change in the phytoplankton communities was related to TSR and the corollary increase in sea surface temperature. Northward shifts of distributions on the zooplankton community in the PAR were shown from results of TS Oshoro-maru 2008 cruises, which suggested that sea ice reduction would have a negative (positive) influence to Arctic (Pacific) species (e.g., Matsuno et al., 2011; Sasaki et al., 2015). Polar cod, *Boreogadus saida*, is a key species in the Arctic Ocean food web. Kono et al. (2015) examined the distribution pattern of *B. saida* and other fish larvae in relation to environmental conditions in the northern Bering and Chukchi seas. The result assumed that the spatial differences of *B. saida* observed across the study region reflect the temporal changes in abundance and size of them at a given location following ice retreat. Nakano et al. (2015) investigated trophic responses of Polar cod, *B. saida*, to changes in zooplankton and benthic invertebrate communities (prey) in the PAR. Yoon et al. (2015) suggested from results of bioenergetic model for chum salmon with 3-D marine ecosystem model that potential habitat which is an area where chum salmon could grow will expand northward into the PAR and may shrink regionally south of 71 N because the water temperature exceeded the optimal condition.

Under ECOARCS project, public symposium was held in Tokyo on November 9, 2015. In this presentation, we would like to introduce the outcome of the symposium as well as some highlights of our scientific results.

References

- Frey, K. E. et al, Arctic Ocean Primary Production [In *Arctic Report Card 2014*], <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>, 2014.
- Fujiwara, A. et al, Timing of sea ice retreat can alter phytoplankton community structure in the western Arctic Ocean, *Biogeosciences*, 11, 1705–1716, doi:10.5194/bg-11-1705-2014, 2014.
- Fujiwara, A., et al., Influence of timing of sea ice retreat on phytoplankton size during marginal ice zone bloom period in the Chukchi and Bering shelves, *Biogeosciences*, 12, 2015 (in press).
- Kono, Y. et al., Distribution pattern of Polar cod (*Boreogadus saida*) larvae in the northern Bering Sea and Chukchi Sea in the summers of 2008, 2009, and 2013, submitted to *Polar Biology* (under revision), 2015.
- Matsuno, K., et al., Year-to-year changes of the mesozooplankton community in the Chukchi Sea during summers of 1991, 1992 and 2007, 2008, *Polar Biology*, doi: 10.1007/s00300-011-0988-z, 2011
- Nakano, T. et al., Diets and body condition of polar cod (*Boreogadus saida*) in the northern Bering Sea and Chukchi Sea, Accepted to *Polar Biology*, doi: 10.1007/s00300-015-1769-x, 2015.
- Nishino, S. et al, Enhancement/reduction of biological pump depends on ocean circulation in the sea-ice reduction regions of the Arctic Ocean, *J. Oceanogr.*, 67, 305-314, doi: 10.1007/s10872-011-0030-7, 2011.
- Nishino, S. et al., Shoaling of the nutricline with an increase in near-freezing temperature water in the Makarov Basin, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 118, 1–15, doi: 10.1029/2012JC008234, 2013.
- Sasaki, H. et al., The species habitats of Arctic small and large and Pacific copepods in the northern Bering Sea and Chukchi Sea, To be submitted to *Biogeosciences Discuss.*, 2015.
- Watanabe, E. et al, Wind-driven interannual variability of sea ice algal production over the western Arctic Chukchi Borderland, *Biogeosciences*, 12, 6147-6168, doi:10.5194/bg-12-6147-2015, 2015.
- Yamamoto-Kawai, M. et al, Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: effects of ocean acidification and sea ice melt, *Science*, 326, 5956, doi: 10.1126/science.1174190, 2009.
- Yamamoto-Kawai, M. et al., Arctic Ocean Acidification: Results from GRENE and JOIS, *The Sixth Symposium on Polar Science*, Tachikawa, Tokyo, Nov. 2015.
- Yoon, S. et al, 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. Oceanogr.*, 131, 146-158, doi:10.1016/j.pocean.2014.12.009, 2015.

北極海航路の利用可能性評価につながる海水分布の将来予測

島田浩二¹、山口一²、羽角博康³

¹ 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

³ 東京大学大気海洋研究所

北極海航路が活用されつつある中、海水分布予測の必要性が高まっている。予測には、船舶の建造など 10 年以上の長期に渡る見通しを必要とするもの、船舶の運航決定等、数か月程度の予測を必要とするもの、北極海航行中における最適航路の選定等、短期予測（予報）を必要とするもの等、多様な時空間スケールに対応する予測が必要となる。また、現況の海水を含む数値モデルは、現実の厚さを含む海水変動の再現が十分行えない面があるなど、改善を要する状況にあった。その改善のためには、海水を含む北極海の諸現象に対する基礎的な理解とモニタリングデータ、そしてパラメタリゼーションが不可欠であり、3つのサブ課題から構成されるチームで観測とモデルの両輪で研究推進を行った。

羽角サブ課題では、高分解能モデルから、気候モデル、同化モデルに至るまで、必要とされる時空間スケールに及ぶモデル開発を行った。高分解能モデルでは、海洋渦を含めた熱塩輸送を再現できるモデルが開発され、特に短期中期予測に資するベースモデル構築に成功している。全球および長時間スケールをターゲットとした気候モデルについては、鉛直粘性のパラメタリゼーションや、実際の現場観測との対話・融合を行い局所的に生じる氷海ならではの海洋熱塩フラックスの改善を行った。気候モデルにより、2007 年に見られた海水激減のような極端現象は、内在する自然変動により起こりうることを示した。また、データ同化手法により、海水予測結果に改善がみられること、また、同化による改善影響の時間的持続性の評価等、予測の信頼性に関わる知見も得ている。

山口サブ課題では、時空間スケールに応じ、複数の実用的海水分布予測法の開発を行ってきた。運航決定に重要となる中期予測に関しては、経験法によるモデルを用い、大規模な海水分布予測を行えることを示した。その際に、並行して開発を進めた衛星による氷厚モニタリングデータを導入することにより、飛躍的に予測が改善されることが見出された。短期予測については、高分解能領域モデルを広域モデルにネスティングすることにより、海洋渦運動に伴う海水分布変動を再現でき、北極海航路上のチョークポイント（難所）となる海域における詳細予測が実現可能になることを示した。また、種々の束縛条件を課した全航路および局所領域航路選択アルゴリズムの開発を行い、合理的かつ安全な運航を行うためのシステムの構築を行った。さらに、北極海航路航行中に想定される船体着氷、種々の氷況における船舶推進性能・操縦性能評価、船体と浮氷片の衝突に関する安全性評価、北極海航路を選択する経済性判断など、本格的な北極海航路利用に備え、必要不可欠な総合的研究を推進した。

島田サブ課題では、海水変動を支配する要素となる海洋循環および海洋熱の影響と海水集積による厚さの局所的増大を中心に観測研究を進めた。その結果、太平洋側北極海では、海洋熱と海水の変動には有意な相関があり、海洋熱の変動は、海洋循環の変動によりもたらされること、海洋循環変動は、海水循環に対し遅延応答している等の知見を得た。また、種々の予測モデルでは、上手く再現できない夏の沿岸域に残存する海水分布は、海水の集積効果による影響が大きいことを明らかにした。その他、一年氷上の塩分成層したメルトポンドでは、メルトポンド面積を拡大させる融解が卓越し、新たなアイスアルベド・フィードバックの可能性を示唆した。

以上、3つのサブ課題により、様々な時空間スケールに対して海水分布予測を行うための問題点と改善方法が抽出され、精度評価を含めた海水分布予測を具体化する準備が整った GRENE 研究の 5 年間であったと結論できる。

GRENE 北極事業における 5 年間の成果

山内 恭（プロジェクト・マネージャー）^{1,2}、高田久美子（コーディネーター）^{1,3,4}
¹ 国立極地研究所；² 総合研究大学院大学；³ 国立環境研究所；⁴ 海洋研究開発機構

Outcomes from the 5-year GRENE Arctic Climate Change Research Project

Takashi Yamanouchi (Project Manager)^{1,2} and Kumiko Takata (Coordinator)^{1,3,4}

¹National Institute of Polar Research; ²Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI);

³National Institute for Environmental Studies; ⁴JAMSTEC

グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス（GRENE）北極気候変動研究プロジェクト「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 年間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である（別項「事業の概要報告」参照）。開始以来、環北極の様々な場所で観測が実施されたほか、解析やモデルによる研究が進められた。これらの観測・研究を通して、多くの新たな研究成果が生まれているが、その代表的なものとしては：

- (1) 北極温暖化増幅の季節進行を含めた詳しいしくみ、
- (2) 北極温暖化の中緯度影響、特に日本の冬の寒波・豪雪への影響、
- (3) 北極海氷予測と北極海航路の可能性、
- (4) 陸上植物活動の変化と大気中 CO₂ 吸収の増加、
- (5) 生態系に影響する海洋酸性化等の海洋環境変化と優占種の変化、
- (6) 氷河・氷床崩壊による海面上昇への寄与、

などがあげられよう。プロジェクトとしての全体のまとめ、戦略研究目標毎の関係を示した科学的成果の関連を図 1 に示した。

これら戦略研究目標に直接は貢献しなかった研究成果も各研究課題から生まれている。プロジェクトというものが、とかく所期の目的以外の成果を埋もれさせてしまうきらいがあるが、実はそこに重要な成果があることも多い。例として、氷河後退域の植生の温暖化による活性度変化、大気中エアロゾル-雲相互作用や衛星による雲量季節変化、ブラックカーボンや氷河微生物による雪氷表面の暗色化、CO₂ 全球季節変動振幅の変化と吸収源・放出源の評価、海水上メルトポンドの役割、などがある。

既に、多くの成果が得られたが、温暖化に伴う雲のふるまい、気象予測の高精度化、積雪変動とその影響の総合評価、降雪・河川流出・海面蒸発など含む水循環、将来の究極的な海水分布、永久凍土融解や海洋底からのメタン発生など、未だ解明しきれなかった課題も多く、今後の研究が待たれる。基盤施設としての雲レーダーをはじめ（衛星EarthCARE計画の地上検証としても期待）、GRENE で培われた分野融合の研究体制などをLegacyとして、これからの研究を進めて欲しい。既にArCS（Arctic Challenge for Sustainability 北極域研究推進）プロジェクトやYOPP（極域予測年；WMO/PPP極域予測プロジェクト下）をめざした計画が進んでいるが、それ以外にも、活発な研究推進が期待される。

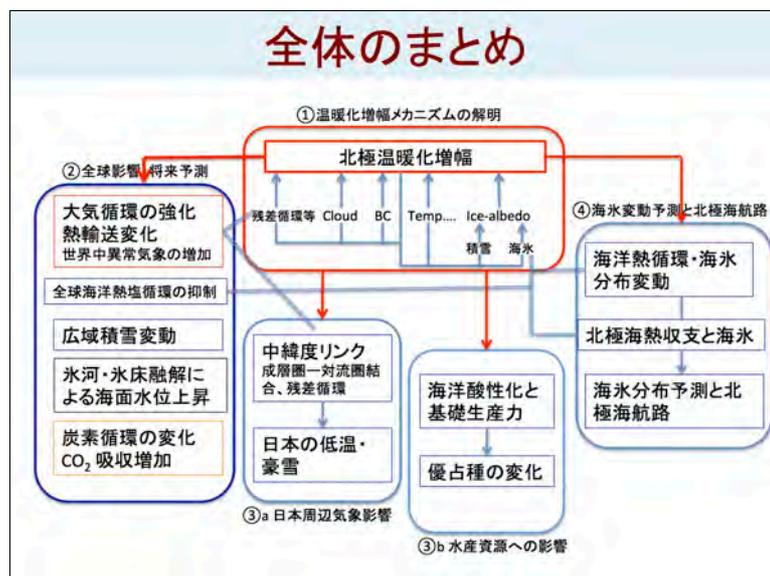


図 1 全体まとめとしての戦略研究目標毎（①～④）の研究成果の関係を示す

陸面モデル HAL における氷床域の取り扱いの改善

保坂征宏¹

¹気象研究所

Improvement of the soil/ice submodels over icesheet regions in a landsurface model HAL

Masahiro Hosaka¹

¹*Meteorological Research Institute*

気象研究所で開発している陸面モデル HAL において、氷床上の氷ならびに積雪のモデルを改変した。従来はとけない土壌（物性は氷）の上に積雪が積もるという取り扱いをしていたが、夏季にその積雪がなくなり裸氷が現れるような消耗域での動作に問題があるので、融ける氷体を導入した。

発表では、改良後の積雪の振る舞いを中心に報告する。

陸面モデル HAL における氷床域の取り扱いの改善

保坂征宏¹

¹気象研究所

Improvement of the soil/ice submodels over icesheet regions in a landsurface model HAL

Masahiro Hosaka¹

¹*Meteorological Research Institute*

気象研究所で開発している陸面モデル HAL において、氷床上の氷ならびに積雪のモデルを改変した。従来はとけない土壌（物性は氷）の上に積雪が積もるという取り扱いをしていたが、夏季にその積雪がなくなり裸氷が現れるような消耗域での動作に問題があるので、融ける氷体を導入した。

発表では、改良後の積雪の振る舞いを中心に報告する。

トップダウン法とボトムアップ法による CO₂フラックス推定値の比較 - シベリア・ヤクーツクでの試み -

高田久美子^{1,2,3}、Prabir Patra³、Dmitry Belikov^{1,2}、小谷亜由美⁴、森淳子^{1,3}、GTMIP グループ、佐伯田鶴³、丹羽洋介⁴、斉藤和之³、太田岳史⁵、Shamir Maksyutov²、町田敏暢²、A. Ganshin^{6,7}、R. Zhuravlev^{6,7}、杉本敦子⁸、青木周司⁹

¹ 国立極地研究所、² 国立環境研究所、³ 海洋研究開発機構、⁴ 気象庁気象研究所、⁵ 名古屋大学、⁶ Tomsk State University、⁷ Central Aerological Observatory、⁸ 北海道大学、⁹ 東北大学

Comparison of carbon fluxes estimated by top-down and bottom-up methods -- a case study at Yakutsk, Siberia --

Kumiko Takata^{1,2,3}、Prabir Patra³、Dmitry Belikov^{1,2}、Ayumi Kotani⁴、Junko Mori^{1,3}、GTMIP group、Tazu Saeki³、Yosuke Niwa⁴、Kazuyuki Saito³、Takeshi Ohta⁵、Shamil Maksyutov²、Toshinobu Machida²、A. Ganshin^{6,7}、R. Zhuravlev^{6,7}、Atsuko Sugimoto⁸、and Shuji Aoki⁹

¹ National Institute of Polar Research, ² National Institute for Environmental Studies, ³ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ⁴ Meteorological Research Institute, ⁵ Nagoya University, ⁶ Tomsk State University, ⁷ Central Aerological Observatory, ⁸ Hokkaido University, ⁹ Tohoku University

森林生態系の炭素収支が気候変動において重要な役割を担っているとともに大きな不確実性があることは広く認識されており、炭素収支に関するボトムアップ推定とトップダウン推定を比較することによって両者の不確実性を低減しようとする試みは、近年精力的に進められている。GRENE事業北極気候変動分野（以下、GRENE北極事業）では、観測データが乏しいシベリア域をはじめとした北極域で陸域観測や大気観測が実施されるとともに、プロセスモデルや逆解析モデルによる地上CO₂フラックスの推定も実施されている。

GRENE北極事業の陸域の研究課題では環北極域でエネルギー・水・炭素循環の観測を多地点で実施しており、その中の4地点で複数の陸域のプロセスベースモデル（陸面過程モデル）によるエネルギー・水・炭素フラックスの相互比較(GTMIP)(Miyazaki et al., 2015)を進めている。一方、温室効果気体の研究課題では航空機や地上ステーションでのCO₂濃度の高精度観測を実施するとともに、逆解析モデルによる地域スケールでのCO₂地上フラックスの推定を実施している。今回はNet Ecosystem Production (NEP) またはNet Biome Productivity (NBP) に相当する炭素収支量を対象として、ヤクーツクでの陸域タワー観測に基づくCO₂フラックス値、陸面過程モデルのCO₂フラックス推定値、逆解析モデルによるヤクーツク周辺500km四方のCO₂フラックス推定値について、1980年から2012年の月平均値で比較した（タワー観測は2004-2011年）。

その結果、タワー観測、陸面過程モデル、逆解析モデルの値は概ね一致し、6-8月に大きな吸収、他の月は小さな放出または吸収となる季節変化の特徴が共通して見られた。経年変動は、夏季平均値（6-8月）のほうが年間値よりもばらつきが小さい傾向が認められた。冬季はもともとフラックス値が小さい上に、不確実性の大きい呼吸過程が支配的であるため、冬季の推定値のばらつきが大きく、年間値もその影響を受けたと考えられる。夏季平均値の年々変動は、幾つかのモデルで観測と似た傾向が認められるが、一致・不一致の原因については、様々な原因があり、第一には、それぞれの推定方法が前提とする水平スケールの違いが考えられる。今後、森林火災のモデルにおける扱い方や、湿潤年・高温乾燥年などの特徴的な気象条件との対応などを個別に調査することが、一致・不一致の原因を明らかにし、CO₂収支の不確実性の低減ために必要である。

Carbon balance of the forested ecosystem is widely recognized as an important component in climate change research, and is also as uncertain at the same time. Some attempts have been made, recently, to understand the origin of the uncertainty by comparing estimates of carbon budget with bottom-up and top-down methods. In the Arctic Climate Change Research Project in the GRENE Program (hereafter as, GRENE Arctic project), the terrestrial and atmospheric observations are conducted in the Arctic regions, where observational data were not available, e.g., Siberia. At the same time, numerical studies are carried out to estimate CO₂ fluxes with process-based models and inversion models as a part of the GRENE Arctic project.

In the terrestrial sub-program of the GRENE Arctic project, observation on energy-water-carbon balances are conducted in the Circum-Arctic, and the fluxes are estimated by a suite of terrestrial ecosystem models at the four super-sites (GTMIP) (Miyazaki et al., 2015). In the greenhouse gas sub-program, atmospheric CO₂ concentration is measured at high accuracy using aircrafts and at surface stations and top-down/inverse modeling is performed for estimating regional CO₂ fluxes. We have

compared the CO₂ fluxes estimated from tower observation at Yakutsk, Siberia with the CO₂ flux estimates by the land-surface models for Yakutsk and CO₂ surface fluxes estimated by inverse models around the Yakutsk region (area ~500 x 500 km²). The Net Ecosystem Production (NEP) or Net Biome Production (NBP) are considered for this analysis at monthly time intervals over the period of 1980 - 2012 (from 2004 - 2011 for flux observation).

We find that the seasonal cycle of CO₂ flux consists of a large drawdown in June-August from the atmosphere, and weaker emissions or absorptions in other months. This result agrees well among the models and observation. As for the long-term changes, the model variation is smaller in summer (June-August) than for the annual values. That is because respiration takes a dominant part of CO₂ flux in winter, that would have large uncertainty both for the observation and the model estimation. Thus the large uncertainty in CO₂-flux estimates in winter would affect the large fluctuation for the annual values. The year-to-year variations in summer by some models agree, at least in part, with the observation, but the reasons for the agreement/disagreement should carefully be investigated. At first, the difference in the horizontal scale assumed in each method should be considered. Besides, the treatment of forest fire in the models is identified as one of the possible causes for model-to-model differences. Making thorough examination of the relation between the NEP/NBP variations and the extreme climate, such as very humid or hot-and-dry summer, is required to identify the causal process of the disagreements and to reduce the uncertainty in CO₂ balance.

References

Miyazaki, S., K. Saito et al., GRENE-TEA model intercomparison project (GTMIP): overview and experimental protocol for Stage 1, *Geosci. Model. Dev.*, **8**, 1-16, doi:10.5194/gmd-8-1-2015

将来予測における北極域温暖化増幅の季節性と大きさを決める支配的要因

吉森 正和¹、Alexandre Laîné^{2,3}、阿部 彩子³

¹北海道大学 大学院地球環境科学研究院

²国立極地研究所

³東京大学 大気海洋研究所

Dominant factors that determine seasonality and magnitude of Arctic warming amplification in the future projections

Masakazu Yoshimori¹, Alexandre Laîné^{2,3} and Ayako Abe-Ouchi³

¹Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

²National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan

³Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa, Japan

Response of the climate system to imposed perturbations is often formulated in terms of forcing and feedbacks. As the feedback processes interact each other, it is necessary to evaluate their individual contributions by either energy flux diagnostics or process-on/off experiments. During the GRENE project, we primarily have taken the former approach although the hybrid use of the two was also accomplished. The feedback analysis based on the energy flux quantifies the contribution of individual processes to climate change so that the sum of every contributions approximately recovers the actual change. The approach has a benefit of identifying the important processes and the comparison between simulations and observations is in principle possible.

The surface energy flux analysis was applied to the CMIP5 multi-model RCP4.5 simulations, and the energy flux analysis at the surface and individual atmospheric levels (CFRAM-Climate Feedback-Response Analysis Method) was applied to the MIROC5 model RCP4.5 simulation. In both methods, the mechanism of warming (or warming amplification) is distinct between Arctic Ocean, Greenland-Norwegian-Iceland Seas, Greenland, and ice-free Arctic land.

Although the albedo feedback on the ocean due to sea ice melting has the most significant influence in July, when the solar radiation is strong, the actual increase in temperature is considerably suppressed, because most of its energy is absorbed by the ocean or expended on melting snow and ice. However, the energy absorbed by the ocean is released in the period from autumn to winter (with the reduced sea ice cover and exposure of sea surface), and the increase in temperature is confined near the surface because of the strong influence of atmospheric stratification. In addition, the greenhouse effects due to cloud cover causes an increase in temperature in the period from October to January. These factors contribute to the significant increase in temperature.

On the land, the effect of melting (albedo feedback) appears with the highest strength in spring, and becomes small in summer. The amplitude of the temperature increase remains relatively flat throughout the year because, unlike the ocean, there is almost no delay effect in the heat absorption and release on the land. Just like the case of the ocean, however, the temperature increase is affected by the influence of atmospheric stratification and the greenhouse effect of clouds to a large extent in autumn, after October, to winter.

References

- Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, M. Watanabe, A. Oka, and T. Ogura (2014): Robust seasonality of Arctic warming processes in two different versions of MIROC GCM. *J. Climate*, **27**(16), 6358-6375.
- Yoshimori, M., M. Watanabe, A. Abe-Ouchi, H. Shiogama, and T. Ogura (2014): Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM. *Clim. Dyn.*, **42**(5-6), 1613-1630.
- Laîné, A., M. Yoshimori, A. Abe-Ouchi (2015): Surface Arctic amplification factors in CMIP5 Models: Land and oceanic surfaces, seasonality, Part I: Multi-model ensemble mean results. *J. Climate*, in revision.
- Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, and A. Laîné (2015): Identification and uncertainty evaluation of the feedback processes that cause amplification of Arctic warming. GRENE News Letter, No. 7, 2-3.
- Yoshimori, M. (2014): Arctic amplification. *Saihyo*, **60**, 2-15 [Written in Japanese: 吉森 正和 (2014): 北極温暖化増幅. 細氷, 日本気象学会北海道支部機関紙 **60**, 2-15].

東シベリアインディギルカ川低地における積雪空間分布

鷹野真也¹、鄭峻介^{2,3}、杉本敦子^{1,2}、ローマン・ペトロフ^{4,5}、トロフィーム・C・マキシモフ^{4,5}

¹ 北海道大学大学院環境科学院

² 北海道大学大学院地球環境科学研究院

³ 情報・システム研究機構国立極地研究所

⁴ ロシア科学アカデミー寒冷圏生物学研究所 (IBPC)

⁵ ロシア北東連邦大学 BEST センター

Spatial variation of snow cover in Indigirka lowland observed in spring 2014/2015

Shinya Takano¹, Shunsuke Tei^{2,3}, Atsuko Sugimoto^{1,2}, Roman Petrov^{4,5}, Trofim C. Maximov^{4,5}

¹ Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

² Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

³ National Institute of Polar Research Japan

⁴ Institute for Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS

⁵ BEST center, NEFU, Yakutsk, Russia

ツンドラ域における積雪は生態系や永久凍土動態へだけでなく、ローカルスケールから全球スケールにおける表層水収支及びエネルギーフラックスへも影響を及ぼすことが知られており、その観測データは極めて重要な意味を持つ。中でも積雪深及び積雪密度、積雪水量 (SWE) の時空間変動の定量は、水文学や生態学の多くの応用分野において必要不可欠である。そこで我々は、GRENE-TEA の東シベリア観測ステーションの 1 つであるロシア・インディギルカ川低地のチョクダ (70.62 N, 147.90 E) 周辺域において、2014 年 4 月と 2015 年 4 月にそれぞれ積雪調査 (雪の水同位体比の観測を含む) を行った。水同位体比は河川水や地下水等のソースの識別といった水文過程の研究において非常に有用なツールである。本研究では、(1) 調査域の積雪深及び積雪密度、SWE、積雪の水同位体組成の空間分布を示し、(2) SWE の推定を流域スケールへ拡大するために、SWE への地形と植生の影響・寄与を明らかにする、ことを目的とした。

本調査では、まずチョクダからインディギルカ川上流に向かって約 40km、チョクダから南西方向に約 25km のトランセクトを設定し、2014 年はそれぞれ 7 か所と 4 か所、2015 年は前者でのみ 12 か所でサンプリングを行った。集中観測サイトである K サイトでは、東西に約 1.2km の範囲内で異なる植生を含む計 25 か所 (2014 年) 及び 24 か所 (2015 年) でサンプリングを行った。観測した積雪深、積雪密度、SWE、 $\delta^{18}O$ は、2014 年がそれぞれ 30~90cm、0.137~0.318 g/cm³、70~200 mm、-36.5~-22.9‰の値を示し、また 2015 年がそれぞれ 12~83cm、0.131~0.325 g/cm³、20~160 mm、-31.2~-22.8‰の値を示した。地表の植生によって積雪の状態に統計的差異が見られ、積雪深は低木の生えた場所で一番深くなり、一方で積雪密度は氷上の積雪で一番高くなった。SWE は、2015 年は低木の生えた場所で最も高く、2014 年は湿地上で最も小さい結果となった。積雪の水同位体比と植生、積雪深、積雪密度の間にはそれぞれ相関が見られなかった。植生タイプごとの SWE 平均値から、衛星画像の植生図 (Morozumi et al., in preparation) を用いて調査地域 (10 km×10 km) の平均 SWE を算出し、2014 年と 2015 年でそれぞれ 100 mm 及び 78 mm という値が得られた。この SWE は本研究域の水収支・土壌水分変動を解明する上で非常に重要な知見となる。

東シベリアインディギルカ川低地における CH₄ 放出フラックスの年々変動と δ¹³C-, δ D-CH₄ から見たプロセス

新宮原諒¹、杉本敦子^{1,2}、村瀬潤³、鄭峻介^{2,4}、鷹野真也¹、両角友喜¹、梁茂厂^{1,*}、岩花剛^{2,†}、
トロフィーム・C・マキシモフ^{5,6}

¹ 北海道大学大学院環境科学院

² 北海道大学大学院地球環境科学研究院、³ 名古屋大学大学院生命農学研究科、

⁴ 国立極地研究所国際北極環境研究センター、⁵ ロシア科学アカデミー寒冷圏生物学研究所 (IBPC)、

⁶ ロシア北東連邦大学 BEST センター、

(現在: * 中国長江大学、† アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター)

Inter-annual variation in CH₄ efflux and its underlying processes with reference to δ¹³C-, δ D-CH₄ at the Lowland of Indigirka River in Northeastern Siberia

Ryo Shingubara¹, Atsuko Sugimoto^{1,2}, Jun Murase³, Shunsuke Tei^{2,4}, Shinya Takano¹, Tomoki Morozumi¹,
Maochang Liang^{1,*}, Go Iwahana^{2,†} and Trofim C. Maximov^{5,6}

¹ Grad. School of Envir. Sci., Hokkaido Univ., Sapporo, Japan

² Fac. of Earth Envir. Sci., Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, ³ Grad. School of Bioagr. Sci., Nagoya Univ., Nagoya, Japan,

⁴ NIPR, Tokyo, Japan, ⁵ IBPC SB RAS, Yakutsk, Russia, ⁶ BEST center, NEFU, Yakutsk, Russia

(Present addresses: * School of Horticulture and Garden, Yangtze Univ., China, † IARC, UAF, Fairbanks, USA)

北極圏に分布する湿地からの CH₄ 放出は、気候への重要なフィードバックの 1 つであり、このような CH₄ 放出量の気候に対する応答を理解し予測する必要がある。湿地からの CH₄ 放出フラックスは、水位 (土壌水分)・地温・植生等の環境因子によって支配されるが (Olefeldt et al., 2013)、フラックスと環境因子の定量的な関係は地域や時間スケールに依存し (Turetsky et al., 2014; Treat et al., 2007)、不明瞭である。その原因の 1 つは、CH₄ の放出が CH₄ 生成・酸化・輸送の 3 つのプロセスで構成され、各プロセスが環境因子に対して固有の応答をすることによる。CH₄ の安定同位体比 (δ¹³C-CH₄, δ D-CH₄) はこの 3 つのプロセスを反映し (Chanton, 2005 等)、自然条件で観測することができる。

東シベリアインディギルカ川低地は、永久凍土上にタイガ-ツンドラ境界域が成立し、生態系が気候変動に対し敏感に応答する可能性がある。我々はこの地域のチョクルダ (70.62 N, 147.90 E) 周辺において、チャンパー法による夏季 CH₄ 放出フラックスの年々変動 (2009-2013 年) と δ¹³C-, δ D-CH₄ を観測し、CH₄ 放出フラックスと環境因子の関係を上記 3 つのプロセスに基づいて理解することを目的とした。

カラマツの生育する乾燥したマウンドでは CH₄ フラックスが常に検出限界付近であったのに対し、ミズゴケやスゲ・ワタスゲの湿地では大きな年々変動が観測された。観測期間のうち 2011 年に突出した降水量を伴った湿潤化が起り、同年に湿地の CH₄ フラックスが増大した。2011 年から 2013 年にかけて水位は低下したが、この間活発な CH₄ の放出が継続した。さらに土壌間隙水溶存 CH₄ 濃度 (10-15 cm 深) が 2011 年から 2012 年に上昇し、2013 年も高濃度が保たれた。一方 CH₄ の同位体比から、湿潤化した 2011 年よりも 2012 年に CH₄ の酸化が抑制されたことが示唆され、湿潤化後に起こる土壌の還元が年を跨いで進行し、溶存 CH₄ 濃度や CH₄ フラックスに影響した可能性がある。当報告会において、このような CH₄ フラックスおよび溶存 CH₄ 濃度の変動と、上記 3 つのプロセスとの関係について発表する。

References

- Chanton, J. P., The effect of gas transport on the isotope signature of methane in wetlands, *Organic Geochemistry*, 36, 753-768, 2005.
- Olefeldt, D. et al., Environmental and physical controls on northern terrestrial methane emissions across permafrost zones, *Global Change Biology*, 19, 589-603, 2013.
- Treat, C. C. et al., Timescale dependence of environmental and plant-mediated controls on CH₄ flux in a temperate fen, *Journal of Geophysical Research*, 112, G01014, 2007.
- Turetsky, M. R. et al., A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands, *Global Change Biology*, 20, 2183-2197, 2014.

Ecology of willow in the Arctic for reconstruction of Indigirka river condition and its tributaries

Rong FAN¹, Shinya TAKANO¹, Tomoki MOROZUMI¹, Ryo SHINGUBARA¹, Shunsuke Tei^{1,2}, Trofim C. MAXIMOV^{3,4}
and Atsuko SUGIMOTO^{1,5}

¹*Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University*

²*National Institute of Polar Research*

³*Institute for Biological Problem of Cryolithozone, Siberian Division of Russian Academy of Science*

⁴*North-Eastern Federal University*

⁵*Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University*

Rapid and strong increases in temperature have been observed in Arctic region (Serreze and Barry, 2011) and further warming is expected to occur in next 50-100 years (ACIA, 2004; IPCC, 2013). It has been pointed out that boreal forest may expand northward (A J Hansen, et al, 2001). Taiga-tundra boundary ecosystem may potentially develop into either forest or tundra, and two ecosystems play important roles in cycling of materials and the global climate system. In Arctic region of northeastern Siberia, there is a large area of Yana-Indigirka-Kolyma lowland. River clearly links to regional climate and shapes surrounding ecosystem through a change in river water level. And these changes definitely control plant community composition, carbon allocation, nutrient cycles and then material cycling.

From vegetation map around Indigirka river (Morozumi, 2015), one sixth of area covered by willow, and unlike larch trees, willow as a kind of shrub can stand disturbance and high soil moisture, therefore fields of willow cover large area along Indigirka mainstream and its tributaries. For this particular character, willow growing along the rivers can be good records of river condition.

Carbon and Nitrogen stable isotope ratios of plants are known as integrated indicators of environment: plant $\delta^{13}\text{C}$ is controlled by environmental factors like aridity and solar radiation, while $\delta^{15}\text{N}$ is depending on N sources. Plant $\delta^{18}\text{O}$ is expected to record source water isotope ratio. River water $\delta^{18}\text{O}$ values of Indigirka and its tributaries show seasonal variation, and usually mainstream had lower $\delta^{18}\text{O}$ than tributaries. However, in 2011, tributary river water had the same $\delta^{18}\text{O}$ value as mainstream (Takano, personal communication). This condition was caused by flowing of main stream water into the tributary because of a high water level of mainstream. Therefore, in this study, it is hypothesized that the difference in $\delta^{18}\text{O}$ of river water between mainstream and tributary indicates the relative water level between mainstream and tributaries. If the difference in $\delta^{18}\text{O}$ between mainstream and tributary can be estimated from that of willow tree ring, it can be used to know Indigirka river water level.

Therefore using stable isotope ratios of willow, reconstruction of river water level will be challenged. Investigation of river condition will be also conducted in this study. Better understanding of characteristics of willow contribute to know the lowland ecosystem in this region.

Purposes of this study is to know:

- 1) current environment of river for willow (controlling factor of willow distribution and production) using willow $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and other parameters.
- 2) relationship between river water and willow $\delta^{18}\text{O}$, and confirm that it can be used to reconstruct water level differences between mainstream and tributaries.
- 3) water level reconstruction of the past by tree ring analysis.

The research site is near Chokurdakh (70.63°N, 147.91°E), Yakutia, Russian Federation, located in taiga-tundra ecosystem along Indigirka river. In this work, there are two steps. The first step is to use current year shoot to figure out the relationship between plant stable isotope and distance to river and to confirm spatial distribution. The second step is tree ring analysis. At the first step, three sites in total were set up, one of them is along Indigirka mainstream and two other sites are along tributary. At each site, three points along a transection from river to land. Samples were collected every 4 days totally 5 times from July 11th to August 1st, 2015. The samples including river water, soil water, willow stem, willow current year shoot. MAT253 was used for $\delta^{18}\text{O}$ analysis and Delta V was used for $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis.

Observed willow foliar $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ apparently showed differences between water logging and no water logging points. This means these parameters may be useful to know the environment of growing sites of willow. From $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of willows along the transection from river to land, sites of water logging range (water level) will be estimated. In summer of 2015, the $\delta^{18}\text{O}$ value of mainstream was also different from tributaries, which indicates the tributary had different water supplies from mainstream (mainstream water level lower than tributaries). In addition, soil water $\delta^{18}\text{O}$ at the nearest location of river was affected by river water. Stem water of willow was confirmed to reflect soil water $\delta^{18}\text{O}$.

The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of willow leaves at various site with different distance from the river will be analyzed to know the environment of each site. After deciding pretreatment method of samples and checking seasonal variability in growing season, $\delta^{18}\text{O}$ of willow will be analyzed to confirm that it reflects river water $\delta^{18}\text{O}$. This research will turn to tree-ring studies to reconstruct water level and the water level differences between mainstream and its tributaries.

References

- M.C. Serreze and R.G. Barry, Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis, *Global and Planetary Change*, 77(1), 85-96, 2011.
- ACIA, Impacts of a warming arctic: Arctic climate impact assessment, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004.
- T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, et al, 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, 2013.
- A.J. Hansen, R.P. Neilson, V.H. Dale, et al, Global change in forests: responses of species, communities, and biomes interactions between climate change and land use are projected to cause large shifts in biodiversity, *BioScience*, 51(9), 765-779, 2001.

タイガ-ツンドラ境界の GRENE-TEA 観測サイトの 高解像度植生図作成とメタン放出量推定

両角友喜¹、新宮原諒¹、ファンロン¹、鷹野真也¹、鄭峻介²、マキシモフトロフィム³、小林秀樹⁴、鈴木力英⁴、
杉本敦子^{1,5}

¹ 北海道大学大学院環境科学院

² 情報・システム研究機構国立極地研究所

³ ロシア科学アカデミー北方生物圏問題研究所

⁴ 海洋研究開発機構

⁵ 北海道大学地球環境科学研究所

High resolution vegetation mapping for GRENE-TEA observation sites and Estimation of CH₄ emission in Taiga-Tundra boundary

Tomoki Morozumi¹, Ryo Shingubara¹, Rong Fan¹, Shinya Takano¹, Shunsuke Tei², Trofim C. Maximov³, Hideki Kobayashi⁴,
Rikie Suzuki⁴ and Atsuko Sugimoto^{1,5}

¹ Graduate School of Environmental Science Hokkaido University

² National Institute of Polar Research Japan

³ Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS

⁴ Japan Agency for Marine-Earth Science Technology

⁵ Faculty of Environmental Earth Science Hokkaido University

Taiga-Tundra boundary ecosystem covers large area in Arctic region in eastern Siberia, and it is not easy to know its' complex structure due to heterogeneous surface conditions. Although it is believed that the tree line may shift northward in Taiga-Tundra boundary, there are still uncertainties about changes in vegetation and biogeochemical cycle. Wetland in the arctic lowland is one of the main sources of methane (CH₄) which is an efficient greenhouse gas. The CH₄ is produced in anoxic soil in wetlands, while CH₄ is oxidized by microbes in forest soil. Therefore, spatial variability of emission and absorption of CH₄ depend on the difference in vegetation types. Intensive field observations have been conducted at several sites in GRENE-TEA project in Taiga-Tundra boundary in Eastern Siberian arctic (e.g. Liang et al., 2014). However, no coincident vegetation map is available. Vegetation map is essential to know the roles of terrestrial ecosystem by scaling the observation results, therefore, we conducted vegetation mapping by high resolution satellite image and estimated local scale CH₄ emission in the Taiga-Tundra boundary ecosystem.

Field observation of vegetation and CH₄ flux were mainly conducted in summer from 2013 to 2015. To produce a vegetation map (10 x 10km), we conducted an in-situ visual and spectral observation, and then conducted up-scaling by remote sensing approach with satellite images. High resolution multispectral satellite image (WorldView-2, July 9, 2013, DigitalGlobe) were classified. Using the field data on vegetation compositions, aerial photographs and spectral reflectance for supervising, vegetation was classified into 8 classes taking various aspects into consideration such as dominant species, soil moisture and reflectance feature. Methane flux was observed by chamber method in growing season, July 2009-2015 (Shingubara et al., in preparation). River water level, soil moisture, oxidation-reduction potential and CH₄ flux in riverside vegetation were also observed in July 2015. Using coverage ratio of vegetation classes, local CH₄ emission was calculated on the basis of the observed data. Our result shows that cotton sedge (*Eriophorum* spp.) dominated wetland vegetation contributes to 3/4 of total CH₄ emission in this local area around the observation site.

タイガ-ツンドラ境界は北極圏陸域の多くの面積を占めるが、植生が混在しているため、その複雑な構造を知ることは困難である。森林限界の北上が指摘される一方で、タイガ-ツンドラ境界における植生変化と、それに伴う物質循環変動については明らかになっていない。北極域に広がる低湿地は、温室効果ガスの一つであるメタン(CH₄)の主要な放出源である。CH₄は湿地の嫌氣的な土壤中生成され、乾燥した立地条件のタイガ林土壤中では酸化分解されている。すなわち CH₄ 放出・吸収の空間変化は植生の違いに対応している。北極圏東シベリアタイガ-ツンドラ境界の湿地とカラマツ林が混在する GRENE-TEA プロジェクト観測サイトにおいて植生と物質循環研究が行われているが(Liang et al. 2014)、これまで観測サイトに対応する詳細な植生分布図は無かった。そこで本研究では、北極圏陸域が植生分布と物質循環の変動においてどのような役割を果たすかについて、基礎的な知見を

得るために、高解像度衛星画像を用いて植生図を作成し、観測サイトを含むローカルな地域における CH₄ 放出量を推定した。

フィールド調査から植生クラスを定義し、衛星画像(WorldView-2, July 9, 2013, DigitalGlobe)を用いて北東シベリアのチョコルダ(N70°, E148°)付近の 10km 四方の地域において植生クラスの被覆割合を見積もった。また植生の分類のために、ターゲット植生の反射スペクトルの観測を行った。結果では植生クラスを 8 つに分類し、スゲ湿地、水面、ヤナギ優占植生の占める割合が大きいことを示した。また、今年 7 月に地点ごとの河川水位と土壤水分、酸化還元電位、チャンバー法による CH₄ フラックス測定を行った。結果より、河川沿いのヤナギ優占植生では水位低下に伴って CH₄ 放出速度が短期間のうちに低下する可能性が示唆された。最終的に、過去 6 年間の CH₄ フラックス測定データ(Shingubara et al., in preparation) 及び本研究による植生被覆データを基に、タイガ-ツンドラ境界の観測地域における夏季 CH₄ 放出量を推定した。その結果、ワタスゲ属などの優占するスゲ湿地はメタン放出量が最も大きな植生であり、ローカルスケールのメタン放出量のうち 3/4 を占めることを示した。

References

Liang, MC, Sugimoto, A., Tei, S., Bragin, IV., Takano, S., Morozumi, T., Shingubara, R., Maximov, TC., Kiyashko, SI., Velivetskaya, TA., Ignatiev, AV., Importance of soil moisture and N availability to larch growth and distribution in the Arctic taiga-tundra boundary ecosystem, northeastern Siberia, *Polar Science*, 8(4), 327-341, 2014

北東シベリアタイガ - ツンドラ境界域湿地土壌のメタン酸化ポテンシャル

村瀬 潤¹、杉本敦子^{2,3}、新宮原 諒³、トロフィーム・C・マキシモフ^{4,5}¹名大院生命農学、²北大院地球環境、³北大院環境科学院、⁴ロシア科学アカデミー寒冷圏生物学研究所、⁵北東連邦大学 BEST センター**Methane Oxidation Potential of Arctic Wetland Soil of a Taiga-Tundra Ecotone in Northeastern Siberia**Jun Murase¹, Atsuko Sugimoto^{2,3}, Ryo Shingubara³, Trofim C. Maximov^{4,5}¹Grad. Sch. Bioagr. Sci., Nagoya Univ., Nagoya,²Fac. Earth Environ. Sci., Hokkaido Univ., Sapporo, ³Grad. Sch. Environ. Sci., Hokkaido Univ., Sapporo, ⁴Inst. for Biol. Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia, ⁵BEST center, NEFU, Yakutsk, Russia

Arctic wetlands are significant sources of atmospheric methane and the observed accelerated warming of the arctic causes increased methane formation in water-saturated tundra soil with deepened permafrost thawing. Methane oxidation is the key process to regulate methane emission from wetlands. In this study we determined the potential methane oxidation rate of the wetland soils of a Taiga-Tundra transition zone in Northeastern Siberia. Peat soil samples were collected in the summer from depressions that were covered with tussocks of sedges and Sphagnum spp. and from mounds vegetated with moss and larch trees. The potential methane oxidation rate was estimated by a bottle incubation experiment in which homogenized soil samples were incubated with methane at the initial concentration of 0.5-0.8 % v/v. Soil samples collected from depressions in the moss- and sedge-dominated zones exhibited active methane oxidation with no lag. The potential methane oxidation rates at 15 °C ranged from 270 to 190 nmol h⁻¹ g⁻¹ dw. Methane oxidation was active over the depths including the water-saturated anoxic layers. The maximum methane oxidation rate was recorded in the layer above the water-saturated layer: the surface (0-2cm) layer in the sedge-dominated zone and in the middle (4-6 cm) layer in the moss-dominated zone. The methane oxidation rate was temperature-dependent and the threshold temperature of methane oxidation was estimated to be -4 to -11 °C, which suggested methane oxidation at subzero temperatures. Soil samples collected from the frozen layer of Sphagnum peat also showed immediate methane consumption when incubated at 15 °C. The present results suggest that methane oxidizing bacteria keep their activity in the wetland soils even under anoxic and frozen conditions and immediately utilize methane when the conditions become favorable. Treatment with inorganic nutrients and black carbon did not affect the potential methane oxidation rate. In contrast with the results of the bottle incubation experiment, the inhibitor of methane oxidation did not affect the methane flux from the sedge and moss zones, which indicated the undetectable levels of methane oxidation associated with the peat plants.

東シベリアカラマツ林でのフラックス観測と湿潤イベントへのカラマツ林の応答

小谷亜由美¹、太田岳史¹、T.C.Maximov²¹名古屋大学大学院生命農学研究科²ロシア科学アカデミー寒冷圏生物学研究所

環北極陸域のタイガ林のうち、東シベリアでは落葉針葉樹のカラマツ林が優勢する。ここでカラマツを中心とする植物は、短い夏季と年間 200-300mm と少ない降水量の条件下で生育するために凍土の融解水を利用する一方で、蒸発散を介して、この地域に特徴的な水循環の形成に重要な役割を果たしていると考えられる。永久凍土上のカラマツ林における森林-大気間の水・CO₂ 交換特性と環境変動への応答について明らかにすることを目的として気象フラックス観測を実施している。ヤクーツク近郊の観測サイト (Spasskaya Pad) の 1998 年以降から継続される観測により、3-5 年ごとに降水量の増減がみられたが、2005 から 2008 年にかけては記録的な多雨年となり、土壌水分の増加、地温の上昇、活動層深さの拡大がみられた。同時に 2007 年の夏季には列状にカラマツが枯死する現象が起こった。また、かつてはコケモモが卓越していた林床植生に草本性植物が増加し、カンバやヤナギの中低層木の成長がみられており、下層植生の変化が進行している。タワーフラックス観測により得られた群落コンダクタンスの年変動は土壌水分の変動と相関があったが、2007 年以降には比例関係から外れて、土壌水分に対するコンダクタンスの値が 2006 年以前よりも小さくなる傾向がみられ、総一次生産量についても 2008 年から以前の関係から外れるようになった (Ohta et al., 2014)。2005 年以降の林内でのフラックス観測によると下層植生の総一次生産量は観測期間を通して増加しており植物量の増加が裏付けられる。それと同時にタワー観測値と林内観測値との差は湿潤化イベント後に減少しており、この値をカラマツ層に由来するフラックスと考えると、上層のカラマツの水・CO₂ 循環への寄与が小さくなっているといえる。一方で、ヤクーツクの約 300km 南東に位置し、降水量が 20-30% 多く、森林が発達している地域の観測サイト (Elgeei) では、カラマツの枯死現象はみられていない。Spasskaya Pad の湿潤イベント後のタワーフラックスを比較すると、2 サイトでは気象状態には大きな違いが見られないが、CO₂ の正味生態系交換量は Elgeei で Spasskaya Pad の 1.6 倍と大きい、蒸発散量の違いは小さかった (Kotani et al., 2014)。2 サイトの植物量の違いが群落生産量の違いに現れているが、Spasskaya Pad では下層植生の寄与により蒸発散が補われている。Elgeei では降水量が Spasskaya Pad よりも多く、保水性の高い土壌により高い土壌水分が保たれるが、Spasskaya Pad での湿潤イベントを経て増加したヤナギが Elgeei でも多いことから、Elgeei のカラマツ林は湿潤土壌に適応して高い生産性を維持していると考えられる。

References

- Ohta et al., Effects of waterlogging on water and carbon dioxide fluxes and environmental variables in a Siberian larch forest, 1998-2011, *Agricultural and Forest Meteorology*, 188, 64-75, 2014.
- Kotani et al., 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, 2014.

周極域の森林土壌特性の地域間比較

松浦陽次郎¹、小野賢二²、野口享太郎³、藤井一至³、牧田直樹⁴、森下智陽⁵、鳥山淳平⁶

¹ 森林総合研究所国際連携推進拠点

² 森林総合研究所東北支所、³ 森林総合研究所立地環境研究領域、

⁴ 森林総合研究所関西支所、⁵ 森林総合研究所四国支所、⁶ 森林総合研究所九州支所

Comparative study on forest soil properties among circumpolar regions

Yojiro Matsuura¹, Kenji Ono², Kazumichi Fujii³, Kyotaro Noguchi³, Naoki Makita⁴, Tomoaki Morishita⁵, Jumpei Toriyama⁶

¹Bureau of International Partnership, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

²Tohoku Research Center, FFPRI, ³Department of Forest Site Environment, FFPRI

, ⁴Kansai Research Center, FFPRI, ⁵Shikoku Research Center, FFPRI, ⁶Kyushu Research Center, FFPRI

We estimated soil organic carbon (SOC) storage and analyzed the relationship between SOC and C/N ratio in circumpolar forest ecosystem soils (Fig.1). Broad patterns of SOC and C/N were regulated by past geological processes and the origin/nature of soil parent materials. The combinations of forest type and permafrost condition were i) larch (deciduous conifer) dominant forest on continuous permafrost, ii) black spruce dominant forests on continuous/discontinuous permafrost, iii) pine/spruce dominant forests on sporadic/non-permafrost regions. iv) pine/spruce forests on permafrost-free regions, including peatland forests. Estimated SOC and CN ratio were varied among regions. SOC storage regime in larch forests on continuous permafrost in eastern and central Siberia is larger than those of other regions. The lacking of glacier ice sheet in Pleistocene era and development of deep permafrost may be critical environmental condition to affect forest dominant type and SOC storage regime. Upland soils derived from weathered rock fragment have higher C/N than those of deposit origin soils in plain topography.

周極域に分布している森林生態系の土壌について、土壌有機炭素（SOC）の蓄積量を推定し、SOC と土壌 CN 比の関係を検討した。これらの土壌における SOC の蓄積量は、その地域の過去の地史的履歴によって、また土壌を形成する母材の性質や起源によって、蓄積量と CN 比のおおよその傾向が認められた。調査研究の対象にした地域の、優占樹種と凍土の条件についての組み合わせは、次の通りである、①落葉針葉樹カラマツ優占の永久凍土の連続分布域、②クロトウヒが優占する連続／不連続分布域、③マツとトウヒが優占する点状分布域または非凍土域、④泥炭湿地林を含む、マツとトウヒが優占する非凍土分布域である。SOC の推定値と CN 比の値は、地域間でバラツキが大きい。過去に大陸氷床が無く深くまで凍土が発達した北東ユーラシア地域では、森林の優占種や SOC の蓄積量の範囲に他の地域では見られない特徴がある。山地・丘陵地の土壌は岩屑を含み残積成母材であることから、沖積成、低位地形面に分布する母材の土壌に比べて、CN 比が高い傾向を示した。



64N-100E continuous



65N-147W discontinuous



60N-113W sporadic



69N-29E non-permafrost

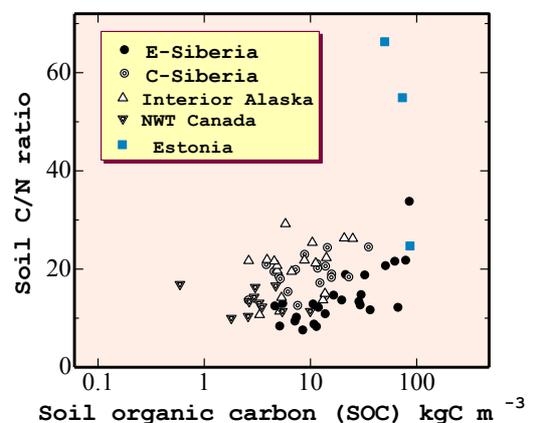


Fig.1. SOC-CN ratio diagram among circumpolar forest ecosystems.

Photos. Typical soil profiles among circumpolar forest ecosystems.

周極域の森林におけるイワダレゴケの分布と成長速度

森下智陽¹、松浦陽次郎¹、大澤晃²、梶本卓也¹、野口享太郎¹、Kim Yongwon³、Zyryanova OA⁴、Prokushkin AS⁴

¹ 森林総合研究所

² 京都大学大学院農学研究科

³ アラスカ大学、IARC

⁴ スカチェフ森林研究所

Distribution and growth rate of *Hylocomium splendens* on forest floor in circumpolar regions

Tomoaki Morishita¹, Yojiro Matsuura¹, Akira Osawa², Takuya Kajimoto¹, Kyotaro Noguchi¹,

Yongwon Kim³, Olga A Zyryanova⁴ and Anatoly S Prokushkin⁴

¹Forestry and Forest Products Research Institute, Japan

²Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Japan

³University of Alaska Fairbanks, USA

⁴V.N Sukachev Institute of Forest, Russia

周極域の森林生態系において、林床の多くは様々なコケ・地衣類に覆われており、樹木からのリターを含めた有機物層の厚さは数十センチに達する場合もある。そのため、この有機物層は森林生態系における炭素のストックおよびフローに大きく寄与する重要なコンパートメントである。また、炭素循環のみならず、この有機物層は土壌の温度・水分環境に影響をおよぼし、樹木等への養分供給の場としても機能している。イワダレゴケ (*Hylocomium splendens*) は、*Pleurozium schreberi*、*Ptilium crista-castrensis* と共に feather moss と呼ばれ、広く周極域の林床の有機物層を構成するコケである。特に *H. splendens* は、枝が年に1段階ずつ階段状に成長する特徴を持ち、年毎の成長量を把握することができる。また、*H. splendens* は広く周極域に見られる種であるが、全く見られない林分から、林床のほとんどを占める林分まで幅広く、年間伸長量も数 mm から数 cm と様々である。そこで、本研究は、気候および植生が大きく異なる周極域の森林生態系において、*H. splendens* の被覆率やサイズ（年間成長量）を林況と関連づけて明らかにすることを目的とした。

本調査は、これまでの研究で林分概況が明らかになっているアラスカ内陸部フェアバンクス近郊のクロトウヒ林 4 地点 (N65° W147°)、中央シベリアクラスノヤルスク州トゥラのカラマツ林 5 地点 (N64° E100°)、カナダ北西準州ウッドバッファロー国立公園内のジャックパイン 3 地点およびクロトウヒ林 3 地点 (N60° W112°) でおこなった。各調査地点において、5m のラインを 4 本以上設置した後、ライン上に見られるコケおよび地衣類の種類を同定して、それぞれの分布割合を調査して、*H. splendens* の被覆率を算出した。また各調査地点に見られる 5 つ以上の *H. splendens* のパッチから 5×5cm で *H. splendens* を採取して、含まれる *H. splendens* の本数をカウントした。さらに *H. splendens* 全ての個体について、1 段階ずつ茎の長さを測り年毎の伸長量 (mm) を測定した。その後、1 段階ずつ切り分けて乾燥させた後、それぞれの重さを測定して、茎の長さから重さを推定する関係式を得て年間成長速度を算出した。

H. splendens の被覆率は 3~100%まで幅広く、中央シベリアのカラマツ林で被覆率が低い傾向が見られた。*H. splendens* が 50%以上占めた林分は全てカナダ北西準州の調査地点だった。また同一地域内でも被覆率に違いが見られ、フェアバンクス近郊クロトウヒ林では斜面上部で被覆率が高く、斜面下部で被覆率が低くなっていた。年間伸長量は 3~30mm の範囲にあり、被覆率の高い地点で、年間伸長量も大きい傾向が見られた。*H. splendens* の年間成長速度は 0.3~221 g m⁻² y⁻¹ と推定され、被覆率が高く、年間伸長量が大きい地点では、樹木による年間リターフォール量に匹敵する量であることが明らかになった。

カナダ永久凍土の炭素蓄積量に対する凍結かく乱と排水条件の影響

藤井一至¹, 松浦陽次郎¹, 安江恒², 大澤晃³

¹ 森林総合研究所

² 信州大学

³ 京都大学

Effects of cryoturbation and drainage on organic matter storage in Canadian permafrost soil

Kazumichi Fujii¹, Yojiro Matsuura¹, Koh Yasue², Akira Osawa³

¹Forestry and Forest Products Research Institute

²Shinshu University

³Kyoto University

Introduction and objectives: Permafrost soils store the large amounts of organic matter. The soil organic C (SOC) storage can be enhanced by cold climate, flooding, and input of recalcitrant litters. In black spruce forests, cryoturbation of Mackenzie area can typically develop mounds and troughs called hummocky micro-topography. This process is hypothesized to play roles in enhancing SOC storage, however, history and functions of hummock soils in SOC accumulation are still unclear.

Development of hummock soil structure could induce tree tilting, as black spruce trees typically grow on the shoulder of hummocky soil. Tree rings could record tilting and soil hummock dynamics (Fig. 1). Using tree ring analyses and litter decomposition experiments, we attempted to reconstruct hummocky soil dynamics and their effects on SOC storage.

Materials and methods: To analyze environmental factors regulating SOC storage, we compared soil C stocks in BSF black spruce forest (BSF) with those in tundra (TND) on fluvial sediments and white spruce forest (WSF) on the upland soil derived from glaciofluvial sands in Northwest Territories, Canada. The following environmental parameters were also measured: soil temperature and moisture, aeration index [Eh, reducible iron (Fe) oxides] of soils, and the decomposition rates of litters (lichen, moss, and root litters) buried in the soils. To reconstruct the history of soil hummock formation, tree ring widths were measured year by year. The magnitude of tree tilting was calculated by the maximum tree ring width dividing by the minimum tree ring width.

Results and Discussion: The BSF exhibited the larger SOC stocks than TND and WSF. The annual mass loss rates of lichen and moss litters were consistently small at all sites. The development of hummocky soil micro-topography resulted in accumulation of sparingly-decomposable lichen litters in mounds and accumulation of moss litters in troughs. Tree ring analyses suggested that hummock soils were formed through freeze-thaw cycles over 200 years. The thick layers of lichen and moss litters in BSF appeared to limit deep melting of permafrost soil during summer. Soil water dynamics indicated that seasonal flooding events caused by spring snowmelt and permafrost melting in summer. Rapid snowmelt and water percolation enhanced aeration in sandy WSF soil, while BSF soils were saturated by water flooding on impermeable permafrost table. The redox cycles of iron were recorded as accumulation of oxalate-extractable Fe oxides. The SOC stocks in BSF and TND soils were significantly ($p < 0.05$) greater than in WSF soil. There was a positive correlation between SOC stocks and free Fe oxides. Cold climate and poor drainage, which are imposed by hummock soil structure, contribute to the largest SOC stocks in black spruce forests.

Conclusion: Tree ring analyses suggested that the hummocky soil micro-topography could be formed by freeze-thaw cycles over 200 years. Development of hummocky micro-topography accumulates lichen and moss litters. The oxalate-extractable Fe oxides in the soil can be a proxy of poor drainage on shallow permafrost table and high SOC storage in permafrost soils of black spruce forests.



Figure 1. Tree ring of black spruce

アラスカ内陸部クロトウヒ林における有機物層の発達程度の空間変動とその要因

鳥山淳平¹、田中（小田）あゆみ²、森下智陽³、松浦陽次郎⁴

¹ 森林総合研究所九州支所

² 森林総合研究所立地環境研究領域（学振特別研究員）

³ 森林総合研究所四国支所

⁴ 森林総合研究所国際連携推進拠点

Spatial variation in development of organic layer and its controlling factor under black spruce stands in Interior Alaska

Jumpei Toriyama¹, Ayumi Tanaka-Oda², Tomoaki Morishita³ and Yojiro Matsuura⁴

¹Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

²Department of Forest Site Environment, FFPRI, JSPS fellow

³Shikoku Research Center, FFPRI

⁴Bureau of International Partnership, FFPRI

Responses of both vegetation and soil to changing climate are key processes to estimate the future effect of warming climate on forest ecosystems in circumpolar region. In discontinuous permafrost region, distribution of different forest types and tree growth rate are affected by spatial variation in active layer depth. Meanwhile, soil biogeochemical process that controls greenhouse gas emission and removals may also be affected by the development of organic layer in forest floor. We focused on moss and lichen that form thick organic layer in subarctic forests and investigated spatial variation in thickness of organic layer and its controlling factor within a watershed. Study site is Caribou-Poker Creeks Research Watershed (CPCRW) in Interior Alaska, The Bonanza Creek Long Term Ecological Research sites. In CPCRW, black spruce (*Picea mariana*) is dominated especially in north-facing slope and lower slope position where active layer is shallow. We set a plot of 600 m × 600 m and 49 grid points of 100m intervals in a northeast-facing slope with altitude of 250-350 m in July 2015 (Figure 1). In each grid point, we investigated coverage ratio of forest floor (leaf litter, moss, lichen and soil), thickness of organic layer, density of individuals of moss (5 cm × 5 cm), temperature (5 cm below from surface), tree density within 2 m of moss census point, diameter of breast height (DBH) of each tree. Moss species in study site were mainly *Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*. The thickness of organic layer ranged 6 to 41 cm. Thick organic layer (>20 cm) was obtained grid point where tree size was relatively small (DBH <11 cm, Figure 2). The grid point with thick organic layer was also characterized by the absence of coverage of leaf litter in forest floor (Figure 3). The relationship between temperature and thickness of organic layer was not clear, while organic layer was thick in north-facing slope and upper slope position. Accordingly, thick organic layer might be formed in the north-facing slope where tree and canopy size are small and there is no inhibition of moss growth by leaf litter. Additional advantage for moss growth by longer duration of daylight is offered in the upper slope position and it might also contribute to the forming of thick organic layer.

周極域の温暖化が森林生態系の構造と機能に与える影響を将来予測するためには、植生と土壌の両方の応答を明らかにする必要がある。不連続永久凍土帯では、森林タイプの分布や樹木の成長速度は、活動層厚の空間変動に影響される。一方、温室効果ガスの生成等に関わる土壌の生物地球化学プロセスは、林床の有機物層の発達程度の違いにも影響される可能性がある。本研究は、亜寒帯林下の厚い有機物層を構成する蘚苔地衣類に着目し、有機物層の発達程度、特に蘚苔類の厚さの空間変動とその要因を明らかにすることを目的とする。現地調査はアラスカ内陸部に位置する Bonanza Creek 長期生態学研究サイトの一つである Caribou-Poker Creeks Research Watershed で行った。同流域では活動層厚の小さい北斜面および斜面下部にクロトウヒ (*Picea mariana*) が優占する傾向がある。2015年7月に標高250-350mの北東斜面に600m×600mの調査区を設定し、49の100m格子地点について林床被覆度（樹木リター、蘚苔類、地衣類、土壌のパッチの面積割合）、有機物層厚、蘚類パッチの個体密度（5cm×5cm）、地温（深さ5cm）、中心から半径2mの樹木個体密度、樹木の胸高直径（DBH）を計測した。蘚苔類は主に *Hylocomium splendens* と *Pleurozium schreberi* が観察された。有機物層の厚さは6-41cmの範囲であった。有機物層の厚さが20cmを超える地点は、樹木の平均個体サイズが小さい傾向がみられた（DBH <11 cm、図1）。またこれらの地点では林床においてリターのパッチが占める割合がほぼ0であった（図2）。有機物層厚と地温の関係は不明瞭であったが、斜面方位がより北向きで、斜面位置が上部の地点において有機物層が厚くなる傾向が見られた。このとき、活動層厚の小さい北向き斜面では樹木の生育が不良で林冠が閉鎖されず、

リターの被覆に伴う蘚苔類の伸長阻害もなく、さらに斜面上部では下部より日照時間が長いため、蘚苔類にとって光環境が良好であり、厚い有機物層が形成されると考えられた。

References

Chapin, F.S., and Hollingsworth, J. Citing online sources: Caribou Poker Creek Research Watershed GIS Data, Digital Elevation Model (DEM), Bonanza Creek LTER - University of Alaska Fairbanks, BNZ:435, 2010.

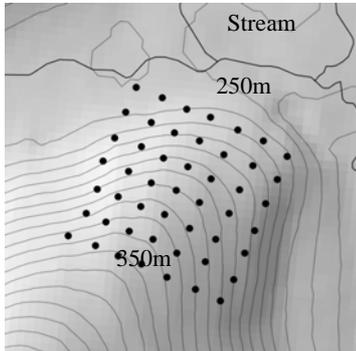


Figure 1. Study site and topography

Contour lines are at 10m intervals in elevation. The number is elevation (m). Closed points are grid point for tree and moss census. The figure is illustrated based on Digital Elevation Model (DEM) of CPRW (Chapin and Hollingsworth, 2010).

図1. 調査地と地形

等高線は10m間隔。図中の数字は標高、点は調査地点。Chapin and Hollingsworth (2010) のDEMデータより作成。

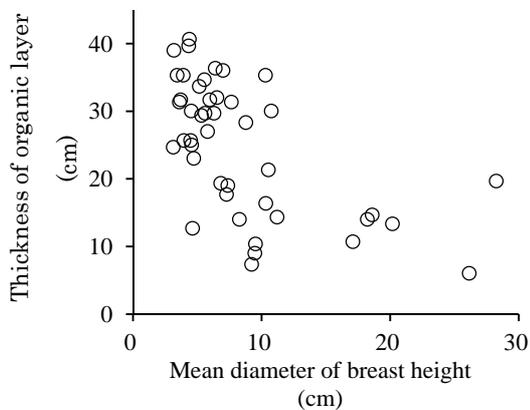


Figure 2. Relationship between diameter of breast height and thickness of organic layer

図2. 樹木の胸高直径と有機物層厚の関係

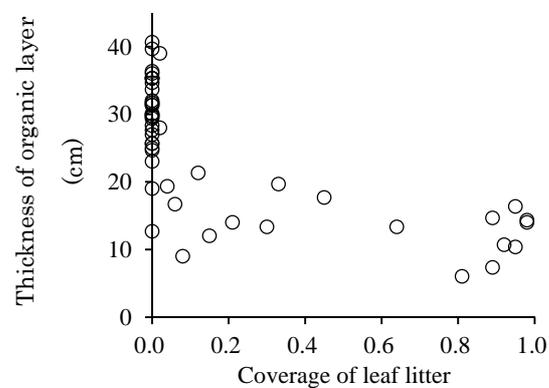


Figure 3. Relationship between coverage of leaf litter and thickness of organic layer

図3. リターの被覆割合と有機物層厚の関係

アラスカ内陸部の活動層厚の異なるクロトウヒ林における細根現存量

野口享太郎¹、松浦陽次郎²、Stephen D. Sparrow³、Larry D. Hinzman⁴

¹ 森林総合研究所立地環境研究領域

² 森林総合研究所国際連携推進拠点

³ アラスカ大学フェアバンクス校農林学実験ステーション

⁴ アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター

Fine root biomass in two black spruce stands with different active layer depths in interior Alaska

Kyotaro Noguchi¹, Yojiro Matsuura², Stephen D. Sparrow³ and Larry D. Hinzman⁴

¹Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute

²Bureau of International Partnership, Forestry and Forest Products Research Institute

³Agricultural and Forestry Experiment Station, University of Alaska Fairbanks

⁴International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks

Fine roots (roots < 2 mm in diameter) are a key component of carbon dynamics in forest ecosystems. To understand effects of different permafrost conditions on fine roots, we examined fine root biomass in two black spruce (*Picea mariana*) stands with different soil active layer depths (thawing mineral soil depth during growing season), which are located on a same north-facing slope in interior Alaska (Figure 1). Fine root biomass of black spruce trees in the plot with shallower active layer (ca. 70 cm; S plot) were smaller than in the plot with deeper active layer (ca. 110 cm; D plot) significantly (711 ± 68 vs. 1097 ± 91 g m⁻²). In contrast, fine-root/aboveground biomass ratio was greater in the S plot than in the D plot. On the other hand, fine root biomass of understory shrubs were significantly greater in the S plot than in the D plot (311 ± 24 vs. 164 ± 23 g m⁻²), whereas their aboveground biomass was similar in both the plot (122 vs. 113 g m⁻²). These results suggested that black spruce trees and understory shrubs could increase biomass allocation to fine roots in sites with shallower active layer to acquire limited below-ground resources from colder environment (Noguchi et al. 2016).

樹木の細根（直径 2 mm 以下の根）は、森林生態系の炭素動態の重要な要素の一つである。本研究では、異なる永久凍土条件が細根に及ぼす影響について理解するために、活動層厚（鉍質土壌の融解深）の異なるクロトウヒ（*Picea mariana*）林 2 林分を調査地として、細根現存量について調査した。その結果、活動層厚の大きい林分（D 区）におけるクロトウヒの細根現存量は、活動層厚の小さい林分（S 区）と比較して有意に小さかった。一方、林床の灌木類については、地上部現存量が S 区と D 区で同様であったのに対し、S 区の細根現存量は D 区よりも有意に大きかった。これらの結果は、クロトウヒと林床の灌木類が、活動層厚の小さい林分では限られた地下部の水分・養分を効率よく獲得するために、細根へのバイオマス分配を増加させていることを示唆している。



Figure 1. Photographs of the study plots and fine roots of black spruce. Left, D plot; Center, S plot; Right, Fine roots of black spruce.

References

Noguchi K, Matsuura Y, Sparrow SD and Hinzman LD (2016) Fine root biomass in two black spruce stands in interior Alaska: effects of different permafrost conditions. Trees (in press)

アラスカ内陸部のクロトウヒの成長と葉の $\delta^{15}\text{N}$ の関係

田中(小田)あゆみ¹、田中憲蔵¹、鳥山淳平²、野口享太郎¹、松浦陽次郎¹、

¹ 森林総合研究所

² 森林総合研究所九州支所

Relationship between tree growth and leaf $\delta^{15}\text{N}$ values of black spruce in Interior Alaska

Ayumi Tanaka-Oda¹, Tanaka Kenzo¹, Jumpei Toriyama², Kyotaro Noguchi¹ and Yojiro Matsuura¹

¹ Forestry and Forest Products Research Institute

² Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute

Nitrogen is one of the most limiting nutrients on plant growth in Interior Alaska. Foliage stable nitrogen isotope ratio ($\delta^{15}\text{N}$) reflects patterns of soil-plant nitrogen uptake. We analyzed foliage and roots $\delta^{15}\text{N}$ values of black spruce (*Picea mariana*) grown in different position of northeast facing slope, in which tree size significantly differed. We established four plots in Caribou Poker Creek Research Watershed (CPCRW) and measured above ground biomass (AGB) of black spruce, foliage $\delta^{15}\text{N}$ values, active layer depth and soil characteristics. We also set two transects (one along a slope gradient, and a second on a north to east axis at a fixed elevation) of 1.6 kilometer length across the plots. We collected foliage and root samples and measured their current shoot growth, $\delta^{15}\text{N}$ signatures and N contents. The AGB and shoot growth varied widely across the gradient: 12.5 t ha⁻¹ in lower slope position to 85.7 t ha⁻¹ in upper slope position. Tree growth rate was strongly affected by elevation and aspects of slope; growth rate at lower elevation with shallow active layer in growing season was lower than higher elevation with deeper active layer, and was also limited in northeast facing slope. Foliage $\delta^{15}\text{N}$ values varied between 2.9 to 13.1‰ and had positive correlation with tree growth rate. These results indicated that nitrogen utilization of black spruce significantly varied with slope position. On the lower slope, where the soil active layer was shallow, black spruce growth was reduced by the low availability of inorganic N and an elevated dependency on mycorrhizae for N uptake.

アラスカ内陸部の不連続永久凍土地帯では窒素が植物の成長を制限する主要因である。植物体の窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$)は、土壌から植物への窒素吸収 (共生菌根菌や、有機態窒素の吸収など)を反映して変化するため、窒素制限下での植物の窒素吸収源や根の共生菌類の指標となる(Mayor et al. 2012, Tanaka-Oda et al. 2016, Kenzo et al. 2016)。アラスカ内陸部の永久凍土上に優占するクロトウヒ(*Picea mariana*)は、同一斜面上でも成長量に差があることが知られている。クロトウヒの成長と土壌特性及び窒素吸収の関係を明らかにするため、アラスカ州フェアバンクス郊外のカリブポーカークリークウォーターシールド(CPCRW)にある北東斜面上に生育するクロトウヒ林において、葉や根の窒素同位体比を調べた。調査は 2012 年と 2014 年に行い、同一斜面上に標高の異なる 4 つのプロットと、そのプロットを縦断するトランセクトを設置した(図 1)。プロットでは土壌プロファイルを作成し、クロトウヒの地上部現存量と葉の窒素同位体比を測定した。トランセクトでは 20m ごとにクロトウヒの葉と根を採取し、根は太さ別に分けて窒素濃度と同位体比をそれぞれ測定した。その結果、地上部現存量は斜面位置による違いが大きく、斜面上部で 85.7 t ha⁻¹、斜面下部では 12.5 t ha⁻¹と同一斜面上で 7 倍の違いがあり(図 2)、地上部現存量と窒素同位体比には正の相関があった。トランセクト上におけるクロトウヒの成長速度と葉の窒素濃度と同位体比にも正の相関があったが、それらは根の窒素同位体比から求めた窒素吸収における菌根菌への依存度と関係があった。斜面下部では生育期間における永久凍土の融解深が浅く、斜面上部より土壌温度が低いため、有機物の無機化が起こりにくい。そのような環境では共生菌根を通じて窒素吸収を行うため、菌根による窒素同位体分別(Mayor et al. 2012, Tanaka-Oda et al. 2016)により根や葉の窒素同位体比が低下していると考えられた。以上から、クロトウヒの地上部現存量や成長は同一斜面内でも窒素吸収の違いにより変化が大きく、今後、温暖化や窒素降下などの環境変動が樹木の成長に影響を及ぼす可能性が考えられた。

References

- Kenzo, T., Tanaka-Oda, A., Matsuura, Y. and L.D. Hinzman, Morphological and physicochemical traits of leaves of different life forms of various broadleaf woody plants in interior Alaska, Canadian Journal of Forest Research, in press, 2016.
- Mayor, J.R., E.A.G. Schuur, M.C. Mack, T.N. Hollingsworth and E. Bååth, Nitrogen isotope patterns in Alaskan black spruce reflect organic nitrogen sources and the activity of ectomycorrhizal fungi. Ecosystems, 15, 819–831, 2012.
- Tanaka-Oda, A., Kenzo, T., Inoue, Y., Yano, M., Koba, K., and Ichie, T. Variation in leaf and soil $\delta^{15}\text{N}$ in diverse tree species in a lowland dipterocarp rainforest, Malaysia. Trees, in press, 2016.

Chapin, F.S., and Hollingsworth, J. Citing online sources: Caribou Poker Creek Research Watershed GIS Data, Digital Elevation Model (DEM), Bonanza Creek LTER - University of Alaska Fairbanks, BNZ:435, 2010.

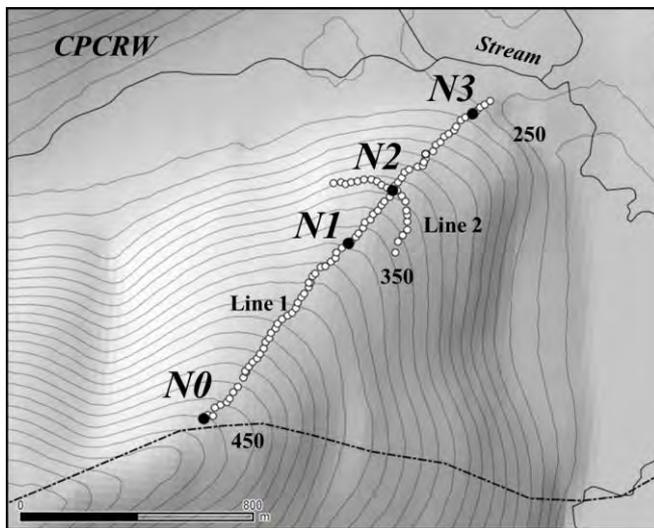


図1 サンプルング地点の地図

N0-N3 はプロットを、○はサンプルを採取した個体を表す。アラスカ大学 HP 上に公開されている CPCRW の Digital Elevation Model (DEM)により作成(Chapin and Hollingsworth, 2010).

Figure 1. Locations of the two transect lines. N0-N3, sample plots (10 × 10 m). Circular symbols indicate sampled individuals. The figure was created by author based on Digital Elevation Model (DEM) of CPCRW (Chapin and Hollingsworth, 2010).



図2 斜面上部(N0:上)と下部(N3:下)プロットの林相の違い
Figure 2. Differences tree size and density between upper (N0) and lower (N3) plots on the northeast facing slope in CPCRW.

内陸アラスカにおける広葉樹の葉の機能的形質と生活形

田中憲蔵¹、田中(小田)あゆみ¹、松浦陽次郎¹、Larry D. Hinzman²

¹ 国立研究開発法人 森林総合研究所

² アラスカ大学フェアバンクス校

Leaf functional traits of different life forms of various broadleaf woody plants in the Alaskan interior

Tanaka Kenzo¹, Ayumi Tanaka-Oda¹, Yojiro Matsuura¹ and Larry D. Hinzman²

¹ Forestry and Forest Products Research Institute

² University of Alaska Fairbanks

The morphological and physicochemical traits of leaves are important in terms of plant adaptation to various growth environments, because such traits play central roles in various functions including photosynthesis. We measured the toughness, mass per unit area (LMA), nitrogen content, and $\delta^{15}\text{N}$ levels of the leaves of different life forms of 39 broadleaf woody plants in interior Alaska. The plants were divided into three life forms based on the maximum height of adult plants: understory (<1 m), small (≥ 1 m to <5 m), and canopy (≥ 5 m). Evergreen species accounted for a large proportion of understory woody plants (44%), whereas most small (87%) and canopy (100%) trees were deciduous. Higher LMA, increased toughness, and higher C/N ratios prolonged leaf lifespan in evergreen species. We also evaluated the presence/absence of bundle-sheath extensions (BSEs), which contribute to the mechanical support of leaves and enhance photosynthetic ability by improving hydraulic properties. In total, 11 species (28%) had homobaric leaves (BSEs were absent) and 28 species (72%) had heterobaric leaves; these proportions are similar to those of woody plants of other temperate deciduous forests. The $\delta^{15}\text{N}$ values reflected the presence of root symbionts such as ericoid mycorrhiza or Frankia sp. Our results suggest that leaf traits may affect both the life form of the host plants and leaf longevity in both evergreen and deciduous species. Those results have been published in Kenzo et al. (2016).

葉の形態や物理化学性などの機能的形質は、光合成など生理的機能や植物の環境適応能力と密接に関係している。近年、葉の機能的形質についての世界的なデータベース化が進み、バイオーム間での比較や、植生モデルへの応用などが行われている。我々は、アラスカ内陸部の広葉樹を対象に、様々な生活形間でどのように葉の形質が異なるのか明らかにするために、39種を対象に、葉の強度、葉面積当たりの葉重(LMA)、炭素と窒素含有量、炭素と窒素安定同位体比を調べた。また、葉内の維管束の周囲に発達する維管束鞘延長部(BSE)の有無にも着目した。延長部が存在する葉は異圧葉(heterobaric leaf)、存在しない葉は等圧葉(homobaric leaf)と呼ばれている。この延長部は、葉緑素を含まない透明な繊維質の組織からなるため、葉を光に透かすと透明な葉脈網がはっきり確認でき比較的容易に識別できる(Fig 1, Terashima 1992)。機能面でもこの部位が光ファイバーの様な働きをし、葉内部への光透過に役立つことや、高い通水機能を持ち、葉の構造強化に貢献することなど様々な機能の存在が明らかになっている(Inoue et al. 2015)。生活形は成木の樹高別に林冠木(5m以上)、低木(1~5 m)、林床木(1m未満)に分け、また常緑樹と落葉樹についてもそれぞれ区分し解析した(Kenzo et al. 2016)。

樹木の生活形や常緑・落葉性と葉の形質には密接な関係が見られた。林床木には常緑樹が多く44%を占めたが、低木では13%、林冠木では0%で全種が落葉樹であった(Fig.2)。また、林床木に比べ林冠木は異圧葉の割合が高かった(Fig.2)。落葉樹は葉内窒素濃度が高く、BSEを持つ異圧葉樹種が80%近くあった(Table 1)。異圧葉樹種は等圧葉樹種に比べ光合成能力が高いことが知られており(Inoue et al. 2015)、林冠など光環境の強い環境に生育する落葉樹は、異圧葉を持ち葉の窒素濃度を高めることで短い生育期間に高い光合成生産を行い(Kenzo et al. 2006)短命な葉の製造コストを短期間で回収していると考えられた(Chabot and Hicks 1982)。一方、林床など暗い環境に多い常緑樹は、LMAや葉の強度が落葉樹の2倍以上あり、炭素濃度やC/N比も高いことから(Table 1)、葉の構造強化に投資し、窒素濃度が低いため光合成は低いが(Kenzo et al. 2006, 2015)葉寿命を延ばすことで葉の製造コストを長期間で回収する戦略を取っていると考えられた(Chabot and Hicks 1982)。また、常緑樹は約半数がBSEを持たない等圧葉であった。分厚い葉を持つ常緑樹は、葉内のガス拡散抵抗が高く、光合成が制限される場合が多い。等圧葉はガス拡散障壁となるBSEを欠くため常緑樹に多くなると考えられた(Terashima 1992)。今回アラスカ寒帯林で得られた異圧葉樹種の割合は72%で、これまで北米や日本の落葉樹が優占する冷温帯林で得られた値(75~90%)とほぼ同じであった。一方、常緑樹主体の暖温帯から熱帯林で得られた値は35~57%とかなり低く(Wylie 1952, Kenzo et al. 2011, 2007)、今回得られた常緑樹の異圧葉樹種の割合(56%)とほぼ同じで、世界的な傾向と一致していた。なお、本成果の一部はKenzo et al. (2016)で公表した。

Table 1. Ratio of heterobaric tree species, leaf mass per area (LMA), leaf toughness, nitrogen and carbon contents, C/N ratio, and stable carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) isotope ratios of deciduous and evergreen leaves. Asterisks indicate significant differences.

Leaf habit	Heterobaric species (%)	LMA (g m^{-2})	Toughness (N cm^{-2})	Nitrogen (%)	Carbon (%)	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
Deciduous	77*	59.9±3.1*	29.4±2.5*	2.04±0.1*	52.8±0.5*	30±3*	-29.3±0.2 ^{ns}	-0.65±0.5*
Evergreen	56*	123±12.4*	66.6±7.5*	1.10±0.9*	57.0±1.4*	55±5*	-30.0±0.4 ^{ns}	-4.10±0.7*

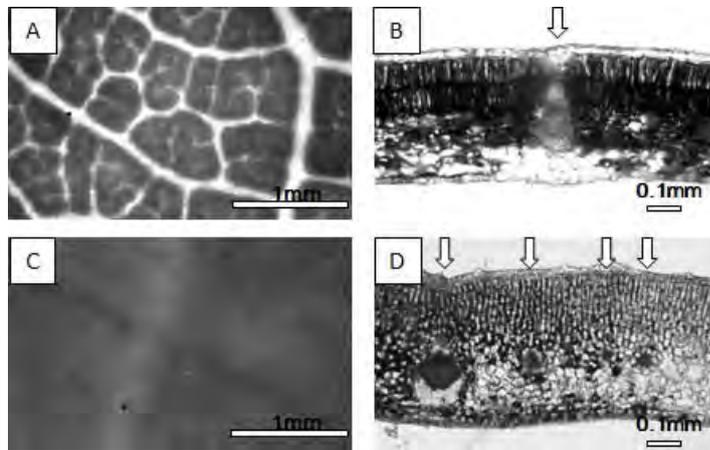


Figure 1. Transmission micrographs of surface and transverse sections of leaves. Arrows indicate bundle sheaths. (A) A heterobaric leaf from a canopy woody plant (*Populus tremuloides*), (B) A heterobaric leaf from a canopy woody plant (*Populus balsamifera*), (C, D) A homobaric leaf from an understory woody plant (*Vaccinium vitis-idaea*)

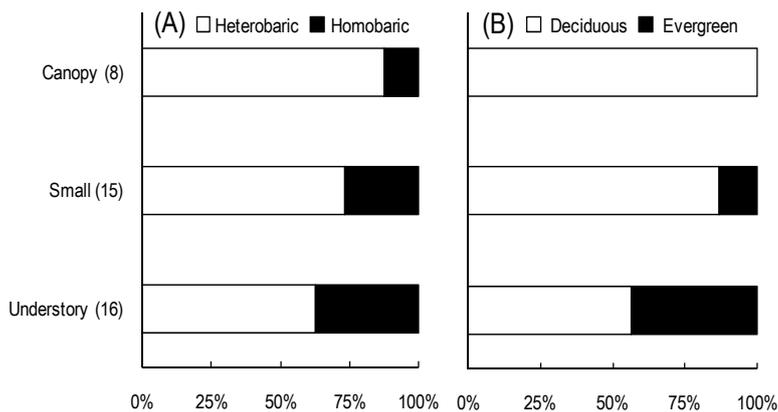


Figure 2. The percentages of trees with heterobaric and homobaric leaves (A), deciduous and evergreen species (B) among different life forms. The numbers in parentheses are the numbers of species analyzed.

References

- Chabot, B.F., and D.J. Hicks, The ecology of leaf life spans. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 13, 229-259, 1982.
- Inoue, Y., Kenzo, T., Tanaka-Oda, A., Yoneyama, A., and T. Ichie, Leaf water use in heterobaric and homobaric leafed canopy tree species in a Malaysian tropical rain forest. *Photosynthetica*, 53, 177-186, 2015.
- Kenzo, T., Ichie, T., Yoneda, R., Watanabe, Y., Ninomiya, I., and T. Koike, Changes in photosynthesis and leaf characteristics with height from seedlings to mature canopy trees in five dipterocarp species in a tropical rain forest. *Tree Physiology*, 26, 865-873, 2006.
- Kenzo, T., Ichie, T., Watanabe, Y., and T. Hiromi, Ecological distribution of homobaric and heterobaric leaves in tree species of Malaysian lowland tropical rainforest. *American Journal of Botany*, 94, 764-775, 2007.
- Kenzo, T., Yoneda, R., Sano, M., Shimizu, A., Tanaka-Oda, A., and H. Ikuzawa, Distribution of heterobaric and homobaric leaf tree species among life-form types in sub-tropical broad-leaved forest, Okinawa, Japan. *Kanto Journal of Forest Research*, 62, 135-138, 2011.
- Kenzo, T., Inoue, Y., Yoshimura, M., Yamashita, M., Tanaka-Oda, A., and T. Ichie, Height-related changes in leaf photosynthetic traits in diverse Bornean tropical rain forest trees. *Oecologia*, 177, 191-202, 2015.
- Kenzo, T., Tanaka-Oda, A., Matsuura, Y. and L.D. Hinzman, Morphological and physicochemical traits of leaves of different life forms of various broadleaf woody plants in interior Alaska, *Canadian Journal of Forest Research*, in press, 2016.
- Terashima, I, Anatomy of non-uniform leaf photosynthesis. *Photosynthesis Research*, 31, 195-212, 1992.
- Wylie, R.B., The bundle sheath extension in leaves of dicotyledons. *American Journal of Botany*, 39, 645-651, 1952.

アラスカ北極圏の湖沼におけるメタンフラックスと永久凍土融解の影響 Effect of the thawing permafrost on methane flux from lakes in the Alaskan Arctic Zone

佐々木正史¹、内田昌男²、近藤美由紀²、内海真生³、米村正一郎⁴、中山恵介⁵

¹北見工業大学、²国立環境研究所、³筑波大学、⁴農業環境技研、⁵神戸大学

1. はじめに

アラスカ北極圏（永久凍土地域）における温暖化物質の挙動に関する興味の一つとして、永久凍土中に蓄積されたメタンが温暖化による融解に伴って大気中に放出される量およびそれによる温暖化加速（正のフィードバック）効果が挙げられる。湖沼は十分な規模（大きさと深さ）があると湖底下に不凍土壌（タリク talik）が形成され、年とともに永久凍土を融解して行く（極端な例では永久凍土層が全て融解しいわゆる「底が抜ける」状況も生じる）のに対し、ツンドラ地帯（アラスカではほぼ連続的な凍土地帯）の植生下では地表から 50 cm 程度掘ると永久凍土フロントが現れるなど、LGM 以降の永久凍土融解速度は極めて低い。以上は、湖沼が永久凍土の融解に関してより高活性であり、より高感度のセンサーであることを示唆するものである。従って、湖沼水中の溶存メタン濃度を観測し、さらにこのメタン内、永久凍土由来の比率を $\delta C14$ 年代測定から求めることにより、永久凍土融解速度を推計するという挑戦的な発想の許に GRENE 陸域のアラスカ湖沼研究チームを発足した。

具体的な研究内容としては、ツンドラ地帯（アラスカ北極圏）（＝連続的永久凍土地帯）の湖沼を中心に、湖沼水中の溶存メタンを観測し、非永久凍土地帯のそれとの差異を明らかにすること。また、永久凍土地帯上に形成された湖沼の水中溶存メタンを年代追跡することにより、永久凍土由来のメタン比率を明らかにすること。それに先立ち、水中溶存メタンの高濃縮化&グラファイト化技術および $\delta C14$ 年代測定技術を確立することである。以下に結果の概要を報告する。

2. 観測サイトおよび観測結果

アラスカ Dalton Highway 沿線で 2008 年夏期に約 30 湖沼の採水を、2012～2014 年の GRENE プロジェクト内で加えて Richardson Hwy, Denali Hwy, Glenn Hwy 沿線で約 10 湖沼の採水を行い、水中溶存メタン濃度（以下 DM ）を観測した。採水ステーションと解析対象エリアを Fig.1 に示す。図中の○印は採水した湖沼の位置を示す。観測エリアは北からツンドラ地帯、山岳地帯（Brooks 山脈）およびタイガ地帯の 3 つの特徴的な地帯から成る。採取した湖水中の DM をガスクロマトグラフィー水素炎イオン検出器（GC-FID：島津 GC-8A）により測定した。採水方法や DM 分析方法の詳細は Sasaki and Endo (2014) などと同様である。表層 DM (nmol L^{-1}) を湖沼面積 A (km^2) との相関として Fig. 2 に示す。2008 年夏と 2012 年夏の重複湖沼 (25) の DM の間には有意の差は認められなかった。アラスカ北極圏のツンドラおよび山岳地帯の DM - A のトレンドは、スウェーデン及び北米北部の湖沼に対して Bastiviken et al. (2004) によって提案された式(1)によってよく記述される。アラスカのツンドラ地帯は連続した永久凍土に覆われているのに対し、式(1)は永久凍土の存在しないスウェーデン及び北米北部の湖沼に対して求められたものであり、アラスカ北極圏のツンドラでは明確な永久凍土の融解の影響 (DM 強調) は認められない。一方タイガ地帯はツンドラ地帯より表層 DM が有意に高い傾向が認められ、これに対しては式(2)の近似式を与えた。

$$DM = 262.4 A^{-0.227} \quad (\text{Bastiviken et al., 2004}) : \text{ツンドラ地帯 (含む山岳)} \quad (1)$$

$$DM = 652.5 A^{-0.149} : \text{タイガ地帯} \quad (2)$$

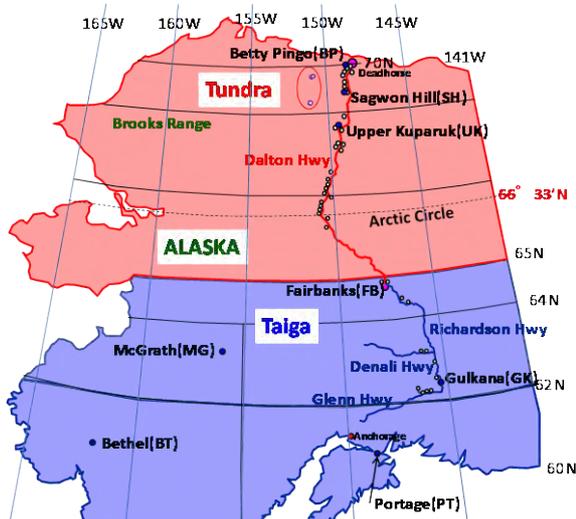


Fig.1 Observation stations and study regions

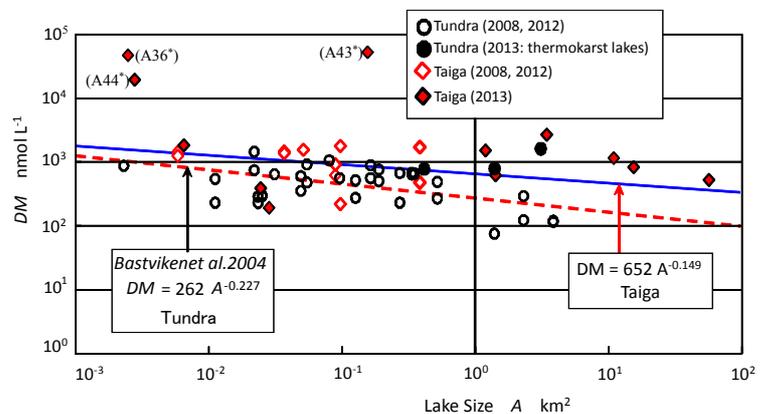


Fig.2 Correlations between lake size (A) and dissolved methane concentrations (DM)

3. アラスカの湖沼から大気に拡散するメタンフラックスの推計結果

CO₂に対する大気-湖沼表層の交換係数 k_{600} (淡水の 20°C の時のシュミット数 $Sc=600$ に対する値) を決定するために、Cole and Caraco (1998) の経験式(3)を適用した。

$$k_{600} = 5.75 \times 10^{-6} + 0.597 \times 10^{-6} U_{10}^{1.7}. \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (3)$$

U_{10} は地上 10 m の相当風速で、本計算では時間平均値を用いた。メタンの交換係数 k_{CH_4} は、メタンのシュミット数 Sc_{CH_4} から、以下の式(4)および(5)によって求まる。

$$k_{\text{CH}_4} = k_{600} (Sc_{\text{CH}_4} / 600)^{-0.5}. \quad (4)$$

$$Sc_{\text{CH}_4} = v_w / D_{\text{DM}}. \quad (5)$$

湖沼表層から大気への時間平均マスフラックス dm/dt は、

$$dm/dt = M_{\text{CH}_4} k_{\text{CH}_4} (DM - DM_0) A \times 3600. \quad (\text{g CH}_4 \text{ hr}^{-1}) \quad (6)$$

以上の大気へのメタン拡散の推計方法は、Sasaki et al. (2010)に詳述されている。アラスカ全観測湖沼において DM は大気平衡濃度 DM_0 (4.7~2.5 nmol/L) を大きく上まわり、湖沼は大気へのメタンソースとなっている。式(6)を各代表気象 Region ごとの湖沼面積および開水期間に対して積分するとアラスカ全土の湖沼のメタンフラックスを推計できる。式(3)に必要な U_{10} 、式(5)のシュミット数 Sc_{CH_4} を決めるのに必要な水温および開水期間(気温から推計)など、気象データは代表的な自動気象観測地点のデータを用いた。すなわち、ツンドラ地帯(北緯 64° 以北)については、Betty Pingo (BP), Sagwon Hill (SH), Upper Kuparuk (UK) および Fairbanks (FB), タイガ地帯については Gulkana (GK), Portage (PT), McGrath (MG), Bethel (BT) のそれぞれ 4ヶ所で、Fig. 1 中●印で示した。式(6)中の湖沼面積 A については、地図サイト (<http://maps.google.co.jp>) から入手した地図画像を、二階調化などの画像処理を施した後に、粒子解析ソフト(旭化成エンジニアリング「A 像くん」®)を流用して、湖沼面積 A が 0.001 km² 以上の全ての湖沼について、その数と面積の頻度分布を解析した。アラスカ全土の合計湖沼面積は 49,291 km² (対象湖沼数約 81 万)となり、そのうちツンドラ地帯は 30%であった。メタンフラックスの月変化の推計結果(2008 年と 2012 年の平均)を Fig. 3 に示す。UK の 5 月と FB の 10 月は開水が半月と仮定しているため、バーの幅を半分に表示している。アラスカ全体のフラックスは 77.4 Gg CH₄ yr⁻¹ となり、その内ツンドラ地帯は 9.0 Gg CH₄ yr⁻¹ であった。アラスカ全土の平均マスフラックス密度(m² 当り)は約 1.57 g CH₄ m⁻² yr⁻¹ であるが、山岳地帯を含むツンドラ地帯(北極圏)は約 0.61 g CH₄ m⁻² yr⁻¹ であった。このレベルはスウェーデン(Bastiviken et al., 2004)、フィンランド(Juutinen et al., 2009)など北欧の永久凍土が存在しない地域と同等(0.78~0.92 g CH₄ m⁻² yr⁻¹)であり、やはりアラスカ北極圏において永久凍土融解がメタンフラックスに及ぼす強調効果は認められなかった。

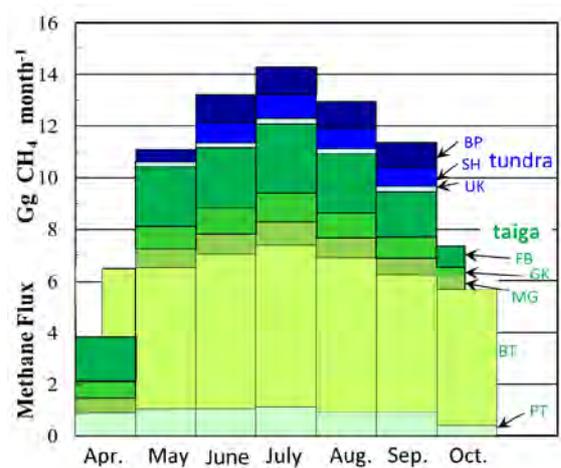


Fig. 3 Seasonal change in methane flux

4. 考察

多くの観測湖沼(特にツンドラ地帯)において、連続的に存在する永久凍土の融解に起因すると思われる DM の強調効果は認められなかった。永久凍土上の単一円形湖沼モデル周囲の 2 次元軸対称熱伝導解析を実施したところ、湖周囲のツンドラ植生部はもちろん、湖沼下の talik でも永久凍土の融解速度は極めて小さく、当然湖沼水中 DM に影響しなかったことが示唆された。むしろタイガ地帯の湖沼でツンドラ地帯よりも有意に高い DM が認められ、今後これらの湖沼と永久凍土の状況、比較的若い thermokarst lakes に注目して観測する必要がある。

謝辞: 本研究の一部は、科学研究費(#24656132.)の一環として実施したものである。

References

- Bastiviken, D., J. Cole, M. Pace and L. Tranvik (2004), Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 18, GB4009, doi:10.1029/2004GB002238.
- Cole J. J. and N. F. Caraco (1998), Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured 10 by the addition of SF₆, *Limnology and Oceanography*, 43(4), 647-656.
- Juutinen, S., Rantakari, M., Kortelainen, P., Huttunen, J. T., Larmala, T., Alm, J., Silvola, J. and Martikainen, P. J. (2009), Methane dynamics in different boreal lake types, *Biogeosciences*, 6, 209-223.
- Sasaki, M., N. Endoh, S. Imura, S. Kudoh, T. Yamanouchi, S. Morimoto and G. Hashida (2010), Air-lake exchange of methane during the open water season in Syowa Oasis, East Antarctica., *J. Geophys. Res.*, 115, D16313, doi:10.1029/2010JD013822.
- Sasaki, M and Noboru Endoh (2014). Exchanges of Methane between Lakes and the Atmosphere in Hokkaido, Subarctic Climate Region, Japan. *J. of Water Resources and Ocean Science.*, 3(6), 89-94. doi: 10.11648/j.wros.20140306.14.

Recent Severe Forest Fire in Alaska and Weather Conditions

Hiroshi Hayasaka¹, Hiroshi L. Tanaka² and Peter A. Bieniek³

¹ NPO Hokkaido Institute of Hydro-climate, Sapporo, 002-8006 Japan

² Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8577 Japan

³ International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK 99775, USA

Recent concurrent widespread fires in Alaska are evaluated to assess their associated synoptic-scale weather conditions. Several severe fire-periods from 2002 to 2015 were extracted using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) hotspot data by considering the number of daily hotspots and their continuity. Fire weather conditions during the top six severe fire-periods in the fire years of 2004, 2005, 2009, and 2015 were analyzed using upper level (500hPa) and near surface level (1000hPa) pressure atmospheric reanalysis data. The top four fire-periods occurred under similar unique high-pressure fire weather conditions related to Rossby wave breaking (RWB). Following the ignition of wildfires, fire weather conditions related to RWB events typically result in two daily hotspot peaks occurring before and after high-pressure systems move from south to north across Alaska. A ridge in the Gulf of Alaska resulted in the first hotspot peak under south-westerly wind. After the high-pressure system moved north under RWB conditions, the Beaufort Sea High developed and resulted in a second (largest) hotspot peak during each fire period under relatively strong easterly wind in Interior Alaska. Low-pressure-related fire weather conditions occurred under cyclogenesis in the Arctic and resulted in a single large hotspot peak under south-westerly wind.

1. Fire History in Alaska - Burnt area from 1956

Fire data provided by the Alaska Interagency Coordination Center (AICC) for 1956-2015 was analyzed to identify annual total burnt area and number of fires, and burnt area of each fire. The annual burnt area due to forest fires for 1956-2015 are ranked in descending order and are displayed in Fig.1. From Fig.1, the top 12 years (burnt area $>6,000$ km²) stand out among the remaining years (burnt area $<6,000$ km²). We will call them “fire years”. The total burnt area of the top 12 fire years is about 169,300 km² and 2.3 times larger than that of the other 48 years combined (about 72,400 km², years of 13th to 60th).

The table inset in Fig.1 shows three different average burnt values: (1) the last 60 years average (①Ave. 1956-2015 in Fig.2) is 4,029km², (2) the 41 year average from 1956 to 1996 (②Ave. 1956-1996 in Fig.2) is 2,885km² and (3) the most recent 19 year average from 1997 to 2015 (③Ave. 1997-2015 in Fig.2) is 6,498km² (year of 1997 is chosen just because for comparison with the summer Beaufort Sea High (BSH) activities from late 1990s (Moore 2012)). The ratios of ②Ave./①Ave. and ③Ave./①Ave. are 0.71 and 1.61 respectively. The ratio of ③Ave./②Ave. is 2.25. These large ratios suggest that there is a trend to larger fire years in the most recent 19 years that started around 1997.

2. Recent fire trend by MODIS hotspot data from 2002

The MODIS hotspot data during 2002-2015 were obtained from NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System). MODIS hotspot data contains various information such as latitude, longitude, brightness, acquisition date and time, satellite name, confidence, etc. We used only the spatial and temporal hotspot data in this study. The number of daily hotspots was used to identify fire periods, i.e. periods of days when numerous fires occurred, and to identify the important dates of major hotspot peaks during the fire periods. The MODIS hotspot data over the entire Alaska domain except Juneau region were used. Hotspots near, but beyond, the border (i.e. 141°W) with Canada to 140°W were also included to identify large fire areas that extended into Canada. Each detection day and time of hotspot data were converted to Alaska local time using UTC (-8 hours) for a consistency.

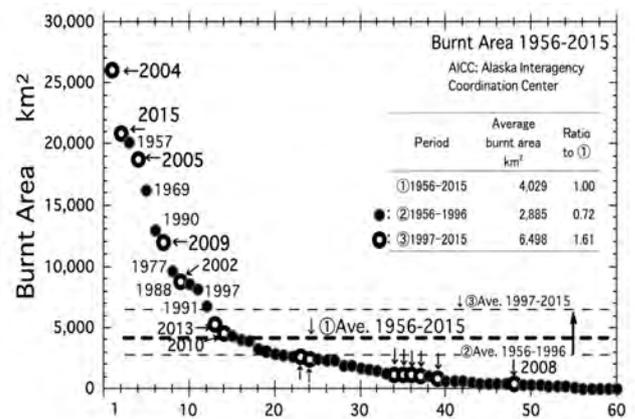


Fig.1. Alaska annual burnt area trend of 60 years from 1956.

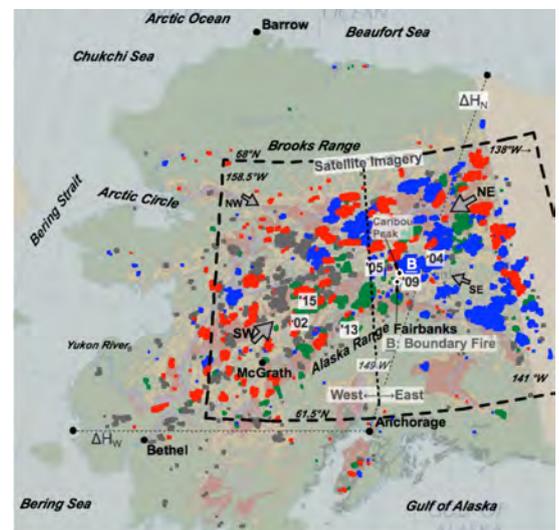


Fig.2 Study area and fire (hotspot) distribution in 2004, 2005, 2009, and 2015.

In Fig.2, the hotspot data for the top four fire years of 2004, 2005, 2009 and 2015 (see Fig.1) are represented by four different color dots (blue for 2004, red for 2005, green for 2009, and gray for 2015) to show the large-scale widespread fires. The center point of fire activity for each year was defined by averaging the longitude and latitude of each hotspot data area.

3. Severe fire periods and their hotspot peaks

The number of daily hotspots was used to find active fire-periods during fire season of each year. The active fire-period was extracted by considering the succession of active fire days. The fire-period was defined as the consecutive fire days when the number of daily hotspots was greater than 300. This definition allowed us to extract several severe fire periods over the MODIS hotspot record.

The number of daily hotspots during the four “fire years” of 2004, 2005, 2009, and 2015 are plotted in Figs.3. Mark of H and a circle are putted when high-pressure system movement from south to north occurs (H stands for high-pressure and a circle in Figs.3 shows exact date of occurrence). Four high-pressure system movements were checked by weather maps at 1000hPa. This movement is discussed in the latter part of paper (weather maps for 2005 in Fig.7). Totally seven severe fire periods are found during four fire years and ranked by total number of hotspots of each fire period.

For major hotspot peaks in four fire years in Figs.3, average wind directions in western and eastern side of Alaska found in the satellite imagery was putted like “S,E”. “S” and “E” stand for southerly wind and easterly wind. In addition to wind directions, mark of ① and ② are putted for specified hotspot peaks of seven severe fire periods in Figs.3. ① and ② stand for first and second largest hotspot peaks of each fire periods (except “2. Late Aug.”). Only top four severe fire period has both mark of ① and ②. For other three fire periods, ① or ② is putted for first or second largest hotspot peak. These wind directions and marks are used to classify each severe fire period.

4. Conclusions

This study focused on the synoptic-scale fire weather conditions that occurred during several widespread fire-periods in 2004, 2005, 2009, to 2015. Analysis results showed that there are two types of fire weather conditions or high- and low-pressure weather types. High-pressure fire weather conditions occurred under unique weather phenomena related to RWB. After the onset of a large meandering of Jet stream near Alaska, a blocking high was formed over Alaska at upper air levels (500hPa) and the high-pressure system then moved from south to north across Alaska at the lower level (1000hPa). Along with the high-pressure system movement, the wind direction changed from southerly and westerly (SW) to easterly (E) within a several days in Interior Alaska. The switch from SW and E winds occurred with two distinctive hotspot peaks. The largest hotspot peak during each fire-period occurred only in E wind conditions under the Beaufort Sea High. Because E wind from BSH was stronger than the SW wind and blew continuously day and night (from our preliminary analysis results of Caribou Peak weather station data). Under low-pressure weather type, SW wind made one large hotspot peak. This wind condition was made by large pressure difference between low-pressure system in the Arctic Ocean and high-pressure system in the Bering Sea. The onset of two types of severe fire weather conditions for Alaska may be predictable. This study suggest two weather phenomena: (1) onset of large meandering of Jet stream in the west of Alaska for the high-pressure weather type, (2) onset of low-pressure system development (cyclogenesis) in the Arctic Sea and high-pressure system in the Bering Sea for the low-pressure weather type. This study also suggest there is a wind passage (corridor) in the central Alaska made by terrain of Alaska (between the two mountain ranges). The above-mentioned E and SW wind actually blew through this wind passage.

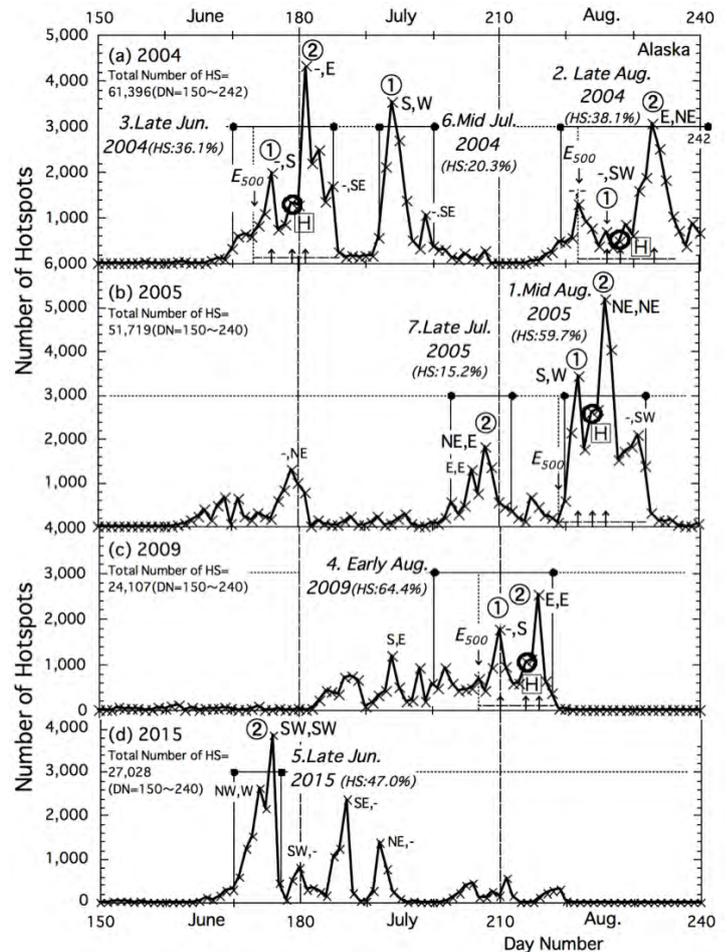


Fig.3. The number of daily hotspots during the 2005 (a), 2004 (b), 2009 (c), and 2015 (d) fire seasons.

高緯度北極ツンドラ生態系炭素循環に及ぼす温暖化影響 —感度分析による各要因の影響評価—

内田雅己 (国立極地研究所)

高緯度北極のツンドラ生態系の研究は、アクセスの困難さや測定機器を稼働させるための電源、また、宿泊のための施設等が不十分であるため、低緯度北極と比較すると遅れている。本研究では、GRENE 北極気候変動研究事業の戦略研究目標の一つである「北極域における温暖化増幅メカニズムの解明」に答えるべく、高緯度北極ツンドラ生態系において、炭素循環に関するコンパートメントモデルを作成し、炭素循環に影響を及ぼす恐れのある要因について、感度分析を行い、どのような要因が温暖化を増幅させる可能性があるのかを明らかにすることを目的とした。

調査地はノルウェー本土の北約 1000km ほどのところにあるスバルバル諸島・スピッツベルゲン島の西側に位置するニーオルスンとした。スバルバルでは、優占する植物としてキョクチャヤナギとコケがある。本調査地においても優占していたキョクチャヤナギとカギハイゴケを選出した。植物の光合成・呼吸特性、土壌微生物の呼吸特性や分解特性、植物のバイオマスや土壌有機炭素量などを測定したのち、生態系純生産量を算出できるようにコンパートメントモデルを作成した。生態系純生産量に影響を与える恐れのある要因として、温度、降水量（強度と頻度）、ヤナギの着葉期間およびコケの生育期間を考慮した。

温度については、上昇するに伴い、生態系純生産量は急激に低下した。一方、降水強度の変化は、生態系純生産量にはほとんど影響しなかった。降水頻度は、増加すると生態系純生産量は僅かに増加した。ヤナギの着葉期間を延長させると、生態系純生産量はそれに応じて増加した。しかしながら、コケの生育期間を延長させたところ、生態系純生産量は低下する傾向が認められた。

温度の上昇による生態系純生産量の減少は、温度上昇による呼吸量の上昇が、光合成による二酸化炭素吸収量を上回る事による物と考えられた。コケの光合成活性は降水に応答するが、降水強度が増しても、コケの光合成活性が正比例的に応答しないため、降水強度の増加に対する反応が小さいことが影響していると考えられた。他方、コケの生育期間の延長が生態系純生産量を減少させる理由として、日照時間の変化が考えられた。高緯度北極の白夜の期間は短く、8 月中旬以降は「夜」の時間が生じ始め、日ごとに急速に長くなる。その一方、雪が積もり始めるのは通常 9 月上旬くらいである。温暖化により、積雪開始時期が遅れ、その間に降雨があると、それだけコケが「夜間」に呼吸をすることになるため、生態系純生産量は減少する方向になる。高緯度北極のツンドラ生態系の炭素循環（生態系純生産量）の変化を注視するためには、生物の応答に加え、環境条件がどのように変化するか高精度の予測が期待される。

植物病原菌がツンドラ生態系における炭素循環に及ぼす影響

増本翔太¹、内田雅己^{1,2}、伊村智^{1,2}、東條元昭³

¹ 国立極地研究所

² 総合研究大学院大学

³ 大阪府立大学

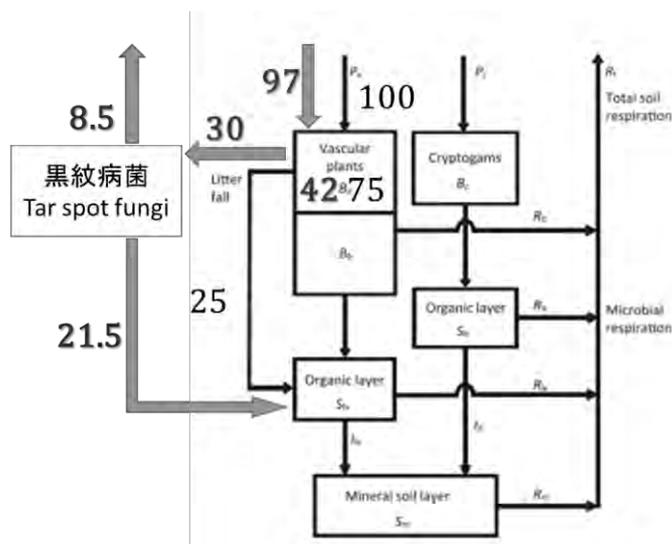
植物病原菌は植物の生育・生存に作用することで、植生や生態系全体に対しても影響を及ぼしうる。北極ツンドラ域においても多様な植物病原菌が報告されているが、それらが宿主植物を介して生態系に与える影響については研究が進んでいない。本研究では、キョクチャナギの病原菌である黒紋病菌が宿主の炭素収支に及ぼす影響を明らかにすることで、植物病原菌が持つツンドラ生態系の炭素循環への影響について評価した。

調査地であるスピッツベルゲン島では、矮性低木植物のキョクチャナギが優占している。この植物には数種の植物病原菌が感染するが、中でも本研究の対象種である黒紋病菌は分布域が広く、感染率が高い。黒紋病菌はキョクチャナギに感染後、生葉上に子実体を形成する。そのため、本菌は感染したヤナギの光合成生産を抑制する（光合成阻害）と同時に、子実体形成に伴い消費する炭素を宿主から奪取する（炭素利用）。本研究では、これら2つの黒紋病菌によるヤナギの炭素収支への影響（光合成阻害と炭素利用）に着目し、感染葉の炭素収支を推定した。さらに、本研究結果と既報の生態系炭素循環モデル（Nakatsubo et al. 2005; Uchida et al. in press）を用いて、本菌がツンドラ生態系炭素循環に及ぼす影響を評価した。

研究の結果、本菌による光合成阻害により、感染葉の個葉あたりの純生産量は健全葉の90%程度となった。一方で、本菌が子実体形成のために利用する炭素量（呼吸量+炭素含有量）は感染葉が着葉期間を通して同化する炭素量を上回る値となった。また、本研究結果を炭素循環モデルに組み入れたところ（図1）、感染率が30%のヤナギ群落では、大気からヤナギ群落へ固定される炭素量が3%減少し、固定された炭素の30%は黒紋病菌を介して環境中へ放出される（約8.5%が菌の呼吸により大気中へ、21.5%が落葉に付着した子実体として土壌中へ移動する）ことが明らかとなり、植物病原菌の存在が生態系炭素循環に対しても大きな影響を及ぼす可能性が示された。

図1 病原菌の影響を加えた生態系物質循環のコンパートメントモデル Uchida et al. (in press)を改変

健全群落が大気中から固定する炭素量を100とした場合の循環炭素量を数値で表した。感染群落は固定される炭素が3%減少し、固定された炭素のうち30%は菌に利用される。



References

- Nakatsubo T, Bekku YS, Uchida M, Muraoka H, Kume A, Ohtsuka T, Masuzawa T, Kanda H, Koizumi H (2005) Ecosystem development and carbon cycle on a glacier foreland in the high Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard. *J Plant Res* 118:173–179
- Uchida M, Muraoka H, Nakatsubo T. Sensitivity analysis of ecosystem CO₂ exchange to climate change in High Arctic tundra using an ecological process-based model. *Polar Biology*, DOI 10.1007/s00300-015-1777-x, in press.

データ同化による陸域植生モデルと観測と融合

伊勢 武史¹、池田 成貴²

¹ 京都大学フィールド科学教育研究センター

² 京都大学大学院農学研究科

データ同化は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、陸上生態系モデルについては、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、データ同化によって最適化することが可能であることを示す。今回はケーススタディとして、落葉樹の展葉・落葉フェノロジーを取り扱う。展葉・落葉によって、樹木の葉面積は非連続で突発的な挙動を示す。その挙動は従来、積算温度などでモデル化されることが多かったが、これまで統計的な手段で最適化されることはあまりなかった。本研究では、人工衛星で観測された葉面積指数の季節変化を用いてデータ同化を行った。その結果、モデルの複数のパラメタは総合的に最適化された。

データ同化の対象としたモデルは Super-Simple Stochastic Ecosystem Model (SSSEM, Dietze 2013) であり、これに展葉・落葉フェノロジーを付加し、粒子フィルタによってパラメタの最適化を行った。アラスカ州フェアバンクス付近の落葉広葉樹林を対象とし、人工衛星観測による葉面積指数 (MOD15A2・解像度 1 km、8 日周期の観測) を用いてデータ同化を実行した。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 1)。

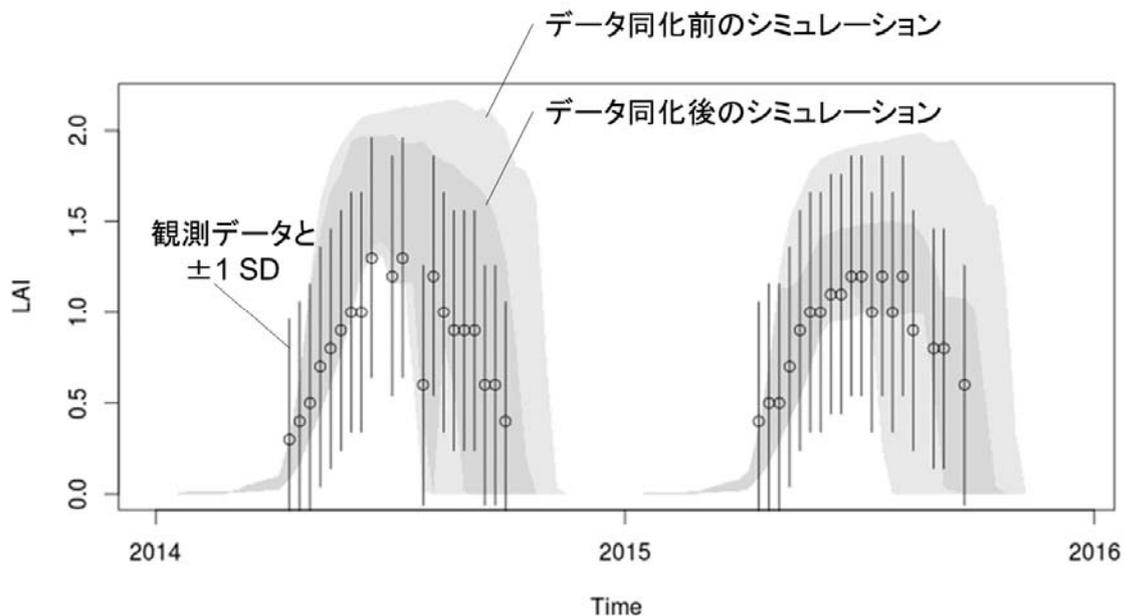


図 1. 人工衛星観測データ (MOD15A2) を用いた SSSEM のデータ同化の結果、シミュレーション結果は観測データの周囲に収束した。グレーの領域は、1,000 粒子のシミュレーションの 5-95% 領域を示す。

Reference

Dietze, M, Ecological Forecasting: code from book and course, GitHub <<https://github.com/mdietze/EcoForecast>>.

Accurate detection of year-to-year variability of growing season in a boreal forest in eastern Siberia

Shin Nagai¹, Ayumi Kotani², Syunsuke Tei^{3,4}, Rikie Suzuki¹, and Atsuko Sugimoto³

¹*Department of Environmental Geochemical Cycle Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

²*Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University*

³*National Institute of Polar Research*

⁴*Graduate School of Environmental Science / Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University*

Accurate detection of spatio-temporal variability of growing season in boreal forests is important to evaluate that of ecosystem functioning under rapid climate changes in the Pan-Arctic region. Towards this aim, satellite remote-sensing is useful but, from the ecological research view point, validation has not yet been sufficiently conducted. Here, (1) we have installed camera system in a larch forest in eastern Siberia (Spasskaya Pad site) in 2013 and then obtained daily canopy surface images. (2) Based on the ground truthing, we evaluated the spatio-temporal variability of the timing of growing season by analysing the Terra/Aqua MODIS-observed daily green-red vegetation index (GRVI) in eastern Siberia during 2003 and 2014. We found that (1) the timing of leaf-flushing and leaf-colouring of understory vegetation (birch) was about 1 week later and earlier than that of overstory vegetation (larch), respectively; (2) GRVI=0 showed the timing of leaf-flushing and leaf-colouring, respectively; and (3) the year-to-year variability of the timing of start of growing season detected by the tower-flux-based net ecosystem exchange (NEE) correlated with that by satellite-observed GRVI.

陸域観測-モデル連携: GTMIP stage 1 入力・検証用データセット (Kevo・Tiksi)

町屋広和^{1,2}, 森淳子^{1,2}, 佐藤篤司¹, 飯島慈裕², 矢吹裕伯², 児玉裕二¹,
荒木田葉月³, 伊勢武史⁴, 宮崎真⁵, 斉藤和之²

¹ 国立極地研究所, ² 国立研究開発法人海洋研究開発機構, ³ 国立研究開発法人理化学研究所,
⁴ 京都大学フィールド科学教育研究センター, ⁵ 株式会社ソニック

GTMIP stage 1: Driver and validation dataset at Kevo and Tiksi derived from GRENE-TEA Collaborative Observational Studies

Hirokazu Machiya^{1,2}, Junko Mori^{1,2}, Atushi Sato³, Yoshihiro Iijima², Hironori Yabuki², Yuji Kodama¹,
Hazuki Arakida⁴, Takeshi Ise⁵, Shin Miyazaki⁶ and Kazuyuki Saito²

¹ National Institute of Polar Research, ² Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ⁴ RIKEN, ⁵ Field Science Education and Research Center, Kyoto University, ⁶ Sonic Corporation

As part of the terrestrial branch of the Japan-funded Arctic Climate Change Research Project (GRENETEA), which aims to clarify the role and function of the terrestrial Arctic in the climate system and assess the influence of its changes on a global scale, this model intercomparison project (GTMIP) has been designed and conducted. Sets of forcing and calibration data for Land Surface Models (including both physical and biogeochemical models; LSMs) was constructed for the 35 year period from 1979 to 2013 with site-observation data to derive site-fitted data for LSMs with realistic yet continuous entries (i.e. without missing data). Four observational sites in the pan-Arctic region (Fairbanks, Tiksi, Yakutsk, and Kevo) were selected for overall GTMIP Stage 1 dataset, of which this paper reports the processes and results for Tiksi and Kevo sites.

GRENE 北極プロジェクトの一環として、北極陸域における観測値やモデル出力値を用いたモデルの相互比較「北極陸域モデル相互比較プロジェクト(GRENE-TEA Model Intercomparison Project: GTMIP; Miyazaki et al. 2015)」を行った。GTMIP の推進にあたり、GRENE が主体的に運営管理する「陸域総合観測サイト (スーパーサイト)」で得られた物理・生態過程のデータセット (観測-モデル連携データセット; Sueyoshi et al. 2016) の整備、すなわち、時間的に連続したモデル入力データ作成のための気象データ整備と、モデル出力を比較・検証する検証データの整備が必要となる。本発表では、GTMIP サイトのうち、ケヴォとティクシについて行った観測データについて報告する。

フィンランド・ケヴォ(Kevo. 北緯 69° 45', 東経 27° 00', 標高 100m. タイガ, 季節凍土) は 1995 年より、またロシア・ティクシ(Tiksi. 北緯 71° 35', 東経 128° 46', 標高 40m. ツンドラ, 永久凍土) は 1997 年より継続的な観測が実施されており、上記「観測-モデル連携データセット」を作成した 4 サイトのうちの 2 つである。Stage1 に用いた 1980~2013 年を期間とするモデル強制データ(Lv1)は、気圧、長波放射、気温、比湿、短波放射、降水量、風速の 7 項目について再解析データなどの気候データを基にしたレベル 0 (Lv0) と観測データとを比較・補正して作成した。

サイト観測値 (Obs) と気候際解析データ ERA-Interim (ERA), GPCP とを年内変動および経年変動について比較した結果、Tiksi では、観測値の年内変動は GPCP に、経年変動は ERA より近く、Kevo では年内/経年ともに変動は ERA に近いが、その絶対量は 3 割程度観測値より過大であった。

本発表では他の気象要素について同様の比較結果を報告するとともに、特に積雪期間に関するモデル出力、現地観測、衛星観測間の比較などの解析の結果についても報告する。

References

- Miyazaki et al. 2015: The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIP): overview and experiment protocol for Stage 1. *Geosci. Model Dev.*, 8, 1–16, doi:10.5194/gmd-8-1-2015.
Sueyoshi et al. 2016: The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIP) stage 1 forcing dataset. accepted, ESSD.

北極陸域モデル相互比較プロジェクト GTMIP stage1 -積雪・凍土・土壌水分再現性比較-

森 淳子^{1,2}、斉藤和之²、町屋広和^{1,2}、宮崎 真³、GTMIP グループ

¹ 国立極地研究所

² 海洋研究開発機構

³ 株式会社ソニック

GRENE-TEA model intercomparison (GTMIP) stage 1 - Comparison of the reproducibility of snowpack, frozen ground and soil water contents -

Junko Mori^{1,2}, Kazuyuki Saito¹, Hirokazu Machiya^{1,2}, Shin Miyazaki³ and The GTMIP Group

¹JAMSTEC, ²NIPR, ³SONIC (Inc.)

北極域が気候変動に対してどのような役割を果たしているかを評価するためには、数値モデルを用いた手法が有効であると考えられる。北極域において特徴的な積雪過程や土壌凍結についても多くのモデルが開発されており、サイトレベルでの再現性は向上している。しかし、北極陸域全体や地球規模を対象とするモデルには、まだこれらの寒冷地特有の物理過程が十分反映されていないものがあり、現在改善が試みられている。GRENE 北極プロジェクトにおける陸域課題 GRENE-TEA のモデルグループによる「北極陸域モデル相互比較プロジェクト (GRENE-TEA Model Intercomparison Project: GTMIP; Miyazaki et al.2015)」の Stage1 では、GRENE-TEA 陸域総合観測サイトにおいて得られた観測値を用いて共通のモデル入力データセットを作成し、それを共通の入力として物理モデルから生態系モデルまで多様な参加モデル間の相互比較および検証を行っている。特に、対象とするスケールがサイトレベルの積雪モデルから全球レベルの気候-生態系モデルまで幅広いモデルが参加していることが特徴の一つである。本発表では、GTMIP Stage1 で各参加モデルから提供された要素のうち、特に土壌の凍結と積雪、水分移動に関わる部分に関してモデル間および検証データとの比較を行う。さらに、土壌環境の再現性の違いがどのように炭素循環に影響を及ぼしているかを考察する。

Fairbanks (米国)、Kevo (フィンランド)、Tiksi (ロシア)、Yakutsk (ロシア)の4カ所の GRENE 観測サイトについて、現地観測データと再解析データを用いてそれぞれのサイトの特徴を有したモデル入力データ(Lv1; Sueyoshi et al. 2016)を作成、プロトコルと共に配布し、GTMIP 参加モデルのうち11モデルから地温の出力値を得た。対象とした期間は1980~2013年の34年間である。対象とした観測サイトのうち、Kevoは季節凍土、他のサイトには永久凍土が分布する(連続帯~不連続帯)。植生は、Tiksiのみツンドラで、Fairbanks、Kevo、Yakutskはタイガである。

モデルにより再現された活動層厚は、連続的永久凍土帯に属する2サイト(Tiksi, Yakutsk)では観測値と比較的よく一致し、ばらつきはその地域の地表面条件の違いに起因するばらつきの範囲内と考えられた。一方、そのほかの2サイトでは活動層厚にモデル間の差が大きく、永久凍土・季節凍土の判定にも違いがみられた。このことから、北極域の永久凍土の南限をモデルで再現、議論する際には注意が必要であることがわかる。ただし、永久凍土層における年平均温度のばらつきは連続帯の2サイトのほうが大きくなった。最大積雪深の再現性を見ると、積雪密度の時間変化を考慮していないモデルでは小さい値となっていた。これは積雪の断熱効果が少なくなる効果を持つため、地温も低めになる傾向を示していた。一方、土壌水分を見ると、活動層厚が比較的よく再現されているTiksiでモデル間のばらつきがもっとも大きくなっていた。永久凍土の有無は土壌水分変動に影響する重要な因子の一つであるが、植生や土壌構造など、そのほかの設定の違いも表層の土壌水分に大きく影響していると考えられる。

References

Miyazaki et al. 2015: The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIP): overview and experiment protocol for Stage 1. *Geosci. Model Dev.*, 8, 1–16, doi:10.5194/gmd-8-1-2015.

Sueyoshi et al. 2016: The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIP) stage 1 forcing dataset. accepted, ESSD.

雲レーダー FALCON-A による北極ニーオルスンでの雲観測

鷹野敏明¹、矢永賢洋¹、永瀬雄斗¹、渡辺哲郎¹、井浦太一¹、
森大知¹、河村洋平¹、中田裕之¹、塩原匡貴^{2,3}、山内恭^{2,3}

¹ 千葉大学、² 国立極地研究所、³ 総合研究大学院大学

GRENE 事業の基盤整備『雲レーダー』の開発・運用は、千葉大学と国立極地研究所との協力で実施され、北極ニーオルスン基地に W バンド 95GHz の雲レーダー (通称: FALCON-A) を設置し、定常観測を行っており、本事業大気課題など関連の研究者が利用できるようにデータの整備なども行われている。FALCON-A 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たドプラーレーダーで、図 1 にその外観を、表 1. に性能等諸元を示す。FALCON-A での雲観測は、2013 年の設置以来、冬期もふくめ常時行っている。図 2. に 2013 年 9 月 16 日に観測されたうろこ雲の様子を示す。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。図 3. は 2014 年 12 月 11 日の ドプラープロファイルマップであるが、雲内部の高度約 5km で、厚さ 100m 程度の薄い層で上昇および下降運動が存在することがわかる。これらの結果は、FALCON-A の高い感度と空間分解能によってもたらされたといえる。



図 1. ノルウェー スパ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。

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)
ドプラー速度幅	±3.16m/s(通常時)
時間間隔	10秒毎に1データ (最小1秒)

表 1. 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高度分解能など空間分解能が高いことなどが特長である。

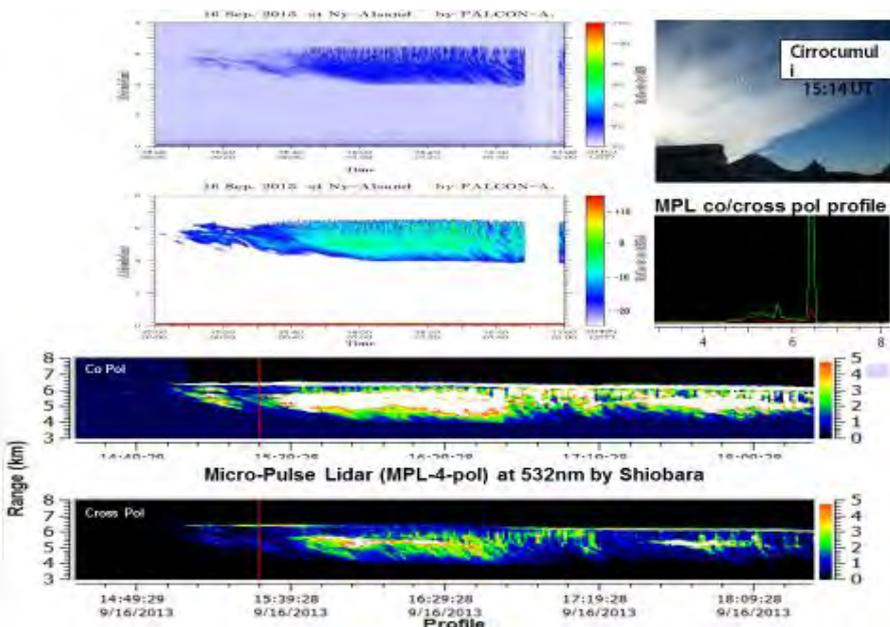


図 2. 2013 年 9 月 16 日に ニーオルスンで観測されたうろこ雲の FALCON-A による強度の高度-時間図 (左最上。その下は dBZ スケールの強度図)。下の 2 段は、Micro-Pulse Lidar (塩原ら) の観測結果。濃い雲の詳細が一致しているが、両者の見え方が異なる部分もある。

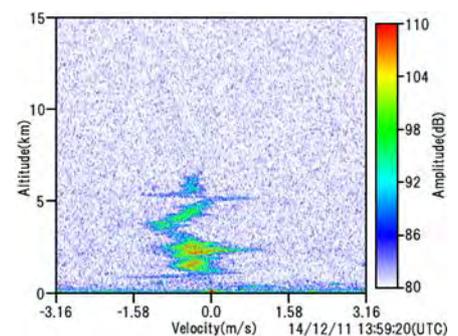


図 3. 2014 年 12 月 11 日の FALCON-A でのドプラー観測データ。縦軸は高度で 0~15 km、横軸はドプラー速度で -3.16 (下降) ~ +3.16 m/s (上昇) を示している。この図を見ると、高度約 5km の雲内部の、厚さ 100m 程度の薄い層で、上昇および下降の運動を示す場所が存在することがよくわかる。

雲粒子顕微鏡ゾンデによるニーオルスンでの係留気球観測

小林 拓¹, 塩原匡貴², 佐藤和敏², 大洞行星³, 小池真⁴, 鷹野敏明⁵, 宇野賢吾⁵, 浮田甚郎⁶
¹山梨大学, ²国立極地研究所, ³東京学芸大学, ⁴東京大学, ⁵千葉大学, ⁶新潟大学

Tethered balloon-borne cloud measurements with Cloud Particle Microscope sonde in Ny-Alesund

Hiroshi Kobayashi¹, Masataka Shiobara², Kazutoshi Sato², Kosei Ohora³, Makoto Koike⁴, Toshiaki Takano⁵,
 Kengo Uno⁵, and Jinro Ukita⁶

¹University of Yamanashi, ²National Institute of Polar Research, ³Tokyo Gakugei University,
⁴University of Tokyo, ⁵Chiba University, ⁶Niigata University

Tethered balloon-borne cloud measurements with Cloud Particle Microscope(CPM) sonde to measure cloud microphysics in Ny-Alesund (78.9N, 11.9E), Svalvard. The number-size distributions of clouds were measured in clouds directly. The measured mode diameter was varied with altitude or observation date.

1. はじめに

GRENE 事業の一環として北極スピッツベルゲン島ニーオルスンに雲レーダーが設置され、北極海の雲に関する観測体制が充実しつつある。雲の微物理特性は、放射影響を評価する上で、また、雲レーダーやライダー、衛星データ解析において重要である。雲の微物理特性を直接的に測定するため、雲粒子顕微鏡 (Cloud Particle Microscope, CPM) ゾンデを開発し、ニーオルスンにおいて係留気球により雲内観測を実施した。

2. 雲粒子顕微鏡ゾンデの概要

雲粒子を浮遊した状態でそのまま撮影できるように光学系を設計し、雲粒子の像は、倍率 10 倍の対物レンズを取り付けた顕微鏡 (ニコン, CM-10L) を通して CCD カメラ (Sentech STC-MC202USB) にて撮影する。光源として、キセノンフラッシュランプ (浜松フォトニクス, L12336) を用い、顕微鏡に設けられた専用の入射口に設置することで同軸落射により照射した。顕微鏡は対物レンズが下になるように設置し、ガラス窓を通して撮影した。ゾンデの下部は開放空間になっており、特にポンプなどを使用せず、空間に浮かんだ状態の雲粒子をそのまま観察した。フラッシュランプの点灯時間 (半値幅) は 0.3 μ s, 点灯周期は 64 Hz, CCD カメラの露出時間は、1/16 s とし、多重露光とすることでサンプリングボリュームを向上させた。CCD カメラの画素数は 1628 x 1236 ピクセルである。バックグラウンドノイズを低減させるため、連続した 2 枚の画像の絶対差を算出した結果をゾンデ内の小型 PC に保存し、地上で回収した後、画像処理を行った。標準粒子 ($d = 20 \mu$ m) を距離を変えながら撮影し、ピントが合う範囲を決定し、サンプリングボリュームを決定した。今回の設定では 0.588mm³/s となった。

3. 観測

観測は、平成 26 年 6~7 月にニーオルスンの AWI/PEV の施設を使用し、係留気球により高度 1000m 前後の雲内部に CPM を保持し、観測を実施した。一回の観測時間は内部バッテリーの制約から 2 時間とした。条件がよいときには、雲下層と雲上層といった複数の高度で測定を実施した。観測結果の一例を Figure 1 に示す。雲内部の高度により粒径分布が異なっている様子が捉えられている。

4. 今後の予定

サンプリングボリュームが小さく、撮影できる粒子数に限りがあるため、光源の見直しなどにより改善を図る予定である。

謝辞：本研究は「GRENE 北極気候変動研究事業」の一環として実施された。

¹Uchiyama A., A. Yamazaki, M. Shiobara, H. Kobayashi, Microphysical properties of boundary layer mixed-phase cloud observed at Ny-Ålesund, Svalbard: Observed cloud microphysics and calculated optical properties, Polar Science, 8, 57-72, 2014.

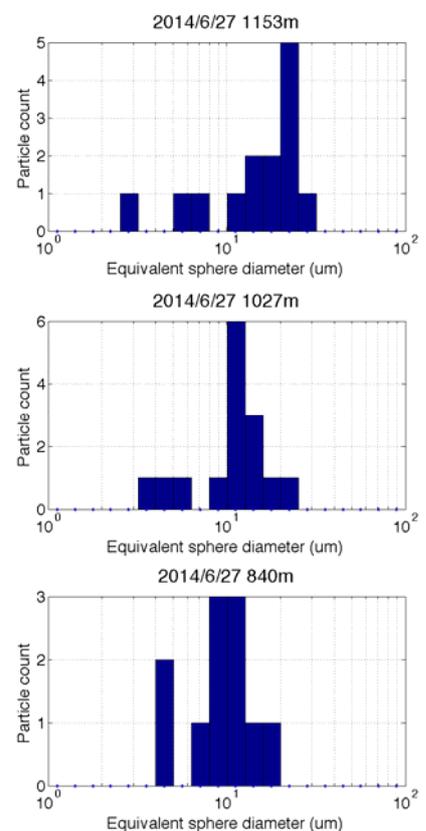


Figure 1. Measured size distribution of cloud droplet particles in each altitude.

Measurement of refractory black carbon mass concentrations in falling and deposited snow in the Arctic

P.R. Sinha^{1,3}, Y.Kondo², M. Koike¹, S. Ohata¹, N. Moteki¹, T. Mori¹,
K. Azuma², and Y. Tsukagawa²

¹*Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo, 113-0033, Japan*

²*National Institute of Polar Research, Tachikawa-shi, Tokyo 190-8518, Japan*

³*Balloon Facility, Tata Institute of Fundamental Research, Hyderabad, 500 062, India*

Abstract

Deposition of black carbon aerosol (BC) on snow (i.e. wet deposition) is considered to lower snow albedo and accelerate melting of snow. The wet deposition estimates have increased attention for the last decades due to its positive feedback (warming) in the Arctic climate, in particular. However, the measurements of the BC deposition in the Arctic are very limited. In this study, we present a novel approach to compare the measured BC mass concentrations in falling and deposited snow samples (C_{BC}) at different depths in Glacier and City sites in Ny-Alesund in the Arctic. The snow samples in the City and Glacier sites in Ny-Alesund were collected on 16 and 17 April 2013, respectively. C_{BC} is measured using a SP2 combined with a nebulizer. Accumulated precipitation corresponding to each day measurement of C_{BC} in falling snow samples is normalized with the water mass flux measured as function of snow depths and scaled the date (back in time from the date of sampling) with an error of ± 1 day. C_{BC} and BC flux (F_{BC}) are then compared between falling snow and deposited snow samples for the scaled period of 24th September 2012 to 17th April 2013 (or 16th April 2013 for City). This comparison shows a well correspondence in regard to C_{BC} and F_{BC} between falling and deposited snow for Glacier. Surprisingly, C_{BC} in city snow samples do not show any correspondence neither with C_{BC} in deposited snow in Glacier nor with C_{BC} in falling snow samples. The ambient BC mass concentrations (M_{BC}) show a good agreement with C_{BC} for both City and Glacier deposited snow samples during the period of 24th September 2012 to 17th April 2013. Interestingly, the BC mass size distributions do not show any significant variations in deposited and falling snow samples and are represented by lognormal function with a mass median diameter of about 200 nm for deposited snow (for both Glacier and City sites) and about 200-300 nm for majority of the falling snow samples. Detailed results will be presented in the meeting.

Corresponding author

P. R. Sinha
Department of Earth and Planetary Science,
Graduate School of Science,
University of Tokyo, Tokyo, 113-0033, Japan
e-mail: prs@eps.s.u-tokyo.ac.jp

シベリア三大河川における大気・陸域水循環の解明と、 北極の大気－海洋－陸域相互作用研究への展望

大島和裕¹, 朴昊澤¹, 吉川泰弘², 緒方香都^{3,4}, 立花義裕³

¹ 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

² 北見工業大学 社会環境工学科

³ 三重大学 大学院生物資源学研究所

⁴ 気象庁 中部航空地方气象台

シベリア三大河川における大気・陸域水循環

シベリアの水循環は北極気候システムの一翼を担う。シベリア三大河川（図 1）を含む北極陸域の河川は淡水の大きな供給源であると同時に、栄養塩や有機物を運び海洋の生態系、物質循環にも関わる。河川水に加えて、上空からの降雪または降水として、また北極海と太平洋や大西洋との間の海流による塩分輸送によって北極海へ淡水が供給される。これらの淡水供給により、ほぼ閉じた海である北極海の表層には低塩分層が形成され、表層だけが効率的に大気から冷やされて凍りやすい状況となる（例えば大島 2014, 2015）。

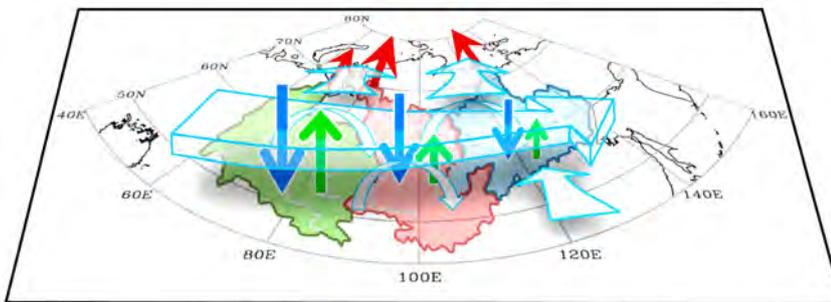
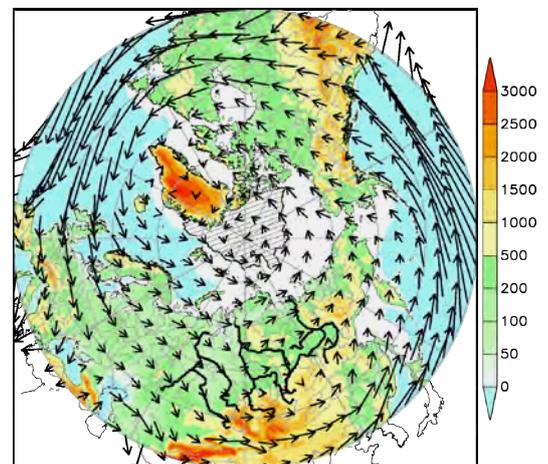


図 1 シベリアにおける大気・陸域水循環の地域的な特徴を示す模式図。陸域の陰影は、シベリア三大河川の流域（緑：オビ、赤：エニセイ、青：レナ）。青、緑、赤、白の矢印は、それぞれ降水量、蒸発散量、河川流量、降水の再循環を含む大気水蒸気輸送。矢印の長さとは、フラックスのおおよその違い（Oshima et al. 2015 より）。

シベリア域の降水は、一部は蒸発散によって大気に戻り、残りが河川水として北極海に注ぐ。よって降水量と蒸発散量の差 ($P-E$) は河川流量に対応しており、 $P-E$ の変動は上空の水蒸気輸送の影響を強く受ける（Zhang et al. 2012, 大島 2014, Oshima et al. 2015）。夏季の $P-E$ はオビ川からレナ川中流域にかけて負であり、この地域の蒸発散が降水の再循環や北極海への水蒸気輸送のソースとなっていることを示唆する。先行研究ではシベリア域の気温や降水量、蒸発散量にみられる東西の気候学的な地域差が示されているが、Oshima et al. (2015) では水蒸気フラックスの時間成分解析から、降水をもたらす水蒸気輸送過程が流域ごとに異なることを明らかにした（図 1）。東のレナ川では低気圧活動、西のオビ川では季節風に伴う水蒸気輸送が影響し、真ん中のエニセイ川では両者が寄与する。また先行研究では $P-E$ と河川流量の変動にずれがあったが、この地域に適した季節的な時間ラグを考慮することでずれは小さくなり、河川流量の年々変動には $P-E$ が支配的であることを明確に示した。

過去 70 年間に観測された河川流量データは、先行研究と同様に 1980 年代から 90 年代半ばにかけてレナ川とオビ川の流量が負相関であることを示し、これには大気循環の東西シーソーパターンが影響していた。一方で 1990 年以降は相関が弱く、1950 年代半ばから 60 年代にかけては正相関であった。さらに長期の過去 200 年間の年輪から復元された流量データにおいても正相関や負相関、無相関の期間がみられ、レナ川とオビ川の関係は年代ごとに異なっていた。興味深いことに、過去 200 年間の年輪復元流量の 15 年移動相関は負に偏って分布した。また AGCM のコントロール実験および CMIP3 マルチ気候モデルの 20 世紀再現実験、産業革命前コントロール実験による夏季シベリアの東部と西部における降水量の相関も負の期間が多く、東西

図 2 夏季北半球中高緯度域における水蒸気輸送と海水分布。矢印は大気の水蒸気輸送（鉛直積分した水蒸気フラックス）の 7 月の平年値（1980 年～2009 年までの平均）。北極の白い領域は 2012 年 3 月の海水分布、北極海中心部のハッチは最小を記録した 2012 年 9 月の分布。陸域のカラーは標高、灰色線および黒線（シベリア三大河川）は河川網（大島 2015 より）。



シーソーパターンと関係していた。AGCM の相関は年輪復元流量や CMIP3 モデルの結果よりも負に偏っていた。これらの結果はシーソーパターンが大気の内変動であることを示す。したがって、大気の内変動として夏季シベリア上空に現れる東西シーソーパターンによって、シベリアの東部と西部の降水量は負相関となり、結果としてレナ川とオビ川の河川流量は負相関になりやすい傾向にあることが分かった。以上のシベリア河川に対する一連の研究から、シベリア域の大気と陸域をつなぐ水循環にとって、大気の水蒸気輸送が長期変動をコントロールする鍵であると言えるだろう。

北極の陸域から海洋をつなぐ河川

北極域の河川は秋に結氷して、冬に氷は成長し、春に融解する季節変化を繰り返す。この河川氷の季節変化は前述の流量変動に影響を及ぼす。これまでの河川氷の研究では観測が主要河川に限られていたため、北極の広域を対象とした影響評価は困難であったが、Park et al. (2016) では河川氷のスキームを陸面過程モデル (CHANGE) に結合することで河川の氷厚とその季節変化、また河川水温のシミュレーションが可能となった。CHANGE による実験の結果、北極河川では近年の昇温によって最大氷厚は平均の 166cm から過去 31 年間 (1979～2009) に 24cm (14%) 薄くなり、河川の結氷期間は平均の 147 日から同期間に 9 日間 (6%) 短くなったことが分かった。従来は気温による影響が言われてきたが、近年の河川氷厚と地温の変化に対しては積雪による断熱効果が強く影響することが感度実験から明らかになった。特に他地域よりも積雪の変化が大きかったシベリア域でこの影響は顕著であった。このような積雪の影響は海洋においても重要である。その他、近年陸域で観測されている凍土融解や森林劣化による河川への影響なども考えられる。

北極の大気－海洋－陸域相互作用

近年北極域では北極温暖化増幅と呼ばれる大きな昇温と海氷減少に伴って大気、海洋、陸域の様々な変化が観測された。海氷減少は大気大循環や低気圧の影響を受けるとともに、海水温や海流、海洋構造などの海洋状況の影響も受けている。一方、海氷減少の影響として、冬季シベリアの気温や積雪、大気循環、低気圧経路、極端現象などの変化、また成層圏を介した中緯度への影響が最近の研究で指摘されている。これらの大気の変化は水蒸気輸送 (図 2) を変え、さらには陸域水循環への影響が予想される。しかしながら、これらの海洋 (海氷) から大気への影響は、海氷が年間で最小となる 9 月 (図 2) 以降の冬に観測されることが多く、大気の水蒸気量が大きく水循環な活発な夏とはずれており、夏に焦点をあてた研究は今後の課題である。陸域から海洋をつなぐ河川に関しては、Park et al. (2016) の結果をもとに解析を進めており、ローカルではあるが春に河川から海氷への影響を示唆する結果が得られている。これは解析を進め別の機会に発表する。

北極域では、最近 10 年間に様々な変化が観測され、色々なことが解明されたが、未解決なことも多い。北極含む北半球中高緯度域の大気、海洋、陸域の種々の現象 (図 3) が現在どのように変わりつつあり、今後どのようになるか (なりそうか)、またそれらがどのように関連しているか、引き続き観測とデータ解析からひとつひとつをつなぐ物理過程の解明を目指す。

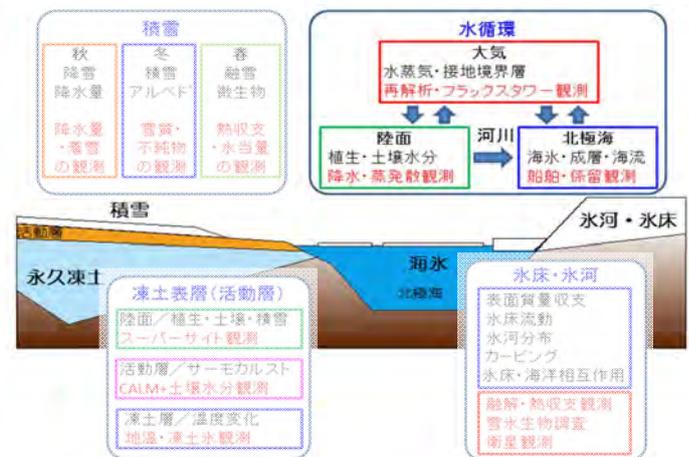


図 3 北極の大気－海洋－陸域システムにおける水循環を介した相互作用 (北極環境研究の長期構想 2014 を修正)。

参考文献

- Oshima, K., Y. Tachibana and T. Hiyama: Climate and year-to-year variability of atmospheric and terrestrial water cycles in the three great Siberian rivers. *Journal of Geophysical Research*, 120, doi:10.1002/2014JD022489. 2015
- 大島和裕：シベリア域における大気陸域水循環。気象研究ノート第 230 号「北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動」, 飯島慈裕, 佐藤友徳編, 12-26, 日本気象学会, 2014 年 10 月
- 大島和裕：シベリアに関係する北極の気候。「シベリア 温暖化する極北の水環境と社会」, 檜山哲哉, 藤原潤子編, 84-88, 京都大学学術出版会, 2015 年 3 月
- Park, H., Y. Yoshikawa, K. Oshima, Y. Kim, T. Ngo-Duc, J.S. Kimball and D. Yang: Quantification of warming climate-induced changes in terrestrial Arctic river ice thickness and phenology. *Journal of Climate*, accepted on December 18, 2015
- 北極環境研究の長期構想, テーマ 4「氷床・氷河, 凍土, 降積雪, 水循環」, 42-52, 北極環境研究コンソーシアム, 2014

Three Dimensional Structures of the Arctic Cyclones

Takuro AIZAWA^{1,3} and Hiroshi L. TANAKA²

¹*Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba*

²*Center for Computational Sciences, University of Tsukuba*

³*National Institute of Polar Research*

Arctic cyclones are unique low pressure systems appearing in the Arctic, which are different from the tropical cyclones and the mid-latitude cyclones. Three typical Arctic cyclones having longer duration in summer were analyzed by Tanaka et al. (2012). They provided a new insight that the surface Arctic cyclone connects to an upper polar vortex producing a deep barotropic vortex. They also noted that the characteristic thermal and the vortical structures are maintained throughout a life cycle. Aizawa et al. (2014) analyzed the same thermal structure and a deep wide-spread tropopause folding just over the cyclone center related to the intensification of the polar vortex. But, the three dimensional stereoscopic structure of the Arctic cyclones was not investigated by their studies. The purpose of this study is to show the three dimensional structure of the typical Arctic cyclones.

The Arctic cyclones chosen in this study (Aizawa and Tanaka 2016) are cases of June 2008 (Tanaka et al. 2012, Aizawa et al. 2014) and August 2012 (Simmonds and Rudeva 2012). The original data used this study are the reanalysis data of JRA-25/JCDAS (Japan 25year Reanalysis/JMA Climate Data Assimilation System; JMA: Japan Meteorological Agency). The case 2008 appeared above the Arctic Ocean at 00Z 10 June 2008, roamed around the Arctic Ocean for more than two weeks. The minimum pressure in the life cycle is 977 hPa. The case 2012 arose above the Central Siberian at 18Z 2 August 2012, and moved to the Arctic Ocean showing a development in the central pressure. The minimum pressure in the life cycle is 965 hPa. To investigate the three dimensional structure of the Arctic cyclones, we converted the meteorological data from a latitude/longitude coordinate system into the cylindrical coordinate system around the cyclone center using a bi-cubic spline interpolation. The resolution of the cylindrical data is 10 km in a radial direction with 1 degree in deflection angle.

Since the cyclone of case 2008 had a steady structure, we calculated the space-time averaging through the life cycle to extract the typical structure of the Arctic cyclone. The figures are time average during 00Z 10 June 2008 to 18Z 26 June 2008 (for 17days). Figure 1 shows the lifetime mean potential vorticity (PVU, $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{K}$), geopotential height (m) at 250 hPa and 500hPa, and sea level pressure (hPa) of the Arctic cyclone. We find from Fig. 1 (a) that there is an isolated potential vorticity anomaly, associating with the intense upper polar vortex having symmetric circulation at lower stratosphere. This stratospheric vortex vertically binds to the tropospheric vortex tightly (Fig. 1b), indicating cyclonic potential vorticity anomaly. The surface cyclone appears just under the upper polar vortex in the high potential vorticity region at 850 hPa (Fig. 1c). The horizontal scale of cyclone showing symmetry from lower and upper altitude is 1500 km in radius.

Figure 2 illustrates the radius-height cross section of azimuthally averaged tangential wind, radial wind, vertical velocity, relative vorticity and temperature deviation from the environmental mean for the case 2008. The dynamical tropopause (2 PVU surface) is also shown in Fig. 2 by the bold contours. The snapshot figures during the life cycle show the same structures as the Fig. 2 (not shown), although there are some fluctuations for the intensities of the secondary circulation in time. The upper jet locates at 300 hPa, in radius of 400-1000 km, and its maximum is over 20 m/s. The cyclonic wind covers the whole length of graphic, exceeds a radius of 1500 km in radius. This huge cyclonic circulation with the jet is related to the upper polar vortex. The Arctic cyclone is a wide-scale vortex of a deep cyclonic primary circulation from the surface up to the stratosphere. There is a secondary circulation within the vortex of the cyclone. The outflow at the upper troposphere (200 -500 hPa) is seen in Fig. 2(b). In the boundary layer, it is an inflow (Fig. 2d). It shows updraft within the 1000 km radius, the region of peak intensity locates at 500 hPa level of a cyclone center.

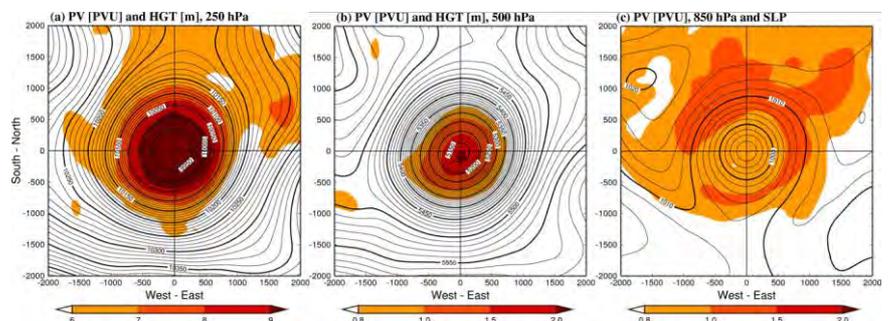


Fig.1 Time averaged potential vorticity (PVU) at (a) 250 hPa, (b) 500hPa and (c) 850 hPa, geopotential height (m) at (a) 250 hPa, (b) 500hPa and (c) sea level pressure (hPa) for the case 2008. The figures are time average during the life cycle (00Z 10 June – 18Z 26 June, 2008). The shades show the potential vorticity, and the contours show the geopotential height and sea level pressure. The contour interval in (a), (b) and (c) is 20 (m/s) and 2 hPa, respectively.

On the other hand, the figure shows the downward current outside the 1000 km radius. Note that it shows a downdraft at the lower stratosphere (70-250 hPa) around the cyclone center. The positive relative vorticity related to the deep cyclonic circulation stretches up to stratosphere from the surface. The temperature deviation indicates a cold core in the troposphere and a warm core in the stratosphere as seen in Fig. 2(f). The center of the warm core locates at 300 hPa in agreement with the previous study by Tanaka et al. (2012) and Aizawa et al (2014). The tropopause at the cyclone center descends from 300hPa to 500 hPa associating with the potential vorticity anomaly at the lower stratosphere. The tropopause folding above the cyclone center implies the upper polar vortex. The sustained downward airflows at the lower stratosphere are able to intensify the warm core by the adiabatic heating process. This effect has the potential to maintain the upper air and surface cyclones, causing the adiabatic cooling by the ascent flows in the troposphere through the boundary layer Ekman pumping.

Note that the cyclone of June 2008 appears showing axisymmetric cyclonic circulations at the surface level. The cyclone of 2012 is characterized by the structure change from the cold core to the warm core at the lower stratosphere, indicating a shift from the ordinary baroclinic cyclone to the typical Arctic cyclone (not shown).

Tropopause polar vortices are often found on the tropopause in the Arctic. Cavallo and Hakim (2010) provided the structure of the tropopause polar cyclones. Compared with their results, though the basic structure of the Arctic cyclones is similar to the tropopause polar cyclone, the scale and the intensity of the Arctic cyclones are significantly larger than that. The major difference in the Arctic cyclone is found in the vertical structure producing the surface cyclonic circulation while it is absent in the tropopause polar vortex. It is found that the Arctic cyclone is characterized as one of the tropopause polar vortices, but it is connected with the polar vortex of all the stratosphere, and the cyclonic circulation reaches to the ground, generating a secondary circulation which produces the cold core in the troposphere by the updraft from the surface level. Although additional studies are needed, a schematic diagram of the Arctic cyclone is proposed in this study.

References

- Aizawa, T., H.L. Tanaka and M. Satoh, Rapid development of Arctic cyclone in June 2008 simulated by the cloud resolving model NICAM, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 137(660), 105-117, 2014.
- Aizawa, T. and H.L. Tanaka, Axisymmetric structure of the long lasting summer Arctic cyclones, *Polar Science*, 2016. (Submitted)
- Cavallo, S.M. and G.J. Hakim, Composite structure of tropopause polar cyclones, *Monthly Weather Review*, 138, 3840-3857. 2010.
- Simmonds, I. and K. Rudeva, The great Arctic cyclone of August 2012, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L23709, doi:10.1029/2012GL054259., 2012.
- Tanaka, H.L., A. Yamagami and S. Takahashi, The structure and behavior of the Arctic cyclone analyzed by the JRA-25/JCDAS data, *Polar Science*, 6, 54-69, 2012.

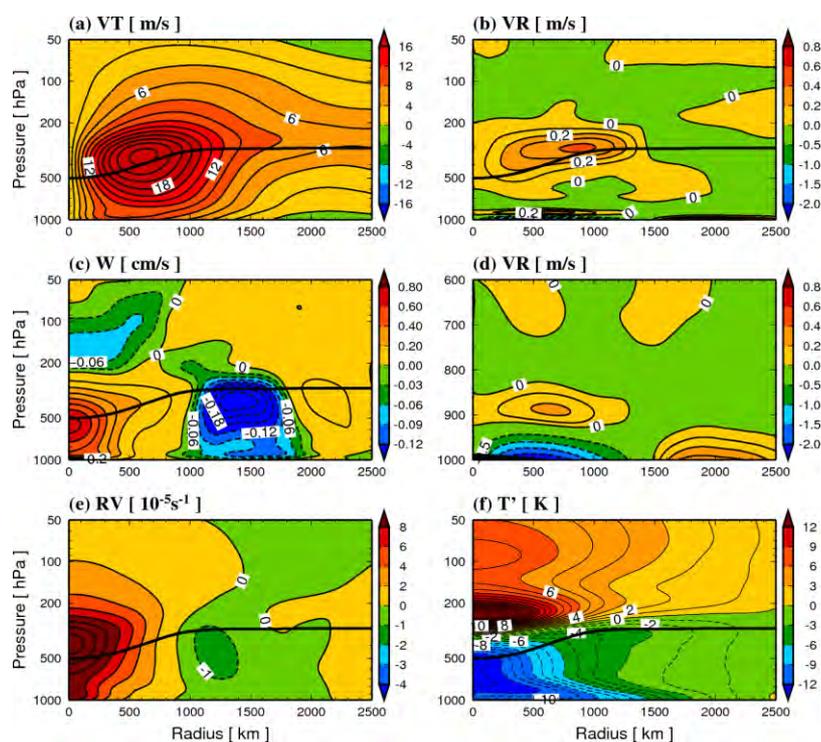


Fig.2 Radius-height cross sections of azimuthal mean (a) tangential wind speed (m/s), (b) radial wind speed (m/s), (c) vertical velocity (cm/s), (d) enlarged plot of (b) near the surface (m/s), (e) relative vorticity ($10^{-5}s^{-1}$) and (f) temperature deviation ($^{\circ}C$) for the case 2008. The figures are time average during the life cycle (00Z 10 June – 18Z 26 June, 2008). The bold contours show the dynamical tropopause (2 PVU surface). The solid lines and the dashed lines indicate positive and negative values. The intervals of the dashed line in (c), (b, d) and (e) are 0.03 (cm/s), 0.5 (m/s) and 1 ($10^{-5}s^{-1}$), respectively.

北半球の自然変動が十年スケールの地上気温変動に及ぼす影響についての研究

田村 美奈¹、田中 博²

¹ 筑波大学 生命環境科学研究科

² 筑波大学 計算科学研究センター

背景・目的

北半球冬季における大気のもっとも卓越した変動として北極振動(Arctic Oscillation: AO)がある。AOは北緯60度を挟んで南北に海面更正気圧(SLP)が逆相関を示す現象で(Thompson and Wallace 1998), AOに伴うSLP偏差パターンは北極域に大きな負偏差, それを取り囲むように北太平洋と大西洋に極大を持つような正偏差となっており, またAOに伴う地上気温偏差パターンはグリーンランド付近で負偏差, シベリアからヨーロッパにかけてと北米で正偏差となる。このときを北極振動指数(AOI)が正であるといい, 負の場合は偏差の符号が全て逆になる。一方, 近年温室効果ガスの増加など人為的起源による地球規模での温暖化が問題となっている(IPCC 2013)。それは特に秋季から冬季にかけての北極域で最も顕著に現れており, 北極域における気温上昇率は全球平均と比べて約2倍大きいこの現象は北極温暖化増幅(Arctic Amplification: AA)と呼ばれている(Serreze and Francis 2006)。Nagato and Tanaka (2012)では北緯20度以北の冬季(DJF)の地上気温についてEOF解析を行うと, EOF-1にはAOパターン, EOF-2には北極域を中心とする温暖化パターンであるAAパターンが抽出され, AOパターンは自然変動成分, AAパターンは人為起源変動成分と示唆されたが, これを明らかにするには至らなかった。一方, Alexeev and Jackson (2012)では, 2-Box Energy Balance Model (Langen and Alexeev 2007)を使用してAAに対する大気の熱輸送と高緯度における地表面アルベドの影響評価を行い, 現在の気候下においてAAには地表面のアルベドフィードバックが大きく影響していることを示した。この地球温暖化のバランス方程式を用いたモデルにより北半球地上気温の長周期変動を再現すると, 図1のようになる(Tanaka and Tamura 2015)。CO₂の影響がない場合(図1, 点線)でも地上気温は数十年スケールで変動可能なことから, 北半球平均地上気温は自然変動成分によって変動していることが示唆されている。地球温暖化の理論式にはAAの影響が含まれていること, またAAの理論式においては大気上端の短波放射収支を考慮した高緯度のアルベドが変動成分となっていることから, 大気上端におけるアルベド(プラネタリーアルベド)が重要な役割を果たしている。本研究では, Nagato and Tanaka (2012)で述べられたAOとAAの分離の結果を再検証すること, また実際の気候におけるプラネタリーアルベドと地上気温変動の関係を調べることを目的とする。

解析手法

本研究ではCO₂の線形トレンドを人為起源変動成分と仮定し, 回帰により地上気温の人為起源変動成分を抽出した。また, 地上気温の変動から人為起源変動成分を差し引いた残差を自然変動成分と定義し, 自然変動成分についてEOF解析を行った。さらに北半球平均およびシベリア平均プラネタリーアルベド変動を求めて各気象要素との相関を調べた。ここで使用したデータはNOAAのMauna Loa月平均CO₂, JRA-55再解析データの月平均2m地上気温, 2次元物理量平均値の大気上端上向き短波放射フラックス及び大気上端下向き短波放射フラックスで, 期間は全て1958/59年~2011/12年(DJF)である。本研究では大気上端上向き短波放射と大気上端下向き短波放射の比をプラネタリーアルベドとして扱った。

結果・まとめ

CO₂の線形トレンドを地上気温に回帰した結果, 北極域を中心とした北半球全域の温暖化パターンが抽出された。この成分を地上気温変動から引いた自然変動成分についてEOF解析を行うと, EOF-1にはAOパターン(図2, 左), EOF-2にはバレンツ海の温暖化, 大陸の寒冷化パターンであるバレンツ海モード(図2, 右)が現れ, AAパターンは現れなかった。これよりAAパターンはCO₂トレンドに伴う人為起源変動成分であること, AOパターンとバレンツ海モードは自然変動成分として重要なパターンであることが確かめられた。また, AOパターンの地上気温変動を領域平均するとほぼ0となり北半球の地上気温変動への影響は小さいということが考えられる。バレンツ海モードの領域平均は-0.16Kとなり, またバレンツ海モードのトレンドは2-Box Energy Balance Modelを用いて再現された北半球平均地上気温変動とよく類似したものとなっていることから, バレンツ海モードが北半球の地上気温の自然変動成分として重要なパターンであることが考えられる。

さらに北半球平均したプラネタリーアルベド変動(図3)はバレンツ海モードの変動と時系列がよく似ていること, またシベリア平均したプラネタリーアルベド変動はAOIと時系列がよく似ていることがわかった。これより北半球の地上気温変動にはバレンツ海モードが大きく影響しており, それはプラネタリーアルベドが密接に関係していると考えられる。またAOパターンはシベリアなどの地上気温変動やプラネタリーアルベドと関係していること

から、その影響はローカルなものであると考えられる。積雪深を用いた解析よりそれらの相互作用について必ずしもアイスアルベドフィードバックが関係しているわけではないことから、雲のフィードバックなど他の要素によるフィードバックの重要性があげられる。また ERA-Interim, NCEP/NCAR 再解析データを用いて同様の解析を行い相互に比較すると、JRA-55 と ERA-Interim のプラネタリーアルベド変動のトレンドはよく似ていた。このことから、本研究で得られたプラネタリーアルベドに関する結果が JRA-55 特有のものでないことが確かめられた。

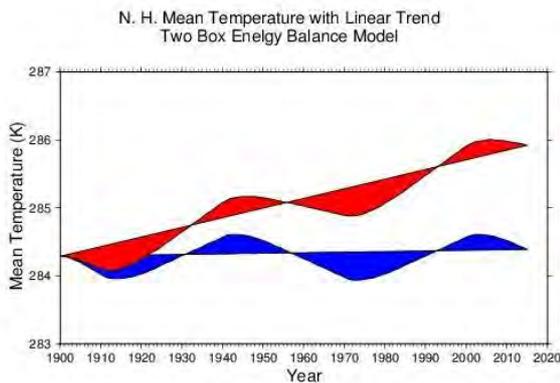


図1 北半球平均地上気温の長周期変動

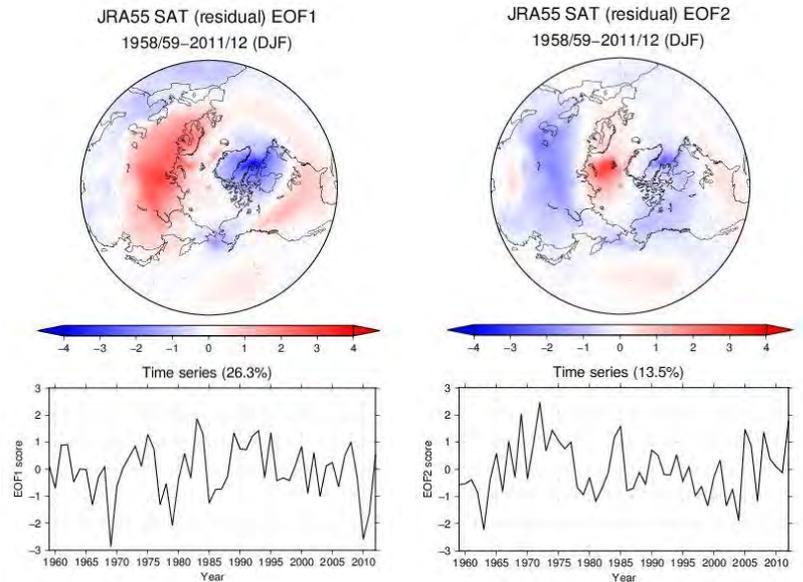


図2 地上気温の自然変動成分の EOF-1(左)と EOF-2(右)

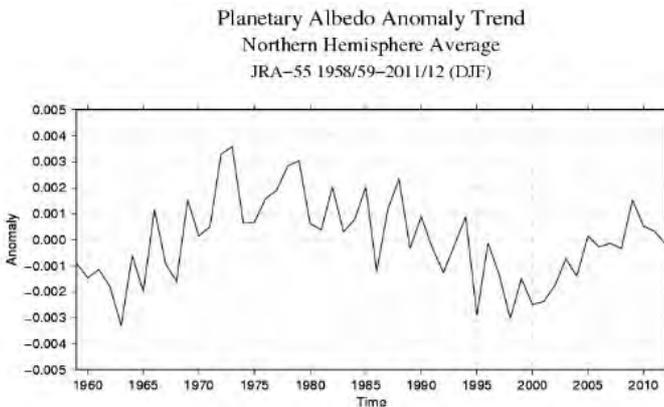


図3 北半球平均プラネタリーアルベド変動の時系列

参考文献

- Alexeev, V. A., and C. H. Jackson, Polar amplification: is atmospheric heat transport important?, *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-012-1601-z, 2012.
- Langen, P. L., and V. A. Alexeev, Polar amplification as a preferred response in an idealized aquaplanet GCM., *Clim. Dyn.*, 29, 305-317., 2007.
- Nagato, Y., and H. L. Tanaka, Global warming trend without the contributions from decadal variability of the Arctic Oscillation. *Polar Sci.*, 6, 15-22., 2012.
- Serreze, M. C., and J. A. Francis, The Arctic amplification debate., *Clim. Change*, 76,241-264., 2006.
- Tanaka, H. L., and M. Tamura, Relationship between the Arctic Oscillation and surface air temperature in multi-decadal time-scale., (Submitted to *Polar Sci.*, 2015)
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields., *Geophys. Res. Lett.*, 25,1297-1300., 1998.

The moisture updrafts on the cold pool captured by the continuously radiosonde observation passing through the marginal ice zone in Laptev Sea

Kensuke K. Komatsu¹, Yoshihiro Tachibana¹ and Vladimir Alexeev²

¹*Mie University, Tsu, Japan*

²*University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, United States*

In summer 2013, we conducted 6 hourly radiosonde observation between off-ice and on-ice by Russian icebreaker “Akademik Fedorov” passing through the marginal ice-zone in Laptev Sea during NABOS project (Nansen and Amundsen Basins Observational System). During observation period, the warmer and humid air mass was advected by southeasterly wind from Siberia to Laptev sea because the low-pressure system was passing. The temperature profiles below 600 m was maintaining the cold pool associated with a sea ice and the inversion layer formed above it. The humidity profiles were, however, not trapped until the height of inversion layer, they reached at higher levels (< 5000 m). These observational evidences implied that the humid air from Siberia was lifted on the cold pool maintained by sea ice and this process could transport the moisture to upper level in the arctic region. To verify these processes and examine the impact of the existence of sea ice, we conducted the numerical experiment by WRF. Three boundary conditions were adopted to simulation; present sea ice, removed all sea ice, and increased sea ice area. As primary results, the trajectories of air parcel from Siberia was rising to upper level with released the latent heat due to the condensation of humid air. The case of present sea ice transported much moisture vertically in the arctic region than other two cases. More detail results will be reported on the day. The process of the vertical moisture lifting due to the cold pool could contribute to the heat transport from the mid-latitude surface to the upper level in the arctic.

初冬の日本に影響を与える大気循環と周辺の海面水温の季節変化

安藤 雄太^{1,2}、小木 雅世³、立花 義裕^{1,3}、小寺 邦彦^{1,4}、山崎 孝治^{1,2,5}¹ 三重大学大学院生物資源学研究所² 国立極地研究所³ マニトバ大学⁴ 名古屋大学⁵ 北海道大学

冬季北半球の重要な大気循環は北極振動 (AO) と西太平洋 (WP) パターンである. 一般的に AO・WP 正 (負) パターンのときシベリア, 東アジア, 日本が高温 (低温) 偏差になる. しかし, 日本海の低温 (高温) 偏差は AO・WP 正 (負) の加熱 (冷却) 効果に勝った. 線形回帰解析では日本海が高温 (低温) 偏差のとき日本が高温 (低温) 偏差になる. つまり, 日本の気温は大気大循環と同様に小規模な海の水温に影響されることが示唆される結果となった (Ando et al. 2015).

しかし, Ando et al. (2015) は 2012/13 年冬の事例解析であるため, 一般的に周辺の海が日本の気温に影響を与えるという結論を得ることはできない. 一般的な結論を得るためには, 統計的な解析, つまり, 日本の気温と周辺の海水温との相関を計算する必要がある. しかし, 大気大循環は日本の気温と周辺の海水温の両方に影響を与える. 両者に有意な正相関があるのは当然の結果である. したがって, 「実際に」周辺の海水温が日本の気温に与える影響を調べるためには, 気温変動から大気循環の影響を除去する必要がある. また, 季節により日本に影響を与える大気循環は異なるため, 特定の大気循環指数を用いるだけではその時期に実際に影響を与える大気循環を捉えることはできない. 我々は大気循環の季節変化を適切に捉え, さらにその大気循環の影響を除去する新手法を考案した. 本研究では, 周辺の海水温が日本の初冬の気温に影響を与えるか, その季節変化をこの統計的な新手法を用いて明らかにすることを研究目的とする.

解析の結果, 日本の気温に影響を与える大気循環は 11 月下旬と 12 月上旬で大きな季節変化があることが明らかとなった. 一方, 初冬の日本周辺の海水温は大気循環の影響を除去しても日本海と有意な正相関であった. この結果は事例解析である Ando et al. (2015) と整合的である. 大気循環の影響は強いが, 日本海の水温も日本の気温に強く影響することが統計的に示唆される結果となった.

References

Ando, Y., M. Ogi, and Y. Tachibana, 2015: Abnormal winter weather in Japan during 2012 controlled by large-scale atmospheric and small-scale oceanic phenomena, *Monthly Weather Review*, **143**, 54-63, [doi: 10.1175/MWR-D-14-00032.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00032.1).

The role of the cold Okhotsk Sea in the strengthening the Pacific subtropical high and Baiu precipitation

K. Kawasaki¹, Y. Tachibana¹, T. Nakamura^{2,3}, K. Yamazaki^{1,2,3}, and K. Kodera^{1,4}

1: Weather and Climate Dynamics Laboratory, Mie University, Japan

2: Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Japan

3: National Institute of Polar Research, Japan

4: Nagoya University, Japan

It is commonly known that the formation of a stationary precipitation zone in association with the Baiu front is influenced by the existence of the warm Tibetan Plateau. Some GCM studies in which the Tibetan Plateau is removed pointed out that without the Tibetan Plateau, the Baiu front would not appear. The cold Okhotsk Sea, which is located to the north of Japan, is also important in forming cold air for the Bai front. This study focused on the role of the Okhotsk Sea in the formation of the Baiu front by using an atmospheric GCM. One GCM is executed without the Okhotsk Sea, in which was changed to an eastern part of the Eurasian continent as if the Okhotsk Sea was totally landfilled (land run). The other (sea run) is a control run under the boundary condition of climatic seasonal changes of the SST over the globe. The comparison of the land run with the sea run showed that precipitation over Japan would weaken in the Baiu season without the Okhotsk Sea, indicating that the existence of the Okhotsk Sea has an impact on the increase in precipitation (Fig.1). The precipitation increase in the sea run is directly accounted by the strengthening of southeast wind in association with the strengthening of the subtropical high located over the Pacific Ocean (Fig. 2). The westerly jet, which is located at the northern part of the subtropical high, was also accelerated in the sea run. The subtropical high in association with the accelerated jet was strengthened by meridional atmospheric thermal gradient caused by underlying cold Okhotsk Sea and the warm Pacific Ocean. The strengthened thermal gradient also activated the storm track that extends zonally over the Okhotsk Sea, and the activated storm track further strengthened the jet and subtropical high by wave-mean flow feedback. This feedback loop could further strengthen the Baiu precipitation. In consequence, the Okhotsk plays a significant role in the strengthening the subtropical high and its associated Baiu precipitation.

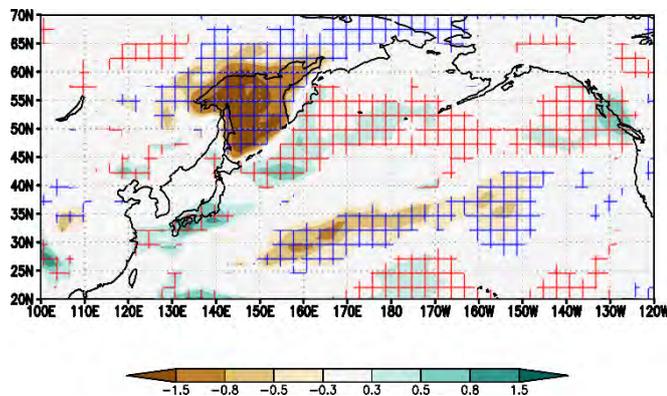


Figure 1. Difference in May-June mean in precipitation [mm/day] between sea-run and land-run (color shading). Significance levels above 90% based on t-test are hatched.

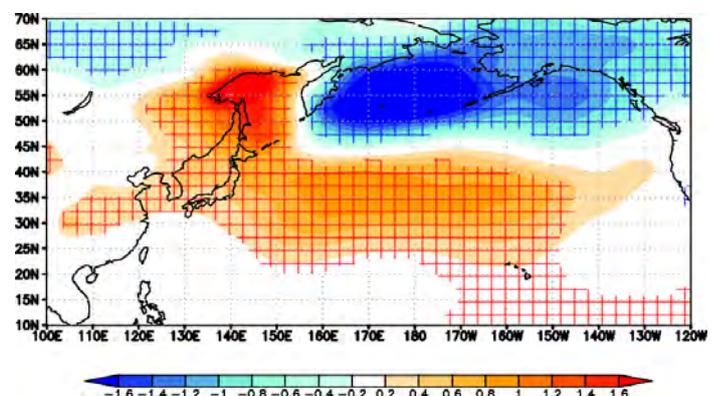


Figure 2. Difference in May-June mean in Sea level pressure [hPa] between sea-run and land-run (color shading). Significance levels above 90% based on t-test are hatched.

大気における極向きエネルギー輸送に関する南北風の再評価

春山哲範¹、浮田甚郎¹、本田明治¹、岩本勉之¹²³

¹新潟大学

²国立極地研究所

³紋別市役所

・背景

近年、北極域では急速な温暖化が進行している。その要因の一つとして大気による極へのエネルギー輸送の変化が示唆されている(Serreze et al. 2007)。ある緯度円により定義された大気柱の側面(緯度面)におけるエネルギー(顕熱、ジオポテンシャルエネルギー、潜熱、運動エネルギーの和)とそこでの南北風の積であるエネルギー・フラックスをエネルギー輸送として定義する。さらに、このエネルギー・フラックスを線形的に分解すると、擾乱渦成分、定常渦成分、子午面循環成分、質量変化成分の4つの成分に分かれる(Oort 1971)。これらのうち、最後の質量変化成分は、月スケールでの時間平均、東西平均、鉛直重み付き平均した南北風と、これと同様の操作を行ったエネルギーの積、つまりスカラー量同士の積として表すことが出来る。再解析データが登場する以前のラジオゾンデ観測による計算では、上記の3重平均した南北風は値も小さくまた解像度の制約により、質量保存則の観点からその値が0になると仮定されていた。しかしながら、再解析データ登場後も質量変化成分は陽に取り扱われてはいない。

北緯 70° におけるエネルギー・フラックスの年平均値に対して 43% 寄与する顕熱フラックス(Overland et al. 1994)の質量変化成分の時間変化を考えると

$$Cp(\{\bar{T}\}\{\bar{v}\})' = Cp\{\bar{T}\}'\{\bar{v}\} + Cp\{\bar{T}\}\{\bar{v}\}'$$

となる。ここで $\{\bar{A}\}$ はある物理量 A に対する上で述べた 3 重平均、T は気温、v は南北風を表す。北緯 70° 面において上式の右辺の第 2 項のほうが第 1 項より一桁大きいことがわかる。つまり、北緯 70° 面から北極域へと流入する顕熱フラックスの時間変化に対して、温度のトレンドよりも、南北風のトレンドの方が少なくとも重要であると考えられる。そこで本研究では再解析データから、北緯 70° 面の南北風についての季節変動、トレンド、鉛直平均の上端の取り方による数値依存性について調べた。また、この北緯 70° 面における 3 重平均した南北風は北緯 70° 以北の大気柱に流入、または流出する大気質量、つまり質量フラックスそのものを表している。よって、再解析データを用いる際、北緯 70° 以北の大気柱の質量の保存を再解析がどこまで再現できているかが問題となる。そこで北緯 70° 以北の平均地表面気圧の季節変動、トレンドについても調べた。

・データ

本研究では ECMWF Interim reanalysis (ERA-Interim) の 1979 年 1 月から 2010 年 12 月までの 32 年間の月平均データを用いた。水平解像度は $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 、鉛直層数は 1000hPa から 1hPa までの 37 層と月平均地表面気圧である。北緯 70° にはグリーンランド等の標高の高い地形が含まれるので、地形を考慮してマスクをかける必要がある。そこで、月平均地表面気圧より低い気圧の鉛直層に含まれるデータは排除した。また図 2 の右図では北緯 70° 以北の地表面気圧の領域平均を出す際にも地形の影響を出来るだけ排除する為に 975hPa 以下の気圧はマスクをかけてデータから排除した。

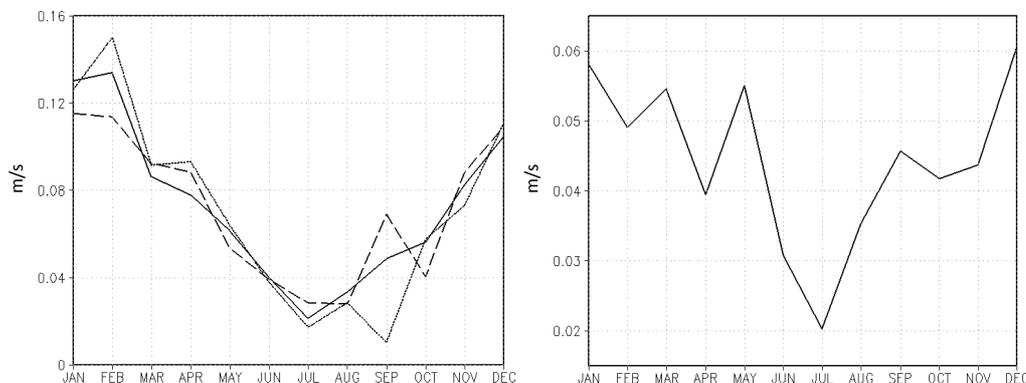


図 1 左: 北緯 70° 面、地上~1hPa までの 32 年間 (1979 年 1 月~2010 年 12 月) に関して 3 重平均した南北風の気候値 (実線)、1979~1988 年間の平均 (点線)、2000~2010 年間の平均 (破線)、それぞれの季節変動 右: 北緯 70° 面、地表~1hPa までの 32 年間における 3 重平均した南北風に関する月別の標準偏差

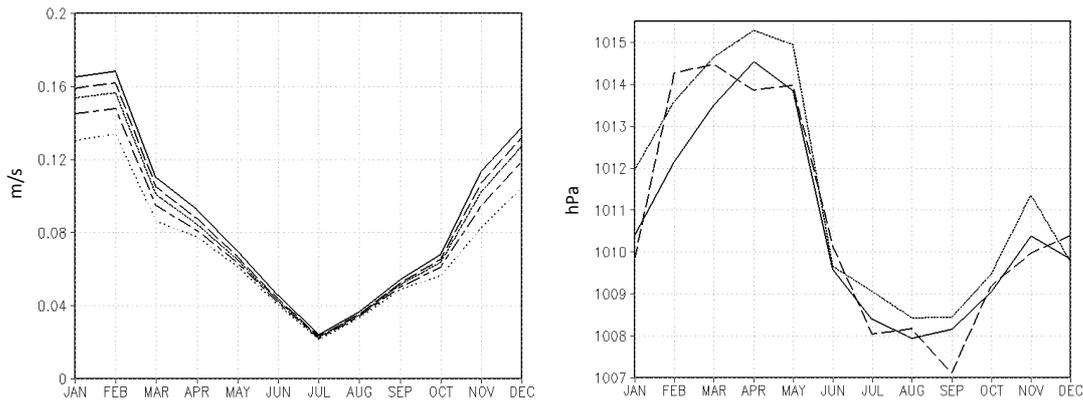


図2 左：北緯70°面、32年間に於いて鉛直重み付き平均の上端を変え、3重平均した南北風、上からそれぞれ地表～50hPa、地表～30hPa、地表～20hPa、地表～10hPa、地表～1hPaまで 右：北緯70°以北、32年間に於いて領域平均した地表面気圧の気候値（実線）、1979～1988年間の平均（点線）、2000～2010年間の平均（破線）、それぞれの季節変動（975hPa以下の地表面気圧はデータから排除）

・初期解析結果

計算結果としては、北緯70°面の3重平均した南北風は年間を通して北極向きを示し、32年間（1979年1月～2010年12月）の気候値は2月に極大値0.13m/s、7月に極小値0.02m/sを取り、年間平均は0.07m/sであった（図1左）。

3重平均した南北風について1979～1988年の期間と2001～2010年の期間を比較すると、2月に関しては0.11m/sから0.15m/sに減速し、また9月に関しては0.01m/sから0.07m/sに加速（図1左）、各月における32年間の標準偏差は12月に最大値0.06m/sを示し、7月には最小値0.02m/sを示した（図1右）。

また、鉛直重み付き平均の上端を変えて計算を行うと、1月では地上から50hPaまでで平均した場合は0.16m/s、一方1hPaまでで平均した場合は0.13m/sを示した（図2左）。これは同じ月の標準偏差（図1右）の半分程度であった。さらに、北緯70°以北の32年間（1979～2010年）、1979～1988年の10年間、2001～2010年の10年間に於ける地表面気圧の領域平均を示した。

・今後

他の再解析データ（JRA-55）を用いて鉛直重み付き平均の上端を変えて計算を行い、今回の結果との比較を行い、さらに北緯70°面における3重平均した南北風と北緯70°以北の平均地表面気圧との関係について調べる予定である。

References

Oort, A.H.(1971), The Observed Annual Cycle in the Meridional Transport of Atmospheric Energy, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 325-339.

Overland, J.E., Turet, P., Oort, A.H.(1996), Regional Variations of Moist Static Energy Flux into the Arctic, *J. Climate*, **9**, 54-65.

Serreze, M.C., A.P. Barrett, A.G. Slater, M. Steele, J. Zhang, and K.E. Trenberth(2007), The large-scale energy budget of the Arctic, *J. Geophys. Res.*, *112*, D11122, doi:10.1029/2006JD008230.

北極域海氷域変動の成層圏対流圏結合系への影響

星一平¹、浮田甚郎¹、本田明治¹、岩本勉之^{1,2,3}、中村哲^{2,4}、山崎孝治^{2,4}¹新潟大学²国立極地研究所³紋別市役所⁴北海道大学

1979年に衛星での定常観測が始まって以降、北極域では海氷域減少が顕著である。この結果、Arctic Oscillation (AO) と North Atlantic Oscillation (NAO) が負の傾向となり、北半球中緯度の低温化に寄与していることが知られている (Nakamura et al., 2015)。この形成要因の一つには、対流圏からの惑星波上方伝播の強化、成層圏での波砕 (収束) による極渦の弱化、そのシグナルの下方伝播という、成層圏を介した応答が挙げられる。さらに、特に Barents-Kara (BK) 海の水氷域減少がこのプロセスには重要であることも指摘されている (Kim et al., 2014)。しかし、この惑星波の上方伝播がどのような力学メカニズムで強化されたのかは明らかになっていない。そこで本研究では数値実験と再解析データから、惑星波の上方伝播強化における力学過程と、その時空間構造を調べた。

本研究に使用した数値実験結果は、GRENE 北極気候変動プロジェクトによって実施されたものである (実験設定の詳細は Nakamura et al., 2015)。大気大循環モデル AGCM for the Earth Simulator (AFES, Ohfuchi et al., 2004) を用い、成層圏全層を再現するためにモデル上端を約 60km としている。北半球海氷域の境界条件のみが一年を通して異なる 2 つのラン (CNTL : 1979-83 平均、NICE : 2005-09 平均) をスピナップの後に 60 年間走らせ、近年の水氷域変動に伴う大気循環場の応答に着目するために偏差をとって解析を行った (NICE-CNTL)。

冬季における応答の季節内進行として、1月の成層圏中・上層で現れた北極域の高気圧性偏差 (図 1a) が時間と共に下方伝播することで、2月対流圏の負 AO/NAO パターン形成に寄与していた (図は省略)。また 1月においては、BK 海上の高気圧性偏差からシベリア上の低気圧性偏差への定常ロスビー波の伝播が対流圏において見られ (図 1b)、さらに成層圏北極域の高気圧性偏差へ上向き・北東方向への伝播が見られた (図 1ac)。この特徴的な定常ロスビー波の伝播に伴い発生した成層圏上層での高気圧性偏差 (周辺の東風偏差と対応) について、その形成された要因を調べるために極向き擾乱熱輸送 V^*T^* (V : 南北風速、 T : 気温、 $*$: 各緯度での東西平均差) を 100hPa 面で見積もった。その 40°N 以北での領域平均値において、1月に顕著な正偏差が見られ、成層圏中・上層での東西一様な東風偏差の形成と力学的に整合的であった。また、その水平分布としては BK 海域と北太平洋域であり (図 2a)、気候平均場の強化と対応していた。

そこで、両領域での正偏差形成要因を明らかにするために、Nishii et al. (2009) による手法を用いて V^*T^* 偏差を以下のように線形的に分解した。

$$[V^*T^*]_{NICE-CNTL} = [V_a^*T_c^*] + [V_c^*T_a^*] + [V_a^*T_a^*]_a$$

ここで、c は基本場 (CNTL)、a は海氷域減少に伴う偏差 (NICE-CNTL)、 $[\]$ は 60 年平均とした。また、右辺第 3 項 (非線形項) は偏差場による熱輸送を、第 1、2 項 (線形項) は偏差場と気候平均場による熱輸送を意味する。正の V^*T^* 偏差が顕著である BK 海域を 50-90°E, 50-80°N、北太平洋域を 140°E-160°W, 50-80°N と定義し、

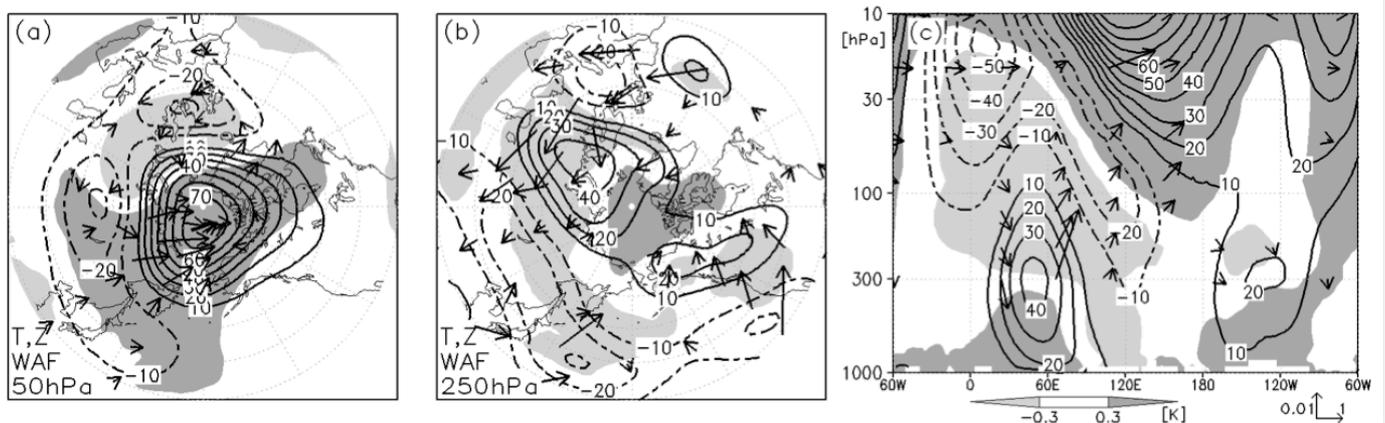


図 1 数値実験における 1 月の気温偏差 (色, K) とジオポテンシャル高度偏差 (線, m) の (a) 50hPa、(c) 250hPa の水平面図と、(c) 60°N における高度-経度断面図。矢印は Takaya and Nakamura (2001) による定常ロスビー波の活動度フラックス (矢, m^2s^{-2}) を示し、(a-b) においてはその水平成分を、(c) においては鉛直-東西成分を示す。

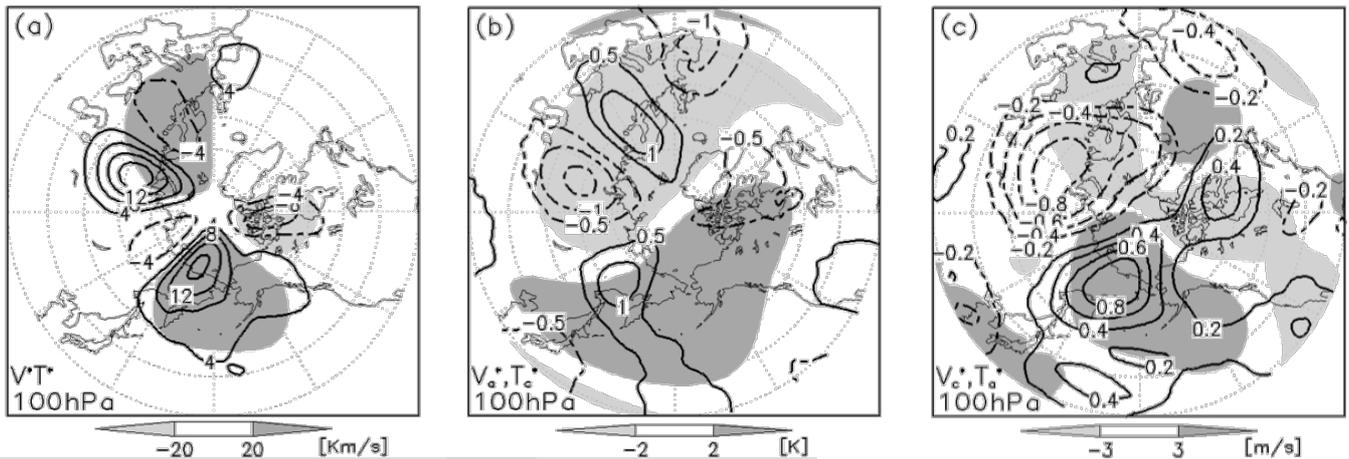


図2 数値実験における1月100hPa面での(a)極向き擾乱熱輸送 V^*T^* (Kms^{-1})の偏差(線)と気候値(色)、(b)南北風偏差 V_a^* (線、m/s)と気候平均場の気温 T_c^* (色、K)、(c)気温偏差 T_a^* (線)と気候平均場の南北風 V_c^* (色)。*は東西平均差を示す。

線形的に分解した各項の寄与率を見積もった。BK海域に置いては、右辺第一項、第二項、第三項の寄与がそれぞれ59、8、33%であり、北太平洋域ではそれぞれ23、58、19%であった。つまり、BK海域では $[V_a^*T_c^*]$ 項、北太平洋域では $[V_c^*T_a^*]$ 項が約6割を占め、非線形項である $[V_a^*T_a^*]$ 項の寄与は副次的であった。

V^*T^* 正偏差形成に強く寄与していたそれぞれ線形項について、次にその形成メカニズムを調べた。BK海域において $[V_a^*T_c^*]$ 項は、気候平均場の低温域に北風偏差が分布することで形成されていることがわかる(図2b)。風偏差は高度偏差に対応して形成されるが、この北風偏差とスカンジナビア半島上の南風偏差(図2b)はその間に分布する高気圧性循環、つまり、BK海での海氷域減少により形成される高気圧性偏差が成層圏中層まで卓越することに対応している(図1c)。対して北太平洋域の $[V_c^*T_a^*]$ 項形成については、気候平均場の南風領域に高温偏差が分布することで形成されていることがわかる(図2c)。この高温偏差は高気圧性偏差を伴って北太平洋域の成層圏全層で卓越しており(図1c)、BK海上の高気圧性偏差からシベリア上の低気圧性偏差を介して成層圏へ伝播する定常ロスビー波応答により形成・強化されていた。これは偏差場の傾圧的構造とも整合的である。つまり、この定常ロスビー波列の成層圏への伝播によって偏差場が形成され、その結果、BK海域・北太平洋域において偏差場と気候平均場の相互作用により V^*T^* が増加した事で極渦の弱化をもたらした事が分かった。

以上の結果について観測データとの比較も行った。大気へのインパクトの大きい初冬におけるBK海域の海氷域変動に着目し、11、12月平均したBK海($15\text{-}90^\circ\text{E}$, $70\text{-}85^\circ\text{N}$)で領域平均した海氷密接度の時系列に、続く冬の大気場を線形回帰した(両者のトレンド除去後)。解析期間は1979年から2015年とした。その結果、応答の一連の季節内進行だけでなく、 V^*T^* 偏差を線形的に分解した各項の分布と形成要因についても非常に整合的な結果を得た。よって本研究により、海氷域の減少に伴う惑星波上方伝播の強化プロセスが強く示唆された。

References

- Kim, B-M., S-W. Son, S-K. Min, J-H. Jeong, S-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and H-J. Yoon (2014), Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat Commun*, doi:10.1038/ncomms5646.
- Nishii, K., H. Nakamura, and T. Miyasaka (2009), Modulations in the planetary wave field induced by upward-propagating Rossby wave packets prior to stratospheric sudden warming events: A case study, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135, 39–52.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita (2015), A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn, *J. Geophys. Res.*, 120, 3209–3227.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, and K. Ninomiya (2004), 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator—Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator), *J. Earth Simulator*, 1, 8–34.

北半球冬期気候変動の要因分析のための Hindcast 実験の概要と初期解析結果

中村哲^{1,2}、山崎孝治^{1,2}、浮田甚郎³、岩本勉之^{1,3,4}、本田明治³、三好勉信⁵、小川泰信^{1,6}、富川喜弘^{1,6}¹ 国立極地研究所² 北海道大学³ 新潟大学⁴ オホーツク流水科学センター⁵ 九州大学⁶ 総合研究大学院大学

我々は Nakamura et al. (2015) において、過去と現在の海氷分布を大気大循環モデル (AFES version 4.1) の境界条件として与えた感度実験から、北極海の海氷減少が北極振動 (Arctic Oscillation: AO) をより負の位相にシフトさせることを示した。このとき海氷減少により励起されるプラネタリー波の増幅が成層圏の極渦を弱め、そのシグナルが対流圏へと下方伝搬するメカニズムが重要である事を示した (Nakamura et al., 2016)。一方で、秋のユーラシア大陸上の積雪偏差に伴うプラネタリー波の変調が成層圏を經由して冬期 AO の位相に影響する事が指摘される (Fletcher et al., 2007; Peings et al., 2012)、エルニーニョ南方振動 (El Niño-Southern Oscillation: ENSO) に代表される熱帯の海面水温 (Sea surface temperature: SST) 変動も成層圏極渦と続く対流圏へ影響を持つ事が示唆される (Scaife et al., 2005; Manzini et al., 2006)。また成層圏準二年振動 (Quasi Biennial Oscillation: QBO) のような成層圏に内在する力学的な変動や、成層圏オゾン濃度の長期変動によっても極渦の強さや崩壊頻度・時期は影響を受けると考えられる。成層圏を介した冬期 AO の変動についてはドライビングフォースとなり得る個々の要素について議論がされているものの、それぞれの要素同士が相互作用しているのか、独立であるのか、またその影響は単純に線形的な重ね合わせなのか、非線形的であるのか、統一的な理解は進んでいない。

本研究では、AO に代表される冬期北半球気候状態に関連するドライビングフォースそれぞれの影響評価、およびその相互作用を見積もるため、大気大循環モデル (AFES version 4.1) を用いたアンサンブルシミュレーションを行った。1979-2014 の期間で観測された SST と海氷データ (Hurrell et al., 2008)、オゾン濃度と QBO の位相 (ERA-interim)、全球平均温室効果ガス濃度 (WMO) を境界・外部条件として与えた 30 メンバーのシミュレーションを基準実験 (Control run) とし、海氷のみ 1980-1999 期間平均値を与えた 20 メンバーのシミュレーションを摂動実験 (Fixed-ICE run) とした。初期解析として海氷が大きく減少した 2000-2014 期間で二つの実験の差 (Control-minus-Fixed-ICE) を取る事で、海氷減少に対する大気応答を見積もった。結果、晩冬の成層圏の極渦が弱まり対流圏と結合する事で負の AO 的な偏差が見られ、これは過去の成果と整合的である。またユーラシアの積雪偏差、熱帯の SST 変動と大気の関係も、過去の報告や観測をよく再現している事がわかった。この実験結果を詳細に解析する事で、冬期北半球の気候変動とそれを左右する要因について統一的な理解が進む事が期待される。

本研究は GRENE 北極気候変動研究事業の成果を元に提案され、引き続き ArCS 北極域研究推進プロジェクトにおいて進展させるものである。

References

- Fletcher, C. G., P. J. Kushner, and J. Cohen, Stratospheric control of the extratropical circulation response to surface forcing, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L21802, 2007.
- Hurrell, J. W., J. J. Hack, D. Shea, J. M. Caron, and J. A. Rosinski, A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the Community Atmosphere Model, *J. Clim.*, 21, 5145–5153, 2008.
- Manzini, E., M. A. Giorgetta, M. Esch, L. Kornbluh, and E. Roeckner, The Influence of Sea Surface Temperatures on the Northern Winter Stratosphere: Ensemble Simulations with the MAECHAM5 Model, *J. Clim.*, 19, 3863–3881, 2006.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita, A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JD022848, 2015.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa, and J. Ukita, The stratospheric pathway for Arctic impacts on mid-latitude climate, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 2016.
- Peings, Y., D. Saint-Martin, and H. Douville, A Numerical Sensitivity Study of the Influence of Siberian Snow on the Northern Annular Mode, *J. Clim.*, 25, 592–607, 2012.
- Scaife, A. A., J. R. Knight, G. K. Vallis, and C. K. Folland, A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L18715, doi:10.1029/2005GL023226, 2005.

オホーツク海の海氷減少に対する大気応答

西井和晃¹、中村尚¹、中村哲^{2,3}¹ 東京大学先端科学技術研究センター² 国立極地研究所³ 北海道大学**Atmospheric response to anomalous sea ice in the Sea of Okhotsk**Kazuaki Nishii¹, Hisashi Nakamura¹ and Tetsu Nakamura^{2,3}¹*Research Center for Advanced Science and Technology*²*National Institute for Polar Research*³*Hokkaido University*

Atmospheric response to sea ice reduction in the Sea of Okhotsk is investigated by conducting two atmospheric general circulation model (AGCM) experiments, whose boundary conditions do not have interannual variability, and differ only in sea ice over the Sea of Okhotsk between the two experiments. In winter, enhanced surface sensible and latent heat fluxes due to the reduction of sea ice moistens and warms surface air just over the Sea of Okhotsk, which results in their suppression just downstream over the western North Pacific. The surface air warming over the Sea of Okhotsk makes sea level pressure lower there. Around late winter, when the prescribed sea ice reduction is the largest, an anticyclonic height response appears over the sea of Okhotsk in the middle and upper troposphere connecting to an anticyclonic anomaly over the Bering Sea in the lowermost atmosphere. A linear baroclinic model experiment reveals that those responses in the AGCM can be considered as linear response to diabatic heating anomaly due to the enhanced sea surface heat fluxes. The observed response is similar to the dominant interannual variability over the western North Pacific both in the AGCM and a reanalysis data set, which suggests that the sea ice reduction triggers atmospheric internal variability there.

北極海氷変動がもたらす大気への局所的な影響 ～3次元波活動フラックスと3次元残差循環を用いた解析～

富川喜弘^{1,2}、三好勉信³、中村哲^{1,4}、山崎孝治^{1,4}、浮田甚郎⁵

¹ 国立極地研究所

² 総合研究大学院大学

³ 九州大学

⁴ 北海道大学

⁵ 新潟大学

Nakamura et al. (2015) は、過去と現在の海氷分布を大気大循環モデル (AFES version 4.1) の境界条件としてそれぞれ 60 年分の数値積分を行い、北極海の海氷減少が北極振動 (Arctic Oscillation: AO) をより負の位相にシフトさせることを示した。これは、海氷が無くなって海面が現れた場所での乱流熱フラックスの増加が、定常ロスビー波の励起を促し、対流圏内の子午面循環が強化され、中緯度域を冷却、北極域を加熱することによる。しかし、よりスケールの小さい総観規模波動などの変化により、背景場の気温にどのような局所的な影響を及ぼすかは明らかではない。

これまで、循環の変化とそれに伴う気温への影響は、変形オイラー平均方程式 (TEM) 系における 2 次元の残差子午面循環を用いて議論されてきた。しかし、TEM 系では残差循環や気温変動の経度依存性を議論することができない。近年、3 次元の波活動フラックスとそれに対応する 3 次元残差循環が新たに定式化され (Kinoshita and Sato, 2013a, b)、擾乱の位相情報を除いた後の背景場の循環や気温の経度依存性や局所分布を議論することが可能となってきた。そこで本研究では、これらを用いて海氷変動に起因する 3 次元の波活動や循環の変化を調べ、その結果起こる局所的な気温変動を定量的に明らかにすることを試みる。この手法により、これまで必ずしも自明ではなかった 3 次元の波活動の変化と残差循環の変化、および局所的な気温変化の因果関係が明瞭になると期待される。

References

- Kinoshita, T., and K. Sato, A formulation of three-dimensional residual mean flow applicable both to inertia-gravity waves and to Rossby waves, *J. Atmos. Sci.*, 70, 1577-1602, doi:10.1175/JAS-D-12-0137.1, 2013a.
- Kinoshita, T., and K. Sato, A formulation of unified three-dimensional wave activity flux of inertia-gravity waves and Rossby waves, *J. Atmos. Sci.*, 70, 1603-1615, doi:10.1175/JAS-D-12-0138.1, 2013b.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita, A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JD022848, 2015.

グリーンランド氷床ダイナミクスと氷河地震活動

金尾政紀¹、坪井誠司²、姫野哲人³、豊国源知⁴、東野陽子²、Kent Anderson⁵

¹ 国立極地研究所

² 海洋研究開発機構

³ 滋賀大学

⁴ 東北大学

⁵ IRIS

Greenland Ice Sheet Dynamics and Glacial Earthquake Activities

Masaki Kanao¹, Seiji Tsuboi², Tetsuto Himeno³, Genchi Toyokuni⁴, Yoko. Tono² and Kent Anderson⁵

¹ *National Institute of Polar Research*

² *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

³ *Tohoku University*

⁴ *Shiga University*

⁵ *Incorporated Research Institutions for Seismology*

The Greenland ice sheet and its response to climate change have potentially a great impact upon mankind, both through sea-level rise and modulation of fresh water input to the oceans. Monitoring a dynamic response of the Greenland ice sheet to climate change is a fundamental component of long-term observations in global science. “Glacial earthquakes” have been observed along the edges of Greenland with strong seasonality and increasing frequency in this 21st century by the data from Global Seismographic Network (GSN). During the period of 1993-2006, more than 200 glacial earthquakes were detected, but more than 95% have occurred on Greenland, with the remaining events in Antarctica. Greenland glacial earthquakes are considered to be closely associated with major outlet glaciers at the margins of the continental ice sheet. Temporal patterns of these earthquakes indicate a clear seasonal change and a significant increase in frequency after 2002. These patterns are positively correlated with seasonal hydrologic variations, significantly increased flow speeds, calving-front retreat, and thinning at many outlet glaciers. These long-period surface waves generated by glacial earthquakes are incompatible with standard earthquake models for tectonic stress release, but the amplitude and phase of the radiated waves can be explained by a landslide source model. The seismicity around Greenland including tectonic/volcanic events was investigated by applying a statistical model to the globally accumulated data. Calculated b values, the Magnitude-frequency-dependence parameter, indicated a slight increase from 0.7 to 0.8 in 1968-2007, implying that the seismicity including glacial events around Greenland become slightly higher during the last four decades. The detection, enumeration, and characterization of smaller glacial earthquakes were limited by the propagation distance to globally distributed stations of the GSN. Glacial earthquakes have been observed at stations within Greenland, but the coverage has been very sparse. In order to define the fine structure and detailed mechanisms of glacial earthquakes, a broadband, real-time network needs to be established throughout the ice sheet and perimeter. The International Polar Year (IPY 2007-2008) was a good opportunity to initiate the program with international collaboration. Then, the “Greenland Ice Sheet Monitoring Network (GLISN)” was initiated for the purpose of identifying the dynamic response of the Greenland ice sheet to climate change. This presentation introduce the summarization of seismic investigation regarding statistic seismicity around Greenland, waveform propagation modelling in the ice sheet by using the GLISN retrieved data.

グリーンランド氷床における広帯域連続地震波形記録を用いた地震波干渉法解析

豊国 源知¹、竹中 博士²、金尾 政紀³、坪井 誠司⁴、東野 陽子⁵¹ 東北大学大学院 理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター² 岡山大学 大学院自然科学研究科³ 国立極地研究所⁴ 海洋研究開発機構⁵ 文部科学省**Ambient noise cross-correlation analysis using broadband continuous seismic waveform data from the Greenland ice sheet**Genti Toyokuni¹, Hiroshi Takenaka², Masaki Kanao³, Seiji Tsuboi⁴, and Yoko Tono⁵¹ RCPEVE, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan² Graduate School of Natural Science & Technology, Okayama University, Okayama, Japan³ NIPR, Tokyo, Japan⁴ JAMSTEC, Yokohama, Japan⁵ MEXT, Tokyo, Japan

The GLISN (GreenLand Ice Sheet monitoring Network) is an international project to seismologically monitor changes in the Greenland ice sheet, by deploying a large broadband seismograph network in and around Greenland. This project is currently managed through joint collaboration by 11 countries for operating 32 seismic stations, although only four of them are on the ice sheet. Japan is a partner country from when the project was launched, and has been sending a field team every year since 2011. A joint USA and Japanese GLISN team has ever serviced three stations on ice sheet (station code: ICESG, DY2G, and NEEM) and also three stations on bedrock at the coastal area (NUUK, SOEG, and DBG), which indicates a great effort of this team among the whole GLISN committee. Especially in 2015, the joint team succeeded in relocating a seismometer at ICESG station, by excavation from 5 m depth below the snow surface.

The GLISN broad-band seismic data (20 sps) is available in realtime via the Iridium satellite network. The data is also open to the public at the IRIS Data Management Center (<http://www.iris.edu/ds/nodes/dmc/>). In this work, we detected the Rayleigh wave by the ambient noise cross-correlation analysis of the GLISN data, to investigate shallow structure including both ice sheet and bedrock in Greenland.

We used the vertical-component records during Jan. 1, 2015 – Apr. 20, 2015 from four GLISN stations on ice sheet (ICESG, DY2G, NEEM, SUMG). Daily cross-correlation functions (CCFs) for all possible pairs of stations are computed by the following procedure. First, we divide the continuous records into 600-s-long segments with 450-s overlap. Second, we correct the instrument response, eliminate segments with event data or error values, and apply the whitening in frequency domain and banalization in time domain. After that we calculate the daily CCFs by stacking CCFs for each segment (e.g., Shapiro & Campillo, 2004; Takagi & Okada, 2012). The final CCFs can be obtained by stacking all daily CCFs for the whole analysis range.

We found, for example, nearly constant Rayleigh wave group velocity of 2.8 km/s, for the period range of 2-14 s, on the CCF of the NEEM-SUMG pair. We also found that the ambient-noise sources are well corresponded to a known source of microseisms located at the southern tip of Greenland.

References

Shapiro, N.M. and M. Campillo, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L07614, doi:10.1029/2004GL019491, 2004.

Takagi, R. and T. Okada, Temporal change in shear velocity and polarization anisotropy related to the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake using KiK-net vertical array data, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L09310, doi:10.1029/2012GL051342, 2012.

グリーンランド北西部における氷床から海洋への融解水流出

松野智^{1,2}、津滝俊^{2,3}、榊原大貴^{1,2}、杉山慎²

¹北海道大学大学院環境科学院

²北海道大学低温科学研究所

³国立極地研究所国際北極環境研究センター

Melt water runoff from ice sheet to ocean in northwestern Greenland

Satoshi Matsuno^{1,2}, Shun Tsutaki^{2,3}, Daiki Sakakibara^{1,2}, Shin Sugiyama²

¹Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

³Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research

近年グリーンランド氷床の質量が減少し、氷床から海洋への淡水流出が増加している。氷床の質量は、雪氷の表面融解と、カービング氷河末端における氷山分離と水中融解によって変動するが、特に近年の気温上昇による夏の表面融解量の増加が注目されている (Bamber and others, 2012)。氷床から海洋へ淡水が流出することによって海水準が上昇する他、グリーンランド沿岸の海洋生態系および海洋循環に影響を与えられていると考えられているが、淡水流出の時空間分布はよくわかっていない。そこで、本研究ではグリーンランド氷床北西部に位置する2つの流域に着目し、各流域から海洋への表面融解水の流出量を定量化することを目的とした。

解析には3つの手法を用いた。まず、人工衛星 (Landsat7、ALOS/PRISM、ASTER、SPOT-5) によって取得されたデータを地理情報システムソフトウェアによって解析し、2つの流域境界を決定した (流域 a、b)。各流域の面積と標高帯分布は ASTER と SPOT-5 (The Greenland Ice Mapping Project) に基づく標高データを用いて解析した。次に、2012年から2015年にかけてグリーンランド北西部に位置するカナック氷帽 (北緯 77°28'、西経 69°14') において、各標高 (243、427、584、739、839、968 m a.s.l.) における表面質量収支を測定した。このデータと、グリーンランド氷床上 (標高 1500 m a.s.l.) に設置された自動気象測器 (AWS) の気象データから、氷床上の各標高帯における表面質量収支を求めた。また、カナック氷帽上 (950 m a.s.l.) の AWS によって測定された積雪深データから、各標高帯の積雪量を求めた。最後に、以上の解析から得られたデータを使って、各流域の 0–1600 m a.s.l. において 2012–2015 年までの年間の表面融解水の年間流出量を導出した。

解析の結果、流域 a の面積は 1361 km²、流域 b の面積は 728 km² であり、それぞれ標高 1300–1400 m a.s.l. および標高 1000–1100 m a.s.l. に最大の面積を持つことがわかった。また、現地観測によって得られたカナック氷帽の年間表面質量収支は、2012–2015 年においてそれぞれ、-0.51、-0.75、-1.44 m w.e. a⁻¹ と算出された。また、氷床上標高 1500 m a.s.l. における質量収支は、2012–2015 年の期間でそれぞれ 0.38、0.27、0.14 m w.e. a⁻¹ であり、同じ地点で掘削された積雪コアの解析結果と近い値を示した。次に、年間積雪量は標高 950 m a.s.l. 地点において 2012 年から順に 0.482、0.365、0.295 m w.e. であった。同様に標高 1500 m a.s.l. では 2012 年から 0.396、0.324、0.260 m w.e. であり、両方の標高における年々変動は同じ傾向を示した。最後に、以上の結果を用いて算出した各標高帯での表面融解水量は、2012 年から順に、流域 a においては 0.685、0.793、1.248 km³ a⁻¹ であり、流域 b では 0.428、0.487、0.799 km³ a⁻¹ であった。

以上の解析から、2012–2015 年における、グリーンランド北西部に位置する2つの流域から流出する表面融解水量を定量化することに成功した。融解水量は顕著な年々変動を示しており、氷床からの淡水流出が海洋に与える影響が毎年大きく異なることを示唆している。またその変動は気温と密接に関係しているため、平均気温の上昇に起因する表面融解水量の経年変化を考察する上で重要な知見を与えるものである。

References

Bamber, J., M. van den Broeke, J. Ettema, and J. Lenaerts, Recent large increases in freshwater fluxes from Greenland into the North Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L19501, 2012.

グリーンランド北西部における溢流水河の末端位置と流動速度の季節変化

榎原大貴^{1,2}、杉山慎²¹ 北海道大学大学院環境科学院² 北海道大学低温科学研究所**Seasonal variations in frontal positions and flow speeds of marine terminating outlet glaciers in northwestern Greenland**Daiki Sakakibara^{1,2} and Shin Sugiyama²¹ *Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University*² *Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University*

Greenland ice sheet is losing mass as a result of increase in surface melting and ice discharge from marine terminating outlet glaciers (e.g. Enderlin et al., 2014). This mass loss from the Greenland ice sheet significantly contributes to the recent sea level rise. To accurately include the contribution of the marine terminating outlet glaciers to the future projection of the sea level rise, mechanisms controlling the glacier dynamics should be better understood. To this end, we analysed Landsat images to measure ice front positions and ice speeds of marine terminating outlet glaciers along the coast of the Prudhoe Land, northwestern Greenland between 1987 and 2015. The results were utilized to investigate relationships among frontal position, flow speed, and air temperature with special attention on seasonal variations.

All of studied glaciers retreated from the 1980s to 2014 by a distance between 5.34 and 0.23 km. Most of the glaciers began retreat around 2000, as demonstrated by the increase in the mean retreat rate from 5 m a⁻¹ in 1980s–1999 to 60 m a⁻¹ in 2000–2014. A possible driver of the more rapid retreat since 2000 is atmospheric warming because significant increase in the summer temperature was observed in the late 1990s. The studied glaciers flowed at a rate between 10 and 1800 m a⁻¹, and many of them accelerated in the early 2000s. The magnitude of the acceleration was correlated with the retreat rate as represented by rapid retreat and acceleration at Heilprin, Tracy, Farquhar, Bowdoin and Diebitsch Glaciers. Because the acceleration was greater near the front, the change in the flow regime enhanced stretching of ice along the glacier and induced dynamic thinning. These results suggest that thinning due to flow acceleration was the driver of the rapid retreat.

In general, studied glaciers advanced from spring to early summer, which was followed by retreat in late summer. Then, the front remained at the retreated positions throughout the following fall. Magnitude of seasonal front variations ranged in 50–400 m. The timing of the retreat agreed with the disappearance of sea ice / ice mélange in front of the terminus. Many of the studied glaciers accelerated from spring to mid-summer and then decelerated in late summer. Magnitude of the seasonal variations in ice speed was between 80 and 440 m a⁻¹. Because the speed variations were correlated with air temperature, the seasonal speedups were probably due to enhanced basal sliding driven by meltwater input to the bed.

References

Enderlin, E. M., I. M. Howat, S. Jeong, M. J. Noh, J. H. van Angelen, and M. R. van den Broeke, An improved mass budget for the Greenland ice sheet. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 866–872, 2014.

グリーンランド氷床北西部 Thule 地域沿岸における高濁度海水域の変動

大橋良彦^{1,2}、飯田高大³、杉山慎²、青木茂²

¹北海道大学大学院環境科学院

²北海道大学低温科学研究所

³北海道大学水産学部

Spatial and temporal variations in high turbidity surface water off the Thule region, northwestern Greenland

Yoshihiko Ohashi^{1,2}, Takahiro Iida³, Shin Sugiyama² and Shigeru Aoki²

¹Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

³Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University

Glacial meltwater discharge from the Greenland ice sheet and ice caps forms high turbidity water off the Greenland coast. Although the timing and magnitude of high turbidity water export affect the marine biological productivity (e.g. Arendt et al., 2011), little is known about the characteristics of high turbidity water. We therefore report on the spatial and temporal variations in high turbidity water off the Thule region in northwestern Greenland (76°–78°N, 65°–75°W; Fig. 1), based on remote sensing data analyses. We defined high turbidity area by high remote sensing reflectance at the wavelength of 555 nm ($R_{rs555} \geq 0.0070 \text{ sr}^{-1}$) (e.g. Caballero et al., 2014) and the extent of high turbidity area was determined from 2002 to 2014. The high turbidity area was generally distributed near the coast, where many outlet glaciers terminate in the ocean and on land. The extent of high turbidity area exhibited substantial seasonal and interannual variability, and temporal variations in high turbidity area was correlated with changes in air temperature at Thule Air Base ($R > 0.6, p < 0.05$). Assuming a linear relationship between the high turbidity area and summer temperature, annual maximum extent increases under the influence of increasing glacial meltwater discharge, as can be inferred from present and predicted future warming trends.

グリーンランド氷床や周縁氷帽の質量損失に伴う融解水の流入によって、氷床沿岸には高濁度海水域が形成される。このような高濁度水の形成は、海洋の生物生産等に強く影響を与える可能性が指摘されている(e.g. Arendt et al., 2011)。しかしながら、氷河融解の影響を反映した高濁度水の挙動に関する研究事例は少なく、その詳細は明らかでない。そこで本研究では、グリーンランド氷床北西部 Thule 地域沿岸(76°–78°N, 65°–75°W; Fig. 1)における高濁度海水域の面積変動を人工衛星データによって解析した。波長 555 nm のリモートセンシング反射率(R_{rs555})が 0.0070 sr^{-1} 以上の値を示す地域を高濁度海水域と定義し(e.g. Caballero et al., 2014)、2002–2014 年の過去 13 年間にわたってその面積を算出した。解析の結果、高濁度海水域は氷床や氷帽から溢流する氷河前縁部に形成されることが確認された。高濁度海水域の面積は顕著な季節変動および経年変動を示し、この時間変動は Thule 空軍基地における気温変化と有意な相関を示した($R > 0.6, p < 0.05$)。以上のことは、高濁度海水域面積が気温上昇による氷河融解水の流入によって変動することを示唆している。さらに、本研究で得られた夏期平均気温と高濁度海水域の最大面積の正の相関関係から、近年の気温上昇傾向に伴う融解水の流入増加によって、高濁度海水域の面積が増加しつつあることが予想された。

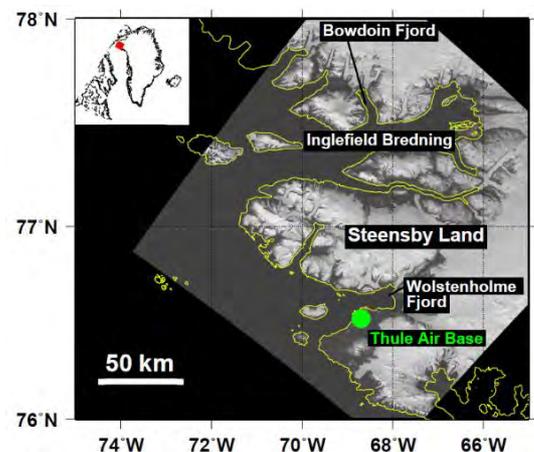


Figure 1. Landsat image taken on 6 September 2014, showing the study area. The coastline is indicated by yellow line. The inset shows the location of the study area in Greenland.

References

- Arendt et al., Effects of suspended sediments on copepods feeding in a glacial influenced sub-Arctic fjord, *Journal of Plankton Research*, 33, 1526–1537, 2011.
- Caballero et al., The influence of Guadalquivir River on the spatio-temporal variability of suspended solids and chlorophyll in the Eastern Gulf of Cadiz, *Mediterranean Marine Science*, 15(4), 721–738, 2014.

Water properties and circulation in front of tidewater glaciers in northwestern Greenland

Minowa Masahiro^{1,2}, Shin Sugiyama¹, Yoshihiko Ohashi^{1,2}, Takanobu Sawagaki³, Shun Tsutaki^{1,4}, Daiki Sakakibara^{1,2},
Shigeru Aoki¹, Podolskiy Evgeny⁵ and Yvo Weidmann⁶

¹*Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan*

²*Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan*

³*Faculty of Social Science, Hosei University, Tokyo, Japan*

⁴*Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan*

⁵*Arctic Research Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan*

⁶*The Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH, Zurich, Switzerland*

Tidewater glaciers in Greenland are rapidly retreating, and it contributed global sea-level rise during the twentieth century (e.g. Kjeldsen et al., 2015). Studies have been carried out to understand the mechanisms of the glacier retreat (e.g. Rignot et al., 2010). Previous studies suggested the importance of submarine melting, but physical processes relevant to submarine melting (e.g. heat source of the melting, water circulation and bathymetry) are not understood well. This is because in-situ observations are difficult in front of a glacier where icebergs usually cover the ocean. In addition to this, there is no hydrographical observation in front of tidewater glacier in northwestern Greenland. To better understand the ice-ocean interaction, we measured ocean temperature, salinity, turbidity, chlorophyll, dissolved oxygen, $\delta^{18}\text{O}$, d-excess and bathymetry in front of Bowdoin and Sun Glaciers, tidewater glaciers in northwestern Greenland, in 2014 and 2015 summer. We also performed high spatial (2560×1920 pixel) and temporal (10 s) time-lapse photography in front of Bowdoin Glacier in 2015 July.

Below the depths of 280 m (2014) and 250 m (2015) in the Bowdoin Fjord, we observed Atlantic Water (AW), which is believed as the heat source of submarine melting. The mean temperature and salinity within the layer of AW was 1.2°C and 34.4 g kg⁻¹ in 2014, and 1.1°C and 34.5 g kg⁻¹ in 2015. The results suggested that warm water flows into the Bowdoin Fjord from the open ocean. Contrasting to these observations at Bowdoin, AW was missing in front of Sun Glacier and relatively fresh and cold water mass was found. It was suggested that relatively shallow bathymetry (~100-m deep) and existence of sill (~10-m deep) inhibited entering warm water from the open ocean. Near the surface in the vicinity of plume of Sun Glacier (~200 m away from the front), water mass properties were completely different from those in the open ocean. Water was highly turbid, fresh and cold, suggesting subglacial discharge of meltwater as the origin of the water.

The time-lapse photographs revealed fjord circulation near the ice-ocean interface. It was clear that the circulation was driven by buoyant plume, which was generated subglacial discharge and/or submarine melt. In early July, waters emerged by buoyant plume was always visible along the surface approximately 5 km from the front, but it was only visible near the front in late July. The change from early July to late July may be explained by amount of subglacial discharge and the stability of stratification near the ocean surface as reported by recent modelling studies (e.g. Sciascia et al., 2013).

Our observations water mass structures and circulation in the fjord in front of the tidewater glaciers in northwestern Greenland, which are important properties to calculate submarine melting rate in two different types of tidewater glaciers.

References

- Kjeldsen et al., Spatial and temporal distribution of mass loss from the Greenland Ice Sheet science AD 1900, *Nature*, **528**, 394–400, 2015
- Rignot et al., Rapid submarine melting of the calving faces of West Greenland glaciers, *Nature Geoscience*, **3**(3), 187–191, 2010
- Sciascia et al., Seasonal variability of submarine melt rate and circulation in an East Greenland fjord, *Journal of Geophysical Research*, **118**, 1–15, 2013

Short-term variations in the dynamics of Bowdoin Glacier in northwestern Greenland

Masahiro Minowa^{1,2}, Shin Sugiyama¹, Takanobu Sawagaki³, Shun Tsutaki^{1,4} and Daiki Sakakibara^{1,2}

¹*Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan*

²*Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan*

³*Faculty of Social Science, Hosei University, Tokyo, Japan*

⁴*Arctic Environment Research Center, National Institute of polar Research, Tokyo, Japan*

Tidewater glaciers in Greenland ice sheet are rapidly retreating by under the influence of changes in ice dynamics (e.g. Nick et al., 2009). For example, Bowdoin Glacier began rapid retreat in 2008, which was accompanied by significant acceleration near the glacier front (Sugiyama et al., 2015). Submarine melting and ice-mélange weakening are suspected as triggering mechanisms of the rapid retreat of tidewater glaciers in the Greenland ice sheet (e.g. Straneo et al., 2013), but details of processes at the ice-ocean interface are poorly understood. To better understand these processes, we measured ice-front position of Bowdoin Glacier in northwestern Greenland and glacier/ice-mélange movement in front of the glacier. The glacier/ice-mélange measurement was performed by processing 3-hourly photographs taken by a time-lapse camera operated over two years since July 2013. We also operated a dual-frequency GPS at 3 km from the calving front to measure ice speed from May to July in 2014 and 2015.

The image analysis revealed clear seasonal variations in the ice-front position with an amplitude of ~200 m. Seasonal changes were also observed in ice speed along the center of the glacier (amplitude ~50%). During summer, the ice-front position was relatively stable, but retreated occasionally by large calving events. These events occurred near upwelling of subglacial discharge, where a large submarine melt rate is expected. The glacier began to advance in September approximately when daily mean air temperature dropped below 0°C. The glacier advanced the most in winter when the fjord was covered by ice-mélange. After winter, extended portion of the glacier rapidly disintegrated by a few calving events. Such event coincided with onset of ice-mélange movement in front of the glacier. This movement occurs when air temperature above 0°C and high wind speed were observed, suggesting the calving event was due to decrease in the mechanical support from the ice-mélange.

These results indicate both ice-mélange and submarine melting play roles in seasonal advance and retreat of Bowdoin Glacier. Moreover, the onset of glacier advance (retreat) coincided with the changes from positive to negative (negative to positive) temperatures, implying that air temperature is an indirect indicator of the ice-front position change.

References

- Nick et al., Large-scale changes in Greenland outlet glacier dynamics triggered at the terminus, *Nature Geoscience*, **2**(2), 110–114, 2009
- Straneo et al., Challenges to understanding the dynamic response of Greenland's marine terminating glaciers to oceanic and atmospheric forcing, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **94**(8), 1131–1144
- Sugiyama et al., Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland, *Journal of Glaciology*, **61**(226), 223–232, 2015

Seismic emissions from a tide-water calving glacier (Bowdoin Glacier, Greenland)

Evgeny A. Podolskiy¹, Shin Sugiyama¹, Martin Funk², Riccardo Genko³,
Masahiro Minowa¹, Fabian Walter², Shun Tsutaki^{4,1}, and Maurizio Ripepe³

¹*Arctic Research Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan*

²*Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH Zurich, Zurich, Switzerland*

³*Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Florence, Italy*

⁴*Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan*

For cryogenic microseismicity to be used as an indicator of dynamic changes, it must have a clear connection with glacier dynamics (including calving, basal sliding, strain, and melt). There is currently much speculation and disagreement about these connections, particularly, with respect to the relationship between tide-modulated seismicity and glacier dynamics. Here we analyze records from an on-ice seismometer placed 250 m from the calving front of Bowdoin Glacier, Greenland. We find that the overall microseismic activity of this glacier is at least an order of magnitude larger than previously reported (more than 100,000 events within 2 weeks and up to 600 events per hour) and that it is positively correlated with falling tide velocity. Using high-resolution surface displacement measurements, we show for the first time that the correlation is relayed through strain-rate variations. The strain-rate corresponds with longitudinal stretching of the glacial surface, in response to higher melt rates and falling tide, both of which accelerate glacier movement and enhance the stretching flow regime. Previous proposals to use icequakes as a proxy for grounding line migration need to be reconsidered because Bowdoin Glacier is grounded, with no tide-induced vertical bending of the near-floating tongue, and yet always exhibits microseismic activity due to continuous longitudinal stretching. Our results demonstrate a potential of microseismicity to be used for studying detailed response of calving glacier dynamics to small perturbations.

グリーンランド氷床北西部の積雪堆積環境の時空間変動

的場澄人¹、門田萌^{1,2}、對馬あかね³、箕輪昌紘^{1,2}、山口悟⁴、津滝俊^{1,3}、澤柿教伸⁵、青木輝夫⁶、杉山慎¹、
本山秀明³、榎本浩之³

¹北海道大学低温科学研究所、²北海道大学環境科学院、³国立極地研究所

⁴防災科学技術研究所雪氷防災研究センター、⁵法政大学、⁶気象研究所、⁷総合研究大学院大学

Spatiotemporal variations of snow accumulation condition in the northwestern Greenland Ice Sheet

Sumito Matoba¹, Moe Kadota^{1,2}, Akane Tsushima³, Masahiro Minowa^{1,2}, Satoru Yamaguchi⁴, Shun Tsutaki^{1,3},
Takanobu Sawagaki⁵, Teruo Aoki⁶, Shin Sugiyama¹, Hideaki Motoyama^{3,7}, and Hiroyuki Enomoto^{3,7}

¹Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,

²Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, ³National Institute of Polar Research

⁴Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ⁵Hosei University,

⁶Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, ⁷SOKENDAI (Graduate University for Advanced Studies)

We conducted glaciological observations in the northwestern Greenland Ice Sheet to elucidate spatiotemporal variations of snow accumulation conditions under the projects of GRENE-Arctic and SIGMA (snow impurity and glacial microbe effects on abrupt warming in the Arctic) since 2011. Annual mass balance at 1500 m of elevation site (SIGMA-A) decreased since 2000 suggesting the run off of melt water have occurred since 2000 below 1500 m elevation. Annual mass balance at upstream area of Heilprin glacier (SIGMA-D) has not varied since 1660s. We also measured flow velocity around SIGMA-D site and installed an automated weather station at the SIGMA-D site.

1. はじめに

近年、グリーンランド氷床の質量が減少し、その減少量が加速的に増加していることが報告されている。数値モデル研究や衛星観測研究は、現在の質量の減少は表面融解量の増加と氷山分離量の増加が主な原因だとしている。グリーンランド北西部は、グリーンランド中部および南部に比べて氷床の減少が著しくなく、今後、減少量が増加することが予想されるが、北西部は他の地域に比べて観測データが少ない。この地域の少々質量収支の現状を理解するために、日本が主導する二つの大型研究が行われた。GRENE 北極気候変動研究事業の基で実施されたグリーンランド観測はカービング氷河のダイナミクスと独立氷帽の質量収支の理解に、SIGMA (積雪汚染及び雪氷微生物が北極域の環境変動に及ぼす影響) プロジェクトは、積雪粒径の増大化と雪氷汚染による氷床表面アルベドの変化と氷床融解過程の理解に、それぞれ重点を置いた (Sugiyama et al., 2014, 2015; Aoki et al., 2014; Yamaguchi et al., 2014)。本研究の目的は、二つのプロジェクトの基でグリーンランド氷床北西部の涵養域において雪氷・気象観測を実施し、積雪環境の時空間変動を示すことである。

2. 研究対象地域と観測内容

図1に観測場所を示す。SIGMA-A (78.052°N, 67.628°W, h=1490m a.s.l.) では2012–14年に積雪の観測を行った。2012年に19mの雪氷コアを採取した。SIGMA-A2 (78.10°N, 64.08°W, h=1800m a.s.l.) では、2013年に観測を行い、6.5mの雪氷コアを採取した。これらの雪氷コアは現地为数センチメートル毎に切断して融解させ、日本に持ち帰って化学分析を行った。SIGMA-D (77.636°N, 59.120°W, h=2100m a.s.l.) では2014年に観測を行い、浅層メカニカルドリルで222.5mのアイスコアを採取した。アイスコアは現地の一部を数センチメートル毎に切断して融解させ、残りは冷凍で日本に持ち帰ってから処理を行い、化学分析を行った。SIGMA-A、SIGMA-A2は氷床の尾根上に位置し、SIGMA-Dはこの地域最大のカービング氷河の一つである Heilprin 氷河の上流部の谷に位置している。

3. 年間涵養量と融解量の空間分布

すべての雪氷コア中の水同位体比は明瞭な季節変動を示した。この季節変動から年層を同定し、冬に相当する負のピーク間の距離から年間の涵養量を求めた。また、SIGMA-D アイスコアは1963年のトリチウムピークを示準層として年層を確認した。図2に各サイトの雪氷コアから復元された年間質量収支の時間変化を示す。SIGMA-Aのみ2000年以降、年間質量収支が減少している傾向が示された。SIGMA-Aでは、20m雪温は-20度であり夏期の融解水が再凍結するためにも十分低い温度であるが、2011年、2012年の夏期にはその年の冬季に堆積した積雪の温度が0度まで上昇し、ザラメ雪化したことが観測された。つまり、2000年以降、標高が1500mより低い地点では、融解水の流出によって質量収支が減少した可能性が考えられる。

4. 年間質量収支の長期変動と現在の気象状況モニタリング

SIGMA-D 雪氷コア 222.5m 中、現時点で 112m まで解析が終了している。112m で 1660 年に相当した。1660 年から現在までの平均年間質量収支は $0.25\text{m w.eq. yr}^{-1}$ で、小氷期中期から現在にかけて大きな変動を示さなかった。つまり涵養域から Heilprin 氷河への氷体の供給量は小氷期から現在にかけて一定であるということが示された。

図 3 に、GPS で測定した SIGMA-D 掘削地点周辺の流動場を示す。掘削地点は下流に向かって、 2.43m yr^{-1} の速度で流動している。氷厚を一定と仮定し流動速度から推定した SIGMA-D アイスコアの深度と年代の関係は、アイスコアの水同位体比から同定した年代とほぼ一致したことから、掘削地点の流動場も小氷期から現在にかけて大きく変化していないことが予想される。

SIGMA-D 地点には、自動気象観測装置を設置し、気温、風向風速、湿度、放射収支、雪温、積雪深を測定している。測定データは、ADS (Arctic Data System) にて公開している。

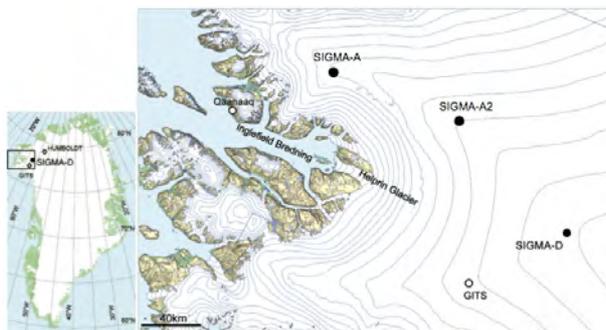


Figure 1. Location of observation sites

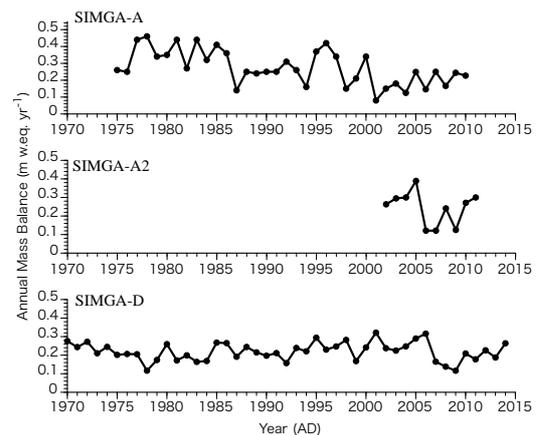


Figure 2. Variations of annual mass balance at SIGMA-A, SIGMA-A2 and SIGMA-D sites reconstructed with seasonal variations of water isotopes.

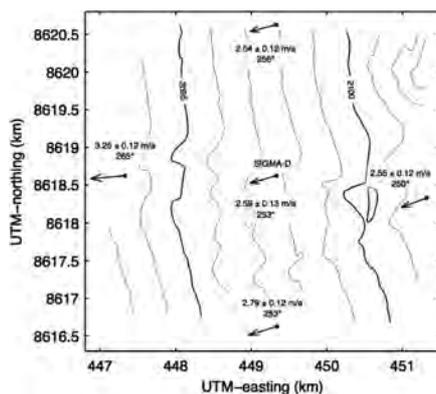


Figure 3. Surface elevation measured by this study at contour intervals of 1 m, and locations of the flow velocity measurements (solid circles) and horizontal velocity vectors (arrows). Coordinates are in UTM zone 20N (km).

謝辞

観測に協力いただいた GRENE 北極観測事業グリーンランドサブ課題および SIGMA プロジェクトの現地観測メンバーに感謝いたします。本研究は、GRENE 北極観測研究事業、JSPS 科研費基盤研究(S)23221004、基盤研究(C)26400460、北海道大学低温科学研究所共同研究の助成を受けて行われた。

References

- Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi and H. Motoyama, Field activities of the “Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic (SIGMA) Project in Greenland in 2011-2013. *Bullet. Glaciol. Res.*, 32, 3-20, doi: 10.5331/bgr.32.3, 2014.
- Matoba, S., H. Motoyama, K. Fujita, T. Yamasaki, M. Minowa, Y. Onuma, Y. Komuro, T. Aoki, S. Yamaguchi, S. Sugiyama and H. Enomoto, Glaciological and meteorological observations at the SIGMA-D site, northwestern Greenland Ice Sheet, *Bullet. Glaciol. Res.*, 33, 7-14, doi: 10.5331/bgr.33.7, 2015.
- Sugiyama, S., D. Sakakibara, D. Matsuno, S. Yamaguchi, S. Matoba and T. Aoki, Initial field observations on Qaanaaq Ice Cap in the northwestern Greenland, *Ann. Glaciol.*, 55, 25-33, doi: 10.3189/2014AoG66A102, 2014.
- Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Tsutaki, M. Maruyama and T. Sawagaki, Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland, *J. Glaciol.*, 61, 223-232, doi: 10.3189/2015JoG14J127, 2015.
- Yamaguchi, S., S. Matoba, T. Yamasaki, T. Tsushima, M. Niwano, T. Tanikawa and T. Aoki, Glaciological observations in 2012 and 2013 at SIGMA-A site, Northwest Greenland, *Bullet. Glaciol. Res.*, 32, 95-105, doi: 10.5331/bgr.32.95, 2014.

グリーンランド北西部における近年の氷質量損失
 – GRENE グリーンランドプロジェクトの成果と ArCS プロジェクトへの展望–

杉山慎¹、津滝俊^{1,2}、榊原大貴^{1,3}、斉藤潤^{1,3}、大橋良彦^{1,3}、丸山未妃呂^{1,3}、片山直紀^{1,3}
 エヴゲニ・ポドルスキ^{1,4}、箕輪昌紘^{1,3}、松野智^{1,3}、澤柿教伸⁵、的場澄人¹
 マーティン・フंक⁶、リカルド・ゲンコ⁷、榎本浩之²

¹ 北海道大学低温科学研究所、² 国立極地研究所国際北極環境研究センター、³ 北海道大学大学院環境科学院
⁴ 北海道大学北極域研究センター、⁵ 法政大学社会学部、⁶ スイス連邦工科大学、⁷ フィレンツェ大学

Recent ice mass loss in northwestern Greenland
 — Results of the GRENE Greenland project and overview of the ArCS —

Shin Sugiyama¹, Shun Tsutaki^{1,2}, Daiki Sakakibara^{1,3}, Jun Saito^{1,3}, Yoshihiko Ohashi^{1,3}, Mihiro Maruyama^{1,3},
 Naoki Katayama^{1,3}, Evgeny Podolskiy¹, Masahiro Minowa^{1,3}, Satoshi Matsuno^{1,3}, Takanobu Sawagaki⁴, Sumito Matoba⁴,
 Martin Funk⁵, Riccardo Genco⁶, Hiroyuki Enomoto²

¹*Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University*

²*Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research*

³*Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University*

⁴*Arctic Research Center, Hokkaido University, ⁵Faculty of Social Sciences, Hosei University*

⁶*Section of Glaciology, Laboratory for Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH-Zurich, Switzerland*

⁷*Department of Earth Science, University of Florence*

グリーンランド氷床およびその周縁に位置する氷河氷帽では、近年急速な氷損失が進んでいる (Khan et al., 2015)。その主要因は、気温上昇による融解増加とカービング氷河からの氷流出の加速と考えられている。人工衛星データによる解析でこれらの概要が明らかになっているが、氷損失の時間変動、空間分布、さらにそのメカニズムの詳細は未だ理解されていない。特に近年ではグリーンランド北西部で氷の減少速度が増加しているとの報告があるが (Enderlin et al., 2014)、アクセスの悪いグリーンランド北部は概して観測データが不足している。このような背景を受けて GRENE 雪氷課題では、グリーンランド北西部カナック周辺に焦点をあて (図 1)、氷床、氷帽、カービング氷河の質量変化の定量化を目的として、現地観測と人工衛星データ解析に取り組んだ。近年急速な後退と流動加速が起きたボードイン氷河では (図 2)、その急激な変動の原因を明らかにするために、氷河末端部とフィヨルドでの集中観測を実施した (Sugiyama et al., 2015)。また氷厚現象と氷の暗色化が進むカナック氷帽では、その質量収支と流動速度を継続的に測定した (Sugiyama et al., 2014)。本発表では、4年間の研究活動で明らかになったカービング氷河と氷帽の変動について報告するとともに、グリーンランド北西部で継続する ArCS プロジェクトへの展望を紹介する。

The Greenland ice sheet and peripheral ice caps are rapidly losing ice mass (e.g. Khan and others, 2015). The mass loss is driven by two key processes, melt increase due to warming climate and accelerated ice discharge from tidewater glaciers. Overview of the mass change is relatively well understood by satellite remote sensing, but more detailed investigations are necessary to understand spatial and temporal variations, and mechanism of the ice loss. Recently, mass loss is increasing particularly in northwestern Greenland (e.g. Enderlin and others, 2014). Despite its importance, in-situ data are sparse in the northern area of Greenland. To quantify current ice mass loss in northwestern Greenland and predict its future, we studied ice caps and calving glaciers in the Qaanaaq region (Figure 1), as a part of GRENE Arctic Climate Change Research Project. Field and satellite observations were performed to quantify the ice mass loss of the ice sheet, outlet glaciers and ice caps. We also studied detailed processes occurring near the front of outlet glaciers to better understand ice-ocean interaction. These studies include mass balance monitoring on Qaanaaq Ice Cap since 2012, integrated field observations near the front of Bowdoin Glacier since 2013 (Figure 2), and ocean measurements in fjord in the region. In this contribution, we present the results of the GRENE Greenland project, and introduce the overview of the next project planned under the framework of ArCS (Arctic Challenge for Sustainability Project).

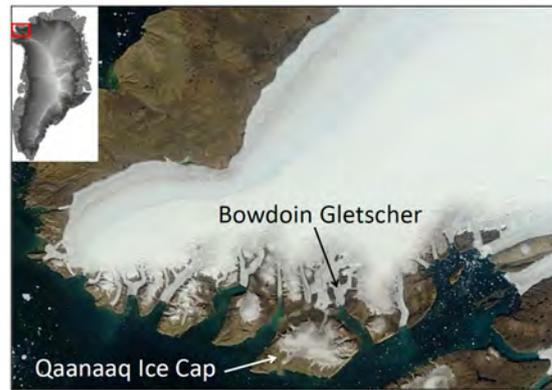


図1. 観測地カナック周辺の人工衛星写真。左上にグリーンランドにおける観測地の位置を示す。

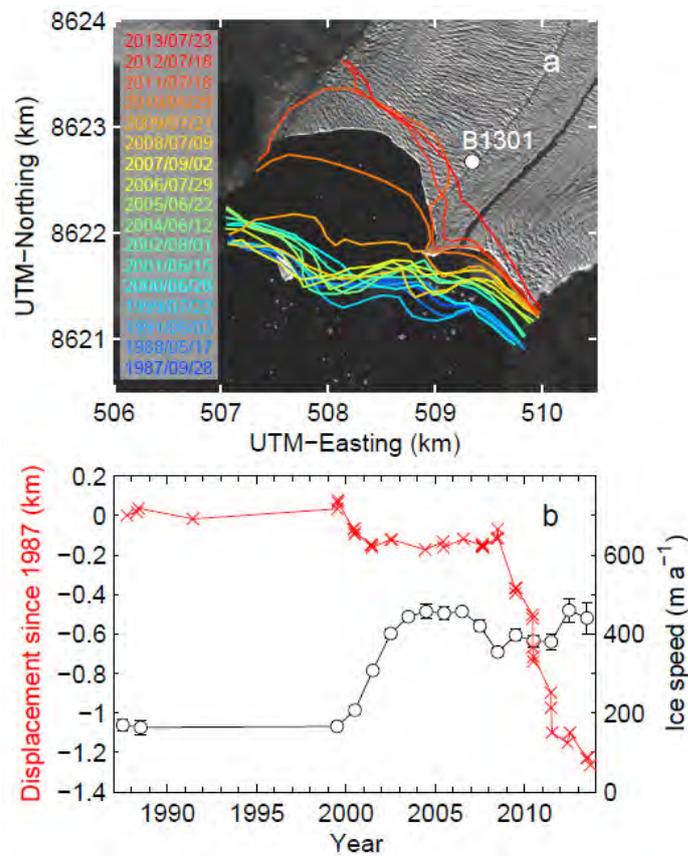


図2. (a)ボードイン氷河における近年の末端位置変化、および(b)氷河後退距離と流動速度変化との比較。

References

- Enderlin, E. M., I. M. Howat, S. Jeong, M. J. Noh, J. H. van Angelen, and M. R. van den Broeke, An improved mass budget for the Greenland ice sheet. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 866–872, 2014.
- Khan, S. A., A. Aschmann, A. A. Bjørk, J. Wahr, and K. H. Kjær, Greenland ice sheet mass balance: a review. *Rep. Prog. Phys.*, 78, 20145.
- Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Tsutaki, M. Maruyama and T. Sawagaki, Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland. *J. Glaciol.*, 61(226), 223–232, 2015.
- Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Matsuno, S. Yamaguchi, S. Matoba and T. Aoki, Initial field observations on Qaanaaq Ice Cap in northwestern Greenland. *Ann. Glaciol.*, 55(66), 25–33, 2014

北極圏の氷河・氷床の生物学的暗色化過程とその融解への効果

竹内望¹、藤沢雄太²、田中聡太²、大沼友貴彦²、島田利元²、永塚尚子²、植竹淳²

¹ 千葉大学大学院理学研究科

² 国立極地研究所

Biotic darkening processes and its impact on surface melting of the Arctic glaciers and ice sheet

Nozomu Takeuchi¹, Yuta Fujisawa¹, Sota Tanaka¹, Yukihiko Onuma¹, Rigen Shimada¹, Naoko Nagatsuka² and Jun Uetake²

¹Chiba University

²National Institutes of Polar Research

北極圏の氷河や氷床では近年表面のアルベドの低下、いわゆる暗色化が報告されている。表面の暗色化は、日射量の吸収を増やし、雪氷の融解を速める効果があるため、氷河融解の一因として温暖化による気温上昇とともに注目されている。氷河の裸氷域の暗色化の主な原因は、暗色の不純物の堆積によるもので、不純物には黒色炭素や鉱物ダストのほか、氷河上に生息する雪氷生物由来の有機物も含まれる。特に近年の環境変化による氷河表面の物理的、化学的条件の変化は、雪氷生物の繁殖に影響し暗色化を引き起こしている原因となっている可能性がある。GRENE プロジェクト (2011-2015) では、他の科研費プロジェクトとともに、北極圏の氷河氷床上の微生物活動の実態とその氷河暗色化および融解への影響を明らかにすることを目的に、グリーンランド北西部および南西部、東シベリア、スバルバル、アラスカ等の氷河で調査を行った。

調査を行った北極圏氷河の裸氷域表面には、1.0 - 150 g m⁻²の暗色の固形不純物が堆積していた (Takeuchi et al., 2014)。不純物の構成物は、重量比で 0.3 - 15%が有機物で、残りが鉱物粒子であった。氷河表面の不純物量は氷河の場所によって変動し、多くの氷河では末端付近よりも氷河中流部で比較的量が多くなる傾向があった。この不純物の空間分布は、不純物の主成分である鉱物粒子が、単に大気から氷河へ供給されたものではなく、氷体内に含まれていたものが表面に現れたものであることを示しており、表面の不純物量の一つの原因として、氷の中の鉱物粒子濃度が考えられる。不純物の顕微鏡観察の結果、どの氷河でも鉱物粒子、雪氷藻類細胞、および暗色の有機物の塊 (クリオコナイト粒) で構成されていることが明らかになった。この中で氷河表面のアルベド低下に影響する構成物は、東シベリアの氷河では、暗赤色の色素をもった雪氷藻類 *Ancylonema nordensholdii* であることが明らかになった (Takeuchi et al., 2015)。氷河表面の反射率は、不純物全重量とは相関がなかったのに対し、*Ancylonema nordensholdii* のバイオマスとは負の相関があった。一方、グリーンランドの氷河では、クリオコナイト粒が最も氷河の暗色化に影響している成分であった。クリオコナイト粒は、糸状のシアノバクテリアが鉱物粒子等を集めることによって形成されていたことから、氷河表面の暗色化には鉱物粒子の供給量とともにシアノバクテリアの繁殖が関わっていると考えられる。さらにクリオコナイト粒は、氷河表面にできた小さな穴 (クリオコナイトホール) に集積したり、穴の崩壊とともに氷河状に散らばったりすることがわかった。このことはクリオコナイトホールの形成や崩壊も、氷河の暗色化に関わっていることを示唆している。スバルバルの氷河では、氷河周辺に多様な鉱物種をもった地層が分布し、鉱物粒子の起源によって不純物の光学特性も異なることも明らかになった。

東シベリアの氷河で、氷河表面のアルベドおよび表面融解速度 (PDDF) を観測により求めたところ、アルベド融解速度には負の有意な相関があることが明らかになった。不純物のない氷河表面の PDDF は、3.00 mm w.e.⁻¹ day⁻¹ なのに対し、不純物を含む氷河表面では、最大 8.55 mm w.e.⁻¹ day⁻¹ となった。このことは、不純物によって融解速度は最大 2.6 倍 (平均 1.8 倍) に加速されていることを示している。

以上の結果から、温暖化に伴って増えた氷体内からの鉱物粒子およびそれに伴って繁殖した糸状のシアノバクテリア、さらに緑藻 *Ancylonema nordensholdii* の繁殖とクリオコナイトホールの崩壊などのプロセスによって、北極圏の氷河が暗色化していると考えられた。これらの要因は、今後の温暖化によってさらに広い範囲で氷河を暗色化する可能性があり、求めた融解速度や微生物繁殖モデル等を使って、今後の氷河氷床の具体的融解量の評価を行っていきたい。

References

- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Uetake, J., and Shimada, R. (2014) Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. *Bulletin of Glaciological Research*, 32(0), 85-94.
- Takeuchi, N. et al. (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.

グリーンランドの積雪における雪氷藻類の繁殖とそのアルベド効果のモデル化

大沼友貴彦¹、竹内望¹、田中聡太¹、永塚尚子²、庭野匡思³、青木輝夫³¹ 千葉大学大学院理学研究科² 国立極地研究所³ 気象研究所

Modeling of microbial growth and its albedo effect on snow surface in north-west Greenland

Yukihiko Onuma¹, Nozomu Takeuchi¹, Sota Tanaka¹, Naoko Nagatsuka², Masashi Niwano³ and Teruo Aoki³¹ Graduate School of Science, Chiba University² National Institute of Polar Research³ Meteorological Research Institute

雪氷藻類とは、積雪や氷河上に繁殖する寒冷環境に適応した光合成微生物である。雪氷藻類の繁殖は雪氷表面の色を変化させ、アルベド（反射率）を低下させる。雪氷表面のアルベドが低下すると太陽光の吸収量が増加し、雪氷の融解が促進される。そのため、雪氷藻類がどのような環境で繁殖するのかを明らかにすることは、北極域の融雪への影響を考える上で重要である。加えて、北極圏の融雪を正確に将来予測するためにはこのような雪氷藻類の繁殖を考慮したアルベドのモデル化が必要であると考えられる。しかしながら、雪氷藻類の繁殖を考慮したアルベド物理モデルはもちろん、積雪上の藻類の繁殖を再現する生物モデルも現時点では存在しない。さらに、雪氷藻類は積雪中では液相の水の中で繁殖することが知られているが、繁殖に最も影響を与える要因が何かはまだ明らかになっていない。そこで本研究は、北極圏グリーンランド北西部にあるカナック氷帽上の積雪において、現地の観測結果を基に雪氷藻類の繁殖を再現する生物モデルおよび、この生物モデルを加えたアルベド物理モデルを作成、検証することを目的とした。

本研究では、2014年の6月上旬から8月上旬にかけてグリーンランド北西部のカナック氷帽 (N 77°, E 69°) の積雪で観測を行った。対象サイトは積雪上に赤雪現象が確認された2地点 (Site-A 550m a.s.l, Site-B 950m a.s.l) とし、1週間間隔で積雪表面から深さ2 cm および2 - 10 cm の2層で、雪サンプルの採取を観測毎に2-6箇所で行った。採取した雪サンプルから、蛍光顕微鏡による細胞数のカウントを行い、雪氷藻類のバイオマスを評価した。また、同時に積雪中の鉍物量、黒色炭素 (BC)、電気伝導度、pH 分析用のサンプルも採取し分析を行った。雪氷藻類の発生と繁殖の主な要因を明らかにすることと、アルベド物理モデルを用いたアルベドの計算を行うために、気象および積雪物理観測を行った。気象観測では、Site-A, B と同地点にある自動気象測器を用いて1時間ごとに気温と日射を測定した。積雪物理観測では、サンプル採取時に Site-A, B で粒径、密度、含水率などを主に測定した。

顕微鏡観察の結果、直径の平均が $21.3 \pm 2.3 \mu\text{m}$ である球形の藻類が、Site-A, B ともに7月から8月に採取した全ての表面積雪サンプルで優占種として確認された。この藻類は、サイズと形状が似ていたことから *Chlamydomonas nivalis* と考えられた。この藻類は積雪断面観測の結果より、大気より飛来していると考えられた。この藻類の細胞濃度は時間と標高で変化した。両サイトでは、藻類細胞は6月下旬にはじめてみられ、その後観測終了まで指数関数的に増加し、その細胞濃度は6月下旬から8月にかけて1万倍以上の増加を示した。細胞濃度の最大値は、Site-A の8/2で $3.5 \times 10^7 \text{ cells m}^{-2}$ 、Site-B の8/3で $3.0 \times 10^6 \text{ cells m}^{-2}$ となり、標高の低いサイトで大きくなった。観測で求めた藻類の時間変化を、ロジスティック方程式 (e.g. Qiwu and Lawson, 1982) を用いてモデル化した。このモデルのパラメータである雪氷藻類の繁殖開始時の細胞濃度（初期細胞濃度）と増加率を、観測結果の線形回帰分析から求めた。Site-A と B の初期細胞濃度と増加率はそれぞれ、 695 cells m^{-2} と 0.42 day^{-1} 、 13 cells m^{-2} と 0.38 day^{-1} となった。初期細胞濃度がサイト間で異なったのは、繁殖前に大気から雪面に供給される藻類の孢子量の違いのためと考えられる。同じく大気から供給される積雪表面の鉍物粒子の重量にも、同様な有意な差があったことは、そのことを支持している。増加率もサイト間で違いがあったが、雪氷藻類が氷点以下では繁殖しないことを考慮して増加率を再計算したところ、 $0.42 - 0.45 \text{ day}^{-1}$ の範囲で互いに近い値となった。日射、融解水の温度、pH といった藻類の他の周辺環境は、増加率とは全く関係がみられなかったことから、これらの条件は増加率に影響しないと考えられる。モデル計算値と観測結果を比較したところ、決定係数 R は、Site-A, B でそれぞれ 0.64, 0.99 となった。以上の結果から、積雪上の藻類の繁殖は、ロジスティック方程式を用いて初期細胞濃度と細胞の増加率から再現することが可能であり、初期細胞濃度は飛来する鉍物量から決定し、*Chlamydomonas nivalis* の増加率は求めた値を用いることによって、観測値以外の周辺の積雪表面にも応用することができると考えられる。

当日の発表では、不純物濃度を考慮したアルベド物理モデル PBSAM (Aoki et al., 2011) と作成した生物モデルを組み合わせアルベドを計算し、その計算結果の報告と検証も行う予定である。

References

- Aoki, T., K. Kuchiki, M. Niwano, Y. Kodama, M. Hosaka, and T. Tanaka, Physically based snow albedo model for calculating broadband albedos and the solar heating profile in snowpack for general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 116, D11114, 2011.
- Qiwu Cui, G.J. Lawson, Study on models of single population: an expansion of the logistic and exponential equations, *T. Theor. Biol.* 98, 645-659, 1982.

北極圏氷河の雪氷藻類群集の経年変動とその要因

田中聡太¹、竹内望¹、宮入匡矢¹、藤澤雄太¹、門田勤²、白川龍生³、日下稜³、高橋修平³、榎本浩之⁴、大畑哲夫²、矢吹裕伯²、紺屋恵子²、Alexander Fedorov⁵、Pavel Konstantinov⁵

¹ 千葉大学

² JAMSTEC

³ 北見工業大学

⁴ 国立極地研究所

⁵ Melnikov Permafrost Institute

Inter-annual variability of snow and ice algal community on glaciers in Arctic

Sota Tanaka¹, Nozomu Takeuchi¹, Masaya Miyairi¹, Yuta Fujisawa¹, Tsutomu Kadota², Tatsuo Shirakawa³, Ryo Kusaka³, Shuhei Takahashi³, Hiroyuki Enomoto⁴, Tetsuo Ohata², Hironori Yabuki², Keiko Konya², Alexander Fedorov⁵,

Pavel Konstantinov⁵

¹ Chiba University

² Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

³ Kitami Institute of Technology

⁴ National Institute of Polar Research

⁵ Melnikov Permafrost Institute

雪氷藻類とは寒冷な環境に適応した光合成微生物である。雪氷藻類は氷河表面のアルベドを低下させて氷河の融解を促進するが、融解への寄与の度合いは藻類群集の構造やバイオマスによって異なる。雪氷藻類の繁殖には積雪頻度や融解水量といった環境条件が影響を与えると考えられており、近年の北極圏の気候変動が氷河上の藻類群集を変化させている可能性もある。本研究ではグリーンランドと東シベリアの氷河を 2012 年から 2014 年の 3 年間にわたって観測し、北極圏氷河の雪氷藻類群集の経年変動を明らかにした。

東シベリアのスタルハヤタの氷河の藻類バイオマスは、融解期の気温に対応して有意に経年変動することが明らかになった。調査年中で最も気温が高かった 2012 年の藻類バイオマス (1.91 ml m^{-2}) は、最も気温が低かった年の値 (0.17 ml m^{-2}) の約 10 倍であった。同様の結果はグリーンランド北西部のカナック氷河でも観察され、最も気温が高かった 2012 年のバイオマスが 0.35 ml m^{-2} であったのに対し、最も気温が低かった 2013 年のバイオマスは $0.40 \times 10^{-2} \text{ ml m}^{-2}$ 、2014 年のバイオマスはその中間値となる 0.02 ml m^{-2} であった。以上のことから、北極圏氷河の藻類群集バイオマスは、各年の融解期の気温に対応して大きく経年変動するという特徴があることが示唆された。このような経年変動の原因は、両氷河に共通する優占種である *Ancylonema nordenskioldii* の生態にあると考えられた。2012 年スタルハヤタ地域での観測結果から、この種の緑藻は年毎の環境条件の影響下で繁殖を繰り返していると考えられる。どちらの地域でも 2012 年は夏季の平均気温が 0°C を上回る日数が他の年よりも多く、これは藻類の繁殖期間が長くなることを意味する。また、先行研究によって、気温が高い年の北極圏氷河では、クリオコナイトホール崩壊頻度が増加して氷河表面に雪氷藻類が拡散する機会が多くなる (McIntyre, 1984) ことや、氷の融解によって供給される栄養塩量が増加する (Hawkings et. al., 2015) ことが明らかになっている。これらのことから、気温の高かった 2012 年に藻類バイオマスは大きな値を示したのだと考えた。*A. nordenskioldii* が優占し、また氷河上にクリオコナイトホールが存在するというのは、他の北極圏氷河でも一般的に観察される特徴である。今後も北極圏の気温の増加傾向が持続すれば、藻類群集が北極圏氷河の融解に与える影響も強くなっていくかもしれない。

References

- Hawkings, J. R., Wadham, J. L., Tranter, M., Lawson, E., Sole, A., Cowton, T., Tedstone, A. J., Bartholomew, I., Nienow, P., Chandler, D., Telling, J., The effect of warming climate on nutrient and solute export from the Greenland Ice Sheet, *Geochemical Perspectives Letters*, 1, 94-104, 2015.
- McIntyre, N. F., Cryoconite hole thermodynamics, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21, 152-156, 1984.

東シベリア・スントアルハヤタ山塊のNo. 31 氷河の長期変動に関する考察

大畑哲夫¹、門田勤²、白川龍生³、張 勇¹、アレキサンダーフェドロフ⁴、榎本浩之¹

1 : 国立極地研究所

2 : 元海洋研究開発機構

3 : 北見工業大学

4 : ロシア科学アカデミー・永久凍土研究所

Consideration on Characteristics of Glacier Variation of No. 31 Glacier in the Suntar-Khayata Mountain Range, Eastern Siberia

Tetsuo Ohata¹, Tsutomu Kadota², Tatsuo Shirakawa³, Yong Zhang¹, Alexander Fedorov⁴
and Hiroyuki Enomoto¹

1 : National Institute of Polar Research

2 : Former affiliation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

3 : Kitami Institute of Technology

4: Melnikov Institute of Permafrost, Russian Academy of Sciences

This paper will present the consideration on the long-term glacier variation of No. 31 Glacier in the Suntar-Khayata Mountain Range in East Siberia, based on new data from the GRENE Project (2011-15). By referring to the several past studies in this region, the glacier variation will be up-dated and also their cause will be discussed. The difference of glacier variation with other Arctic Region will also be shown.

GRENE計画(2011～2015年)で東シベリア東北部のスントアルハヤタ山塊の氷河調査および解析研究を行ってきた。この地域の氷河量は他の北極地域に比べて多いわけではないが、北極地域全体の氷河変動や質量収支の全体的様相を知る上では欠かせない、空白地域と言われている地域である。またその情報は、当該地域の気候変動特性に関する情報となる。4年間にわたり夏期の現地調査(2011～2014)を通じた氷河の現状測定、およびモレーンなどの同定解析を行い、それから過去に比べ相当縮小していることが分かってきた。そして、新たに氷河変動シミュレーションを実施し、過去からの変化をもたらす質量収支変化を調べてきた。

本発表では、過去の情報量の最も多いスントアルハヤタの代表的氷河であるNo. 31 氷河に関して、GRENEで取得した氷河の最新の情報を用いて、過去に行われた幾つかの研究を引用しながら、20世紀中盤(IGY期)からの氷河変動に関し次の事項について発表する。

- (1) 氷河の末端、規模、流動、厚さなどの縮退傾向の特徴。
- (2) この地域の氷河変動と他地域の氷河変動の比較と差異。
- (3) 変動をもたらす気候因子との比較。

東シベリア・スントルハヤタ氷河における気象観測 (2012-2014)

白川龍生¹、大畑哲夫²、Alexander Fedorov³

¹ 北見工業大学

² 国立極地研究所

³ Melnikov Permafrost Institute, Russia

1. はじめに

東シベリア・スントルハヤタ氷河では、1957/58のIGY期に旧ソ連による越冬観測が行われ、氷河観測が集中的に実施された(Koreisha, 1963)。その時期から半世紀を経た2012/13/14の3か年にわたり、GRENE北極気候変動研究事業の研究課題「地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割」の一環として、日本とロシア共同の観測を実施した。本報告では、このうち気象観測で得られた主な成果について報告する。

2. 調査概要

本研究の主な目的は以下の3点である。

- ・ 北極圏シベリア地域氷河の現在の消長傾向を求め、小氷期までの氷河規模変化を見積もり、温暖化に伴う将来を見積もる。
- ・ 現在の氷河変化傾向を見積もるために、気象観測、氷河表面質量収支、流動速度、末端位置の把握、雪氷生物調査等を行う。
- ・ 氷河将来予測に必要な、より精度の高い氷河モデルのパラメータとして、氷河地図作成、氷厚測定を行う。

この目的を達成するため、2011年の予察後、2012年～2014年の3か年にわたって現地にて滞在観測を実施した。IGY当時と同様、主な観測対象はNo.31氷河(末端: 62°36'19.5"N, 140°51'16.4"E、図1)とした。

3. 主な成果

ここでは気温および積雪深の推移について記す。当日は他の観測結果についても報告する。気象特性把握のため、氷河上にAWS(自動気象測器)、温度計およびインターバルカメラを設置し、連続観測を行った。氷河上流域のNo.31-2ステーク(2446m a.s.l.)付近に設置したAWS観測結果を図2に示す。

(1) 気温

2012/13シーズンの平均気温は、2446m a.s.l.地点で-13.6°C、同最低気温は-46.0°Cを記録した。近郊のOymyakonで観測されたデータと比べると、10月～5月の気温は10°C程度高いことがわかった。

(2) 積雪深の推移

氷河上に設置した2台のインターバルカメラに記録された2012/13シーズンの画像から積雪深の推移を算出した。積雪は冬の初めと終わりの時期に集中し、最大積雪深はいずれも2013年5月に記録され、2446m a.s.l.地点では158cmを記録した。冬期間の積雪深が一定である理由は、冬の安定した高気圧が水蒸気の移入を妨げていると考えられる。今回の観測結果は、過去に実施された観測結果と同様の傾向であった。近郊のOymyakonで観測されたデータと比較すると、氷河上の積雪期間は約3ヶ月長いことがわかった。

References

Koreisha, M.M. (1963): Modern glaciation of the Suntar-Khayata Ridge (in English), English translation by S.A. Tchoumithev, English version prepared by T. Kameda, T. Shiraiwa, T. Yamada, S. Takahashi. In Report for the JSPS Grant (B) by S. Takahashi (16403006), 91-183, 2008.

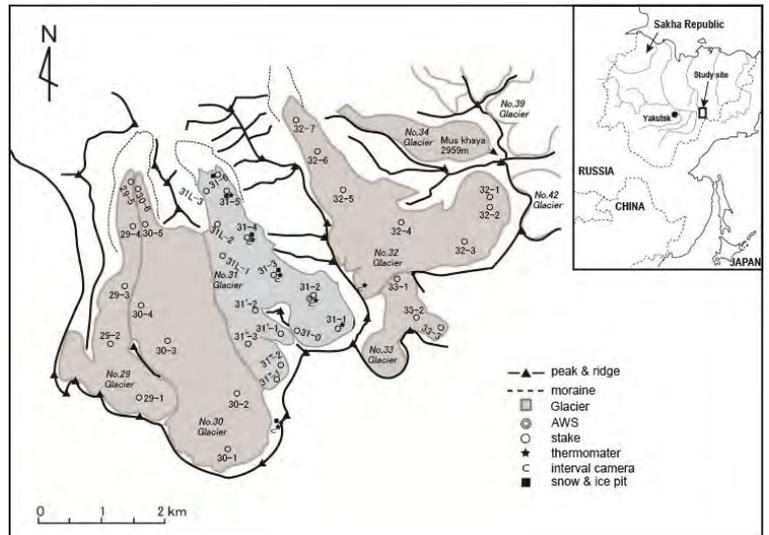


図1 調査エリア (東シベリア・スントルハヤタ氷河)

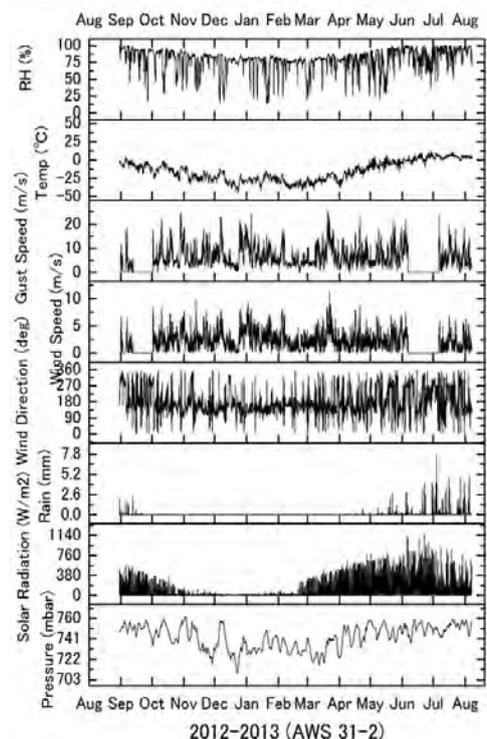


図2 AWS観測結果 (2012/13, 2446m a.s.l.)

東シベリア・ヤクーツクとアラスカ・PFRRにおける降雪観測

平沢尚彦¹、杉浦幸之助²、保坂征宏³、Trofim Maximov⁴

¹ 国立極地研究所

² 富山大学・JAMSTEC、³ 気象研究所、⁴ 寒冷圏生物学研究所 (SB RAS)

Snowfall observations at Yakutsk in East Siberia and at Poker Flat Research Range in Alaska

Naohiko Hirasawa¹, Konosuke Sugiura², Masahiro Hosaka³ and Trofim Maximov⁴

¹National Institute of Polar Research

²Toyama University/JAMSTEC, ³Meteorological Research Institute,

and ⁴Institute for Biological problems of Cryolithozone (SB RAS)

In association with global warming, the moisture circulation in cryosphere will change. In particular, the change in snow cover extent and snow cover period will drive so-called the ice-albedo feedback process. When we intend to understand the feedback process and the evolution of climatic system in the real cryosphere and to study the trajectory of the polar climate system toward the future, precipitation is one of the key valuables to be measured. However, in spite of the development in accurate measurement for air temperature, pressure, wind speed and direction, the accuracy of precipitation measurement, especially that of snowfall, is not sufficiently high. The measurement by gauge, currently generally deployed at observatories of the world, frequently captures only a portion less than 50% of the true amount of snowfall. The loss in measurement will be amplified in the polar region because of the lower-temperature condition. Consequently, we have to apply some corrections for current snowfall data set, and, nevertheless, it is not necessarily sufficient to use for detecting precipitation events, validation of numerical model, etc. The purpose of this activity is to measure snowfall amount in the Arctic region more accurately to study precipitation mechanism and climatic change, and to validate numerical models. During the GRENE project, we have started with the field measurements by disdrometer (LPM manufactured by Thies) at Yakutsk in East Siberia and at Poker Flat Research Range in Alaska. This presentation will show the time series of the snowfall amount and intensity, and the characteristics of the snowfall at both the sites.

地球温暖化に関連して全球の水循環も変動する。雪氷圏の積雪域や積雪期間の変化はアイス-アルベド-フィードバックを駆動するとされる。このようなフィードバックの状況を含めて極域の気候的な変化について、観測データに基づいて理解しようとするとき、降水は重要な観測データの一つである。しかし、これまで、気温、気圧、風などの観測精度が進歩してきたことに比べて、降水、特に降雪の観測精度は著しく低い。ゲージによる降雪量観測では、真値に比べて 50%以下の量しか計測されないことが少なくない。計測の過小評価の程度は、より寒冷的な気候下にある極域では増幅されているだろう。結果として、我々は降雪量データに何等かの補正を施す必要があり、これまでに補正方法の提案がされてきている。それでもなお、降雪イベントの検出や数値モデルの検証データなどには十分でないことがある。この研究の目的は、北極域で、これまでより高い精度で降水量の観測データを取得し、降水機構や気候変化の研究、及び数値モデル検証を行うことである。GRENE プロジェクトの間に、東シベリアのヤクーツクとアラスカの PFRR においてディストロメータ (LPM、Thies 社製) を用いた降雪観測を開始した。この発表では両地点における降雪量や降雪強度の時系列、降雪の特徴を示す。

定点観測による北方林の着雪氷が大気に及ぼす影響

杉浦幸之助^{1,2}、永井信²、鈴木力英²、Hajo Eicken³、Trofim Maximov⁴

¹ 富山大学

² 海洋研究開発機構

³ アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター

⁴ ロシア科学アカデミー北方圏生物問題研究所

一般に積雪は、裸地や森林というように地表の被覆状態に違いがあっても、地表を覆うように降り積もり形成される。時として、強風とともに積雪の削剥や堆積が生じ、あるいは植生への着氷雪の成長や剥離が生じて、地表面のアルベドが変化し、大気に影響を与えることになる。一方、各国の気候モデルによる地表面アルベドの季節変化を比べると、特に積雪森林域でモデル間に大きな相違が見られている。また地球観測衛星による積雪検知の精度は、植生密度が高くなる森林域では低いことが知られている。

そこで本研究では、積雪森林域のアラスカ（JICS 観測サイトの Poker Flat Research Range）およびシベリア（IBPC 観測サイトの SpasskayaPad）の観測サイトにおいてインターバルカメラを用いた森林への着雪氷の実態を調べた。続いて得られたデータをもとに、北方林への着雪氷の有無による大気への影響評価を試みたので報告する。

インターバルカメラの解析から、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かった。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1冬期の結果であるが、着雪氷の期間が5カ月程度とアラスカに比べて長期にわたっていた。

続いて、大気多重散乱を考慮するエネルギーフローに関する1次元の数値モデルを用いて、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として、北方林が着雪氷で覆われなくなった場合の地表面の平均温度を求めたところ、約0.5[K]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昇温するポテンシャルが高いことが示唆される。

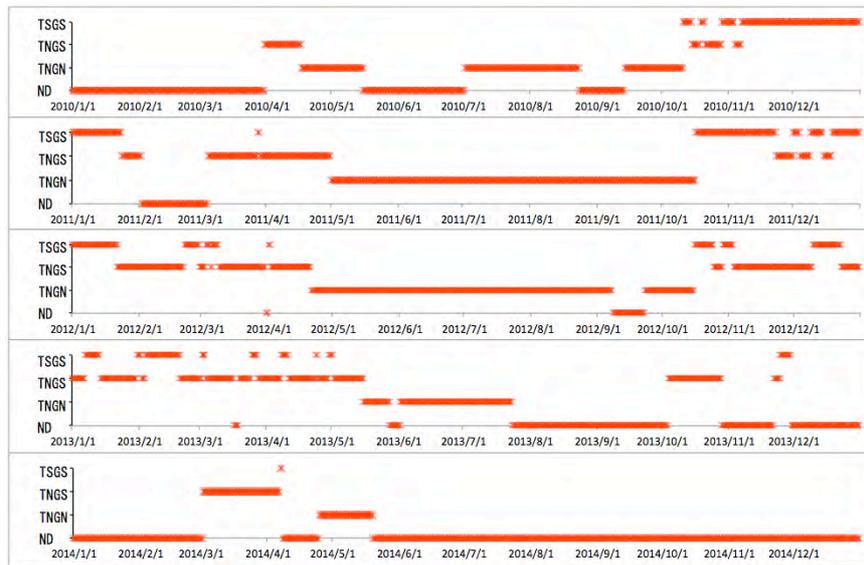


図1 アラスカ・Poker Flat Research Range（JICS 観測サイト）における森林への着氷着雪の頻度。TSGS：森林着雪氷あり積雪あり、TNGS：森林着雪氷なし積雪あり、TNGN：森林着雪氷なし積雪なし、ND：観測データなし。

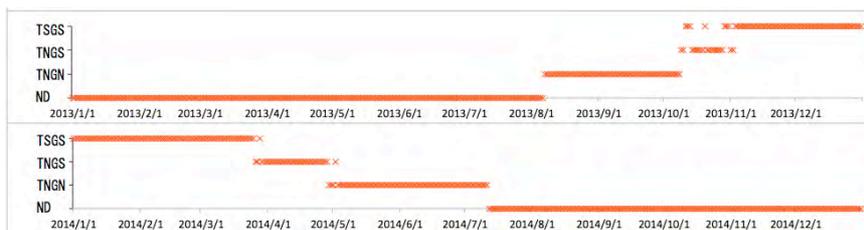


図2 シベリア・SpasskayaPad（IBPC 観測サイト）における森林への着氷着雪の頻度。TSGS：森林着雪氷あり積雪あり、TNGS：森林着雪氷なし積雪あり、TNGN：森林着雪氷なし積雪なし、ND：観測データなし。

航空機搭載マイクロ波放射計を用いたアラスカ積雪域観測

ヌアスムグリ アリマス^{1,2}、榎本浩之^{1,3}、亀田貴雄²

¹ 国立極地研究所

² 北見工業大学

³ 総合研究大学院大学

Airborne passive microwave observation of snow covered area in Alaska

Nuerasimuguli Alimasi^{1,2}, Hiroyuki Enomoto^{1,3} and Takao Kameda²

^{1,2} National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan

² Kitami Institute of Technology, Hokkaido, Japan

³ The Graduate University for Advanced Studies

This study reports the air-borne microwave observation over Alaska and ground measurement at Fairbanks and Poker Flat research range, and satellite observations. Ice-Albedo feedback system is the main mechanism of Arctic rapid warming. Spring is the timing of activating this system as snow and sun shine both exist in the Arctic. Climate model has uncertainty in the snow melting season. For the terrestrial ecosystem studies, end of snow cover and melt water supply are important conditions. Therefore, snow melting is important information on climate studies. There are many research works of snow survey; however the observation coverage is not enough in the Arctic to describe spatial patterns and temporal changes. Satellite remote sensing is available for obtaining snow cover information at the continental scale. At the end before the snow disappears. Diurnal amplitude variations (DAV) were used to analyse the melting starts. The data was compared with other satellite observations.

北極域では、融雪期の雪氷状態はアイスアルベドフィードバックによる気候影響を起こすため注目されている。また、融雪は水文学過程において重要である。この時期の雪氷変化は速く広域に及ぶためその観測には衛星リモートセンシングが有効である。高緯度域の雪氷圏の観測では、日射を必要とせず天候の影響を受けないマイクロ波放射計による観測が行われてきた。衛星の観測ピクセルの中には多様な地表面状態が入るが、高緯度地域の積雪観測では雪質、森林や湖や凍土などの影響を考慮する必要がある。より正確な雪氷情報の取得には積雪内部や積雪下の地表面の影響や森林からの影響を考慮する必要がある。

この研究では地上での観測や移動観測が行える可搬型マイクロ波放射計による春のアラスカの森林や湖の航空機観測を行なった。Fig. 1 は観測地域の地図と飛行ルートを示す。凍土域では湿地や湖の分布も多い。凍結している湖では、積雪に覆われていても 6.9GHz の輝度温度は著しく低下することが確認された。また、森林が密集した場所では輝度温度は増加した。春の融雪時には、森林域全域の輝度増加がみられた。これらの観測結果から低周波のマイクロ波観測がもたらす高緯度の積雪域観測可能性を検討する。

References

Chang, A. T. C., P. Gloersen, T. Schmugge, T. T. Wilheit, and H. J. Zwally, Microwave emission from snow and glacier ice, *Journal of Glaciol*, 16, 23-39, 1976.

Derksen, C., A. Walker, and B. Goodison, Evaluation of passive microwave snow water equivalent retrievals across the boreal forest/tundra transition of western Canada, *Remote Sens. Environ.*, vol. 96, No. 3/4, 315-327, 2005.

Derksen, C., A. Walker, B. Goodison, Evaluation of passive microwave snow

water equivalent retrievals across the boreal forest/tundra transition of western Canada, *Remote Sensing of Environment*, 96, 315- 327, 2005.

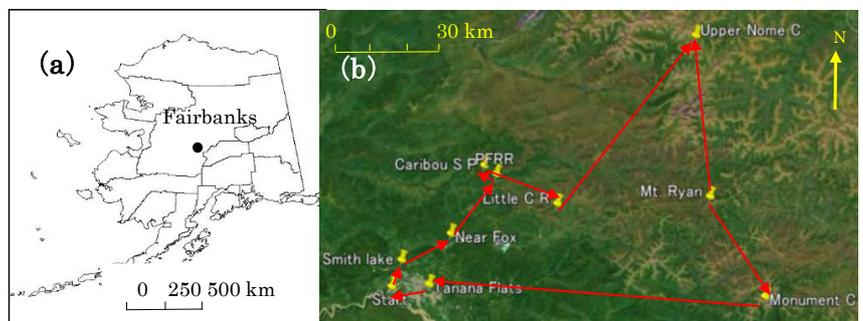


Figure 1. 観測地域と観測ルート

Sr-Nd 同位体比を用いた北極域の積雪中ダストの供給源推定

永塚尚子¹, 塚川佳美¹, 東久美子¹, 杉浦幸之助², 榎本浩之¹, 中野孝教³

¹ 国立極地研究所

² 富山大学

³ 総合地球環境学研究所

Variations in Sr and Nd isotopic ratios of mineral dust in Arctic snow

Naoko NAGATSUKA¹, Yoshimi OGAWA-TSUKAGAWA¹, Kumiko GOTO-AZUMA¹, Konozuke SUGIURA²,
Hiroyuki ENOMOTO¹ and Takanori NAKANO³

¹National Institute of Polar Research

²Toyama University

³Research Institute for Humanity and Nature

Snow and ice in the Arctic contain various atmospheric aerosols, such as soot and mineral dust. These light-absorbing impurities can reduce surface albedo and affect melting of seasonal snow cover and glaciers. Thus, it is important to understand how these impurities were supplied to snow deposited in the Arctic.

Stable isotopic ratios of strontium (Sr) and neodymium (Nd) provide a means of identifying sources of substances and have been commonly used in loess or sediment studies¹. In this study, we analyzed Sr and Nd isotopic ratio of the mineral dust collected from snow in several Arctic regions (Siberia, Mongol, Alaska, and Greenland).

The Sr and Nd isotopic ratios of mineral dust in Arctic snow showed geographical variations among the sampling sites. The dust collected from snow in Mongol showed higher Sr and lower Nd values, while those in Greenland showed higher Sr and lower Nd values. This suggests that origins of mineral dust in snow are substantially different among the regions. Compared with the isotopic ratios of loess, desert sand, soil, and moraine reported over the regions, those of the dust from Mongolia and Greenland were close to those of respective regions. This result indicates that mineral dust in snow from the two sampling sites were mainly derived from surrounding regions. On the other hand, the isotopic ratios of dust in Alaskan snow were close to those of deserts in Kazakhstan and Taklamakan Desert, suggesting that the mineral dust was transported from such distant deserts to Alaska.

極地に分布する積雪や氷河の氷の中には、様々な大気降下物が保存されている。このうち、黒色炭素や鉱物ダストなどの光吸収性エアロゾルは雪氷面に沈着してアルベドを低下させることで最近の北極域の温度上昇に寄与している可能性が指摘されていることから、その供給源や輸送経路を明らかにすることは重要である。

量が少なくとも分析が可能な Sr-Nd 同位体比は、積雪中に含まれるダストの分析に応用可能な供給源特定法の 1 つである。しかしながら、このような同位体比を使った積雪中のダストの供給源に関する研究が北極域の雪氷圏で行われた例はまだほとんどない。そこで本研究では、北極域広域におけるダストの供給源を明らかにすることを目的とし、2012 年から 2014 年にシベリア、モンゴル、アラスカ、およびグリーンランドにおいて採取された積雪中ダストの Sr-Nd 同位体比を測定した。得られた結果を、各地域で報告されている砂漠の砂やレスなどの堆積物の値と比較し、各地域の積雪中に堆積している鉱物ダストの供給源の解釈を試みた。

分析の結果、鉱物ダストの同位体比は各積雪域で大きく異なる値を示した。モンゴルのダストは Sr が低くて Nd が高い傾向を示したのに対し、グリーンランドのダストは Sr が高くて Nd が低い傾向を示した。また、アラスカのダストはその中間の値を示した。これは積雪中のダストの供給源が北極の各地域で大きく異なることを示している。このダストの値を先行研究で報告されている各地の堆積物の値と比較すると、モンゴルはアルタイや中国北部の砂漠、グリーンランドは積雪域周辺のモレーンや土壌にそれぞれ近い値を取った。このことから、モンゴルとグリーンランドの積雪中に含まれるダストは、遠方から飛来したものではなく、それぞれ比較的近距离の供給源から供給されたものであることがわかった。一方、アラスカはサンプルを採取した地点によって同位体比が異なり、アラスカ内陸域の堆積物と、カザフスタンの砂漠やタクラマカン砂漠にそれぞれ近い値を示した。これは、アラスカの積雪に含まれるダストが、周辺の起源だけではなく太平洋を超えたアジアの砂漠からも供給されている可能性があることを示唆している。シベリアの結果については現在分析中であり、当日発表を行う予定である。

アラスカ積雪中のブラックカーボン及び固体微粒子の空間分布

塚川佳美¹、東久美子^{1,2}、近藤豊¹、杉浦幸之助³、大畑祥⁴、森樹大⁴、
茂木信宏⁴、小池真⁴、平林幹啓¹、Remi Dallmayr¹、榎本浩之^{1,2}

¹ 国立極地研究所

² 総合研究大学院大学

³ 富山大学極東地域研究センター

⁴ 東京大学大学院理学系研究科

ブラックカーボン(BC)や鉱物性ダストなどの光吸収性エアロゾルは、雪氷面に沈着することでアルベドを低下させ、積雪の融解を加速させる。これらの過程により正の放射強制力を生じるが、放射強制力の推定には大きな誤差が伴っている(Bond *et al.*, 2013)。このエアロゾルが雪氷面のアルベドに与える影響を評価する上で、雪氷中の光吸収性エアロゾルの濃度や堆積量を正確に把握することが重要である。

特に雪氷面の多い北極域は光吸収性エアロゾルの加熱効果が全球に比べて大きくなる可能性がある。また、北極域は冬から春にかけて、北極前線が南下するため、大気境界層・下部対流圏では、夏季に比べより低緯度域から排出された汚染物質が高緯度の北極域に輸送されやすくなる。しかし北極域での雪氷中の光吸収性粒子濃度と堆積量の高精度の観測報告例は、極めて限られている。

本研究では北極域における積雪中 BC と固体微粒子 (IP) の濃度・堆積量の空間分布を明らかにするため、北極広域で積雪を採取した。今回はそのうちアラスカの近年の積雪中 BC, IP, イオン成分の正確な濃度・堆積量とその変動について報告する。アラスカにおいて同一手法で系統的に北緯 60° から 70° で BC, IP の濃度を測定した例はない。

積雪試料の採取は 2012 年から 2015 年の 2 月下旬-3 月中旬に、アラスカの広域 22 地点で行った (Fig.1)。この時期は前年の降り始めからの雪がもっとも積もる時期であり、一冬分のエアロゾルの堆積量を把握することが可能である。積雪試料は積雪全層、表面 0-2cm, 表面 2-10cm の 3 つを、それぞれパウダーフリーのポリ袋に集めた。

本研究では BC の分析に、レーザー誘起白熱法を測定原理とする SP2 (Single Particle Soot Photometer; Droplet Measurement Technologies) を用いた。この方法は選択的に BC 粒子を検出するため、鉱物性ダストなど他の光吸収性エアロゾルの影響を受けない。また個々の BC 粒子を測定するため、BC の粒径分布を把握することができ、輸送過程中的の変質や起源の推定に役立つ。この方法により先行研究よりも高精度の BC 濃度データを得た。また IP の分析には Coulter Counter Mutisizer4 (Beckman Coulter Inc., USA) を用いた。

アラスカの BC 濃度は緯度によって地域差があり、観測領域を緯度方向に南部 (61.82-63.27°N)、中部 (63.57-65.9°N)、北部 (66.56-68.62°N)、Prudhoe Bay (70.19°N)、Barrow (71.32°N) の 5 つに分けた。このうちフェアバンクスを含む中部地域では BC 濃度が他の地域に比べて高かった。また BC の質量粒径分布は他の地域が単一モードであるのに対して、中部地域では 2 つのモードからなっており、BC 質量濃度に占める大粒子の割合が大きくなっていた。BC 濃度と質量粒径分布の特徴から中部地域の BC は局地的な人為起源の影響をより強く受けていると考えられる。この手法により、領域を代表する採取地点を選別し、平均 BC 濃度を求めた。領域代表性のある平均 BC 濃度の年々変動は比較的小さく、異なった測定手法を用いた先行研究と比べて低濃度であった。

BC 濃度と水等量(SWE)から求めた一冬分の BC 堆積量は、BC 濃度と同様に中部が最も多く、南部では少なかった。

全層の IP 質量濃度は、99-6003 $\mu\text{g L}^{-1}$ で、BC 質量濃度の数百倍であった。IP の質量濃度は BC 濃度と同様に中部で高濃度であり、北部と南部は低濃度であった。このため中部での IP には人為起源のものが含まれている可能性がある。

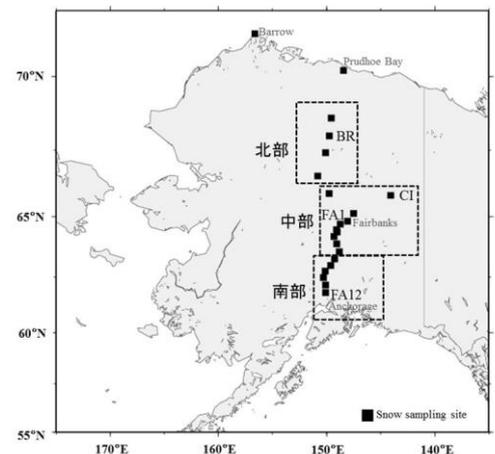


Figure 1 Map of snow sampling sites in Alaska. Dotted frames show three regions districted from results of BC.

Surface mass balance of Arctic glaciers: past and future trends

Yong Zhang¹, Hiroyuki Enomoto¹, Tetsuo Ohata¹, Hideyuki Kitabata², Tsutomu Kadota², Yukiko Hirabayashi³

¹ *Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research, Tokyo 190-8518, Japan*

² *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokohama 237-0061, Japan*

³ *Institute of Engineering Innovation, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan*

Glaciers and ice caps, one of the main components of the Arctic cryosphere, cover an area of 439 617 km² (about half of the world's glaciers and ice caps; Figure 1). These glaciers and ice caps are a major contributor to the eustatic component of global sea level rise, and have impacts on water supplies, water quality, hydroelectric power generation, flood hazards, and ocean circulation patterns. Note that most of the current mass loss from the Arctic glaciers is probably attributable to a change in the surface mass balance. These mass losses are expected to increase in the future, as these glaciers are located in the region of highest predicted air temperature increase during the coming decades. Hence, for better understanding what past and future fluctuations of glacier behavior imply for their atmospheric forcing on multi-decadal scale and impact on sea level rise, there is an urgent need for the assessment of past and future glacier mass balance in the Arctic region. In this study, we attempt to estimate the past and future variations in glacier mass balance using daily near-surface air temperature and precipitation from 12 Global Climate Models in combination with a surface mass balance model. Then, the study attempts to analyze the response of Arctic glaciers to climate change, the role of these glaciers in the Arctic climate system, and the contribution of glaciers to global sea level rise. Through such work, we can well understand the Arctic glacier behavior and the role of these glaciers in the Arctic climate system, and fill the major knowledge gaps in quantifying rates of glacier wastage, future trends and its impacts.

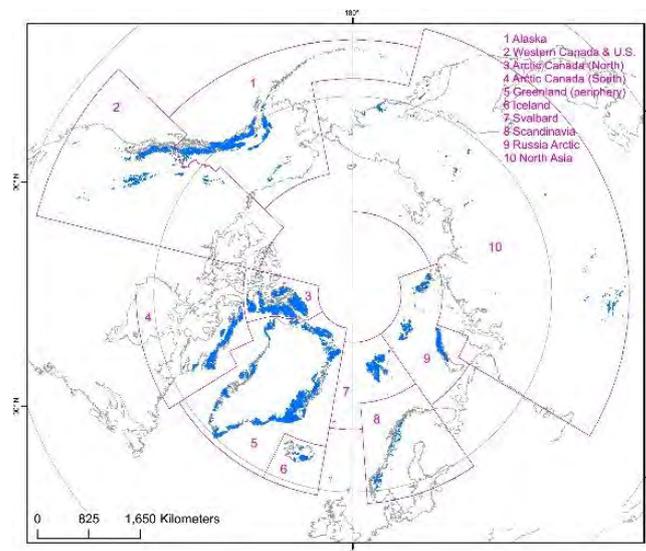


Figure 1 Map of Arctic glaciers and ice caps.

Reference

- Pfeffer WT et al. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *J. Glaciol.*, 60(221), 537–652, 2014.
- Vaughan DG et al. Observations: Cryosphere. In: Stocker TF et al (ed) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York, 2013.

Application of a distributed surface mass balance model to ice caps in northwestern Greenland

Keiko Konya¹, Jun Saito², Mihiro Maruyama² and Shin Sugiyama²

¹*Japan Agency of Marine-Earth Science and Technology*

²*Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University*

Background

Ice caps and glaciers (GICs) existing along the coastal margin of Greenland are losing ice under the influence of recent atmospheric warming, resulting in significant contribution to sea level rise. Northwestern Greenland is one of the areas that experienced large amount of ice mass loss over the last decades. The surface ice loss has been accelerated in recent years (Khan et al., 2010). Bolch et al., (2013) estimated with satellite images of ICESat that surface mass balance of the coastal GICs in northwestern Greenland was -0.60 m a^{-1} and that of all coastal GICs was -0.45 m a^{-1} from 2003 to 2008. Saito et al., (submitted) examined the surface level change of some ice caps in northwestern Greenland more precisely with satellite images by ALOS (Advanced Land Observing Satellite) PRISM and found that the surface change of some ice caps in northwestern Greenland was -1.1 m a^{-1} . We have estimated annual mass balance of some ice caps in northwestern Greenland.

Study site

The studied area is near Qaanaaq ($77^{\circ}28'N$, $69^{\circ}13'W$). The studied five ice caps are the Qaanaaq Ice Cap (QIC), the Hurlbut Ice Cap (HIC), the Five Glacier Dal Ice Cap (FGDIC), the Kiatak Ice Cap (KIC) and Steensby Land Ice Cap (SLIC) in northwestern Greenland. The Equilibrium line altitude (ELA) of QIC was 819 - 864 m a.s.l. in 2012 - 2014 (Maruyama, 2015). Thule climate station ($77.2N$, $68.4W$, hereafter TCS), which is one of the long-term running climate stations in Greenland, situates about 100 km south to Qaanaaq. It is near the Qaanaaq air base and at the altitude of 59 m a.s.l.. The weather station, called sigma-b, was installed on QIC in 2012 (Aoki et al., 2014). The stakes observation was conducted on the outlet glacier of QIC during 2012 - 2015 (Sugiyama et al., 2014; Maruyama, 2015).

Climate of the region

Air temperature at TCS has been increasing gradually. The increasing rate of air temperature, obtained from linear approximation, is $+0.08 \text{ }^{\circ}\text{C a}^{-1}$ from 1980 to 2014. Mean air temperature at TCS during 1980 - 2014 was $-10.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Air temperature lapse rate between TCS and sigma-b was -4.8 and $-4.9 \text{ }^{\circ}\text{C Km}^{-1}$ for summer 2012 and 2013, respectively.

Annual precipitation does not show a wide change since 1980. July and August are months of high precipitation revealed by the monthly precipitation from 2000 to 2014 at TCS. The mean annual precipitation at TCS during 1982 - 2014 was 163.7 mm a^{-1} .

Mass balance model

The mass balance was calculated with the mass balance model of Distributed Enhanced Temperature-Index Model (DeTIM) (Hock, 1999). The model is able to compute spatial variations of surface mass balance for the ice caps. We used a 500 m gridded digital elevation model and surface condition of snow or ice of the ice caps derived from Advanced Land Observing Satellite (ALOS) PRISM data (Saito et al., submitted). Air temperature with lapse rate and precipitation at TCS were used as input of the model. The model was tuned with in-situ stakes data obtained on the Qaanaaq ice cap in 2012-2015.

Result and discussion

Annual mass balance of QIC was consistently negative from 2000 to 2015. The mass balance for the whole area agreed with the satellite data (Saito et al., submitted) for QIC, FGDIC and HIC. However, the model calculation overestimated the satellite data for KIC and SLIC. The surface of KIC and SLIC are covered with fresh snow. Therefore, the surface albedo of KIC and SLIC are higher than other ice caps (Saito et al., submitted). Since KIC and SLIC exist near the coast, KIC and SLIC are probably under maritime climate more than QIC, FGDIC and HIC.

Conclusion

The mass balance of ice caps in northwestern Greenland was estimated with a mass balance model. The tuning factors for ablation require higher value than typical value, which shows that the ice cap experienced high ablation recently. The result of

the calculation shows similar spatial variation to the observed data with stakes. On the other hand, the model results show large variety among ice caps. The reason of difference between the ice caps is possibly due to albedo difference.

References

- Aoki, T., S. Matoba, J. Uetake, N. Takeuchi and H. Motoyama, Field activities of the “snow impurity and glacial microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) project in Greenland in 2011 – 2013, *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 3-20, 2014.
- Bolch, T., L. Sandberg Sørensen, S. B. Simonsen, N. Mölg, H. Machguth, P. Rastner, and F. Paul, Mass loss of Greenland's glaciers and ice caps 2003–2008 revealed from ICESat laser altimetry data. *Geophysical Research Letters*, 40(5), 875-88, 2013.
- Hock, R., A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation, *Journal of Glaciology*, 45(149), 101-111, 1999.
- Khan, S. A., J. Wahr, M. Bevis, I. Velicogna, and E. Kendrick, Spread of ice mass loss into northwest Greenland observed by GRACE and GPS. *Geophysical Research Letters*, 37(6), 2010.
- Maruyama, M., Elevation change, mass balance and ice speed in Qaanaaq Ice Cap, northwestern Greenland, Master's Thesis, Hokkaido University, 56pp, 2015, in Japanese.
- Saito, J., S. Sugiyama, S. Tsutaki, and N. Sawagaki, Surface elevation change on ice caps in the Qaanaaq region, northwestern Greenland, *Polar Science*, 2016, Submitted.
- Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Matsuno, S. Yamaguchi, S. Matoba, and T. Aoki, Initial field observations on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, *Annals of Glaciology*, 55(66), 25-33, 2014.

グリーンランド北西部カナック地域ボードイン氷河の流動に関する数値実験

セディック ハキム¹、グレーベ ラルフ¹、杉山慎¹、榊原大貴^{1,2}、津滝俊^{1,3}

¹北海道大学低温科学研究所

²北海道大学大学院環境科学院

³国立極地研究所国際北極環境研究センター

Modeling the flow dynamics of Bowdoin Glacier, Qaanaaq region, northwestern Greenland

Hakime Seddik¹, Ralf Greve¹, Shin Sugiyama¹, Daiki Sakakibara^{1,2} and Shun Tsutaki^{1,3}

¹*Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan*

²*Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan*

³*Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan*

The Greenland ice sheet is losing mass at a rate increasing over the last decades. In this mass loss a predominant role is played by surface melt and ice discharge from accelerating marine-terminating outlet glaciers. It is thus essential to better understand the dynamics of these outlet glaciers. Located 30 km northeast of Qaanaaq in northwestern Greenland, Bowdoin Glacier (77°41'N, 68°35'W) is a fjord-terminating glacier which was intensively surveyed in the GRENE field campaigns in summer 2013, 2014 and 2015. Complementary to this work, we used the three-dimensional, full Stokes model Elmer/Ice (Gagliardini and others, 2013; elmerice.elmerfem.org) to investigate the flow dynamics of Bowdoin Glacier. Bowdoin Glacier was relatively stable for more than 20 years before 2008. Since then it has been retreating rapidly and its speed has fluctuated frequently. Using the available observational data, we modeled the glacier flow and investigated its sensitivity to external forcing. We applied a control inverse method to infer the present-day spatial distribution of the basal friction coefficient from the measured surface velocities (Sugiyama and others, 2015). We performed sensitivity experiments by applying basal perturbations, i.e., increased basal lubrication, and by changing the sea level at the glacier front. Glacier ice flow was sensitive to moderate basal perturbations (10% decrease in the basal friction coefficient). This suggests that ice flow is affected by rapid short-term variations in air temperature and precipitation. More interestingly, glacier ice flow near the glacier front varies significantly with sea tides. Flow accelerates with falling tides and slows with rising tides. Investigation of the stress regime driving ice deformation revealed a complex combination of lateral shearing that supports the glacier and longitudinal stress (glacier ice extension) that interacts with the hydrostatic pressure acting on the calving front. We therefore demonstrated that the dynamics of Bowdoin Glacier is sensitive to small perturbations occurring at the glacier base and at the calving front.

References

- Gagliardini, O., T. Zwinger, F. Gillet-Chaulet, G. Durand, L. Favier, B. de Fleurian, R. Greve, M. Malinen, C. Martín, P. Råback, J. Ruokolainen, M. Sacchetti, M. Schäfer, H. Seddik and J. Thies. Capabilities and performance of Elmer/Ice, a new-generation ice sheet model. *Geosci. Model Dev.*, 6 (4), 1299–1318, 2013.
- Sugiyama, S., D. Sakakibara, S. Tsutaki, M. Maruyama and T. Sawagaki. Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland. *J. Glaciol.*, 61 (226), 223–232, 2015.

Structural Uncertainties in Simulated Projection of Greenland ice sheet

SAITO Fuyuki¹, Ayako ABE-OUCHI^{2,1} and Kunio TAKAHASHI¹

¹*Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

²*Atmosphere Ocean Research Institute, University of Tokyo*

One of the major uncertainties in the numerical simulation of ice-sheets is the way to describe the basal sliding because of difficulty in its observation. Recently more and more modeling studies use a technique to adjust the coefficients of their basal sliding parameterization to obtain particular data fields, such as geometry and/or surface velocity, which are acceptably close to the observation. Although there may be a certain limit of its application, such methods to optimize the present-day simulation will be more an important technique, especially for a short-term (century-scale) future projection of the Greenland ice sheet.

There have been several techniques to 'inverse' the basal sliding coefficients field. Pollard and DeConto (2012) present a general and simple method to deduce spatial distribution of basal sliding coefficients to reduce the errors in simulated surface topography that can be applied to any type of ice sheet model. In this method, the model is run forward in time, and the basal sliding coefficient at each grid point is periodically adjusted depending on the amount of error in the ice surface elevation compared to the observation.

This study revisits the future surface-climate experiments of Greenland ice sheet proposed by the SeaRISE (Bindschadler et al, 2013). Series of the sensitivity experiments are reexamined using an ice-sheet model IcIES with replacing the spatially uniform basal sliding coefficients to a field obtained by the optimization following Pollard and DeConto (2012). Results will be presented in comparison to the impact on the simulation due to other uncertainties such as initialization methods, surface mass balance methods and so on.

将来の気候変動が北半球高緯度域の陸域炭素収支に与える影響 : ISI-MIP データを用いた解析

伊藤昭彦^{1,2}、仁科一哉¹、野田響¹

¹ 国立環境研究所

² 海洋研究開発機構

Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data

Akihiko Ito^{1,2}, Kazuya Nishina¹ and Hibiki M. Noda¹

¹ *National Institute for Environmental Studies*

² *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

This study assesses future changes in the carbon budgets of northern terrestrial ecosystems (above 60°N) using data from the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP). By analyzing simulations from seven biome models driven by five climate scenarios under two representative concentration pathways (RCP2.6 and RCP8.5), the range of responses and their uncertainty in the 21st century was evaluated. The biome models consistently simulated a gradual increase in vegetation productivity driven by an elevated atmospheric CO₂ concentration and a longer growing period. By the 2090s, most simulations showed average net carbon uptake into the northern terrestrial ecosystems of +27 Pg C for RCP2.6 and +48 Pg C for RCP8.5. These estimates showed a wide range of variability among simulations, especially for soil carbon stocks. Even under low greenhouse gas concentrations (RCP2.6), most simulations indicated that vegetation productivity and biomass would change by more than 10%, implying that it will be difficult to completely prevent climatic impacts in northern regions. Simulated spatial patterns and seasonality in the carbon budget can be used to identify sensitive areas and seasons, allowing for improved monitoring. Further research combining observations and modeling will be required to reduce estimation uncertainty and devise ecosystem management options.

References

Ito A, Nishina K, Noda HM (in press) Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data. *Polar Science*.

High-resolution CO₂ flux inversion model for regional study in Siberia

Shamil Maksyutov¹, Rajesh Janardanan¹, Makoto Saito¹, Akihiko Ito¹, Tom Oda², Johannes W Kaiser³, Dmitry Belikov^{1,4}, Alexander Ganshin⁵, Ruslan Zhuravlev^{5,6}, Vinu Valsala⁷, Motoki Sasakawa¹ and Toshinobu Machida¹

¹*National Institute for Environmental Studies, Tsukuba,*

²*USRA/GSFC NASA, Greenbelt, MD, USA*

³*Max Plank Institute for Chemistry, Mainz, Germany*

⁴*National Institute for Polar Research, Tokyo, Japan*

⁵*Central Aerological Observatory, Dolgoprudny*

⁶*Tomsk State Univ., Tomsk, Russia*

⁷*Indian Institute for Tropical Meteorology, Pune, India*

We develop and test an iterative inversion framework that is designed for estimating surface CO₂ fluxes at a high spatial resolution using a Lagrangian-Eulerian coupled tracer transport model and atmospheric CO₂ data collected by the global in-situ network and satellite observations. In our inverse modeling system, we employ the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART that was coupled to the Eulerian atmospheric tracer transport model (NIES-TM). We also derived an adjoint of the coupled model. Weekly corrections to prior fluxes are calculated at a spatial resolution of the FLEXPART-simulated surface flux responses (0.1 degree). To obtain a best fit to the observations we tested a set of optimization algorithms, including quasi-Newtonian algorithms and implicitly restarted Lanczos method. The square root of covariance matrix for surface fluxes is implemented as implicit diffusion operator, while the adjoint of it is derived using automatic code differentiation tool. The prior flux uncertainty for terrestrial biosphere is scaled proportionally to monthly mean GPP by MODIS product MOD17. The model was applied to assimilating one year of Obspack data, and produced satisfactory flux correction results. Regional version of the model was applied to inverse model analysis of the CO₂ flux distribution in West Siberia using continuous CO₂ observation data by tower observation network JR-Station.

Simulation of CO₂ and CH₄ in the subarctic using coupled Eulerian-Lagrangian model

Dmitry Belikov^{1,2,3}, Shamil Maksyutov², A. Ganshin^{3,4}, R. Zhuravlev^{3,4}, Motoki Sasakawa² and Shuji Aoki⁵

¹*National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan*

²*National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan*

³*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

⁴*Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Russia*

⁵*Tohoku University, Sendai, Japan*

The subarctic is a region in the Northern Hemisphere south of the Arctic and covering much of Alaska, Canada, Iceland, the north of Scandinavia, Siberia, and the Shetland Islands. Generally, subarctic regions fall between 50°N and 70°N latitude, depending on local climates. The subarctic regions contain large amounts of plant biomass and soil organic carbon, so these regions are the largest carbon reservoirs in the world with a substantial source and sink of CO₂ and CH₄. The magnitude and distribution of CO₂ and CH₄ fluxes are still uncertain, so accurate estimation of carbon fluxes and study of CO₂ and CH₄ seasonal cycles in the subarctic regions are essential.

In this work, we use forward simulation employing the Global Eulerian–Lagrangian Coupled Atmospheric (GELCA; Ganshin et al. 2012) model in order to estimate CO₂ and CH₄ seasonal cycles in the subarctic. GELCA consists of an Eulerian National Institute for Environmental Studies global Transport Model (NIES-TM; Belikov et al., 2011) and a Lagrangian particle dispersion model (FLEXPART; Stohl et al., 2005). This approach utilizes the accurate transport of the Lagrangian model to calculate the signal near to the receptors, and efficient calculation of background concentrations using the Eulerian global transport model.

We setup a long simulation period to obtain a better understanding of the role of emissions (using a set of CO₂ and CH₄ emissions scenarios), and transport model characteristics, such as the stratosphere/troposphere exchange and tracers concentration variations in the troposphere. We also analyzed modeled and observed long and short-term trend, seasonal cycle of CO₂ and CH₄.

Model results were compared with observations from the World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG 2015) and the Siberian observations obtained by the Center for Global Environmental Research (CGER) of the National Institute for Environmental Studies (NIES) and the Russian Academy of Science (RAS), from six tower sites (JR-STATION) as described by Sasakawa et al. (2010).

The analyses have shown that CELGA is effective in capturing the seasonal variability of atmospheric tracer at observation sites strongly influenced by local emissions and global transport at the same time.

References

- Belikov, D., Maksyutov, S., Miyasaka, T., Saeki, T., Zhuravlev, R., and Kiryushov, B.: Mass-conserving tracer transport modelling on a reduced latitude-longitude grid with NIES-TM, *Geosci. Model Dev.*, 4, 207–222, 2011.
- Ganshin, A., Oda, T., Saito, M., Maksyutov, S., Valsala, V., Andres, R. J., Fisher, R. E., Lowry, D., Lukyanov, A., Matsueda, H., Nisbet, E. G., Rigby, M., Sawa, Y., Tsumoi, K., Varlagin, A., and Zhuravlev, R.: A global coupled Eulerian-Lagrangian model and 1 × 1 km CO₂ surface flux dataset for high-resolution atmospheric CO₂ transport simulations, *Geosci. Model Dev.*, 5, 231–243, doi:10.5194/gmd-5-231-2012, 2012.
- Sasakawa, M., K. Shimoyama, T. Machida, N. Tsuda, H. Suto, M. Arshinov, D. Davydov, A. Fofonov, O. Krasnov, T. Saeki, Y. Koyama, and S. Maksyutov, Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia, *Tellus 62B*, 403–416, 2010.
- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., and Wotawa, G.: Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2461–2474, doi:10.5194/acp-5-2461-2005, 2005.

Assessment of ACTM global model performance using CONTRAIL aircraft observations of greenhouse gases

K. Ravi Kumar^{1,2}, P.K. Patra², K. Ishijima², T. Saeki², T. Machida³, H. Matsueda⁴, Y. Sawa⁴, S. Aoki⁵

¹National Institute of Polar Research

²Department of Environmental and Geochemical Research Cycle, JAMSTEC

³National Institute of Environmental studies

⁴Oceanography and Geochemistry Research Department, Meteorological Research Institute

⁵Tohoku University

Concentrations of greenhouse gases in the upper troposphere are influenced by surface fluxes, vertical mixing in the troposphere, stratosphere-troposphere exchange (STE) and their chemical losses. This study presents an analysis of the measurements of Carbon dioxide (CO₂), Methane (CH₄), Nitrous Oxide (N₂O) and Sulfur hexafluoride (SF₆) from CONTRAIL aircraft observations over western pacific and northern Eurasia regions in the upper troposphere for the period during 2012-2014 compared with the simulations by JAMSTEC's atmospheric chemistry-transport model (ACTM). Air sample collections onboard the Japan Airlines (JAL) aircrafts have been carried out using the Automatic air Sampling Equipment (ASE) (Machida et al., 2008; Matsueda et al., 2008) and the Manual air Sampling Equipment (MSE). In this study we used observed results from the flights between Narita (NRT), Japan to Sydney (SYD) and between Paris (France) and Haneda (Japan), and only from February and May in 2013 between Moscow (Russia) and Narita (Japan). We used the ACTM for forward simulations is run with horizontal resolution of T42 (~2.8 x 2.8°), 67 sigma-pressure vertical levels for CO₂, CH₄, N₂O and SF₆ (Patra et al., 2011; Patra et al, 2016, Ishijima et al., 2010; Patra et al., 2009).

Figure 1 shows the latitudinal annual averages calculated at latitude of 6° bin for the period 2012-2014. It is clear that the higher values of concentrations of these gases were observed in the northern hemisphere as compared to the southern hemisphere, which are well reproduced by the global model simulations. But there are some model-observation mismatches observed in the extra tropics in both hemispheres. These are likely to be due to the stratosphere-troposphere exchange or north-south emission balance of these gases in the model. Lower concentrations are observed for all species around 30°N, which the model overestimates slightly due to uncertainties in transport around the tropopause modelled by ACTM.

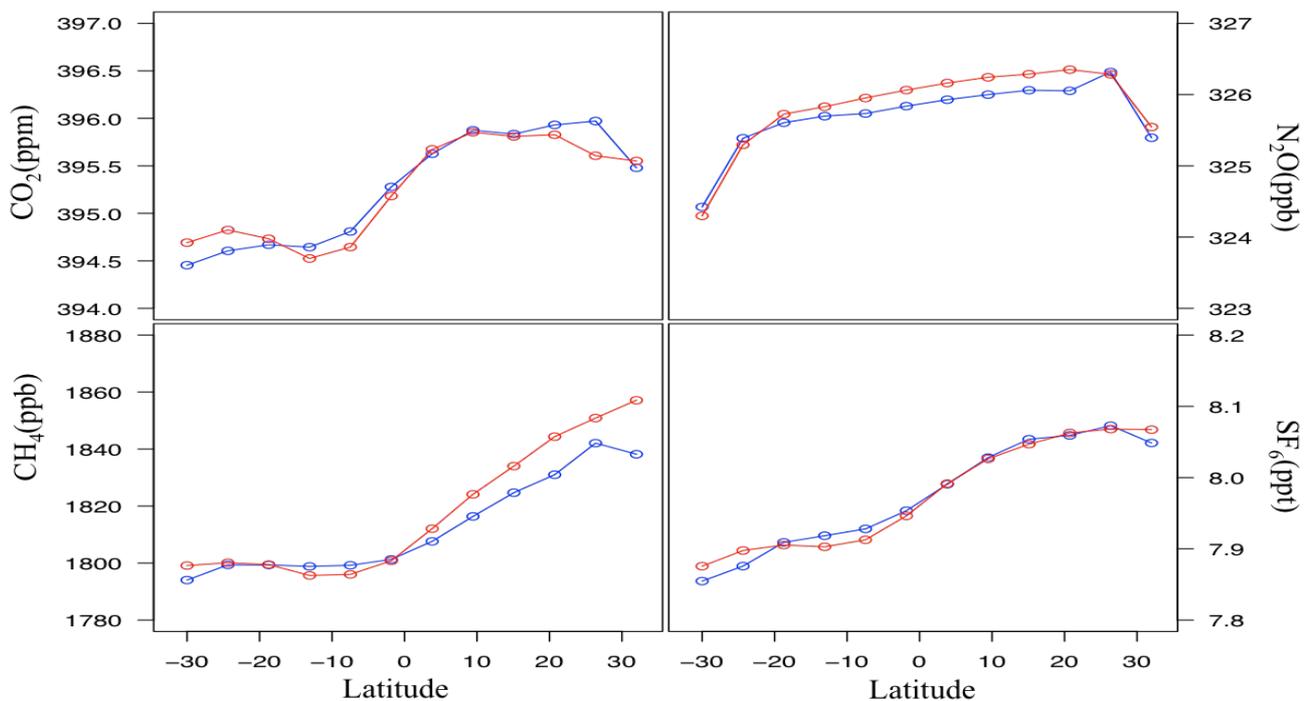


Figure 1: Latitudinal distributions of annual average of the concentrations of greenhouse gases over CONTRAIL aircraft observations along with the model comparisons for the period 2012-2014. Blue lines shows observations and red represents ACTM model

The north-south gradient (mean of values north of 20°N – mean of values south of 20°S) of CO₂ is 1.3ppm in observations and ~1ppm in model, for CH₄ that is 30 and 45 ppb, respectively, for observations and model, gradient for N₂O are 0.6ppb and

1ppb, respectively, and SF₆ gradients are 0.17ppt for both the model and observation. In order to understand the relationship between model and observations correlation coefficients are calculated at each latitude bin having the higher correlations for CO₂ and SF₆ with nearly ~0.9, and for N₂O it is nearly ~0.8 where as in the case of CH₄ correlation at each latitude band is variable with minimum correlations among all the species with nearly ~0.6. The analysis of greenhouse gases over northern mid-latitudes observed the higher mixing ratios along with the higher variabilities in all the species. The model reproduces the observed variations relatively well, especially for the timing of the high and lower values of the mixing ratios but sometimes with weaker amplitudes

References

- Ishijima, K., P. K. Patra, M. Takigawa, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, P. Steele, P. Krummel, R. Langenfelds, S. Aoki and T. Nakazawa, The stratospheric influence on seasonal cycle of nitrous oxide in the troposphere as deduced from aircraft observation and model, *J. Geophys. Res.*, 115, D20308, 2010.
- Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, N. Kondo, K. Goto, T. Nakazawa, K. Ishikawa, and T. Ogawa (2008), World wide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25(10), 1744–1754, doi:10.1175/2008JTECHA1082.1.
- Matsueda, H., T. Machida, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, H. Ikeda, N. Kondo, and K. Goto (2008), Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new flask sampling of JAL airliner observations, *Pap. Meteorol. Geophys.*, 59, 1–17.
- Patra, P. K., M. Takigawa, G. S. Dutton, K. Uhse, K. Ishijima, B. R. Lintner, K. Miyazaki and J. W. Elkins, Transport mechanisms for synoptic, seasonal and interannual SF₆ variations and "age" of air in troposphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1209-1225, 2009.
- Patra, P. K., Y. Niwa, T. J. Schuck, C. A. M. Brenninkmeijer, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa, Carbon balance of South Asia constrained by passenger aircraft CO₂ measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 4163-4175, 2011.
- Patra, P.K., T. Saeki, E.J. Dlugokencky, K. Ishijima, T. Umezawa, A. Ito, S. Aoki, S. Morimoto, E. A. Kort, A. Crowell, K. Ravi Kumar, T. Nakazawa, Regional emission and loss budgets of atmospheric methane (2002-2012), *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 94, 83-105, 2016.

Analysis of atmospheric methane from Siberian tower observation using chemistry transport model

Kentaro Ishijima¹, Motoki Sasakawa², Toshinobu Machida², Prabir K. Patra¹, Akihiko Ito², K. Ravi Kumar^{3,1}, Tazu Saeki¹, Shinji Morimoto⁴, Shuji Aoki⁴ and Takakiyo Nakazawa⁴

¹Department of Environmental Geochemical Cycle Research / JAMSTEC, Yokohama, Japan

²National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

³National Institute for Polar Research, Tokyo, Japan

⁴Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Tohoku University, Sendai, Japan

Atmospheric methane (CH₄) is a strong greenhouse gas and short-lived climate forcer (SLCF), which is present naturally in the Earth's atmosphere, but the amount in the atmosphere has been dramatically increased due to anthropogenic sources especially after industrialization in the 18th century. Such coexistence of both natural and anthropogenic sources at the present make it difficult to quantitatively understand CH₄ cycles on the globe. For example, CH₄ concentration was increasing in 1990s, became stable in 2000s, and began to increase again from 2007, but discussions on what caused the inter-decadal variations remain intriguing. On the other hand, it is well known that wetlands are the largest natural source of CH₄. Wetlands in Arctic regions have been recently receiving remarkable attention, because high-latitude regions are more sensitive to global warming than low-latitudes, possibly enhancing CH₄ emissions there. West Siberian wetlands alone are estimated to contribute 2% at a maximum to the global CH₄ budget.

In order to monitor atmospheric CH₄ variability, continuous measurements of CH₄ concentration from an expanded network of towers (JR-STATION: Japan–Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network; Sasakawa et al., 2010) have been conducted mainly in West Siberia since 2004. A previous study on the measurements has revealed that CH₄ concentration has large diurnal and seasonal variability, which are driven by seasonally varying wetlands and fossil fuel emissions as well as by significant diurnal and seasonal variations of planetary boundary layer height (PBLH). Chemistry transport model can be a useful tool to understand atmospheric CH₄ variations, but model simulation for the JR-STATION seems to be slightly challenging, since the stations are significantly affected by local sources and PBLH variability (Sasakawa et al., 2010), which in some cases need higher horizontal and vertical resolutions of the model to simulate.

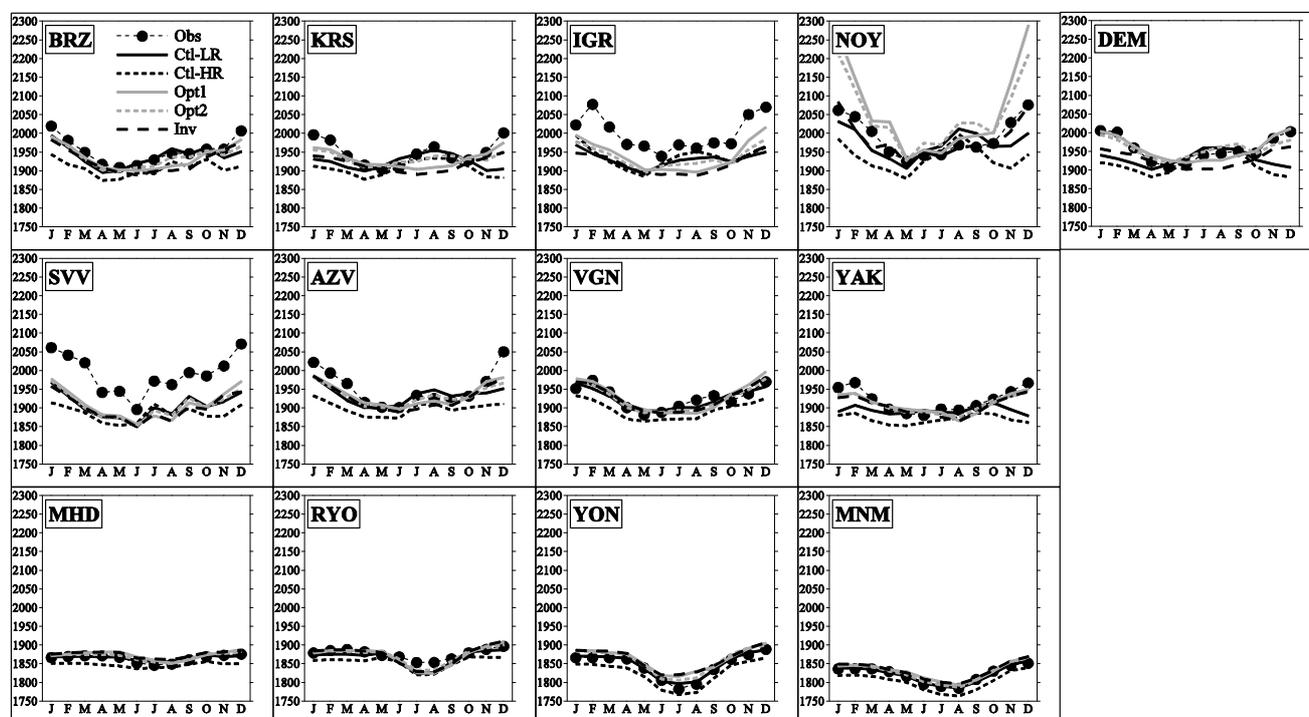


Figure 1. Monthly mean CH₄ of JR-STATION observation (obs) and the ACTM simulations for the period 2004-2013. 9 stations in the upper rows and others represent the results for the JR-STATION and for coastal stations, respectively. Model results are obtained as follows; Ctl-LR&HR: simulated by normal (LR) and high (HR) resolution ACTM with emissions by Patra et al (2011), Opt1&2: emissions by two different types of source balance optimization, Inv: emissions estimated by regional inversion (Patra et al., 2016).

In this study, we compare results simulated by the CCSR/NIES/FRCGC Atmospheric General Circulation Model based Chemistry Transport Model (ACTM; Patra et al., 2009; 2011) with several types of CH₄ emission inventories including the estimations by a process-based biogeochemical model (Ito and Inatomi, 2012) and by atmospheric inversions (Patra et al., 2016), and try to understand the driving factors for observed atmospheric CH₄ variations. Diurnal cycles are generally reproduced by ACTM, but, in summer, when the amplitudes are maximized by enhanced wetland emission and by large planetary boundary layer variability driven by large diurnal temperature change, disagreement for the amplitude and maximum timing between model and observation are found especially at stations located near wetlands (BRZ, KRS, IGR, NOY, and DEM). Seasonal cycles are compared using monthly means of daytime data (Fig.1). General tendency of observation of minimum in summer and maximum in winter is reproduced by model. However, wetland emission signals in summer at stations in wetter areas (KRS, NOY, and DEN) are missed by model cases of Opt1 and Inv. Also local anthropogenic emissions are underestimated at stations, less affected by the wetland emissions (IGR and SVV).

References

- Ito A. and M. Inatomi, Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, 9, 759-773, 2012.
- Patra et al., Growth rate, seasonal, synoptic, diurnal variations and budget of methane in lower atmosphere. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 87(4), 635-663, 2009.
- Patra et al., TransCom model simulations of CH₄ and related species: linking transport, surface flux and chemical loss with CH₄ variability in the troposphere and lower stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12813–12837, 2011.
- Patra P. K., T. Saeki, E. J. Dlugokencky, K. Ishijima, T. Umezawa, A. Ito, S. Aoki, S. Morimoto, E. A. Kort, A. Crotnell, K. Ravi Kumar, T. Nakazawa, Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002-2012), *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 94(1), 83-105, 2016.
- Sasakawa, M., K. Shimoyama, T. Machida, N. Tsuda, H. Suto, M. Arshinov, D. Davydov, A. Fofonov, O. Krasnov, T. Saeki, Y. Koyama, and S. Maksyutov, Continuous measurements of methane from a nine-tower network over Siberia. *Tellus*, 62B, 403–416, 2010.

西シベリアにおけるタワー観測ネットワークを用いた二酸化炭素・メタンの連続測定

笹川基樹¹、町田敏暢¹、勝又啓一¹、津田憲次²、M. Arshinov³

¹ 国立環境研究所

² 地球環境人間フォーラム

³ ロシア大気光学研究所

シベリアにおいて 2002 年からタワー観測ネットワーク (JR-STATION: Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network) を用いて CO₂ 濃度と CH₄ 濃度の連続測定を継続している (Sasakawa *et al.*, 2010, 2012, 2013)。沿岸域のバックグラウンドの変動と比較すると、冬季は極度に低温になるため境界層が発達しにくく地表からのフラックスを下層に溜め込みやすいため CO₂ 濃度が高く、夏季はタイガ植生による光合成の影響を強く受け CO₂ 濃度が低かった。結果として季節振幅は 20 ppm 以上になる。CH₄ 濃度は全サイトで、年間を通してバックグラウンド大気レベルを大きく上回る高濃度 CH₄ が見られた。CH₄ 濃度のばらつきは大きい、春季 (3-6 月) と秋季 (10 月) の日中のデータに注目すると 2007 年以降全球で観測されているような経年増加が観測された (図 1)。しかしバックグラウンドサイト間でのばらつきや本観測のばらつきを考慮すると、シベリア域のみの特徴的な長期トレンドを論ずることは難しい。

タワー観測システムに CRDS を組み込む方式を検討し、初期段階では NDIR の後に CRDS を直列に接続した予備実験を実施した。両センサーの示す CO₂ 濃度に良い一致が見られていたが、このシステムでは試料空気の水蒸気除去のために試薬 (Mg(ClO₄)₂) を用いており、場合によってはこの乾燥剤が潮解して CRDS 内にまで混入してしまう危険性があった。そこで CRDS への試料空気は試薬の前で分岐し NDIR とは並列で測定するシステムを作成した。試料空気の乾燥には Nafion ドライヤー (MD-050-72S-1) を使用し、その後マスフローコントローラで NDIR と同量の流量 (35 ml/min) に調整した。この条件で H₂O 濃度は CRDS の表示で 0.01% 以下になり、CO₂ と CH₄ 濃度の水補正に問題のない条件にまで達することが確認できている。国立環境研究所に設置しているシベリアと同型のタワー観測システムを上記のシステムに変更し、NDIR と CRDS (G2301) の比較実験を行った。セクターユニットのサンプルラインから乾燥空気 (TKB air, CO₂: 391.90 ppm) を導入し両センサーでの同時測定を行い良い一致を確認した (表 1)。本発表では Karasevoe タワーに設置した同システムでの観測結果も紹介する。

表 1. NDIR と CRDS による TKB air の測定値 (平均±標準偏差)

ID	NDIR (ppm)	N	CRDS (ppm)	N
TKB air	391.72±0.18	25	391.85±0.04	25

References

- Sasakawa, M., Shimoyama, K., Machida, T., Tsuda, N., Suto, H., Arshinov, M., Davydov, D., Fofonov, A., Krasnov, O., Saeki, T., Koyama, Y., Maksyutov, S., Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia. *Tellus* 62B, 403-416, 2010.
- Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., Arshinov M., 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*, 64B, doi:10.3402/tellusb.v64i0.17514, 2012.
- Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., 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.*, 118, 1-10, doi:10.1002/jgrd.50755, 2013.

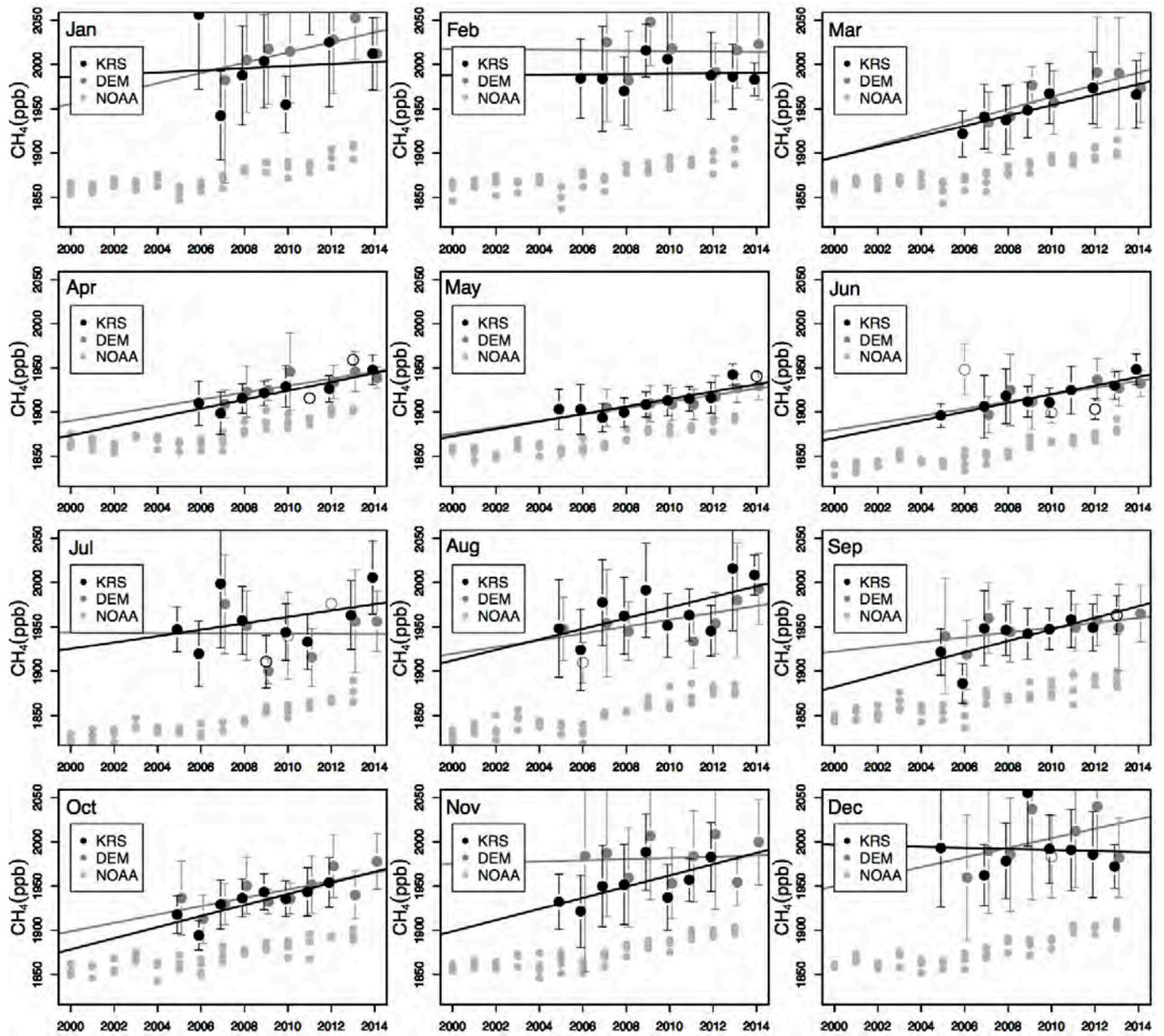


図 1. Karasevoe (KRS)と Demyanskoe (DEM)において観測された CH_4 濃度の日中値 (13:00-17:00 LST) の月平均値の経年変化。エラーバーは標準偏差。直線は直線近似のトレンドライン。日中値は低高度と高々度インレットの濃度差が 50 ppb より小さい場合のみ使用した。月平均に使用した日中値が $N=28$ より少ない場合は白抜きで表しトレンドラインの計算には使用していない。エラーバー無しの灰丸は同緯度帯の沿岸域のバックグラウンドサイト (NOAA のサイト ; CBA, ICE, MHD, SHM) の月平均値を示した。

スヴァールバル諸島ニーオルスンにおける酸素／窒素比および大気ポテンシャル酸素の高精度連続観測

後藤大輔¹、森本真司²、青木周司²、Prabir K. Patra³、中澤高清²

¹ 国立極地研究所

² 東北大学大学院理学研究科

³ 海洋開発研究機構

High-precision continuous measurements of the atmospheric oxygen/nitrogen ratio and atmospheric potential oxygen at Ny-Ålesund, Svalbard

Daisuke Goto¹, Shinji Morimoto², Shuji Aoki², Prabir K. Patra³ and Takakiyo Nakazawa²

¹ *National Institute of Polar Research*

² *Graduate School of Science, Tohoku University*

³ *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

Simultaneous observations of atmospheric O₂ (defined as O₂/N₂ ratio) and CO₂ concentrations provide valuable information for understanding the global carbon cycle. Atmospheric Potential Oxygen (APO) defined as $APO = O_2 + 1.1 \times CO_2$ (O₂ and CO₂ represent the O₂/N₂ ratio and the CO₂ concentration, respectively), which is conservative for land biospheric activities but variable by ocean-atmosphere O₂ exchange, can also be used to evaluate the air-sea O₂ flux. Therefore, several laboratories have developed precise measurement systems for the O₂/N₂ ratio and carried out systematic observations since the early 1990s. To elucidate the role of the Arctic region in the global carbon cycle in terms of atmospheric O₂, we developed a continuous measurement system using a differential fuel-cell O₂ analyzer, and initiated systematic observation at Ny-Ålesund (78°55'N, 11°56'E), Svalbard in November 2012 for the first continuous operation in the Arctic region. We report the results obtained from the first two years of measurement.

The O₂/N₂ ratio observed at Ny-Ålesund shows a clear seasonal cycle with peak-to-peak amplitude of about 140 per meg, which reaches a minimum in late March to early April and a maximum in August. The CO₂ concentration also varies seasonally, showing the amplitude of 17 ppm, but the phase is opposite to the O₂/N₂ ratio. APO shows the clear seasonal cycle similar to the O₂/N₂ ratio, and the amplitude is 55 per meg. In addition to the seasonal cycle, short-term variations on a timescale of several hours to several days are clearly observed. In spring and early summer, the O₂/N₂ ratio shows irregular fluctuations with the amplitude of 30–70 per meg (approximately corresponding to 6–15 ppm in mole fraction). Similar fluctuations are also found for the CO₂ concentration, but the phase is opposite to the O₂/N₂ ratio, and their amplitudes are 5 ppm at most. Irregular fluctuations of APO indicate the amplitude to be 20–50 per meg. From the comparison of backward trajectories of air parcels, as well as of the results of the tagged-tracer experiments using an atmospheric transport model, with the distribution of marine biological net primary production (NPP), it is suggested that such fluctuations of APO are closely related to O₂ emissions due to marine biological activities in the Norwegian Sea, the Greenland Sea and/or the Barents Sea. Sea-to-air O₂ flux is roughly estimated to be $1.4 \times 10^5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ based on a fluctuation event of APO observed on June 17–19, 2013. The net community production (NCP) expected from the estimated O₂ flux is estimated to be $1.2 \times 10^3 \text{ mgC m}^{-2} \text{day}^{-1}$, which is in good agreement with satellite-derived NPP within an order of magnitude. This suggests that in-situ continuous observation of APO at Ny-Ålesund is useful for estimating NCP and/or for validating the satellite-derived NPP data.

Acknowledgements

We are grateful to the Norwegian Polar Institute's staff for their help in our measurements at Ny-Ålesund.

北海道利尻島における大気中 CO₂, CH₄, CO と Black Carbon の変動

吉川久幸¹、遠嶋康徳²、入野智久¹、朱春茂³

¹北海道大学 環境科学院

²国立環境研究所 地球環境研究センター

³海洋研究開発機構 地球表層物質循環研究分野

Variations in atmospheric CO₂, CH₄, CO and BC on Rishiri Island, northern Japan

Hisayuki Yoshikawa¹, Yasunori Tohjima², Tomohisa Irino¹, and Chunmao Zhu³

¹Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

²Center for Global Environmental Research, National Studies for Environmental Studies

³Department of Environmental Geochemical Cycle Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Continuous measurements of atmospheric CO₂, CH₄, and CO were made using a Cavity Ring-Down Spectrometer (CRDS analyzer G1401, Picarro, USA) along with the measurements of equivalent black carbon (eBC), ²²²Rn, and O₃ in the seasonal snowpack area in northern Japan (Rishiri Island, 45°07'N, 141°11'E, 40 m asl) since December 2012. Atmospheric CO₂ varied from diurnal to inter-annual time scales. During a diurnal variation atmospheric CO₂ is positively correlated with ²²²Rn, indicating CO₂ and ²²²Rn emission into the nocturnal boundary layer. On the basis of positive relationship between CO₂ and ²²²Rn and ²²²Rn exhalation rate from Rishiri Island, CO₂ flux from ecosystem was estimated to be low in winter (less than 1 μmol m⁻² s⁻¹) and high in summer (larger than 4 μmol m⁻² s⁻¹) (Q₁₀=3.0, H Yoshikawa-Inoue and Zhu, 2013). Seasonally, the maximum CO₂ mixing ratio appeared in the beginning of April, and the minimum in the middle of August. This seasonal variation implied the natural cycle of terrestrial biological activities of the boreal forest, mostly in the east Eurasia (Zhu et al., 2015). During the diurnal variation, we found a good negative relationship between CO₂ and CH₄ throughout the year, suggesting CH₄ uptake by the surface. And we also found a good negative relationship between CO₂ and CO in spring. In summer CO remained fairly constant against the increases in CO₂ mixing ratio. These results suggest decomposition process caused by the biological activities and the (thermal) production of CO. Over a few days, atmospheric CO₂ sometimes showed a positive correlation with CH₄, CO, and eBC. High concentration events lasting over hours are caused by the long-range transport of air mass contaminated over the Eurasia continent. Back trajectory analysis indicates that air mass originated from latitudinal zones of Eurasia continent equal to or lower than Rishiri Island or moved from northwest over Eurasia continent to Rishiri Island. The former could be caused by the anthropogenic sources and the latter at least partially by biomass burning over Siberia (Zhu et al., 2014). It is necessary to measure these greenhouse gases and eBC to examine variations in sources in mid- to high- latitudes.

2012年12月より季節雪氷域である北海道利尻島(45°07'N、141°11'E、40 m asl)において、キャビティリングダウンスペクトル分析計(CRDS analyzer G1401, Picarro, USA)を用いて大気中の二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)及び一酸化炭素(CO)の測定を、ブラックカーボン(equivalent BC)、ラドン(²²²Rn)、オゾン(O₃)とともに継続的に行ってきた。大気中のCO₂は日から年々に至る時間スケールで変動した。例えば、日変化の際には大気中のCO₂濃度は²²²Rn濃度と正の相関を示しながら変動した。このことは、夜間の接地境界層への土壌と植生によるCO₂と²²²Rnの放出を示している。日変化におけるCO₂と²²²Rnの間の正の相関と利尻島からの²²²Rn放出フラックス評価に基づいて、陸域生態系からのCO₂フラックスは冬季に低く(<1 μmol m⁻² s⁻¹)、夏季に高い(>4 μmol m⁻² s⁻¹)ことが示された(Q₁₀=3.0 H, Yoshikawa-Inoue and Zhu, 2013)。大気中のCO₂濃度は4月初旬に極大、8月中旬に極小を示し、その振幅の年々変動は主にユーラシア大陸の陸上植生により支配されていた(Zhu et al., 2015)。日変化のなかでCH₄はほぼ年間を通じてCO₂と負の相関を示した。このことは、利尻島の地表面がCH₄のシンクであることを示している。その一方でCOは春季にCO₂との負の相関が明瞭に認められる傾向があったが、夏季にははっきりとした傾向は見られなかった。これらのことは、細菌によるCH₄の分解と熱的なCO生成過程の存在によるためと考えられた。また、少なくとも十数時間の間、大気中のCO₂は、CH₄、CO、そしてeBCと正の相関を示す事例があった。数時間にわたって持続するこうした高濃度イベントは、ユーラシア大陸で汚染の影響を受けた空気塊の長距離輸送によって引き起こされると解される。後方流跡線解析によれば、高濃度イベントを示した空気塊は、ユーラシア大陸上に利尻島と同じか低い緯度帯に起源を有する場合(人為起源発生源)と北西から利尻島に移動する事例があった。後者は少なくとも一部はシベリア森林火災の影響を受けていたと考えられる。今後の気候変化に伴う発生源の空間的、質的な変化を的確に捉えていくことが重要である。

北極域における大気中 N_2O isotopocule の時空間分布

豊田栄¹、渡辺由羽馬¹、町田敏暢²、遠嶋康徳²、森本真司³、Doug Worthy⁴、石島健太郎⁵、吉田尚弘^{1,6}

¹ 東工大総理工

² 国立環境研

³ 東北大院理

⁴ カナダ環境省研究所

⁵ 海洋研究開発機構

⁶ 東工大地球生命研

一酸化二窒素 (N_2O) は対流圏では CO_2 の約 220 倍の放射効率をもつ温室効果気体、成層圏では CFC の削減後最も重要なオゾン層破壊物質として知られている (Ravishankara et al., 2009)。全球平均濃度は 2011 年現在で約 324 ppb (nmol mol^{-1}) であり、 0.73 ppb yr^{-1} で増加している (IPCC, 2013)。 N_2O には土壌、海洋など天然の発生源と農業、バイオマス燃焼などの人為発生源が知られており、その多くが微生物過程と関わっている。主な消滅先は成層圏における光化学反応である。

N_2O は非対称の分子構造 (NNO) をもつため、分子内の ^{15}N 分布も考慮すると種々の同位体を含む分子種 (isotopocule) が存在する。これら isotopocule の自然存在比は N_2O の起源や生成・消滅過程の進行度に応じて変動することから、全球収支の推定に有効な指標である。これまでに 10-30 年間保存された中・高緯度大気試料や極域のフィルン (万年雪) 中に保存された過去 100 年におよぶ大気分析、あるいは低緯度大気モニタリングにより isotopocule 比の経年変化が報告され、 ^{14}N に富む「軽い」 N_2O を放出する発生源が N_2O 濃度の増加に寄与していることが明らかになった。しかし、大気中における継続的な観測例は限られている。

われわれは 1999 年から沖縄・波照間島、2005 年から西シベリア・ノボシビルスク上空において大気試料を採取して N_2O isotopocule 比の分析を行っているが、GRENE プロジェクトではさらにカナダ・チャーチルで採取された地表大気試料の分析も開始し、北極点を挟んでほぼ対称の位置にある北極圏の 2 地点 (Figure 1) における観測を行うとともに、測定を自動化して分析の効率化・高精度化を図った。ノボシビルスク (55°N , 83°E) では月 1 回、航空機を用いて高度 500m および 7000m の大気をガラス容器に加圧採取し、国立環境研で N_2O を含む各種微量成分の濃度分析を行った後、東工大にて isotopocule 分析に供した。チャーチル (59°N , 94°W) ではカナダ環境省研究所により週 2 回の地表サンプリングと各種微量成分の濃度分析が行われているが、このうち隔週で 1 試料を選んでガラス容器に分取しアイソトポキュル比を分析した。

ノボシビルスク高度 500m とチャーチルの N_2O 濃度および isotopocule 比の経年変化はほぼ一致し、濃度が約 0.8 ppbv yr^{-1} で増加したのに対し、バルク窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}^{\text{bulk}}$ 、 $^{14}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ に対する $^{14}\text{N}^{15}\text{N}^{16}\text{O}$ および $^{15}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ の存在比の平均) は約 0.04‰ yr^{-1} で減少した。一方、酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$)、 ^{15}N -site preference (SP, $^{14}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ に対する $^{14}\text{N}^{15}\text{N}^{16}\text{O}$ および $^{15}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ の存在比の差) の長期変化は非常に小さかった。 $\delta^{15}\text{N}^{\text{bulk}}$ の減少傾向はわれわれの波照間における観測やフィルンも含む他の地点での研究と概ね一致し、農業などの人為発生源の寄与が高まっていることが確かめられた。しかし、ノボシビルスクでは高度による差異がみられ、500m では 2014 年以降 $\delta^{15}\text{N}^{\text{bulk}}$ の減少傾向が強まる兆候がみられた。大気輸送モデルによるシミュレーション結果との比較も行いつつこの原因を議論する。

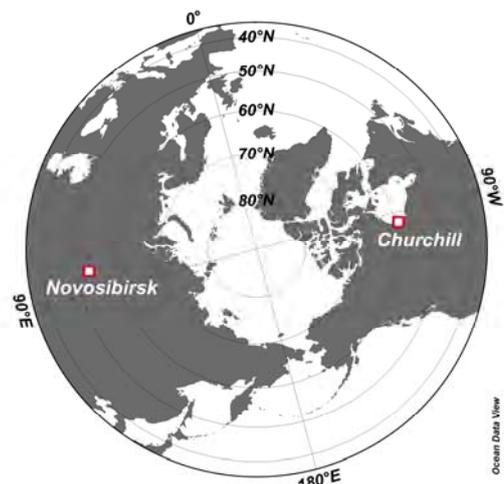


Figure 1. 本研究の試料採取地点

References

- 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 1535 pp., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Ravishankara, A. R., J. S. Daniel, and R. W. Portmann (2009), Nitrous oxide (N_2O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century, *Science*, 326, 123, doi:10.1126/science.1176985.

北極海における溶存メタンおよび一酸化二窒素の濃度と isotopocule の分布

豊田栄¹、工藤久志¹、Florian Breider¹、柿本嵩人¹、山田桂太¹、吉田尚弘^{1,2}、笹野大輔³、小杉如央³、石井雅男³、
吉川久幸⁴、亀山宗彦⁴、稲川満穂実⁴、西野茂人⁵、内田裕⁵、村田昌彦⁵

¹ 東工大院総理工

² 東工大地球生命研

³ 気象研

⁴ 北大院地球環境

⁵ 海洋研究開発機構

メタン (CH₄) と一酸化二窒素 (N₂O) は温室効果気体であり、N₂O は成層圏でもオゾン破壊物質として重要な気体である (IPCC, 2013; Ravishankara et al., 2009)。CH₄ と N₂O の大気中濃度増加の主要因は農業、化石燃料燃焼などの人為発生源と考えられているが、これら気体は生物過程でも生成・消滅し海洋を含む種々の発生源が知られており、全球収支には不確実性が残されている。北極海ではいくつかの海域において表層水中の CH₄ と N₂O が大気に対して過飽和で溶存していることが報告されているが (Kitidis et al., 2010 and references therein)、その生成機構や大気への発生源としての北極海の理解は進んでいない。本研究では、ベーリング海およびチャクチ海における溶存 CH₄ と N₂O の水平および鉛直分布を明らかにするとともに、isotopocule (¹³CH₄, CH₃D, ¹⁵NNO, N¹⁵NO, and NN¹⁸O のように希少な安定同位体で置換された分子種) の存在度に基づいてこれらの生成・消滅過程を解析することを目的とした。

海水試料は 2012-2015 年の 8-9 月に GRENE プロジェクトのみらい航海 (MR12-E03, MR13-06, MR14-05, MR15-03) を利用してそれぞれ 14-22 測点で採取された (Figure 1)。特に 2012 年はキャビティリングダウン分光法を用いた CH₄ 濃度の現場航走観測との比較を行うため広範囲で表層または水深 5m における採水を行った。溶存 CH₄ の濃度は GC-FID、isotopocule 比はガスクロマトグラフ-同位体比質量分析計 (GC-IRMS) を、溶存 N₂O は濃度、isotopocule 比ともに GC-IRMS を用いて測定した。

2012 および 2013 年に観測された CH₄ と N₂O の濃度はそれぞれ 0.5-48.5 nmol/kg、9.3-49.0 nmol/kg の範囲にあり、ほとんどの試料で大気に対して過飽和であった。最も濃度が高かったのは 2013 年の大陸棚の浅い海底 (72.7°N, 168.2°W) で、CH₄ と N₂O の飽和度はそれぞれ 1281%、306% であり、これまで北極海で報告された値よりも高かった。CH₄ と N₂O の濃度極大は水深の深い測点の表層または亜表層でも見られたが、極大となる深度は必ずしも一致しなかった。これらの結果は、CH₄ と N₂O の生成が海底堆積物中だけでなく、水柱でも起きていることを示唆する。isotopocule 比分析からは、N₂O の起源が浅い測点と深い測点では異なることが示された。

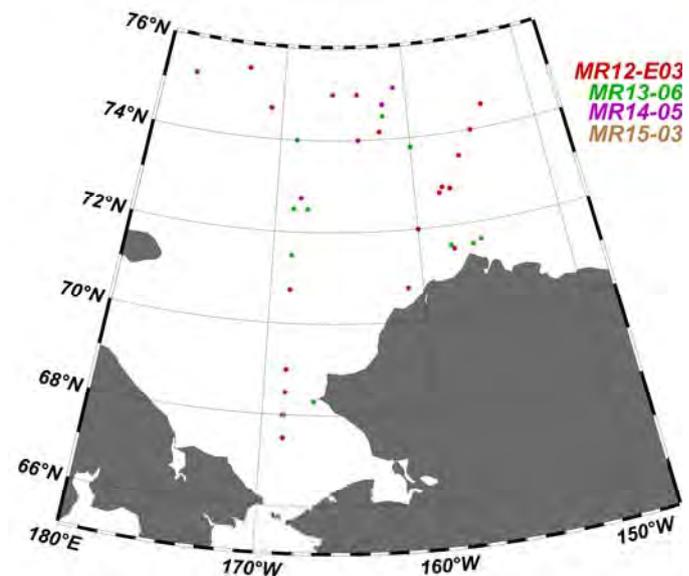


Figure 1. 本研究の試料採取地点。年ごとに色分けしてあるが、重なっている点もある。

References

- 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 1535 pp., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Kitidis, V., R. C. Upstill-Goddard, and L. G. Anderson (2010), Methane and nitrous oxide in surface water along the North-West Passage, Arctic Ocean, *Marine Chemistry*, 121(1-4), 80-86, doi:10.1016/j.marchem.2010.03.006.
- Ravishankara, A. R., J. S. Daniel, and R. W. Portmann (2009), Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century, *Science*, 326, 123, doi:10.1126/science.1176985.
- Yamagishi, H., M. B. Westley, B. N. Popp, S. Toyoda, N. Yoshida, S. Watanabe, K. Koba, and Y. Yamanaka (2007), Role of nitrification and denitrification on the nitrous oxide cycle in the eastern tropical North Pacific and Gulf of California, *J. Geophys. Res.: Biogeosci.*, 112(G2), G02015, doi:10.1029/2005JG000227.

Atmospheric CH₄ distributions observed during Arctic cruises of R/V Mirai in 2012-2015

Y. Tohjima¹, K. Katsumata¹, J. Matsushita², D. Sasano³, N. Kosugi³, S. Kameyama⁴, S. Ishidoya⁵, K. Ishijima⁶ and P. Patra⁶

¹National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

²National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan

³Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Tsukuba, Japan

⁴Hokkaido Univ., Sapporo, Japan

⁵National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japan

⁶Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokohama, Japan

Several researches pointed out the concern that methane emissions in the Arctic region would increase in near future due to global warming. To investigate the CH₄ potential sources in the Arctic region, continuous measurements of the atmospheric CH₄ were conducted onboard a R/V Mirai during 4 Arctic cruises: MR12-E03 (Sep. 3-Oct. 17, 2012), MR13-06 (Aug. 28-Oct. 17, 2013), MR14-05 (Aug. 31-Oct.10, 2014), MR15-03(Aug. 23-Oct. 5, 2015). The onboard measurements of the atmospheric CH₄, carbon dioxide (CO₂) and carbon monoxide (CO) were carried out by using a cavity ring-down spectroscopy (CRDS) analyzer (Picarro, G2401). The estimated analytical precisions were about 0.02 ppm (CO₂), 0.3 ppb (CH₄), and 1 ppb (CO) for the 5-min averages when the CRDS analyzer was in good condition. However, the precisions were considerably worse for CO during MR13-06 cruise, CO₂ and CO during MR15-03 cruise, and CH₄ during the latter half of the MR15-03 cruise because of malfunctions of the CRDS analyzer. It should be noted that the CO₂ and CO mixing ratios were sometimes contaminated by the own exhaust fumes while there was no significant influence from the exhaust fumes on the CH₄ mixing ratio. Such pollution events are easily distinguishable by the characteristics of the relative wind direction, the tight correlation of CO vs. CO₂, and large short-term (~a few second) variability of CO₂.

From these Arctic cruises, distribution of the atmospheric CH₄ in the Bering Sea, the Chukchi Sea, and the Canada Basin of the Arctic Ocean in September were mainly observed. For the individual cruises, relatively elevated CH₄ mixing ratios of several tens ppb were observed in the Bering Strait, Chukchi Sea, and off the northern Alaskan coast (Fig. 1). Since these elevated CH₄ peaks were generally associated with similar CO₂ peaks but not with CO peaks, it's unlikely that the ocean or combustion processes were the sources of the elevated CH₄. To examine the relationship between the CH₄ variations and the air mass transport, 3-day backward trajectories along the cruise tracks are computed by using the METEX (METeoro logical data Explorer, <http://db.cger.nies.go.jp/metex/>) developed by Zeng et al. (2003). The backward trajectory analysis suggests that the elevated CH₄ are associated with the air mass transport from Alaska or East Siberia, especially North Slope of Alaska (Fig. 2). Simulated CH₄ variations based on an atmospheric transport model and reported CH₄ flux map well capture the observed CH₄ variations, also suggesting that the most of elevated CH₄ were derived from the land sources. However, the amplitudes of the elevations are not necessarily reproduced well. These results suggest that the observed CH₄ spatiotemporal variations could be used to improve the CH₄ emissions from the Arctic regions.

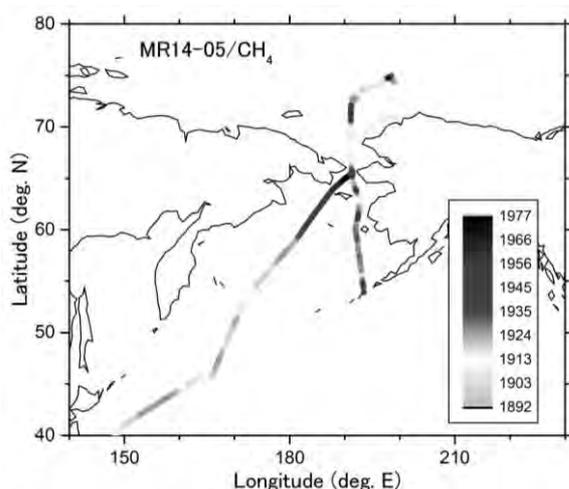


Fig. 1. CH₄ distribution along the track of the MR14-05 cruise.

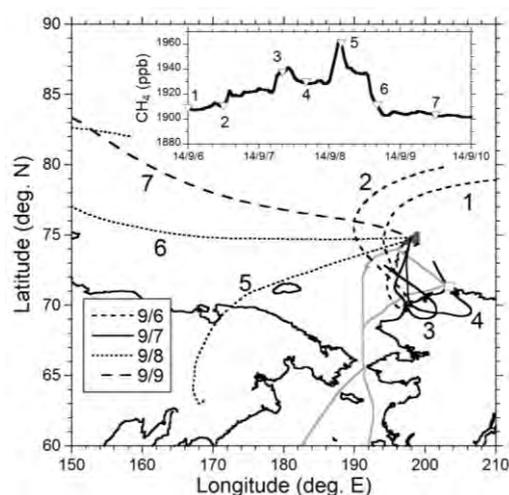


Fig. 2. 3-day backward trajectories along the cruise track for 4-day period during the MR14-05 Arctic cruise. Inserted figure shows time series of CH₄ mixing ratio.

References

Zeng, J., Y. Tohjima, Y. Fujinuma, H. Mukai, and M. Katsumoto, A study of trajectory quality using methane measurements from Hateruma Island, Atmos. Environ., 37, 1911-1919, 2003.

北極海 CO₂ フラックスの推定：広域分布と季節・経年変化

Mapping of the air–sea CO₂ flux in the Arctic Ocean and its surrounding seas: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability

Sayaka Yasunaka^{1,2}, Akihiko Murata^{1,2}, Eiji Watanabe², Melissa Chierici^{3,4}, Agneta Fransson⁵, Steven van Heuven⁶, Mario Hoppema⁷, Masao Ishii⁸, Truls Johannessen⁹, Naohiro Kosugi⁸, Siv K. Lauvset¹⁰, Jeremy T. Mathis¹¹, Shigeto Nishino², Abdirahman M. Omar¹², Are Olsen⁹, Daisuke Sasano⁸, Taro Takahashi¹³, Rik Wanninkhof¹⁴

¹Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, Japan

²Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, Japan

³Institute of Marine Research, Norway

⁴Department of Marine Sciences, University of Gothenburg, Sweden

⁵Norwegian Polar Institute, Fram Centre, Norway

⁶Royal Netherlands Institute for Sea Research, Marine Geology and Chemical Oceanography, Netherlands

⁷Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Climate Sciences Department, Germany

⁸Geochemistry and Oceanography Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Japan

⁹Geophysical Institute, University of Bergen and Bjerknes Centre for Climate Research, Norway

¹⁰Uni Research Climate, Bjerknes Centre for Climate Research, Norway

¹¹NOAA Arctic Research Program, USA

¹²Uni Research AS, Norway.

¹³Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, USA

¹⁴Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, National Oceanographic and Atmospheric Administration, USA

We produced 204 monthly maps of the air–sea CO₂ flux in the Arctic Ocean and its adjacent seas (north of 60°N) from January 1997 to December 2013, using the partial pressure of CO₂ in surface water (pCO_{2w}) estimates by a self-organizing map technique. The pCO_{2w} data were measured by shipboard underway measurements and calculated from alkalinity and total inorganic carbon of surface water samples. Subsequently, we investigated the basin-wide distribution and seasonal to interannual variability of the CO₂ fluxes. The pCO_{2w} undersaturation combined with less ice-cover and strong winds drives a flux of CO₂ into the Greenland/Norwegian, Barents and Chukchi seas, averaging 11 ± 3 mmol m⁻², 10 ± 4 mmol m⁻² day⁻¹, and 4 ± 4 mmol m⁻² day⁻¹, respectively, over the 17 year period. Annual CO₂ uptake of the Arctic Ocean was estimated to be 152 ± 173 TgC yr⁻¹. The seasonal variability of the CO₂ flux depends mainly on wind variability, and partly on sea-ice coverage. In winter, the CO₂ influx was large in the Greenland/Norwegian Sea because of strong winds, but small in the Chukchi Sea because of sea ice. In contrast, interannual variability was mostly related to the air–sea pCO₂ differences and partly to wind speed and sea-ice changes. In recent years, the CO₂ uptake in the Greenland/Norwegian Sea has increased and that in the southern part of the Barents Sea decreased due to increased and decreased air–sea pCO₂ differences, respectively.

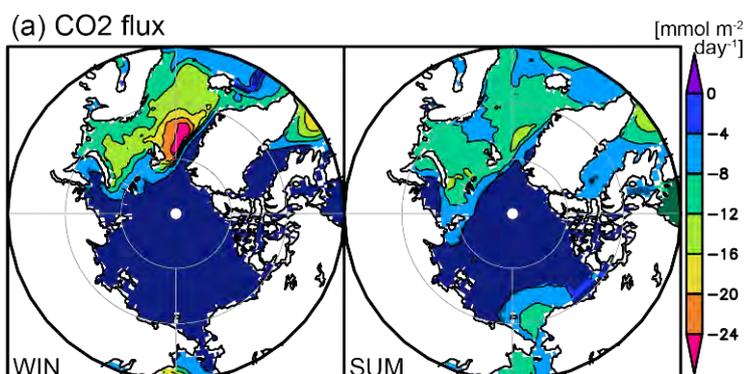


Figure 1. CO₂ flux [mmol m⁻² day⁻¹] from December to May (left) and from June to November (right.). Darker shades show values in grids where values were smaller than the uncertainty.

北極域における大気ポテンシャル酸素と大気海洋間酸素フラックスの船舶観測

石戸谷重之¹、内田裕²、笹野大輔³、小杉如央³、田口彰一¹、亀山宗彦⁴、石井雅男³、森本真司⁵、遠嶋康徳⁶、西野茂人²、村山昌平¹、青木周司⁵、石島健太郎²、藤田遼⁵、後藤大輔⁷、中澤高清⁵
¹産業技術総合研究所、²海洋研究開発機構、³気象研究所、⁴北海道大学、⁵東北大学、
⁶国立環境研究所、⁷国立極地研究所

Shipboard Observations of Atmospheric Potential Oxygen and air-sea O₂ flux in the northern North Pacific and the Arctic Ocean

Shigeyuki Ishidoya¹, Hiroshi Uchida², Daisuke Sasano³, Naohiro Kosugi³, Shoichi Taguchi¹, Sohiko Kameyama⁴, Masao Ishii³, Shinji Morimoto⁵, Yasunori Tohjima⁶, Shigeto Nishino², Shohei Murayama¹, Shuji Aoki⁵, Kentaro Ishijima², Ryo Fujita⁵, Daisuke Goto⁷ and Takakiyo Nakazawa⁵

¹*Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba 305-8569, Japan,*

²*Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka 237-0061, Japan,*

³*Meteorological Research Institute, Tsukuba 305-0052, Japan,*

⁴*Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan,*

⁵*Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan,*

⁶*National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan,*

⁷*National Institute of Polar Research, Tachikawa 190-8518, Japan.*

Simultaneous observations of Atmospheric Potential Oxygen (APO = O₂+1.1xCO₂) and air-sea O₂ flux were carried out onboard a research vessel MIRAI in the northern North Pacific and the Arctic Ocean in the autumns of 2012-2015. Air samples to measure the atmospheric δ(O₂/N₂) and CO₂ concentration to derive APO were collected on average once per day for the period September 5 – October 15, 2012, August 29 – October 6, 2013, September 1 – October 9, 2014 and August 27 – October 5, 2015. Dissolved oxygen concentration in the near-surface water was also measured continuously during these cruises, and converted to air-sea O₂ flux (F_{O₂-obs}). The relationships of δ(O₂/N₂) and simultaneously-measured δ¹³C with CO₂ concentration indicated that terrestrial biospheric activities and the air-sea O₂ flux are the main contributors to the observed variations in CO₂ concentration and APO, respectively. To compare the observed APO values with those simulated using the monthly air-sea O₂ flux climatology taken from the TransCom experimental protocol (F_{O₂-cli}), a simulation of APO using a 3-dimensional atmospheric transport model forced by F_{O₂-cli} was also carried out. The observed APO showed larger short-term variations than the simulated APO, and F_{O₂-obs} also showed larger variation than F_{O₂-cli}. A simple calculation indicated that the short-term variations in APO produced by using F_{O₂-obs} were comparable in magnitude to the observed, and the characteristics of the temporal variations in the observed APO were relatively well reproduced by the calculated APO. These results strongly suggest that the short-term variations seen in the observed APO is attributable to the short-term variations in the air-sea O₂ flux around the observation area. The F_{O₂-obs} values were systematically higher than the F_{O₂-cli} values in all cruises, with an average difference of about 0.3 μmolm⁻²s⁻¹. By uniformly mixing the sea-to-air O₂ flux of 0.3 μmolm⁻²s⁻¹ from the northern hemisphere ocean into the overlying atmosphere during the fall season, it was possible to explain the discrepancy between the observed and simulated seasonal APO cycles seen at Ny-Ålesund, Svalbard and Sendai, Japan in the fall season. These findings show that simultaneous ship observations of APO and F_{O₂-obs} are useful to validate regional air-sea O₂ fluxes in detail (Ishidoya et al., submitted).

Acknowledgements

We thank the captain, crew, and technical staffs of R/V MIRAI for their hard work in collecting the data and samples. We also thank J. Matsushita and K. Katsumata (National Institute for Environmental Studies) for their support to collect the data and samples.

References

Ishidoya, S. et al., Ship observations of atmospheric potential oxygen and regional air-sea O₂ flux in the Northern North Pacific and the Arctic Ocean, submitted to *Tellus B*.

北極海の海氷変動予測における海洋熱の重要性

中野渡 拓也^{1,2}, 猪上 淳^{1,3,4}, 佐藤 和敏¹, 菊地 隆³

¹ 国立極地研究所 国際北極環境研究センター

² 北海道大学 低温科学研究所

³ 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

⁴ 総合研究大学院大学

近年、日本を含むユーラシア大陸や北アメリカでは寒冬が頻発しており、その原因として北極海やその縁辺海の Marginal Ice Zone における大気への境界条件の重要性が指摘されている[Frankignoul et al. 2014]。実際、バレンツ海やカラ海などの海氷域の減少傾向に伴う熱源応答がこれらの大陸の寒冷化の原因であることを示唆する結果が、観測データの解析 [Honda et al. 2009, Inoue et al. 2012] や気候モデルによる感度実験 [Mori et al. 2014] によって得られている。我々の研究グループは北半球中緯度の冬季の寒冷化に先立つバレンツ海とベーリング海の海氷面積の変動要因について、海洋の熱的条件に着目した研究を行ってきた。過去 30 年間の大気や海洋のデータ解析の結果、外洋の海洋熱が 3 ヶ月から 1 年かけて岸に沿った海流によって輸送され、それが海氷面積の経年変動に直接影響を及ぼすことがわかった [Nakanowatari et al. 2014, 2015]。さらに、亜熱帯循環の西岸境界流における大気海洋相互作用や暖水域における対流活動が、大気の波動伝播によって間接的に海氷面積の張り出しや抑制に影響を及ぼすメカニズムも明らかになった。本成果報告会では、両大陸の寒冷化に密接に関連しているバレンツ海とベーリング海における海氷の経年変化の要因やメカニズムについて、これまでの研究成果を中心に発表する。

References

- Frankignoul, C. N. Sennéchaël, and P. Cauchy, 2014: Observed atmospheric response to cold season sea ice variability in the Arctic. *J. Climate*, 27, 1243-1254.
- Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08707, doi:10.1029/2008GL037079.
- Inoue, J., M. Hori, and K. Takaya, 2012: The role of Barents sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a Warm-Arctic Cold Siberian anomaly. *J. Climate*, 25, 2561-2568.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue, and M. Kimoto, 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nat. Geosci.* 7 869-873
- Nakanowatari T., K. Sato, and J. Inoue, 2014: Predictability of the Barents Sea ice in early winter: Remote effects of oceanic and atmospheric thermal conditions from the North Atlantic. *J. Climate*, 27, 8884-8901
- Nakanowatari T., J. Inoue, K. Sato, and T. Kikuchi, 2015: Summertime atmosphere-ocean preconditionings for the Bering Sea ice retreat and the following severe winters in North America. *Environ. Res. Lett.* 10, 094023, doi:10.1088/1748-9326/10/9/094023.

北極海バロー海底谷における流量、淡水、熱輸送量の長期変動

伊東素代、菊地隆、西野茂人
海洋研究開発機構

北極海では、地球温暖化の影響で、夏季の海水減少が顕著になっており、2007年以降はかつての5-7割まで海水面積が減り、今世紀半ばには、夏季の海氷域が消滅すると予測されている。中でもアラスカ、シベリア沖の太平洋側北極海は、特に海氷減少が著しい。この海域では、ベーリング海峡を通して、太平洋起源の水塊が流入し、熱、淡水、栄養塩が供給されている。バロー海底谷は、太平洋水の主要な流路上にあり、流量や熱輸送量の多い夏季は70%以上がこの海底谷を通して、海盆地に流出する。海洋研究開発機構では、2000年からバロー海底谷で、係留系による通年の流量、淡水、熱輸送量のモニタリングを行なっている。本研究では、2000年-2015年に実施した係留系観測データと、海洋地球研究船「みらい」や、アメリカ、カナダの観測船で実施した係留点を横切る断面でのCTD、ADCPデータを用いて(図1)、流量、淡水、熱輸送量の長期変動を調べることを目的とする。ここでは、淡水量は北極海の平均塩分(34.8psu)、熱量は海水の結氷温度($\sim -1.8^{\circ}\text{C}$)を基準とする、北極海で標準的な手法を用いる。

図2に2000年10月~2015年10月の流量、淡水、熱輸送量を示す。2010年以降のバロー海底谷の流量、淡水輸送量は2000-2008年と比べると、減少傾向にある。流量や淡水輸送量の変動は岸沿いの風の変動が原因であることが示されているため(Itoh et al., 2012, 2013)、北風が強かったことが原因と考えられる。また、ベーリング海峡の流量は近年、増加傾向にあるため(Woodgate et al., 2012)、ヘラルド海底谷などの西側の経路を通る流量が増加している可能性も示唆している。熱輸送量は、冬季はほぼ0、夏季に最大になる。これは、バロー海底谷では、冬季は結氷温度の冬季太平洋水、夏季は水温が $2-8^{\circ}\text{C}$ 程度まで達する夏季太平洋水が流入しているためである。熱輸送量は経年変動が大きく、北極海の水氷面積が少なかった2007、2010、2012年は熱輸送量も多い。熱輸送量の変動は、主に夏季の風と夏季太平洋水の水温変動で決まるが、2007年は主にチャクチ海の水氷減少による夏季太平洋水の水温上昇、2010年、2012年はそれに加えて夏季に北風が弱かったことが原因と示唆された。

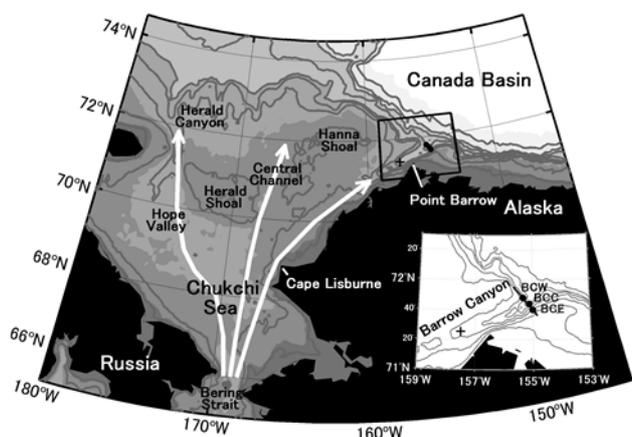


図1. チャクチ海の水底地形と係留点の位置。矢印はベーリング海峡からの流入水の流れの模式図。

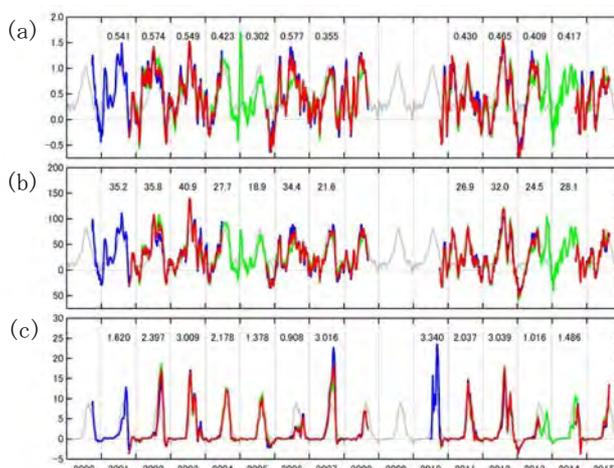


図2. バロー海底谷の(a)流量、(b)淡水、(c)熱輸送量。グレー線は2000-2015年の平均値。上部の数字は年平均値。

References

- Itoh, M., S. Nishino, Y. Kawaguchi, T. Kikuchi (2013), Barrow Canyon volume, heat, and freshwater fluxes revealed by long-term mooring observations between 2000 and 2008, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 4363-4379, doi:10.1002/jgrc.20290.
- Itoh, M., R. Pickart, T. Kikuchi, Y. Fukamachi, K. Ohshima, D. Simizu, K. Arrigoe, S. Vagle, J. He, C. Ashjian, J. Mathis, S. Nishino, C. Nobre (2015), Water properties, heat and volume fluxes of Pacific water in Barrow Canyon during summer 2010, *Deep-Sea Res. I*, doi:10.1016/j.dsr.2015.04.004.
- Woodgate, R., T. Weingartner, R. Lindsay (2012), Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L24603, doi:10.1029/2012GL054092

Water mass characteristics and their temporal changes in a biological hotspot in the southern Chukchi Sea

Shigeto Nishino¹, Takashi Kikuchi¹, Amane Fujiwara¹, Toru Hirawake², and Michio Aoyama^{3,4}

¹*Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

²*Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University*

³*Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

⁴*Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University*

We analysed mooring and ship-based hydrographic and biogeochemical data obtained from a Hope Valley biological hotspot in the southern Chukchi Sea. The moorings were deployed from 16 July 2012 to 19 July 2014, and data were captured during spring and fall blooms with high chlorophyll *a* concentrations. Turbidity increased and dissolved oxygen decreased in the bottom water at the mooring site before the fall bloom, suggesting an accumulation of particulate organic matter and its decomposition (nutrient regeneration) at the bottom. This event may have been a trigger for the fall bloom at this site. The bloom was maintained for 1 month in 2012 and for 2 months in 2013. The maintenance mechanism for the fall bloom was also studied by hydrographic and biogeochemical surveys in late summer to fall 2012 and 2013. Nutrient-rich water from the Bering Sea supplied nutrients to Hope Valley, although a reduction in nutrients may have occurred in 2012 by mixing of lower-nutrient water that would have remained on the Chukchi Sea shelf. In addition, nutrient regeneration at the bottom of Hope Valley could have increased nutrient concentrations and explained 60% of its nutrient content in the bottom water in fall 2012. The high nutrient content with the dome-like structure of the bottom water may have maintained the high primary productivity via the vertical nutrient supply from the bottom water, which is likely caused by wind-induced mixing at this site during the fall bloom. Primary productivity was $0.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in September 2012 and $1.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in September 2013. The lower productivity in 2012 was related to strong stratification caused by the high fraction of surface sea ice meltwater.

CryoSat-2/SIRAL 観測で明らかになった冬期北極海におけるボーフォート循環の変動

溝端浩平¹、渡邊 英嗣²、木村詞明³¹ 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科² 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター³ 国立極地研究所**Wintertime variability of the Beaufort Gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations**Kohei Mizobata¹, Eiji Watanabe² and Noriaki Kimura³¹ Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology² Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology³ National Institute of Polar Research

The variability of the Beaufort Gyre (BG) and its various impacts were previously documented. McPhee (2013) demonstrated that the geostrophic currents on the periphery of the BG between 2003 and 2011 were intensified relative to the climatological value. Proshutinsky *et al.* (2002) proposed a hypothesis that the BG accumulated freshwater mechanically because of Ekman convergence and the associated downwelling, and Proshutinsky *et al.* (2009) used long-term in situ measurements to provide observational evidence for that hypothesis. Morison *et al.* (2012) investigated in situ measurements and satellite data and concluded that the spatial and temporal variability of freshwater in the Arctic Ocean was caused by changes in the pathways of river runoff that are modulated by the Arctic Oscillation rather than the strength of the wind-driven BG circulation (i.e., deepening/shallowing of isohaline surface). In either case, determining the spatial and temporal variability of the BG and surrounding oceanic circulation patterns is crucial for understanding the freshwater content in the Arctic Ocean.

We processed the sea surface height measured by the SAR (Synthetic Aperture Radar) / Interferometric Radar Altimeter on board the CryoSat-2 (CS-2) and successfully estimated the monthly dynamic ocean topography (DOT) of the Arctic Ocean. The CS-2 monthly DOT showed the interannual and monthly variability of the BG during winter between 2010/2011 and 2014/2015. The northward flow at the western edge of the BG was primarily estimated over the Chukchi Borderland (CBL). However, the BG extended across the CBL, and the northward flow was estimated over the Mendeleev Ridge in the winter of 2012/2013. Our analyses revealed a significantly variable BG in response to changes in the sea surface stress field. Our analysis indicated that 1) sea ice motion acts as a driving force for the BG when sea ice motion was intensified during winter and 2) sea ice motion can also act as an inhibiting force for the BG when sea ice motion is weakened during winter. In addition, the relationship between the DOT, steric height and ocean bottom pressure implied that the DOT during winter responded to varying wind stresses through baroclinic and barotropic adjustments. According to a tracer experiment, we inferred that in the winter of 2012/2013, the Pacific-origin water carried into the BG through the Barrow Canyon was transported to the northern shelf and shelf break of the Chukchi Sea rather than the CBL, which is where the Pacific-origin water had been transported in the other years of the target period.

References

- McPhee, M. G., Intensification of geostrophic currents in the Canada Basin, Arctic Ocean, *J. Climate*, 26(10), 3130-3138. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00289.1, 2013.
- Morison, J., R. Kwok, C. Peralta-Ferriz, M. Alkire, I. Rigor, R. Andersen, and M. Steele, Changing Arctic Ocean freshwater pathways, *Nature*, 481(7379), 66–70. doi: 10.1038/nature10705, 2012.
- Proshutinsky, A., R. H. Bourke, and F. A. McLaughlin, The role of the Beaufort gyre in Arctic climate variability: seasonal to decadal climate scales, *Geophys. Res. Lett.*, 29(23), 2100. doi: 10.1029/2002GL015847, 2002.
- Proshutinsky, A., R. Krishfield, M. Timmermans, J. Toole, E. Carmack, F. McLaughlin, W. J. Williams, S. Zimmermann, M. Itoh, and K. Shimada, Beaufort gyre freshwater reservoir: state and variability from observations, *J. Geophys. Res. Oceans*, 114, C00A10. doi: 10.1029/2008JC005104, 2009.

A role of sea ice melt water on iron supply to surface water in the polar and the sub-polar Ocean

Naoya Kanna¹ and Jun Nishioka¹

¹*Institute of Low Temperature Sciences, Hokkaido University, Sapporo, 060-0819, Japan*

Massive utilization of nitrate in the surface layer in summer in the polar ocean in the Northern Hemisphere indicates sufficient supply of bioavailable iron into surface water. To reveal iron supply processes in the Arctic ocean and the sub-polar marginal sea, the Okhotsk Sea, in the early stage of biological increase, we investigated a roles of sea ice melt water on iron supply to surface phytoplankton community. First, we conducted surface towed fish clean sampling from the Bering sea shelf area, through the Bering strait, and around sea ice edge in the Chukchi Sea. Alkalinity was measured as tracer which can be used for classify the sources of fresh water, river discharge or sea ice melting. Judging from the potential alkalinity, sea ice melt water was clearly distributed around edge of the sea ice. Dissolved iron and total dissolvable iron concentration well correlated with a fraction of sea ice melt water, and iron concentration increased with increasing of the fraction. On the other hand, area of Alaskan coastal current (ACC), west coast of Alaska, both of river water and sea ice melt water existed and iron concentrations correlated with fraction of sum of river water and sea ice melt waters. Our estimate from the slope of the correlation indicate that the sea ice melt water have comparable impact on iron supply as river discharge. Second, we also conducted winter observation in the sea ice area of the southern Okhotsk Sea. Hydrographic observations were carried out at a station in deep basin (>900 m) of the southern Okhotsk Sea in late-November 2013 (absence of sea ice) and in mid-February 2014 (presence of sea ice). We observed a striking temporal change in surface mixed-layer Fe concentrations, from ~6.5 nM for total dissolvable iron and ~0.96 nM for dissolved iron in November, to ~62.5 nM for total dissolvable iron and ~3.37 nM for dissolved iron in February. The increases of the mixed-layer Fe concentrations in February coincided with a decrease in seawater salinity. A three-component mixing scheme of seawater, sea ice melt water, and Amur River water using relationship between alkalinity and salinity revealed that the low seawater salinity observed in the mixed-layer was affected by the sea ice melt water, not the Amur River water. The inventory which is released Fe to the mixed-layer from sea ice is estimated using the Fe profiles in November and February as the inventory of 7407 $\mu\text{mol m}^{-2}$ for total dissolvable iron and 375 $\mu\text{mol m}^{-2}$ for dissolved iron, quantitatively. These observational studies clearly indicate that sea ice melting is one of significant process for deliver micro-nutrient, iron, to the surface water in the seasonal ice zone.

Transport of trace metals (Mn, Fe, Ni, Zn and Cd) in the western Arctic Ocean (Chukchi Sea and Canada Basin) in summer 2012

Yoshiko Kondo^{1,2}, Hajime Obata³, Nanako Hioki⁴, Atsushi Ooki⁴, Shigeto Nishino⁵, Takashi Kikuchi⁵ and Kenshi Kuma⁴

¹*National Institute of Polar Research*

²*Graduate School of Fisheries Sciences and Environmental Studies, Nagasaki University*

³*Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo*

⁴*Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hokkaido University*

⁵*Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

Trace metals such as Fe, Mn, Ni, Zn and Cd are involved in numerous processes in the metabolisms for phytoplankton growth. In the Arctic Ocean, the continental shelf area comprises roughly one-third of its total area and accounts for approximately one-fifth of that of the world's ocean. Previous studies have revealed that the maximum of Fe concentration existed in the halocline waters with nutrients and dissolved organic matters, suggesting that the formation of cold and dense water in the halocline layer and the input from the continental shelf play the significant roles for Fe transport in the western Arctic Ocean (e.g., Hioki et al., 2014). On the other hand, there are only few data about the distributions of Zn, Cd, Ni and Mn in this region. In this study, distributions of dissolved and total dissolvable trace metals (Mn, Fe, Ni, Zn and Cd) were investigated in the western Arctic (Chukchi Sea and Canada Basin) in 2012 September to elucidate the mechanism of the transport of these metals in this region. We found concentration maxima not only of Fe, but also of the other trace metals in the halocline and/or near bottom waters with respect to both dissolved and total dissolvable fractions in the western Arctic Ocean. The distribution patterns were generally similar between dissolved and total dissolvable fractions for all trace metals. However, especially high concentration was observed in the near bottom water in the Chukchi Sea shelf with respect to total dissolvable Fe and Mn. On the other hand, Ni, Zn and Cd mainly existed as dissolved form. In this study area, the shelf sediments, melting sea-ice and river discharge are expected as the sources of trace metals as well as remineralization of organic matters. Among these potential sources, the remineralization is the common source for all metals measured in this study. Considering the maximum concentrations for Fe and Mn were found in the near bottom water in the Chukchi Sea shelf region, extra input such as sediments could be important. The relationship between the distance from sea-shelf and concentrations of dissolved trace metals showed that dissolved Fe and Mn in the halocline waters tended to decrease with distance logarithmically (especially in the lower halocline water), suggesting that distributions of dissolved Fe and Mn were mainly controlled by diffusion and mixing. Distributions of dissolved Cd and Zn were correlated well with phosphate concentration, suggesting that Zn and Cd were also transported to offshore via halocline water like as nutrients and dissolved organic matter. Since dissolved Ni concentration tended to be high in the surface mixed layer in this study area, the correlation with phosphate was poor. These results suggested the importance of the halocline water for the transport of Mn, Ni, Zn and Cd as well as Fe in the western Arctic during summer.

Reference

Hioki, N., K. Kuma, Y. Morita, R. Sasayama, A. Ooki, Y. Kondo, H. Obata, J. Nishioka, Y. Yamashita, S. Nishino, T. Kikuchi, M. Aoyama, Laterally spreading iron, humic-like dissolved organic matter and nutrients in cold, dense subsurface water of the Arctic Ocean, *Scientific Reports*, 4:6775 DOI:10.1038/srep06775, 2014.

**Distributions of volatile organic iodine compounds in the western Arctic Ocean
(Chukchi Sea and Canada Basin) in summer 2012 –a possibility of production in relation to the
degradation of organic matter**

Atsushi Ooki¹, Shuho Kawasaki¹, Shigeto Nishino², Takashi Kikuchi² and Kenshi Kuma¹

¹*Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University*

²*Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

We conducted a shipboard observation over the Chukchi Sea and the Canada Basin in the western Arctic Ocean in September and October 2012 to obtain vertical distributions of four volatile organic iodine compounds (VOIs) in seawater. The VOIs observed in this study were iodomethane (CH₃I), iodoethane (C₂H₅I), diiodomethane (CH₂I₂), and chloriodomethane (CH₂ClI). Maximum concentrations of the four VOIs were found in the bottom layer water over the Chukchi Sea shelf, in which layer the maximum concentration of ammonium (NH₄⁺) also occurred. A significant correlation was observed between C₂H₅I and NH₄⁺ (correlation coefficient R = 0.93, P < 0.01, n = 64) and between CH₃I and NH₄⁺ (R = 0.77, P < 0.01, n = 64), suggesting that the production of these VOIs increased with the degradation of organic matter. Over the northern Chukchi Sea shelf-slope area, concentration maxima of CH₂I₂, CH₂ClI, and CH₃I were found in the subsurface cold, dense water (CDW). A large nitrogen deficit (N deficit = NH₄⁺ + NO₂⁻ + NO₃⁻ - 16PO₃⁻) occurred simultaneously in this water, suggesting the production of the three VOIs in the sediment or the bottom layer water over the shelf, probably in association with the degradation of organic matter. We conclude that VOI production over the Chukchi Sea shelf can be largely attributed to the degradation of organic matter that is produced in the highly productive shelf water. High concentrations of CH₂ClI were also found in the Alaskan Coastal Water (ACW) from the Bering Strait to the surface of the northern Chukchi slope. The VOIs that originated at the Chukchi Sea shelf are expected to be laterally transported to the Arctic Ocean basin through the CDW and the surface ACW. The Chukchi Sea shelf was found to have the largest sea-to-air flux of CH₂ClI in the global ocean from tropical – polar ocean areas. Degradation of organic matter over the shallow continental shelf would have a great impact on iodine flux to the air, which might affect atmospheric ozone level.

Reference

- Ooki, A., Nomura, D., Nishino, S., Kikuchi, T., Yokouchi, Y., 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 (2015).
- Ooki, A., Kawasaki, S., Kuma, K., Nishino, S., Kikuchi, T., Concentration maxima of volatile organic iodine compounds in the bottom layer water of the cold, dense water over the Chukchi Sea in the western Arctic Ocean: a possibility of production in relation to the degradation of organic matter. *Biogeosciences*, 13, 1-13, doi:10.5194/bg-13-1-2016 (2016).

強風イベントに対する従属栄養性バクテリア群集の応答：
西部北極海チュクチ陸棚域における定点観測

内宮万里央^{1,3}、西野茂人²、小川浩史³、永田俊³

¹ 国立極地研究所

² 海洋研究開発機構

³ 東京大学大気海洋研究所

Strong wind events resulted in enhanced bacterial production in the Chukchi Shelf, western Arctic Ocean

Mario Uchimiya^{1,3}, Shigeto Nishino², Hiroshi Ogawa³ and Toshi Nagata³

¹ *National Institute of Polar Research*

² *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

³ *Atmospher and Ocean Research Institute, the University of Tokyo*

Recent studies have indicated that autumnal phytoplankton bloom is becoming more common in most of the Arctic regions because of the receding of sea-ice pack, which may allow more light penetration and vertical mixing driven by atmospheric forcing. However, it remains unclear how these changes in physical forcing may influence patterns in carbon fluxes mediated by the microbial loop in Arctic waters. This study examined temporal changes (time resolution, 6–24 hours) in heterotrophic bacterial production and abundance in the Chukchi Shelf, western Arctic Ocean, during the fixed-point observation conducted between 10 and 25 of September 2013. During this investigation period, strong wind events were followed by the occurrence of an autumnal phytoplankton bloom, which was presumably triggered by the enhanced upward nutrient fluxes induced by physical disturbances. In the layer above the pycnocline (<20–30 m), bacterial production and abundance increased with the increase of chlorophyll *a* concentration (Pearson's $r = 0.73–0.87$, $p < 0.05$). Bacterial production to primary production ratios were relatively high and constant throughout the observation period (average \pm SD, 0.13 ± 0.02 ; $n = 8$). Despite dynamic changes in phytoplankton and bacteria parameters, dissolved free (DFAA) and combined amino acid (DCAA) concentrations remained low (DFAA, 9.8 ± 4.7 nmol L⁻¹, DCAA, 236 ± 32 nmol L⁻¹). These results suggest that there was a tightly coupled flow of labile dissolved organic matter from phytoplankton to bacteria, which fueled high bacterial production during the bloom period. In the layer near the seafloor (56 m), enhanced bacterial production and abundance, which was accompanied by low transmittance, were observed following strong wind events (wind speed, >12 m s⁻¹). This indicates that wind-related turbulence near the seafloor caused bottom sediment resuspension, which in turn enhanced bacterial production. Taken together, our data demonstrate that, in both the upper and deeper layers, bacteria responded dynamically to autumnal strong wind events in the Chukchi Shelf, indicating that bacterially mediated flows of carbon and other bioelements represent a key component of biogeochemical cycles during the autumnal phytoplankton bloom in the Arctic regions.

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

夫津木亮介¹、平譚享^{2*}、菊地隆³、西野茂人³、笹野大輔⁴、石井雅夫⁴、鈴木光次⁵、渡邊豊⁵

¹北海道大学大学院水産科学院 (現在:株式会社PASCO)

²北海道大学大学院水産科学研究院、³海洋研究開発機構

⁴気象研究所 海洋・地球化学研究部、⁵北海道大学大学院地球環境科学研究院

* Corresponding author

近年の気候変動を考える上で、海洋が吸収するCO₂量を把握することは重要である。北極海は全海洋が年間に吸収するCO₂量の5 - 14%を占めており、特にチャクチ海はCO₂の吸収量が多いことで知られている。水温や風などの物理過程と海水中のCO₂分圧($p\text{CO}_2$)の関係についてはいくつか先行研究によって明らかになっているが、植物プランクトンによるCO₂吸収などの生物過程に関する定量的な研究例は少ない。また、CO₂は気体交換速度が非常に遅いため、長期的な生物過程の影響を考慮に入れる必要がある。衛星によって推定した基礎生産力は生物過程のパラメータとして有用であると考えられるが、推定精度を上げるためには基礎生産力を推定するアルゴリズムを本研究対象海域に最適化する必要がある。そこで本研究では、生物過程のパラメータとして基礎生産力を正確に推定するために基礎生産力推定アルゴリズムを対象海域用に最適化した後、西部北極圏海域の生物過程が $p\text{CO}_2$ にどの程度寄与しているか調べた。

基礎生産力推定アルゴリズムの最適化には、Hirawake et al. (2012)のデータセットに加えて、海洋地球研究船「みらい」の北極航海MR12-E03およびMR13-06、「おしよる丸」255次GRENE北極航海で取得した基礎生産、色素および光学観測データを用いた。また、生物過程と $p\text{CO}_2$ との関係については、海洋地球研究船「みらい」の北極航海MR12-E03において測定された、表層水温(SST)、塩分(SSS)、クロロフィルa濃度(Chl.a)、 $p\text{CO}_2$ を使用した。 $p\text{CO}_2$ はキャピティリングダウン分光分析装置(CRDS)を用い、1時間ごとに平均した後、SST、SSS、Chl.aと比較した。また、海氷密接度(SIC)と9日間移動平均の基礎生産量を衛星データより求め、開氷期間の平均基礎生産量および積算基礎生産量を算出した。さらに、それぞれの観測点をSST、SSS、Chl.a、開氷期間、開氷期間の平均基礎生産量および積算基礎生産量よりK-means法のクラスター解析を用いて4つに分類し、 $p\text{CO}_2$ との関係をそれぞれ調査した。

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。したがって、今回最適化をおこなったアルゴリズムは本研究対象海域の基礎生産力を推定するにあたり有用であることが示された。観測をおこなった9月~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は小さく、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唆された。以上の知見は、海洋環境の変化が激しく、CO₂の吸収量が多い西部北極圏海域のCO₂収支の解明に大きく寄与するものと考えられる。

北極海環境変動研究：海氷減少と海洋生態系の変化 おしよろ丸によるベーリング・チャクチ海観測航海報告

平譚 享¹、綿貫 豊¹、菊地 隆²、おしよろ丸乗船共同研究者

¹北海道大学大学院水産科学研究院

²独立行政法人海洋研究開発機構

Ecosystem studies of the Arctic Ocean declining Sea ice: Report on research cruise of T/S Oshoro Maru in the Bering and Chukchi Seas

Toru Hirawake¹, Yutaka Watanuki¹, Takashi Kikuchi² and co-researchers

¹Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University

²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

As a part of research project 'Ecosystem studies of the Arctic ocean declining Sea ice (ECOARCS)' under the GRENE Arctic Climate Change Research Project, research cruise by T/S Oshoro Maru of Hokkaido University in the Bering and Chukchi Seas was conducted in June and July 2013. CTD observations and water collections at 75 stations were carried out and biological and chemical parameters of the waters were analyzed. We also successfully operated sediment sampling, fish larvae collection, plankton collection, bottom trawl, ROV, dredge, and bio-optical measurements for satellite oceanography. The sea bird and mammal sighting surveys were also conducted from the upper bridge. The cruise has been completed almost of what we planned.

During the cruise, we investigated gradations in physical and chemical environments together with planktons and demersal fishes from open water to sea ice edge. We will report details of the observations and preliminary results from the cruise.

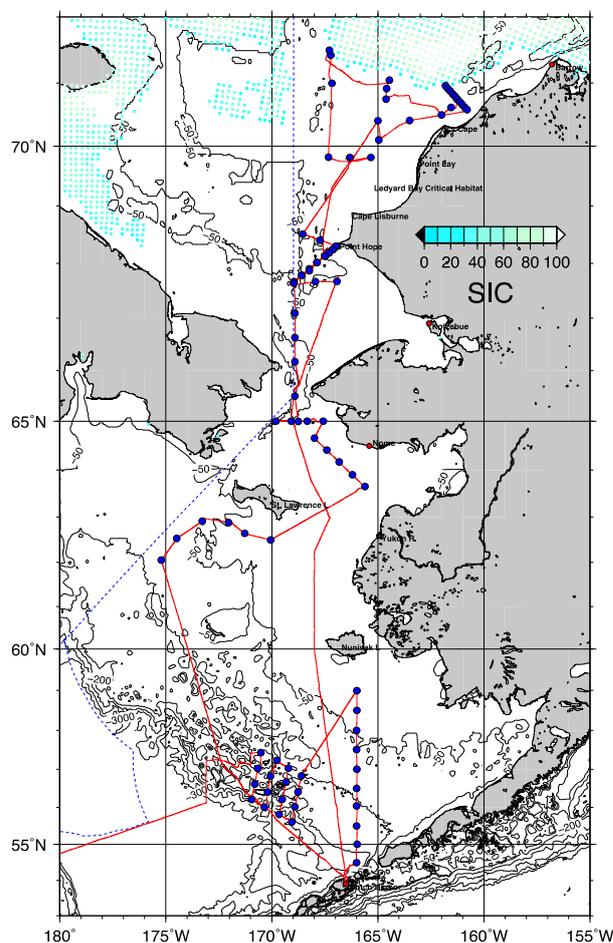


Figure 1. Map of sampling stations of cruise of T/S Oshoro Maru in the Bering and Chukchi Seas.

海水減少に対する基礎生産者の応答

藤原 周¹、平譚 享²、鈴木 光次³、Lisa Eisner⁴、西野 茂人¹、菊地 隆¹、今井 一郎²、齊藤 誠一²

¹ 海洋研究開発機構

² 北海道大学大学院水産科学研究院

³ 北海道大学大学院地球環境科学院

⁴ NOAA-Fisheries, Alaska Fisheries Science Center

北極海の海水縁では、春季から夏季にかけての海水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。短い日照時間や海水によって、冬季の基礎生産がほぼ皆無に等しい北極海では、春季、夏季の基礎生産が一年間の海洋生態系の生産全体を支える重要な役割を持つ。しかしながら、近年の海水減少や海水後退時期の変化は、生物生産の原点となる基礎生産の起点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に関する研究は時空間的に断片的なものが多く、海水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。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、主に太平洋側北極海において、海水変動（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、様々な海域・時期で調べた。ここでは、衛星データおよび現場観測によって得た、海水融解タイミングの変化が基礎生産者に及ぼす影響について得た新しい知見中心に紹介する。

本事業で開発したこれらのアルゴリズム (Fujiwara et al., 2011, Hirawake et al., 2012) 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、海水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。海水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 5 μ m 以上）の割合が増加することを示した (Figure 1)。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。これらの結果は、北極海の昇温による海水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., in-press)。

一方、チャクチ海の北部海盆域においても、海水減少に対する植物プランクトンの群集構造の応答を、2008-2010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年よりも海水後退の時期が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 (Figure 2)。2008年におけるハプト藻類の優占は、海水後退が早く、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、夏季の海水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)。

北極海の海水は一様な減少傾向は見せておらず、ベーリング海のように冬季の海表面積が増加傾向をみせる海域もある。一連の研究は、海水分布と基礎生産者の空間的一般性を定量化することで、将来の海洋環境に対する海洋生態系の応答の予測の一助となることが期待される。

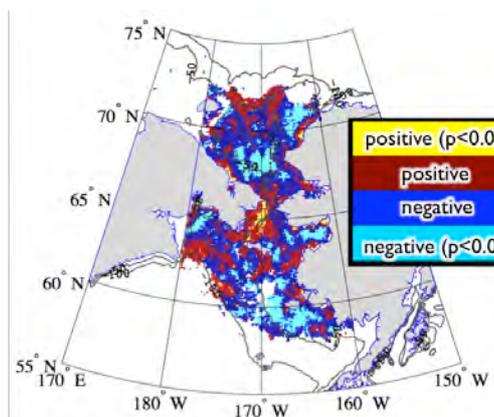


Figure 1. チャクチ海~ベーリング海陸棚域における海水融解タイミング (Julian-day) と春季ブルーム期の大型植物プランクトンサイズの順位相関係数分布。負の相関は海水融解日の早期化に伴い、春季ブルーム期に大型の植物プランクトンが増加することを表す。対象海域の7割の海域で有意な負の相関（18%の海域で有意：図中水色）を示した。

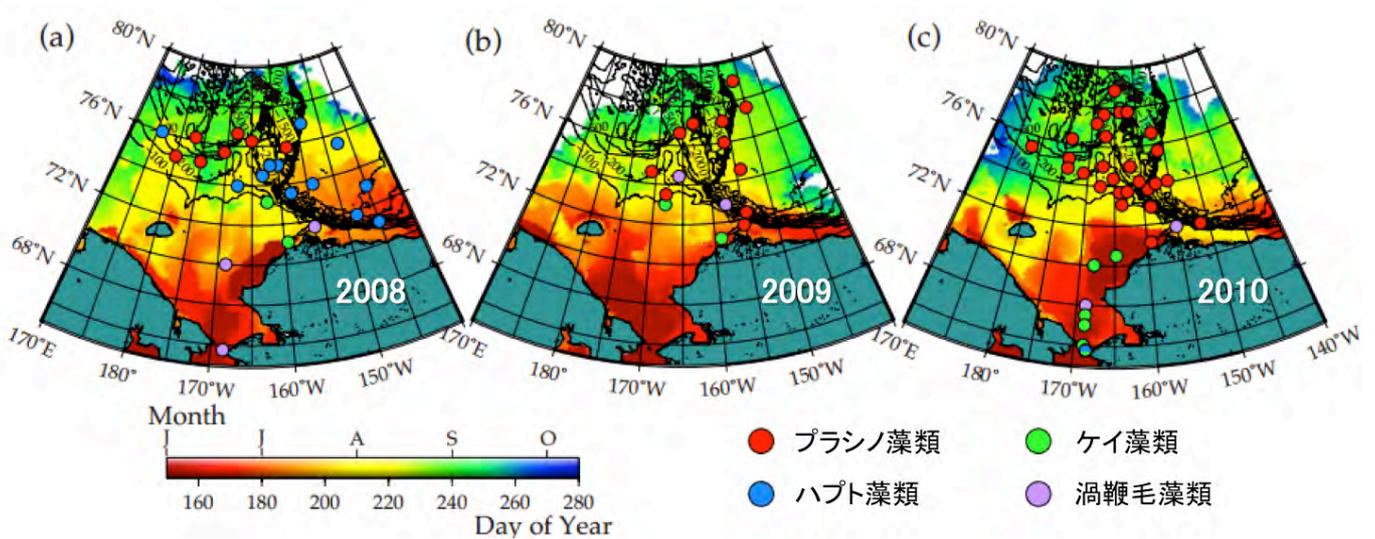


Figure 2. チャクチ海北部海盆域における、8-9月の優占植物プランクトン分類群と、海氷融解タイミング（カラーバー）分布の(a)2008、(b)2009、(c)2010年の比較図。2008年は1-2ヶ月早い海氷融解により高い表層水温が観測された。黒色コンターは水深を示す。

References

- Fujiwara, A., T. Hirawake, K. Suzuki, and S. -I. Saitoh. Remote sensing of size structure of phytoplankton communities using optical properties of the Chukchi and Bering Sea shelf region, *Biogeosciences*, 8, 3567-3580, 2011.
- Hirawake, T., K. Shinmyo, A. Fujiwara, and S. -I. Saitoh, Satellite remote sensing of primary productivity in the Bering and Chukchi Seas using an absorption-based approach, *ICES-J. Mar. Sci.*, 69, 1194-1204, doi:10.1093/icesjms/fss111, 2012.
- Fujiwara, A., T. Hirawake, K. Suzuki, I. Imai, and S. -I. Saitoh, Timing of sea ice retreat can alter phytoplankton community structure in the western Arctic Ocean, *Biogeosciences*, 11, 7, 1705-1716, 2014.
- Fujiwara, A., T. Hirawake, K. Suzuki, L. Eisner, I. Imai, S. Nishino, T. Kikuchi and S. -I. Saitoh, Influence of timing of sea ice retreat on phytoplankton size during marginal ice zone bloom period on the Chukchi and Bering shelves, *Biogeosciences*, inpress.

Distributional shifts in size structure of phytoplankton community

Hisatomo Waga¹, Toru Hirawake¹, Amane Fujiwara², Shigeto Nishino², Takashi Kikuchi²,
Koji Suzuki³, Shintaro Takao³ and Sei-Ichi Saitoh⁴

¹Faculty/Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, ²JAMSTEC

³Faculty/Graduate School of Earth Environment Sciences, Hokkaido University,

⁴Arctic Research Center, Hokkaido University

Species distribution is changing with various rate and direction in response to global warming (Poloczanska et al., 2013). Climate velocity, which is derived as the ratio of temporal trend to spatial gradient of sea surface temperature (SST), predicts species migration and persistence as an expectation how species track their thermal niches (Burrows et al., 2011). However, past studies exposed independent changes in species distribution from climate velocity due to the complexity of biological interactions (e.g., Philippart et al., 2011). In this study, we estimated the velocity of shifts in phytoplankton size structure using remote sensing data to predict species distributional shifts through spatiotemporal changes in food web structure. Chlorophyll Size Distribution (CSD) model was developed by quantitating the relationships between size structure of phytoplankton community and spectral feature of phytoplankton absorption coefficient ($a_{ph}(\lambda)$) (Wang et al., 2015), and validation results suggested that the exponent of CSD (CSD slope) which describes synoptic size structure of phytoplankton community was derived with sufficient accuracy (RMSE = 26.6%). When comparing the velocities of CSD slope and SST, interesting differences in rate and direction were found. For instance, latitudinal patterns showed high velocities at high and low latitudes in both CSD slope and SST, while the median rate of velocity of CSD slope (92.1 km decade⁻¹) was approximately six times higher than that of SST (13.4 km decade⁻¹). In addition, direction of shifts suggest that species are required to shift their distribution toward not limited to simple pole-ward migration, and some regions exhibit opposite direction between the velocity of CSD slope and SST. These findings imply that combined approach, both together the velocity of phytoplankton size structure and that of SST, may produce more accurate prediction of species distributional shifts than existing studies which considering only variations in specie thermal niches. Our results could contribute to generate global and regional maps of the expected rate and directions of species distribution now and future.

References

- Burrows, M. T., Schoeman, D. S., Buckley, L. B., Moore, P., Poloczanska, E. S., *et al.*: The Pace of Shifting Climate in Marine and Terrestrial Ecosystems, *Science*, 334(6056), 652–655, doi:10.1126/science.1210288, 2011.
- Philippart, C., Anadón, R. and Danovaro, R.: Impacts of climate change on European marine ecosystems: observations, expectations and indicators, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 2011.
- Poloczanska, E. S., Brown, C. J., Sydeman, W. J., Kiessling, W., *et al.*: Global imprint of climate change on marine life, *Nat. Clim. Chang.*, 3(10), 919–925, doi:10.1038/nclimate1958, 2013.
- Wang, S., Ishizaka, J., Hirawake, T., Watanabe, Y., *et al.*: Remote estimation of phytoplankton size fractions using the spectral shape of light absorption, *Opt. Express*, 23(8), 10301–10318, doi:10.1364/OE.23.010301, 2015.

チャクチ海南部における動物プランクトン量の季節変動

喜多村稔¹、甘糟和男²、西野茂人¹、菊池隆¹

¹海洋研究開発機構

²東京海洋大学

北極海における海水減少などの環境変化は海洋生物群集に大きな影響を与え、実際に、基礎生産の増加、ベントス群集のバイオマスと組成の変化、魚類分布域の北上、索餌海域として北極海を利用するシャチ個体数の増加などがすでに報告されている。海洋生態系を構成する様々な分類群に変化が現れている事実は、北極海の海洋生態系も大きく変化している、あるいは今後大きく変化することを示唆している。北極海沿岸部における海洋生態系の特徴に、基礎生産産物のほとんどが水柱中で消費されることなく海底に沈降し、ベントス群集の生産を支えている Pelagic-benthic coupling がある。そしてこの coupling は、ベーリング海北部やチャクチ海で特に強固であると考えられてきた。これは水柱中の動物プランクトン現存量の少なさに由来するが、北極海における動物プランクトンの時系列研究は極めて少ない。今後の動物プランクトン動態を予測するためには、現状の動物プランクトンに関する基礎的な生物・生態的知見の蓄積が必要である。本研究では、バイオマスの季節変動特性を明らかにし、動物プランクトン動態に影響を与える環境要因と現状の Pelagic-benthic coupling について考察した。

複数の周波数を有するエコーサウンダー（Acoustic Zooplankton Fish Profiler, AZFP, ASL Environmental Sciences Inc.）をチャクチ海南部（67°42'N, 168°50'W, 水深 50m または 68°02'N, 168°50'W, 水深 59m）に 2012 年 7 月 16 日から 2014 年 7 月 19 日までの 2 年間、海底上 7m に上向きに係留し音響データを収録した。サンプリング間隔は 1 または 2 分毎、採集層厚は 0.5 または 0.2m である。AZFP は 4 つの周波数（125, 200, 455, 769 kHz）を使った測定が可能であるが、送波器に不具合があったため 455 および 769 kHz は使えなかった。また、10m 以浅は波浪に伴う気泡や季節海水の影響を強く受けていたため、解析にあたってデータを用いなかった。125 および 200 kHz それぞれを用いて収録された音響データから、体積散乱強度（Sv）およびこれを鉛直方向に積算した面積散乱強度（Sa）を算出した。Sa あるいは Sv 変動に影響を与える環境要因を考察するために、AZFP の係留用フレームに各種センサーを取り付けて底層における水温・塩分・溶存酸素濃度・濁度・クロロフィル蛍光の環境変動を、衛星観測から海水密度と表層水温をモニターした。さらに、係留系の回収・再設置航海時（7, 9, 10 月）に、係留点近傍でプランクトンネット（口径 80cm、目合い 0.33mm）の鉛直曳きを行い、音響データを解釈するために生物相を明らかにした。

ネット試料を使ったバイオマス組成から、係留海域に卓越し音響散乱に寄与するのはカイアシ類とオキアミ類であることが明らかになった。実測した両分類群の体長・アスペクト比（幅/体長）および既往の密度比・音速比・遊泳姿勢（角度）を理論モデルにあてはめ、散乱体別に周波数とターゲットストレングスの関係を検討したところ、200kHz と 125 kHz の Sv 差から小型動物プランクトン（体長 3mm 程度、> 5 dB）、大型動物プランクトン（体長 7mm 以上、0~5 dB）、有鰾魚(< 0 dB)、気泡(< -5 dB) の 4 者に分離できることが示唆された。この Sv 差を使って、秋季は大型動物プランクトンが、冬季~春季には小型動物プランクトンが卓越し、有鰾魚は主として夏から秋にかけて出現していたものと考えられた。バルク動物プランクトンバイオマスの指標となる Sa の季節変化は、秋季に最も高く、春季に最低を記録した。両年共に 5 月末、Sa と底層水温は同期して上昇したが、海水融解およびクロロフィル蛍光増加のタイミングと Sa 上昇は同期しなかった。この時期動物プランクトンは、昼夜ともに下層に多く分布して日周鉛直移動を行っておらず、表層ではなく底層の環境変化（水温上昇）がきっかけで動物プランクトンの活性が高まり、バイオマス上昇に結びついた可能性がある。植物プランクトンの春季ブルームは 5~6 月に認められたが、この時期 Sa はまだ増加に転じたばかりで値も低く、上記の通り下層に多く分布していた。これらより、ブルーム期には動物プランクトンの植物プランクトンに対する摂餌圧は低く、基礎生産産物の水柱中での消費は低いものと考えられた。ベーリング海の Pelagic-benthic coupling は近年弱まっているが、カナダ多島海では未だ強固であると報告されている。本研究の結果は、カナダ多島海同様にチャクチ海南部においても Pelagic-benthic coupling は強く働いていることを示唆している。

Characteristics of the summer decapod larvae community through Bering and Chukchi Seas

Jose M. Landeira¹, Kohei Matsuno², Atsushi Yamaguchi¹, Toru Hirawake¹, Takashi Kikuchi³

¹Graduate School of Fisheries Science, Hokkaido University

²National Institute of Polar Research

³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Arctic Pacific is experiencing profound ecosystem changes due to human (direct and indirect) pressure, including global warming and exploitation of marine resources. In this sense, warming and reduction of summer sea-ice cover have large implications for the ecosystem functioning, likely related with alterations in growth, abundance, distribution and phenology of marine organisms. Moreover, Bering and Chukchi Seas are among the most productive ecosystems and sustain one of the largest fisheries industry. The overfishing has led to the collapse of crab fisheries in the southeastern Bering Sea since early 1980s, closing most of the stocks for harvesting. The new scenario of warming and sea-ice retreat open new fishery perspective, since northern unexploited areas are now more accessible to the fishing vessels. Therefore, it is necessary to study the current state of the Arctic populations to predict ongoing changes related with both global warming and fishing pressure and so, be able to make decisions for ecosystem management. Most studies in this region are mainly based on benthic adult populations while little is known for planktonic larval stages. During the larval phase the highest mortality rate (90%) of the life cycle occurs, so it is a key issue to understand the population dynamics for the fisheries management. Recently, reduction of the ice-covered area during summer become pronounced and its effects on mesozooplankton community has already been reported, while no information is available about how the decapod larvae response to such drastic environmental changes. This study analyzes zooplankton samples from Bering Sea to Chukchi Sea during the consecutive summers of 2007 and 2008 to evaluate changes in decapod larvae community in this region.

Zooplankton samples were collected by vertical tows of NORPAC net (mesh size: 315 μm) at 138 stations in the Bering and Chukchi Seas from 20 July to 13 August of 2007 and from 4 June to 13 July of 2008. Bottom trawls were made at 15 stations covering the same area. At each station, CTD casts were made and chlorophyll concentrations were measured using the water from Niskin bottle samples. Plankton samples were preserved with 5% formalin seawater immediately after collection. Bottom trawl samples were sorted, identified and weighed to calculate the CPUE (kg h^{-1}). In the land laboratory, all decapod larvae were sorted and identified to species level from plankton samples. To compute larval abundance, all counts were converted to total number of individuals per square meter of sea surface area (ind. m^{-2}). For the numerically dominant species: snow crab (*Chionoectes opilio*), the carapace length of zoea I, II, and megalopa (ZI, ZII, M) were measured by eyepiece micrometer.

In total, 8 families, 11 genera, and 18 species were identified. For both years, the most dominant species/taxa were the hermit crabs *Pagurus* spp., followed by the spider crab *Hyas* spp., and the commercially important tanner crab (*Chionoectes bairdi*) and snow crab (*C. opilio*) were also dominant. For most of the species, the abundances were greater during 2008 than 2007 (mean abundance was 90 ind. m^{-2} in 2008 while 49 ind. m^{-2} in 2007). Species diversity was also higher in 2008. Most of the species occurred throughout the region, while *C. bairdi* was restricted to the southeastern Bering Sea shelf. During 2008, larval abundance of most decapod species were higher in the Chukchi Sea. Regarding larval stages, *C. bairdi*, *C. opilio*, and *Hyas* spp. dominated by earlier development stages in 2008 larval stages than those of 2007 ($p < 0.01$, *U*-test). The body size of *C. opilio* showed a significant latitudinal pattern, in which larger carapace length occurred at higher latitudes for ZI, ZII, M. The analysis of environmental parameters showed that ZI had highly significant negative correlation with temperature ($p < 0.001$), ZII had no correlation with temperature while had positive correlation with chlorophyll *a* ($p < 0.05$), whereas M had no correlation with any of these environmental parameters. Concerning benthic adults collected by bottom trawl, *C. bairdi* dominated the catches in the southeastern Bering Sea shelf, *C. opilio* were particularly abundant around St. Lawrence Islands and hermit crabs dominated the samples in the Chukchi Sea. In general, the distribution and composition of benthic adults corresponded with those of planktonic larvae.

Annual changes in abundance and developmental stage structure of planktonic larvae seem to be related to the one-month delay in sampling period (thus, July-August in 2007 while June-July in 2008) and not determined by the contrast environmental conditions observed in both years. In fact, the results suggest a similar seasonal timing of larval release for both years. To detect phenological changes in response to climate change, a larger time-series sampling is needed in the future. However, it seems clear that changes in temperature conditions can modify the body size of early larvae (ZI) at higher latitudes, and hence their swimming, foraging and predator avoidance in the planktonic phase.

北部ベーリング海およびチャクチ海における 北極海産・太平洋産カイアシ類の分布とその環境について

佐々木裕子^{1,2}、松野孝平^{1,2}、藤原周³、大額実咲⁴、山口篤²、上野洋路²、綿貫豊²、菊地隆³

¹ 国立極地研究所国際北極環境研究センター

² 北海道大学大学院水産科学研究院

³ 海洋研究開発機構

⁴ 北海道大学大学院環境科学院

西部北極海では、海氷の融解とベーリング海峡から流入する太平洋系水がカイアシ類の分布に影響を与えると考えられている (Matsuno et al. 2011)。カイアシ類は同海域の食物網において非常に重要であるため、これらの環境の影響を定量化し、将来的な気候変動に対する応答を明らかにする必要がある。そこで本研究では、北部ベーリング海およびチャクチ海におけるカイアシ類分布と海洋環境との関係を明らかにすることを目的とした。カイアシ類および環境データは、北海道大学水産学部附属練習船おしよろ丸の 2007、2008 年、2013 年夏季の航海で取得されたものを使用した。NORPAC ネットで採集されたカイアシ類を北極海産大型種、北極海産小型種と太平洋産種に分類し、個体数を計数した。ネットサンプリングと同時に実施された CTD 観測より塩分、水温、密度を、さらに採水しクロロフィル *a* 濃度を求めた。マイクロ波衛星リモートセンシングから得た日平均海氷密接度より、サンプリングが行われた地点の海氷融解日を求めた後、1991–2013 年の海氷融解日に対するアノマリーを算出した。同海域の水塊特性を調べるために、鉛直方向の密度勾配が最大になる深度を求め、その上下で水温、塩分、クロロフィル *a* 濃度を平均した。さらに、最大密度勾配、上下層の水温と塩分の 5 つの変数を用いて主成分分析を行い、同海域の水塊構造を示す 3 つの主成分を得た。この 3 つの主成分 (水塊構造 PC1-3) と、海氷融解日アノマリー (aTSR)、上下層のクロロフィル *a* 濃度 (Chl_{UPP}・Chl_{BOT})、水深 (Bdepth) を説明変数、各カイアシ類の個体数を応答変数として一般化加法モデルを用いてハビタットモデルを構築した。赤池情報量規準を用いて最適モデルの選択を行ったところ、全ての種の最適モデルで海氷融解日アノマリー、水塊構造、下層クロロフィル *a* 濃度、水深が説明変数として選択された (Table 1)。北極海産大型種の個体数が多かった地点の水塊構造は、下層に高塩分の水塊 (Anadyr Water など) がある、または上層に低温底塩分の水塊 (海氷融解水)、下層に低温高塩分の水塊 (Anadyr Water や Bering Shelf Anadyr Water) の組み合わせであった。また、北極海産小型種の個体数が多かった地点の水塊構造は、上層に高温高塩分の水塊 (Bering Shelf water など)、下層に低温高塩分水の組み合わせであった。一方で、太平洋産種が多かった地点の水塊構造は上層に高温高塩分の水塊、下層に低温高塩分の水塊の組み合わせであった。また、水深が浅い地点に比べて、深い地点の方がカイアシ類の個体数が多かった。クロロフィル *a* 濃度は全ての種の最適モデルで選択されていたが、明確な傾向は見られなかった。海氷融解日が早くなった地点では全ての種の個体数が多い傾向が見られ、これは海氷融解の早期化がカイアシ類の個体数増加につながるということを示していると考えられる。これまで、こうした動物プランクトンの分布と環境との関係の解明には、クラスター化された海洋環境が用いられてきた (Eisner et al., 2013; Ershova et al., 2015)。しかしながら、クラスター化された値では、モデルを用いて定量的な解析をすることは難しい。本研究では、サンプリング地点の水塊の組み合わせを数値化することで、カイアシ類の空間分布と水塊構造との関係を定量化することができた。また、本研究は、海氷融解日の早期化がカイアシ類の個体数増加につながるということを定量的に示した。

Table 1. 最適モデル

応答変数	最適モデル	Deviance Explained (%)	Observed vs.
			Fitted R ²
北極海産大型種	s(aTSR)+s(PC1)+s(PC2)+s(PC3)+s(Chl.a _{UPP})+s(Chl.a _{BOT})+s(Bdepth)+ε	92.4	0.94
北極海産小型種	s(aTSR)+s(PC1)+s(PC3)+s(Chl.a _{UPP})+s(Chl.a _{BOT})+s(Bdepth)+ε	89.9	0.88
太平洋産種	s(aTSR)+s(PC1)+s(PC2)+s(PC3)+s(Chl.a _{BOT})+s(Bdepth)+ε	75.3	0.38

References

- Eisner, L., Hillgruber, N., Martinson, E., and Maselko, J.: Pelagic fish and zooplankton species assemblages in relation to water mass characteristics in the northern Bering and southeast Chukchi seas, *Polar Biol.*, 36, 87-113, 2013.
- Ershova, E. A., Hopcroft, R. R., and Kosobokova, K. N.: Inter-annual variability of summer mesozooplankton communities of the western Chukchi Sea: 2004–2012, *Polar Biol.*, 38, 1461-1481, 2015.
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Hirawake, T., and Imai, I.: Year-to-year changes of the mesozooplankton community in the Chukchi Sea during summers of 1991, 1992 and 2007, 2008, *Polar Biol.*, 34, 1349-1360, 2011.

北部ベーリング海・チャクチ海における ホッキョクダラ (*Boreogadus saida*) 仔魚の分布と海洋環境との関係

河野唯¹、佐々木裕子^{1,2}、栗原縁³、藤原周⁴、山本潤⁵、桜井泰憲¹

¹ 北海道大学大学院水産科学院

² 国立極地研究所国際北極環境研究センター

³ 株式会社エコニクス

⁴ 海洋研究開発機構

⁵ 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター

ホッキョクダラ (*Boreogadus saida*) は、タラ科魚類の中で最も寒冷な海に適応している。本種は生物量も多く、動物プランクトンと海鳥、海棲哺乳類を繋ぐ栄養段階にあることから、北極海とその縁辺海における鍵種であると言われている (Hop *et al.* 2013)。また、本種は海氷下で産卵し、海氷融解とともにふ化することが知られており (Rass 1968)、海氷に依存した再生産を行なう。よって本種の初期生活史は海氷と密接な関係があることが予測されるが、実際の再生産海域での分布や初期生態については明らかにされていない。そこで本研究では、本種の野生下での分布状況から海洋環境との関係を調べることを目的とした。解析に用いたホッキョクダラ仔魚サンプルは、北海道大学水産学部練習船おしよろ丸が 2008 年、2013 年の夏季に北部ベーリング海・チャクチ海にてボンゴネット (口径 0.7 m、目合い 0.5 mm) を用いて採集した。仔魚が分布していた水柱の特徴を調べるために、仔魚採集地点では CTD 観測を実施し、水温・塩分の鉛直プロファイルより表層水温・塩分 (SST・SSS) および水柱の水温・塩分最頻値 (Ftemp・Fsal) を求めた。さらに、本種と海氷融解タイミングとの関係を調べるために、衛星データを用いて採集地点の海氷融解日からの経過日数 (dSRT) を調べた。採集地点によって、本種の密度が大きく異なっていた (0.0—70.0 inds. m⁻²) ため、密度 4.9 inds. m⁻² を閾値として閾値以下の地点を低密度地点、閾値以上の地点を高密度地点とした。低密度地点は Norton Sound および St. Lawrence Island 南部に、高密度地点はチャクチ海北部海域周辺に存在していた (Figure 1)。低密度地点と高密度地点の海洋環境を比較した結果、SST・SSS が低く、dSRT が短い地点でホッキョクダラ密度が高く、逆に SST・SSS が高く、dSRT が長い地点でホッキョクダラ密度が低い傾向が見られた ($p < 0.05$)。水柱の環境には統計的な差はなかったが、高密度地点が存在していた地点は Ftemp が低かった (-2.0–0.5 °C)。さらに、ホッキョクダラと海氷の関係を詳しく調べると、dSRT が短い地点では密度が低く、長い地点では密度が高いという弱い負の相関関係 ($r = -0.49, p < 0.01$) がみられた。また、dSRT が短い地点では全長が小さく、長い地点では全長が大きいうという正の相関関係 ($r = 0.55, p < 0.01$) もあることが明らかになった。これらは、ホッキョクダラが開氷直後の海域で孵化していることを示唆している。また、海氷下で孵化していることから、表層の環境が本種の分布に影響していると推測されてきた。しかしながら、過去の室内実験の結果より、ホッキョクダラの適水温は 0.5 °C 以下 (Sakurai *et al.* 1998) と言われており、本研究のホッキョクダラ高密度地点の SST の範囲は適水温の範囲を大きく超えていた。一方で、高密度地点の Ftemp の範囲は室内実験の値と近いとため、ホッキョクダラ仔魚は表層以外にも分布し、分布には水柱全体の環境が影響していると考えられる。

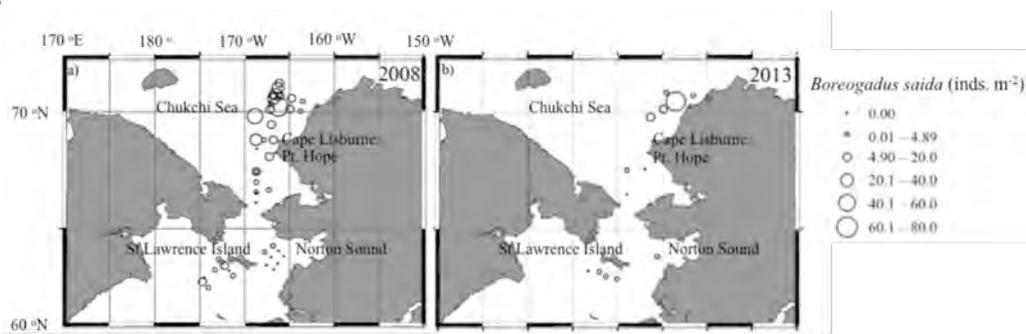


Figure 1. ボンゴネットにより採集されたホッキョクダラ仔魚の分布。a) 2008 年 b) 2013 年。丸の大きさは密度を示す。

References

- 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
- Rass T (1968) Spawning and development of polar cod. *Rapp PV Reun Cons Perm Int Explor Mer* 158:135-137
- Sakurai Y, Ishii K, Nakatani T, Yamaguchi H, Anma G, Jin M (1998) Reproductive Characteristics and Effects of Temperature and Salinity on the Development and Survival of Eggs and Larvae of Arctic Cod (*Boreogadus saida*). *Memories Of The Faculty Of Fisheries Hokkaido University* 45:77-89

海洋生態系のカギ種と汚染を海鳥から探る

綿貴豊¹, 西沢文吾¹, 松野孝平², 山本誉士², C.E. Meathrel³, P.N. Trathan⁴

¹北海道大学大学院水産科学院, ²国立極地研究所, ³ラトローブ大, ⁴英国南極局

Seabirds as indicators of changing marine food webs and pollution

Yutaka Watanuki¹, Bungo Nishizawa¹, Kohei Matsuno², Takashi Yamamoto², C.E. Meathrel³, P.N. Trathan⁴

¹Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, ²National Institute of Polar Research

³LaTrobe University, ⁴British Antarctic Survey

海鳥の移動と体組織の化学マーカから海洋生態系のカギ種や海洋汚染の海域間差を知ることができる。ハシボソミズナギドリ (*Puffinus tenuirostris*) は、11月から翌年4月にかけてオーストラリア南東部やタスマニア島で繁殖し、繁殖後は北太平洋、ベーリング海およびチャクチ海に移動し、そこで5月から10月までの約半年間を過ごす(非繁殖期)。タスマニア島で繁殖するハシボソミズナギドリにジオロケーター(光を記録し毎日の日の出日の入り時刻を定め、移動経度を推定する)を装着し、翌年回収して、非繁殖期の利用海域やその中での季節移動を調べた。ジオロケーターを回収する際には、非繁殖期に過ごした海域で生え変わった風切り羽を採集し、その水銀濃度を測った。非繁殖期のハシボソミズナギドリの分布は、船舶からの目視調査によっても調べた。同時に、ノルパックネットを用いて主要な餌生物であるオキアミを採集し、そのサイズを調べた。ハシボソミズナギドリは、夏季(7月)にはベーリング海を主に利用し、秋季(9月)にはチャクチ海に移動した。チャクチ海におけるオキアミのサイズは夏季に小さく、秋季には大きかった。本研究により、1) 秋には北極海にオキアミが輸送されていること、2) オホーツク海は南東部ベーリング海より水銀濃度が高いことが推察された。

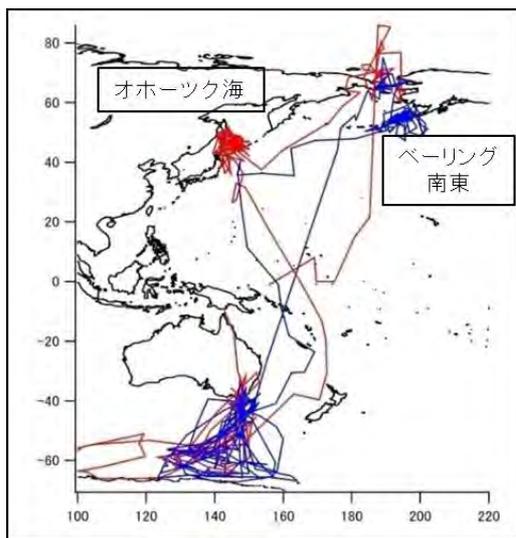


図1 非繁殖期における利用海域の個体差

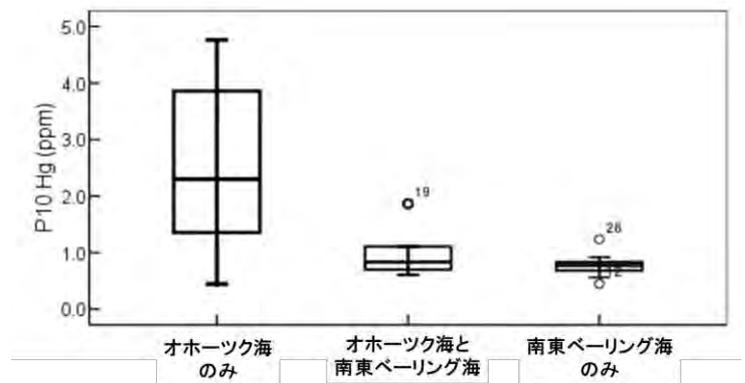


図2 非繁殖期を過ごした海域とそこで生え変わった羽根の水銀濃度

References

Yamamoto, T., Hoshina, K., Nishizawa, B., Meathrel, C. E., Phillips, R. A., and Watanuki, Y., Annual and seasonal movements of migrating short-tailed shearwaters reflect environmental variation in sub-Arctic and Arctic waters, *Mar. Biol.*, 162, 413–424, 2015.

Watanuki Y., Yamamoto T., Yamashita A., Ishii C., Ikenaka Y., Nakayama S.M., Ishizuka M., Suzuki Y., Niizuma Y., Meathrel C.E., Phillips R.A., Mercury concentrations in primary feathers reflect pollutant exposure in discrete non-breeding grounds used by Short-tailed Shearwaters. *J Ornithol.*156:847-850, 2015.

Nishizawa B., Matsuno K., Labunski E. A., Kuletz K. J., Yamaguchi A., Watanuki Y., Seasonal distribution of short-tailed shearwaters and their prey in the Bering and Chukchi Seas, *Biogeosciences Discuss.*, 12, 17721-17750, 2015

ベーリング海北部およびチャクチ海におけるホッキョクダラの食性と栄養状態

中野 翼¹、松野孝平²、西沢文吾¹、岩原由佳³、三谷曜子³、山本潤³、桜井泰憲¹、綿貫豊¹
¹北海道大学大学院水産科学院、²国立極地研究所、³北海道大学北方生物圏フィールド科学センター

Diets and body condition of polar cod (*Boreogadus saida*) in the northern Bering Sea and Chukchi Sea

Tsubasa Nakano¹, Kohei Matsuno², Bungo Nishizawa¹, Yuka Iwahara³, Yoko Mitani³, Jun Yamamoto³,
 Yasunori Sakurai¹, Yutaka Watanuki¹

¹Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, ²National Institute of Polar Research

³Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University

To understand trophic responses of polar cod *Boreogadus saida* (a key species in Arctic food webs) to changes in zooplankton and benthic invertebrate communities (prey), we compared its stomach contents and body condition between three regions with different environments: the northern Bering Sea (NB), southern Chukchi Sea (SC), and central Chukchi Sea (CC). Polar cod were sampled using a bottom trawl, and their potential prey species in the environment were sampled using a plankton net and a surface sediment sampler. Polar cod fed mainly on appendicularians in the NB and SC where copepods were the most abundant in the environment, while they fed on copepods, euphausiids, and gammarids in the CC where barnacle larvae were the most abundant species in plankton samples on average. The stomach fullness index of polar cod was higher in the NB and SC than CC, while their body condition index did not differ between these regions. The lower lipid content of appendicularians compared to other prey species is the most plausible explanation for this inconsistency.

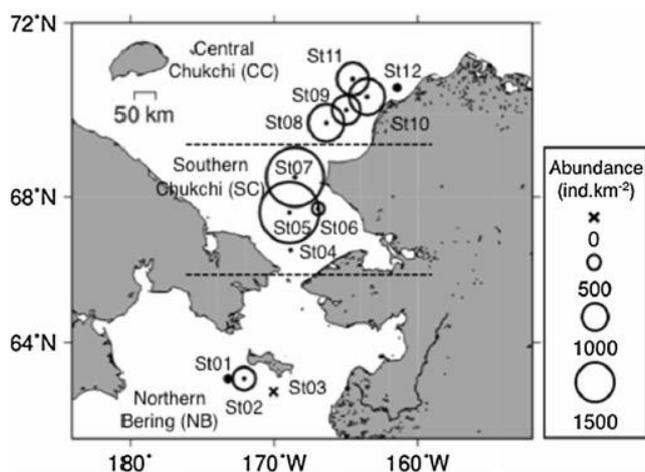


Fig. 1

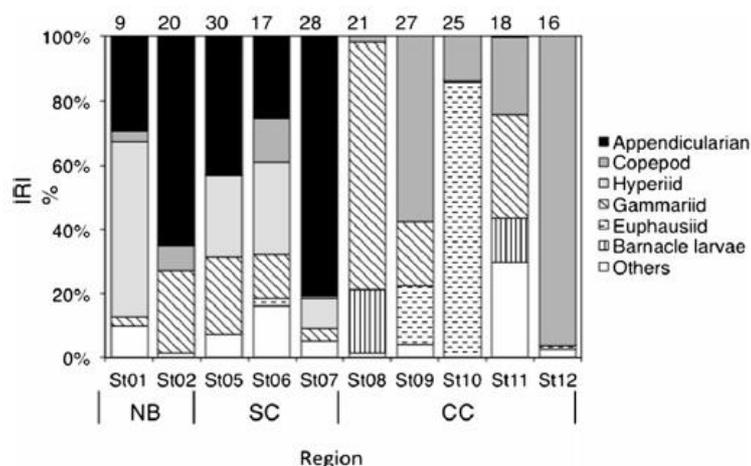


Fig. 2

Fig. 1 Sampling stations (St) and abundance of polar cod (catch per unit effort as number of fish per km² of area swept by bottom trawl) in the northern Bering Sea (NB), southern Chukchi Sea (SC), and central Chukchi Sea (CC). No fish were collected at St03

Fig. 2 The percentage composition of prey taxa, shown by the index of relative importance (%IRI), found in the stomachs of polar cod collected in the northern Bering Sea (NB), southern Chukchi Sea (SC), and central Chukchi Sea (CC). Sample sizes (number of stomachs) are shown at the top of bars

References

Nakano T., Matsuno K., Nishizawa B., Iwahara Y., Mitani Y., Yamamoto J., Sakurai Y., Watanuki Y., Diets and body condition of polar cod (*Boreogadus saida*) in the northern Bering Sea and Chukchi Sea, *Polar Biology*, 2015.

ベーリング海の水温構造とハシブトウミガラスの採餌行動の年変動

國分互彦^{1,2}、山本誉士^{1,3}、菊地デイル万次郎²、佐藤信彦²、綿貫豊³、Alexander S. Kitaysky⁴、高橋晃周^{1,2}

¹ 国立極地研究所、² 総研大極域科学専攻、³ 北海道大学水産科学院、

⁴ アラスカ大学フェアバンクス校

Foraging ecology of thick-billed murre in the Bering Sea: variability in relation to ocean thermal structure

Nobuo Kokubun^{1,2}, T. Yamamoto^{1,3}, D. Kikuchi², N. Sato², Y. Watanuki³, A. S. Kitaysky⁴, A. Takahashi^{1,2}

¹National Institute of Polar Research, Japan, ²Department of Polar Science, Graduate University for Advanced Studies,

³Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, ⁴University of Alaska Fairbanks

Southeastern Bering Sea is one of the most productive areas in the world where huge amount of predators inhabit. During recent decades, the area has experienced series of warm and cold regimes that lead abrupt changes in plankton and nekton community (Coyle et al. 2011). In this context, potential impacts of changes in the ocean thermal structure on apex predators have attracted ecologist's attention. The aim of this study was to reveal how variability in ocean thermal structure affects the foraging ecology of thick-billed murre (a representative seabird species in the Bering Sea). The field study was conducted on Saint George Island, Bering Sea, in 2004, 2006, 2007, 2013, 2014 and 2015 covering a series of warm and cold regimes. Small accelerometers were attached on chick-rearing thick-billed murre, and behavioral data was obtained from 12, 5, 4, 9, 12 and 7 birds successfully in the 6 years. Trip and flight durations, dive depth, Sea Surface Temperature (SST), thermocline depth and intensity, temperature at depth (>40m) in the foraging area were analysed with the acceleration, depth and temperature records (Kokubun et al. 2010). Prey species were also observed. Assuming the temperature at depth (>40m) as an indicator of the annual thermal condition, 2015 ($6.5 \pm 0.9^\circ\text{C}$) was the warmest year followed by 2004 ($5.4 \pm 0.8^\circ\text{C}$), 2014 ($4.9 \pm 1.0^\circ\text{C}$), 2006 ($4.5 \pm 1.0^\circ\text{C}$), 2013 ($3.7 \pm 0.9^\circ\text{C}$), 2007 ($2.4 \pm 1.2^\circ\text{C}$). Thermocline detected in the foraging area was most intense in 2007 ($6.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$) followed by 2014 ($5.4 \pm 1.4^\circ\text{C}$), 2013 ($4.9 \pm 1.4^\circ\text{C}$), 2004 ($4.3 \pm 1.2^\circ\text{C}$), 2015 ($3.7 \pm 0.9^\circ\text{C}$) and 2006 ($3.6 \pm 1.2^\circ\text{C}$). In the years with intense thermocline (2007, 2014 and 2015), birds spent more time foraging in stratified waters (87-97%), whereas the birds also used mixed waters (11-28%) in 2006, 2015 and 2004 with less intense thermocline. In all years there was a peak of dive depth near thermocline depth (17-54% of dives), but in the coldest year 2007, there was another prominent peak (36% of dives) in deeper depths (>50m). Annual breeding success of the birds were positively correlated with thermocline intensity ($r = 0.864$) and negatively correlated with temperature at depth ($r = -0.819$). In summer, small fishes such as age-0 walleye pollock aggregate near thermocline depth, whereas recruitment of larger fishes including age-1 pollock increases during cold years. Intense summer thermocline is caused by cold previous winter when production of sea ice and cold pool is enhanced, and/or increased heating of sea surface during summer. Intense thermocline under such environmental conditions may lead high feeding efficiency of the birds through aggregation of small fishes. Especially in the colder years, large fishes with presumably slow swim speed may be available in addition to the small fishes around thermocline. We will discuss further on underwater foraging behavior of the birds in relation to thermal conditions by adding acceleration data.

南東ベーリング海は世界有数の高生産海域であり、多くの高次捕食者が生息する。同海域では近年、数年間にわたって続く温暖期-寒冷期が観測されており、それに伴って優占するプランクトンや魚の特徴が変化することがわかってきた(Coyle et al. 2011)。このような水温構造の変化が、海洋生態系の栄養の流れを通じて、高次捕食者にどのような影響を及ぼしているかが注目されている。そこで本研究では、同海域の代表的な潜水性の海鳥であるハシブトウミガラスの採餌行動を複数年にわたり計測することで、海洋の水温構造の変化が高次捕食者の採餌生態にどう影響しているか明らかにすることを目的とした。温暖期と寒冷期をまたぐ 2004 年、2006 年、2007 年、2013 年、2014 年、2015 年の夏期、ベーリング海のセントジョージ島で、ハシブトウミガラスに小型加速度記録計を取り付け、それぞれ 12 個体、5 個体、4 個体、9 個体、12 個体、7 個体から行動記録を得た。加速度・深度温度記録を用いて、鳥のトリップ長と飛行時間、潜水深度、鳥の採餌エリアの表面水温(SST)、温度躍層の深度、強度(温度躍層上下の平均水温差)、深い深度(>40m)の平均水温を分析し(Kokubun et al. 2010)、さらに鳥の持ち帰った餌の種類を調べた。鳥の採餌エリアでの深い深度の水温を指標とすると、2015 年($6.5 \pm 0.9^\circ\text{C}$)、2004 年($5.4 \pm 0.8^\circ\text{C}$)、2014 年($4.9 \pm 1.0^\circ\text{C}$)、2006 年($4.5 \pm 1.0^\circ\text{C}$)、2013 年($3.7 \pm 0.9^\circ\text{C}$)、2007 年($2.4 \pm 1.2^\circ\text{C}$)の順で水温環境は温暖だった。鳥の採餌エリアで見られた温度躍層は、2007 年($6.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$)、2014 年($5.4 \pm 1.4^\circ\text{C}$)、2013 年($4.9 \pm 1.4^\circ\text{C}$)、2004 年($4.3 \pm 1.2^\circ\text{C}$)、2015 年($3.7 \pm 0.9^\circ\text{C}$)、2006 年($3.6 \pm 1.2^\circ\text{C}$)の順に強かった。このような水温環境の違いに関連して、採餌行動にも違いが見られた。比較的溫度躍層の強い 3 年間(2007 年、2014 年、2015 年)には、鳥は溫度躍層のある海域を利用する割合が高かった(87-97%)一方、比較的溫度躍層の弱い年(2006 年、2015 年、2004 年)には溫度躍層のない海域も利用していた(11-28%)。どの年にも躍層付近に潜水深度のピークが見られたが(全潜水の 17-54%)、特に寒冷だった 2007 年には、50m 以深の深い深度にもう 1 つの潜水のピークが見られた(全潜水の 36%)。各年の鳥の繁殖成績は、

温度躍層の強さと正の相関をもち($r = 0.864$)、深い深度の水温と負の相関をもっていた($r = -0.819$)。この海域では、夏期に温度躍層付近にスケトウダラ 0 歳魚などの小さな魚が集まり、また寒冷な年には、深い深度でスケトウダラ 1 歳魚などのより大きな魚の加入が増える。夏期に温度躍層の強まる条件は、前冬期が寒冷で、海氷の生成と海水の沈み込みが多くなること、または夏期に海水面がよく温められることであり、そのような年にはハシブトウミガラスの餌となる小さな魚が温度躍層付近に集積して、鳥の採餌効率が高まっていたと考えられる。特に寒冷な年は、温度躍層付近の小さな魚に加えて、低温で動きの遅くなったより大きな魚を採ることができる点で、鳥の採餌にとって有利だった可能性がある。鳥の加速度記録から得られた水中でのばたきと水温環境の関連性に焦点を当てて解析を行い、今後この仮説をさらに検証する。

References

- Coyle, K. O., Eisner, L. B., Mueter, F.J., Pinchuk, A. I., Janout, M. A., Ciciel, K. D., Farley, E. V., and Andrews, A. G., Climate change in the southeastern Bering Sea: impacts on pollock stocks and implications for the oscillating control hypothesis, *Fish. Oceanogr.*, 20, 139-156, 2011.
- Kokubun, N., Takahashi, A., Ito, M., Matsumoto, K., Kitaysky, A. S., and Watanuki, Y., Annual variation in the foraging behaviour of thick-billed murres in relation to upper-ocean thermal structure around St. George Island, Bering Sea, *Aquat. Biol.* 8, 289-298, 2010.

The jellyfish buffet: jellyfish enhance seabird foraging opportunities by concentrating prey

Nobuhiko N. Sato ¹, Nobuo Kokubun ^{1,2}, Takashi Yamamoto ^{2,3}, Yutaka Watanuki ³

Alexander S. Kitaysky ⁴ and Akinori Takahashi ^{1,2}

¹ Department of Polar Science, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Tokyo, Japan

² National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan

³ Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hokkaido, Japan

⁴ Department of Biology and Wildlife, Institute of Arctic Biology, University of Alaska Fairbanks, USA

The rapid increase in jellyfish biomass and its impact on marine ecosystems is of great concern for the world's oceans. Jellyfish are generally thought to have indirect negative impacts on higher trophic level predators, through changes in lower trophic pathways. However, high densities of jellyfish in the water column may affect the foraging behaviour of marine predators more directly, and the effects may not always be negative. Here, we present novel observations of a diving seabird, the thick-billed murre, feeding on fish aggregating among the long tentacles of large jellyfish, by using small video loggers attached to the birds. We show that the birds encountered large jellyfish, *Chrysaora melanaster*, during most of their dives, commonly fed on fish associated with jellyfish (Figure 1), and appeared to specifically target jellyfish with a high number of fish aggregating in their tentacles, suggesting the use of jellyfish may provide significant energetic benefits to foraging murre. We conclude that jellyfish provide feeding opportunities for diving seabirds by concentrating forage fish, and that the impacts of jellyfish on marine ecosystems are more complex than previously anticipated and may be beneficial to seabirds.



Figure 1. Young age fish were aggregated among tentacles of a large jellyfish.

Arctic NEMURO モデルの開発と海氷域生態系研究への応用

渡邊 英嗣¹、照井 健志²、石田 明生³、岸 道郎⁴¹ 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター² 国立極地研究所 国際北極環境研究センター³ 常葉大学 社会環境学部⁴ 北海道大学 水産科学研究院

西部北極海ノースウインド深海平原 Station NAP に設置されたセディメントトラップ係留系による時系列観測結果から、極夜が始まる 10 月以降に新鮮な有機物粒子や鉱物を多く含む沈降粒子量極大が捉えられており、水深の浅い陸棚域からの水塊輸送との関係が示唆されている。発表者らはこれまでに、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 を結合させた上で季節変動実験を行い、生物生産性の高いチャクチ陸棚水がバロー峡谷の沖合で生成された海洋渦によって輸送されるプロセスが動植物プランクトンの生息環境向上にとって重要であることを明らかにしてきた [Watanabe et al., 2014]。

同じく Station NAP のセディメントトラップで捕集された夏季の試料に着目すると、2011 年にはアイスアルジー（海氷に付着する藻類）を多く含む沈降粒子量極大が捉えられている一方で、翌年の 2012 年は沈降粒子量が全体的に少ないことが報告されている [Onodera et al., 2015]。そこで本研究では、上記の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]。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ポ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、Station NAP 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。またアイスアルジーに関する光特性・栄養塩取込過程・捕食圧・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。アイスアルジーに関する現場観測は非常に限られているが、海氷過程を考慮した 3 次元生態系モデリングとセディ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を期待される。

本研究でこれまでに開発してきた生態系モデルでは、魚類・海鳥・海生哺乳類そのものを計算対象とはしないが、元々の栄養源となる動植物プランクトンの情報を提供する役割がある。その応用例として、生物エネルギーモデルを用いたシロサケの研究が既に行われている [Yoon et al., 2015]。生物エネルギーモデルは、シロサケ 1 個体あたりの成長率（体重増分）を主に捕食・代謝・排泄の関係式に基づいて計算するもので、捕食式の餌量および水温に上記の北極海物理生態系結合モデルの出力を与えている。地球温暖化シナリオに沿った季節変動実験の結果からは、チャクチ陸棚域における水温上昇と餌密度の増加により、シロサケの生息可能域（成長率 > 0 で定義）が北に拡大する一方、ベーリング海峡周辺では最適水温条件を超える昇温によって夏季の生息可能域がむしろ縮小することが示唆されている。このように海氷減少が水産資源に及ぼす影響を評価するためには、海洋循環変動を詳細に分析するとともに、食物連鎖を根底から調べる必要があり、本研究成果はその礎となるものである。

References

- Onodera, J., E. Watanabe, N. Harada, and M. C. Honda, Diatom flux reflects water-mass conditions on the southern Northwind Abyssal Plain, Arctic Ocean, *Biogeosciences*, 12, 1373-1385, doi:10.5194/bg-12-1373-2015, 2015.
- Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. C. Honda, K. Kimoto, T. Kikuchi, S. Nishino, K. Matsuno, A. Yamaguchi, A. Ishida, and M. J. Kishi, Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump, *Nature Communications*, 5:3950, doi: 10.1038/ncomms4950, 2014.
- Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. N. Aita, A. Ishida, and M. J. Kishi, Wind-driven interannual variability of sea ice algal production in the western Arctic Chukchi Borderland, *Biogeosciences*, 12, 6147-6168, doi: 10.5194/bg-12-6147-2015, 2015.
- Yoon, S., E. Watanabe, H. Ueno, and M. J. Kishi, 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, *Progress in Oceanography*, 131, 146-158, doi:10.1016/j.pocean.2014.12.009, 2015.

Prediction System for the Pan-Arctic sea ice with the MIROC Climate Model

Jun Ono¹, Masato I. Nodzu², Hiroaki Tatebe¹, Masayoshi Ishii², and Yukio Tanaka¹

¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

²Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Under the GRENE project, we have developed the prediction system for the Pan-Arctic sea ice with the climate model MIROC5 (Watanabe et al., 2010) that has an improved sea ice module (Komuro et al., 2012). So far we have conducted a series of assimilation experiments and prediction experiments. Here we present the newest experiments and discuss their results. We performed assimilation experiments from 1975 to 2011 using the MIROC5 whose the atmosphere component has a resolution of T42 and L40 and the ocean component has a resolution of $1.4^\circ \times 0.5^\circ - 1.4^\circ$ and 50 levels. The method used for the assimilation is a simplified version of an incremental analysis update (Tatebe et al., 2012). The data used for the assimilation are ocean temperature, salinity, and sea-ice (Ishii and Kimoto, 2009), and air-temperature and wind from the ERA and ERA-Interim. Further, we carried out ensemble prediction experiments with 8 members, which were initialized by the assimilation experiments. These experiments were started from initial state of January, April, July, and October. We compared the reproducibility of sea ice in September and investigated the predictability. The assimilation followed the observed trend and inter-annual variations in sea ice well. In contrast, the prediction started from July captures well the observed features except for 2007 (Fig. 1a), but not for January, April, and October cases (not shown). Anomaly correlation coefficient (ACC) at three month lead time is 0.78 for detrended SIE anomaly, which is good skill. ACC for July start experiment is high until five month lead time (Fig. 1b). RMSE increases during summer season due to the ice-edge error (not shown). In addition to above experiments, we have participated in the Arctic Predictability and Prediction On Seasonal to Inter-annual Timescales (APPOSITE) project and performed control simulation and ensemble predictions with MIROC 5.2, following the APPOSITE protocol, to investigate the Arctic sea-ice predictability. It was found, from lagged correlation analysis using our APPOSITE control-run data, that the potential predictability were 1-2 and 2-3 years for sea-ice extent and volume (not shown), as in the previous studies (Blanchard-Wrigglesworth et al., 2011a). Furthermore, two re-emergence features can be seen in the sea-ice extent, which is attributed to the memory of ocean temperatures and sea-ice thickness. We have currently been developing the sea ice assimilation system with the Ensemble Kalman Filter and also examined the further key processes for improving the Pan-Arctic sea ice prediction system, which will be discussed during the poster presentation.

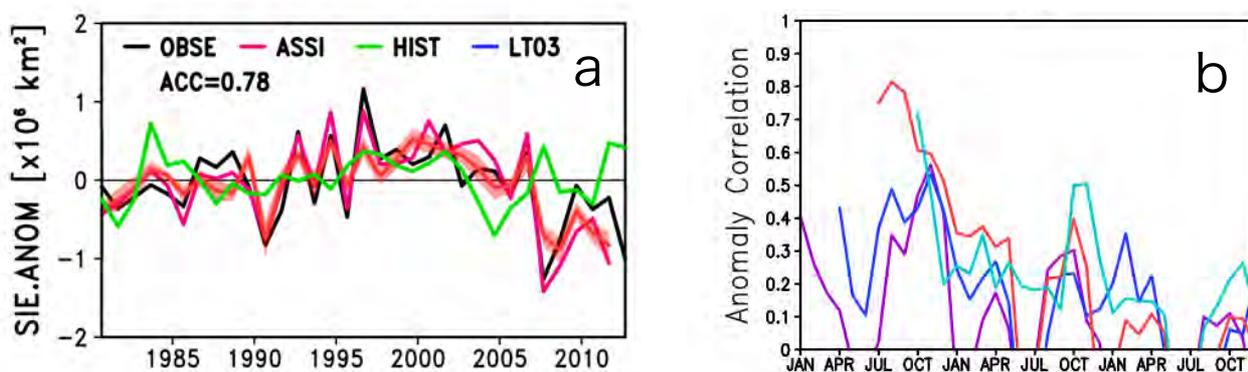


Figure 1. (a) Time series of September SIE anomaly in the Northern Hemisphere from 1980 to 2012, for observation (OBSE), assimilation (ASSI), historical-run (HIST), prediction of three months lead time (LT03). Anomaly correlation coefficient (ACC) at three month lead time is 0.78 for detrended SIE anomaly, which is good skill. (b) Lead-time dependence of SIE ACC for January (purple), April (blue), July (red), and October (cyan).

References

1. Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe, and M. Kimoto, 2010, *J. Climate*, **23**, 6312–6335.
2. Komuro, Y., T. Suzuki, T. T. Sakamoto, H. Hasumi, M. Ishii, M. Watanabe, T. Nozawa, T. Yokohata, T. Nishimura, K. Ogochi, S. Emori, M. Kimoto, 2012, *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 213–232.
3. Tatebe, H., M. Ishii, T. Mochizuki, Y. Chikamoto, T. T. Sakamoto, Y. Komuro, M. Mori, S. Yasunaka, M. Watanabe, K. Ogochi, T. Suzuki, T. Nishimura, and M. Kimoto, 2012, *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 275–294.
4. Ishii, M., and M. Kimoto, 2009, *J. Oceanogr.*, **65**, 287–299.
5. Blanchard-Wrigglesworth, E., C. M. Bitz, and M. M. Holland, 2011, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L18503, doi: 10.1029/2011GL048807.

Short-term sea ice prediction for ice navigation in the Arctic sea routes using TIGGE data

Liyanarachchi Waruna Arampath De Silva^{1,2}, Dulini Yasara Mudunkotuwa² and Hajime Yamaguchi²

¹National Institute of Polar Research, Japan

²The University of Tokyo, Japan

Introduction

Recent rapid decrease in the summer Arctic sea ice extent, together with climate model predictions of additional ice reduction in the future, have attract the interest of Arctic shipping routes. However, the precise prediction of ice distribution is crucial for safe and efficient navigation in the Arctic Ocean. In general, however, most of the available numerical models have exhibited significant uncertainties in short-term and narrow-area predictions. Ensemble predictions of short-term sea-ice conditions along the ASR have been carried out using a high-resolution (2.5km) ice–ocean coupled model that explicitly treats ice floe collisions in marginal ice zones. In this study, the ensembles are constructed by using forecasted atmospheric forcing data sets from THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE)) project in 2015 and the ice and ocean conditions estimated by the model (De Silva et al., 2015). The correlation score of ice edge error and sea ice concentration distribution quantifies forecast skill. Skill scores are computed from 5-days ensemble forecasts initialized in each month between May 2015 to October 2015. Comparison of different ensemble atmospheric forecasts, using different months initial data sets, revealed that our ice-POM numerical model skillfully predicts the ice distribution during the NSR operational period and NSR opening and closing dates.

Model description

A high-resolution (about 2.5km) ice–ocean coupled model used in this study is based on the model developed by De Silva et al. (2015). The ocean model is based on generalized coordinates, the Message Passing Interface version of the Princeton Ocean Model (POM; Mellor et al. 2002). The ice thermodynamics model is based on the zero-layer thermodynamic model proposed by Semtner (1976). The ice rheological model is based on the elastic–viscous–plastic (EVP) rheology proposed by Hunke (2001) and is modified to take ice floe collisions into account, following Sagawa & Yamaguchi (2006). Model domain is constructed using Earth Topography one-minute Gridded Elevation Dataset (ETOPO1). High-resolution computations are initialized using interpolated whole-Arctic model results and AMSR2 sea-ice concentration as described in De Silva et al., (2015). The atmospheric forcing are given by the TIGGE (Bougeault et al. 2010) dataset, which has been developed as part of THORPEX. TIGGE provides operational medium-range ensemble forecast data for non-commercial research purposes through its data portals. The seven operational ensemble prediction systems used here include the China Meteorological Administration (CMA), the Canadian Meteorological Center (CMC), the European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF), the Japan Meteorological Agency (JMA), the France Metrological Office (FMO), the United Kingdom Meteorological Office (UKMO), and the US National Centers for Environmental Prediction (NCEP), as of July 2015.

Discussion

To evaluate the different atmospheric datasets we used the correlation score of ice edge error and sea ice concentration distribution. The ice edge error is defined as follows. First, the difference in the ice areas between the models predictions and AMSR2 satellite observations are calculated. Note that area covered with ice concentration more than 15% is taken into comparison. Next, dividing the length of the model predicted contour of the ice concentration of 15%, we obtain the ice edge error with the dimension of length. The results of the 5days (20 to 25 July 2015) forecasted ice edge error and the hindcast (ERA) using ERA-Interim data is shown in Fig. 1.

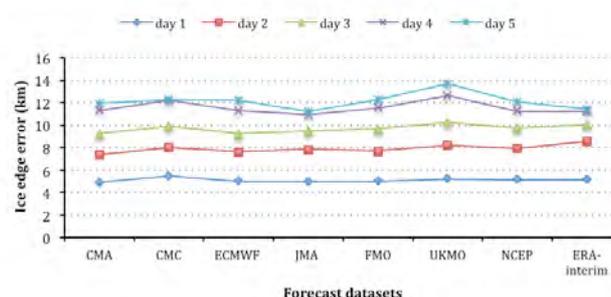


Figure 1. Ice edge error between different forecasted datasets and AMSR2

There were no significant differences of ice edge error between different forecasted datasets and ERA-interim hindcast data. Within 5 days average ice edge among seven-forecasted dataset is 9.28 ± 2.44 km. During the computation period the JMA showed best ice edge error prediction of 8.89 ± 2.57 km and the UKMO shows worst ice edge error prediction of 10 ± 3.41 km. In addition to the quantitative comparisons of ice edge error, we compared the sea-ice concentration distribution qualitatively. Fig. 2 shows the difference between the model and AMSR2 sea-ice concentrations after the 5th day of computation (25 July 2015).

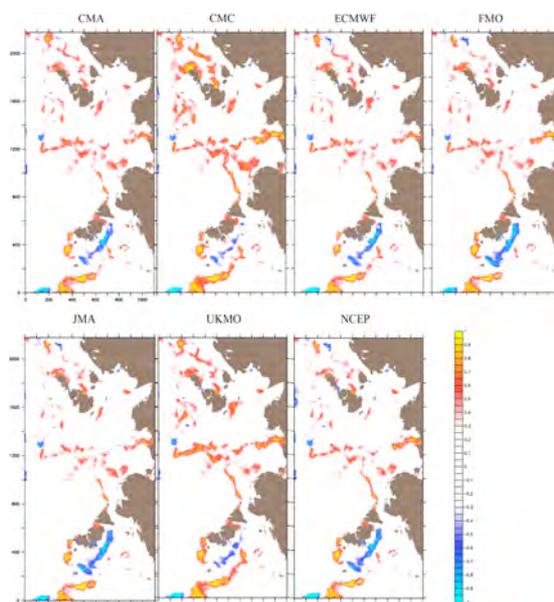


Figure 2. Difference between model-predicted ice concentration and AMSR2 (model - AMSR2)

Southern part of the domain, difference in sea ice concentration is higher compared to the other regions. This discrepancy could be due to the under estimation of heat transfer process between ice and ocean. However, sea ice spatial distribution between different datasets has no significant difference.

Conclusion

Sea ice forecasted skill of different dataset (TIGGE) is evaluated in the study. Average forecast skill of ice-POM model is 9.28 ± 2.44 km that is in good agreement with the requirement of operational ice navigation system (10 km). The current study partly includes the preliminary results of the melting season. To improve the model forecast accuracy, the further studies would be necessary in freezing season.

Acknowledgement

This study was supported by Green Network of Excellence Program Arctic Climate Change Research Project

References

- Bougeault, P. and Coauthors, The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 91, 1059–1072, 2010.
- Hunke, E. C., Viscous–Plastic Sea Ice Dynamics with the EVP Model: Linearization Issues. *J. Comput. Phys.*, 170, 18–38, 2001.
- Mellor, G. L., S. Hakkinen, T. Ezer, and R. Patchen, A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids. In *Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications.*, Springer, Berlin Heidelberg, 55–72. 2002.
- Semtner, A. J., A Model for the Thermodynamic Growth of Sea Ice in Numerical Investigations of Climate. *J. Phys. Oceanogr.*, 6, 379–389, 1976.
- De Silva, L. W. A., H. Yamaguchi, and J. Ono, Ice–ocean coupled computations for sea-ice prediction to support ice navigation in Arctic sea routes. *Polar Res.*, 34, 2015.

季節海氷域化する北極海における海水－海洋アルベドフィードバック効果

柏瀬陽彦^{1,2}、大島慶一郎²、二橋創平³、Hajo Eicken⁴

¹ 国立極地研究所

² 北海道大学低温科学研究所

³ 苫小牧高等工業専門学校

⁴ アラスカ大学フェアバンクス校

近年北極海では夏季海氷面積の減少、平均氷厚の減少、季節海氷域の増加など様々な変化が現れており、これらの変動は特に 2000 年以降の太平洋セクターにおいて顕著である。先行研究ではそのような変化が気温の上昇、大気循環場の変化に伴う海氷流出量の増加、外洋域からの熱流入量の増加など、様々な要因が複合的に働いた結果であることを示唆しているが、その全体像は未だ明らかにはされていない。一方で北極海では近年の気候変動が増幅されることも指摘されており、この polar amplification と呼ばれる現象には海氷激減が関連していると考えられている (Bekryaev et al., 2010)。本研究では北極海の急激な変動の要因の一つとして海水－海洋アルベドフィードバック効果に着目する。これは開水面と海氷表面とでアルベド（日射に対する反射率）が大きく異なる（それぞれ 0.07 および 0.7 程度）ことに起因して生じるものであり、一旦海氷密接度が低下すると開水面に入る日射熱が海氷を融解させ、さらに密接度が低下する正のフィードバック効果である。このフィードバックは南極海やオホーツク海といった季節海氷域の海氷後退をコントロールする要素の一つであることが明らかになっており (Niahsni and Cavalieri, 2006; Niahsni et al., 2011)、近年は季節海氷域化しつつある北極海においても重要な役割を持つことが期待される。しかし、現状では北極海太平洋セクターで海氷密接度の減少と対応して開水面から吸収される日射に有意な増加傾向が見られることが報告されている (Perovich et al., 2007) もの、その熱がどの程度海氷融解の増加に寄与しているか、フィードバック効果が生じるために必要なトリガーとなる物理プロセスは何かがあるかなどの基本的な疑問点もあきらかにはなっていない。

本研究では北極海太平洋セクターの海氷域（海氷密接度 $\geq 30\%$ として定義）を対象として、衛星観測による海氷データおよび簡略化海水－海洋結合モデルを使用してそこでの海水－海洋アルベドフィードバック効果を定量的に評価した。本研究で使用したのは、1979–2012 年の期間の衛星マイクロ波放射計 (SMMR および SSM/I) による海氷観測データの他、海氷漂流速度、ice age データ、ICESat 氷厚データ、および気象再解析データ (ERA-interim) であり、それぞれ 25km の polar-stereographic グリッド上に内挿して使用した。

はじめに、衛星観測から得られた海氷密接度、漂流速度およびアルベドを使用することで太平洋セクター（図 1、扇形領域）での熱収支の年々変動を計算した（図 2）。ここでは、海氷融解に最も重要であると考えられる、開水面およびメルトポンドからの熱吸収量（それぞれ灰太線および灰細線）を示し、海氷融解量（黒太線）および流出量（破線）と比較する。北極海の熱収支においてメルトポンドは無視することができないものであり、本研究では裸氷とメルトポンドのアルベドを一定（それぞれ 0.6 および 0.07）とすることで海氷のアルベドからメルトポンドフラクションを計算している。図 2 からは、北極海太平洋セクターにおいては海氷後退のほとんどが流出ではなく融解によるものであること、融解量が開水面からの日射によって決まることが示唆されている。これは海水－海洋アルベドフィードバックが働くための前提条件が満たされていることを意味する。

次に、フィードバックが実際に働いていることを示すため、海氷融解量と海氷発散との比較を行った。最も有意な相関を示した、初夏（5月中旬–6月上旬）の海氷発散（灰線）および 1–2 ヶ月後（6月中旬–8月上旬）の海氷融解量の経年変動を図 3 に示す。両者に有意な相関（相関係数=0.73）があることは、海氷発散によるわずかな密接度の差がトリガーとして働き、海水－海洋アルベドフィードバックにより 1–2 ヶ月でそれが増幅されることを示している。また、この関係は 2000 年代以降明らかに強まっている傾向も示された。さらに、開水面からの熱量や融解量（図 2）、初夏の海水発散には 2000 年代以降に有意な増加トレンドが見られることも特徴的である。

以上の結果からは、北極海太平洋セクターが季節海氷化したことに起因して、海水－海洋アルベドフィードバックの影響が表面化するようになったことが近年の北極海での海氷激減に関係していることが示唆される。最後に、北極海太平洋セクター（図 1、長方形領域）での海氷後退を簡略なモデルで再現し、そこでのフィードバック効果の影響を検証した。モデルに 2000 年以降で平均した熱フラックスおよび海氷漂流速度を与えた場合、観測と同程度の海氷後退を得ることができた。漂流速度を与えなかった場合の実験結果と比較すると、与えた場合の海氷融解量は 1.6 倍程度増加しており、これが海水－海洋アルベドフィードバックによる影響の大きさであるといえる。また、漂流速度のみを特徴的であった 2004 年および 2012 年の値に変更して実験を行うことで、それぞれ

の年の海氷後退を再現することにも成功した。このモデルから推定される海氷後退の時間スケールは初夏では約1ヶ月であり、これは海氷発散が融解に影響するまでのラグと整合的であった。

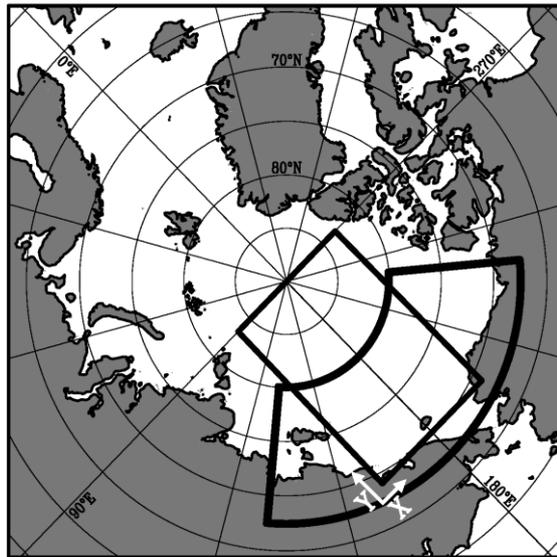


図1. 北極海の地図。熱収支解析および海氷発散の計算を扇型領域内で行った。長方形領域は簡略化海氷-海洋結合モデルによる海氷後退の再現実験に使用した。

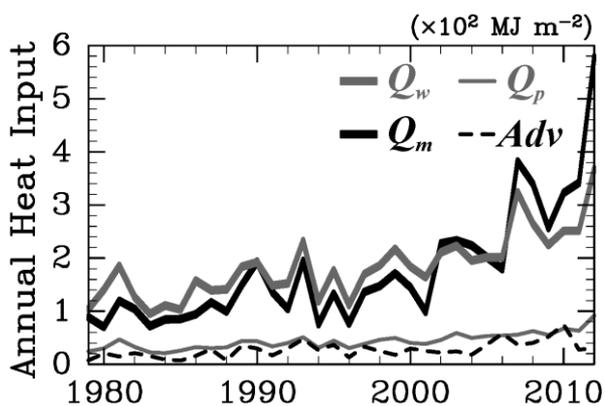


図2. 熱収支解析の結果。融解期（5月-8月）の開水面（灰太線）およびメルトポンド（灰細線）から吸収される熱量、海氷融解量（黒太線）および海水流出量（破線）の経年変動をそれぞれ示す。比較のため、融解量および流出量はそれぞれその量を融解するのに必要となる熱量の形で表現した。

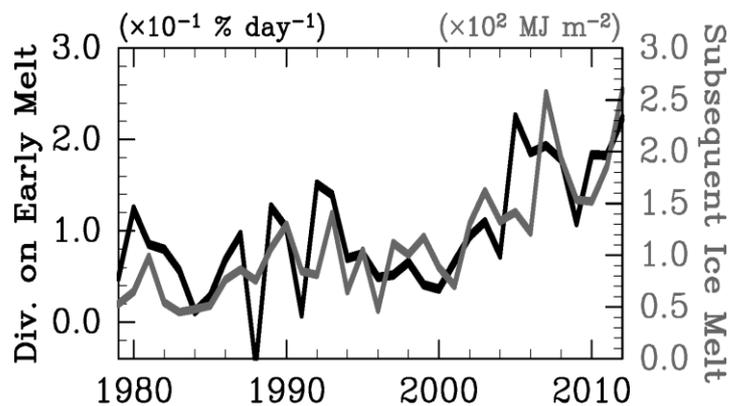


図3. 初夏（5月中旬-6月上旬）の海氷発散（黒線）およびその後2ヶ月間（6月中旬-8月上旬）の海氷融解量（灰線）の経年変動の比較。海氷発散は漂流速度による海氷密接度の変化として示す。

References

Bekryaev, R. V., I. V. Polyakov, and V. A. Alexeev (2010). Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. *Journal of Climate*, 23(14), 3888-3906.

Nihashi, S., and D. J. Cavalieri (2006). Observational evidence of a hemispheric-wide ice-ocean albedo feedback effect on Antarctic sea-ice decay. *J. Geophys. Res.*, 111, C12001, doi:10.1029/2005JC003447.

Nihashi, S., K. I. Ohshima, and H. Nakasato (2011). Sea-ice retreat in the Sea of Okhotsk and the ice-ocean albedo feedback effect on it. *J. Oceanography*, 67(5), 551-562, doi:10.1007/s10872-011-0056-x.

Perovich, D. K., B. Light, H. Eicken, K. F. Jones, K., Runciman, and S. V. Nghiem (2007). Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979-2005: Attribution and role in the ice - albedo feedback. *Geophysical Res. Lett.*, 34(19).

北極海への大西洋水流入のモデリング研究

川崎 高雄^{1,2}、羽角 博康^{2,1}¹ 国立極地研究所 国際北極環境研究センター² 東京大学 大気海洋研究所

北極海の数十年先の海水分布の予測を行うために、北極海の成層構造の形成・変動メカニズムを明らかにすることは重要である。特に大西洋水は、北極海において最も高温な亜表層以深に広がる水塊であり、ナンセン海盆の大陸斜面域では鉛直乱流混合を通じた表層への熱供給を担い、顕著な海水融解をもたらしている。近年、気候変動に伴う大西洋水の高温化が観測されており、今後さらに大西洋水の海水に対する影響は大きくなることが予想されている。高温な大西洋水の流入口であるフラム海峡は、幅数十キロの西スピッツベルゲン海流と渦による高温水の輸送が見られ、その再現には高解像度の海洋モデルが必要である。北極海の縁辺海であるバレンツ海は、高緯度であるにもかかわらず高温の大西洋水流入によってその南半分は冬季でも海水がない海域である。最近の研究によって、バレンツ海での海水面積と我が国の冬季気温に有意な関係があることが示されており、バレンツ海での大西洋水の流入及び変質過程とその経年変動について調べることは、日本を含む北半球中緯度域の気候変動を理解する上でも重要である。そこで本研究では、大西洋と北極海をつなぐ(1)フラム海峡と(2)バレンツ海において、大西洋水の流入・変質過程とその経年変動メカニズムについて、それらの領域を高解像度とした現実的設定下の海水-海洋大循環モデルを用いて調べることを目的とする(図1)。

フラム海峡において北極海への大西洋水の流入を担う西スピッツベルゲン海流が高解像度モデルによって再現された(図2)。さらにフラム海峡付近では、衛星観測で見られる活発な渦活動およびそれに伴う氷縁の特徴的な形状が再現された(図2)。水温・流速・渦運動エネルギーも定量的に妥当な値が再現されたことが確認された。熱フラックスの解析によって、北極海内に流入する熱量に対する中規模渦活動の影響は平均流によるそれに比べて小さいことが示された。フラム海峡での通過流と北極海内部への流入による熱フラックスについて、それぞれの経年変動の要因を調べた。フラム海峡を通過する熱の経年変動の要因はグリーンランド海を中心とする低気圧偏差であることが示唆された。一方、北極海内部(ナンセン海盆)へ流入する熱の経年変動はシベリア高気圧の変動が要因であることが示された。

バレンツ海では、モデルによって計算されたバレンツ海内での大西洋水の流入経路は海底地形の影響を受けており、これは観測や過去のモデリング研究とよく一致している(図3)。また、流れに沿って大西洋水は海面冷却に伴って低温化しており、これもよく再現された(図3)。バレンツ海への大西洋水流入によってもたらされる熱フラックスは87TW(1 TW = 10^{12} Watt)であり、観測からの見積もり(73-103TW)と整合的である。バレンツ海における大西洋水変質の一端を担っていると考えられる海水生産も衛星観測からの見積もりと整合的である。今後、大西洋水の変質過程について観測・再解析データを用いて検証し、その経年変動要因について調べる予定である。

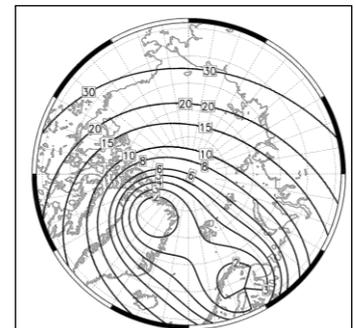


図1: モデルの水平格子幅(km)。フラム海峡と Barents Sea Opening 付近を高解像度に設定した。

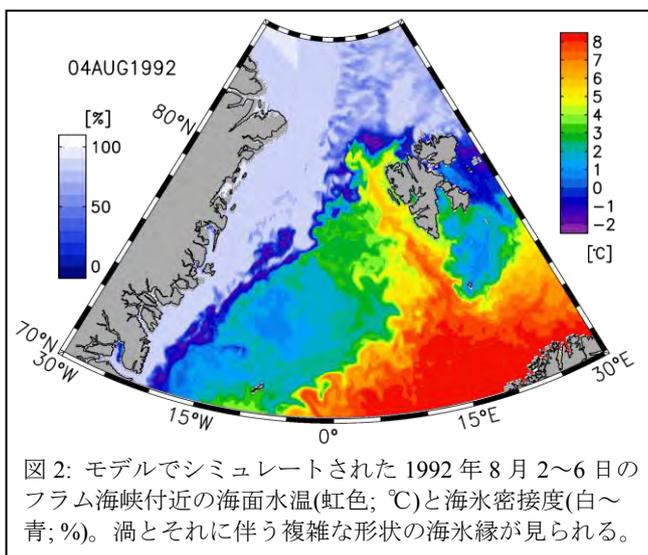


図2: モデルでシミュレートされた1992年8月2~6日のフラム海峡付近の海面水温(虹色; °C)と海水氷接度(白~青; %)。渦とそれに伴う複雑な形状の海水縁が見られる。

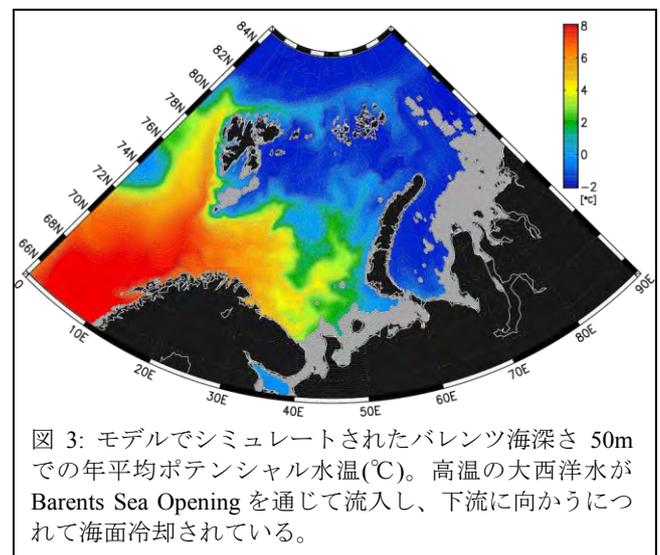


図3: モデルでシミュレートされたバレンツ海深さ50mでの年平均ポテンシャル水温(°C)。高温の大西洋水が Barents Sea Opening を通じて流入し、下流に向かうにつれて海面冷却されている。

氷海船舶の氷荷重推定と構造・運動性能評価に関する研究

澤村淳司¹¹ 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻

Numerical Estimation of Ice Forces and Ship Performance in Ice-covered Water

Junji SAWAMURA¹¹Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University

The commercial use of Northern Sea route (NSR) has been increased with developing offshore oil and gas in North Sea and transporting them from Europe to Asia. The improvement of ship performance both of ship structural safety and maneuverability in ice-covered water have been strongly desired with increase in the number of voyages and volume of cargoes transiting the NSR. In order to improve the structural safety and maneuverability of ice-going vessels, it is vital issue to estimate the ice force distributions acting on the ship. This study develops a numerical model for simulation of ice clearances and/or ice breaking when a ship is advancing into ice-covered waters. The ice force distributions around ship are calculated by the developed model. Figure 1 shows numerical results of ice clearance and ice breaking when an icebreaker is advancing into pack ice. The ice floes are broken or eliminated by the icebreaker, depending on the size of ice floes. The numerical results of ice force distributions are used for calculations of a structural response of ship hull and a ship motion under the ice loads. Finally, the structural safety and maneuverability of ship in an ice sea can be evaluated by using the numerical results.

北極海航路の利用など氷海域での船舶の商業利用の活発化に伴い、氷海中の船舶の安全性と経済性の向上がこれまで以上に求められている。氷海中の船舶は氷荷重という通常海域とは異なる厳しい荷重環境下に置かれる。氷海船舶の氷中性能の評価には、大小様々な海氷から受ける氷荷重を正確に推定する事が重要となる。本研究は、様々な氷況下における船舶の氷荷重推定が可能な数値計算方法を開発し、数値計算によって得られた詳細な氷荷重分布を用いて、氷中の構造安全性や運動性能の評価を行う。Figure 1 は砕氷船が流氷域中を航行する時の流氷分布と船体周りの氷荷重分布を推定した例である。このように、開発した数値計算によって、大小様々な氷が浮遊する複雑な氷海中を航行する氷海船舶の氷の砕氷や排除の計算ができる。さらに、数値計算によって取得した船体周りの氷荷重分布を用いて、船体外板の構造応答計算や船体運動の計算を実施し、氷海船舶の構造安全性評価や氷中運動性能評価に用いる。

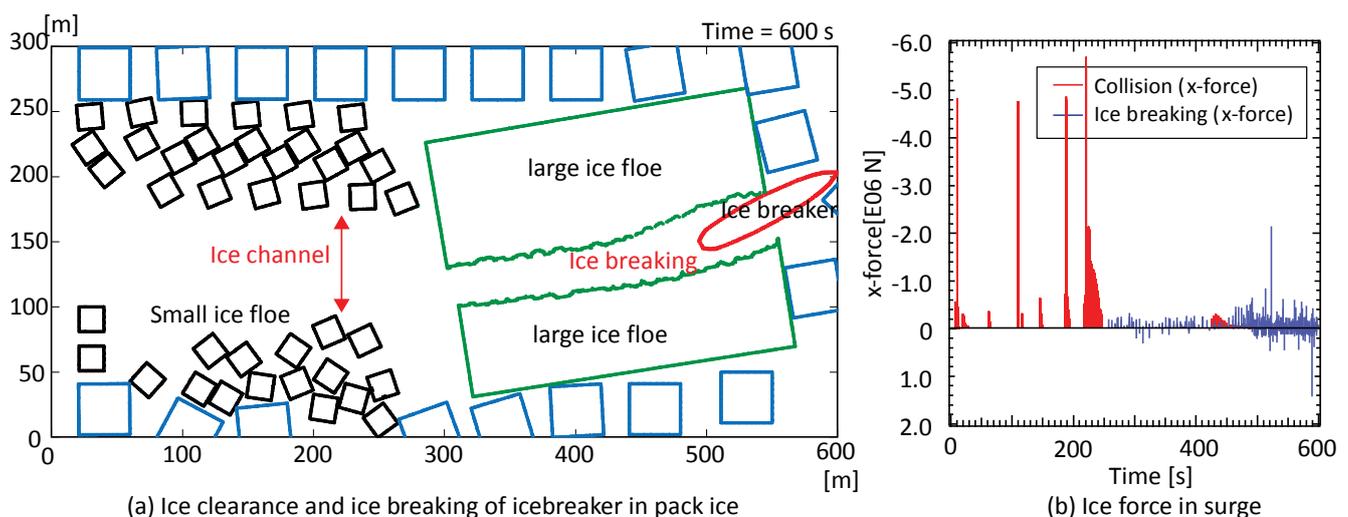


Figure 1. Numerical simulation of ship advancing in pack ice.

References

澤村淳司, 流氷域中を航行する砕氷船による氷板の割れと排除の数値計算, 第25回海洋工学シンポジウム講演論文集, 2015, OES25-101

船体着氷の成長指標と着氷対策の検討

尾関俊浩¹、志賀俊成²、安達聖³、澤村淳司⁴、山口一²

¹ 北海道教育大学札幌校

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

³ 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

⁴ 大阪大学大学院工学研究科

Study of Sea Spray Characteristics, Predictor and Anti-icing Method of Sea Spray Icing on Vessel

Toshihiro Ozeki¹, Toshinari Shiga², Satoru Adachi³, Junji Sawamura⁴ and Hajime Yamaguchi²

¹Sapporo Campus, Hokkaido University of Education

²Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo

³Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

⁴Graduate School of Engineering, Osaka University

北極海や北海道の沿岸など寒冷海域では、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。この着氷の主因は海面からの飛沫である。樹氷のような大気着氷は過冷却水滴が物体に衝突し着氷するので、飛来する雲水量は現在、気象データから WRF などのメソ気象モデルを用いて与えることが可能となってきた。しかし、船体着氷では飛沫の発生が波浪と船との相互作用によるので、船首形状の影響や甲板での二次飛沫の発生など現象はたいへん複雑である。一般に、開放水面では、飛沫発生は風速と波高に関連づけられる (Jones and Andreas, 2009)。また、船舶における飛沫の鉛直分布は、高度とともに指数関数的に減少する経験則 (Lozowski *et al.*, 2000) が用いられているが、その発生量、飛沫の空間分布についてはいまだに十分に理解されていない。今後、様々な船種が寒冷海域を航行することが想定されるため、飛沫の発生と飛来について様々な船種でデータ収集を行う必要がある。海水飛沫の計測は今まで様々な方法が用いられてきた。本研究では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。SPC型しぶき計は50~1000 μmの粒径計測範囲を32分割し、粒子の粒径とその個数を1秒毎に記録できる。雨量計型しぶき計は船舶用雨量計にしぶき捕捉部を取り付けた構成である。両しぶき計とも海水飛沫の連続観測が可能である。

観測は大型砕氷船である「しらせ」（基準排水量約12,650[t]）の開放水面航行期間に2航海（JARE-55、JARE-56）実施した。SPC型しぶき計は最上層甲板（06甲板）中央に、雨量計型しぶき計は暴露貫通甲板（01甲板）左・右舷に1台ずつ設置した。海水飛沫の飛来量（しぶき量）と粒径分布の計測データは、しらせで計測されている気象データ、航行データを用いて解析した。風速、風向、船速、船首方向、うねり、風浪のデータとしぶき量との相関分析を実施した結果、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た。Figure 1に06甲板でSPCが捉えたしぶき量と相対風速の関係を示す。両者の相関係数は0.82であった。また、JARE-55における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。以上の結果より、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、船首方向から推定できる可能性が示された。また、SPCが多く粒子（5秒間に1000個以上）を捉えた期間で、平均粒径と風速、風向、船速、船首方向のデータを用いた相関分析の結果、船首から船尾方向の風速成分と平均粒径の間で正の相関があることが分かった。

海水飛沫着氷は現象が複雑で、コンピュータシミュレーションは単純2次元形状への着氷速度を計算した例（例えば Horjen, 2013）があるものの、実際の船舶に適用するには至っていない。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、用いることが多い (Overland, 1990)。

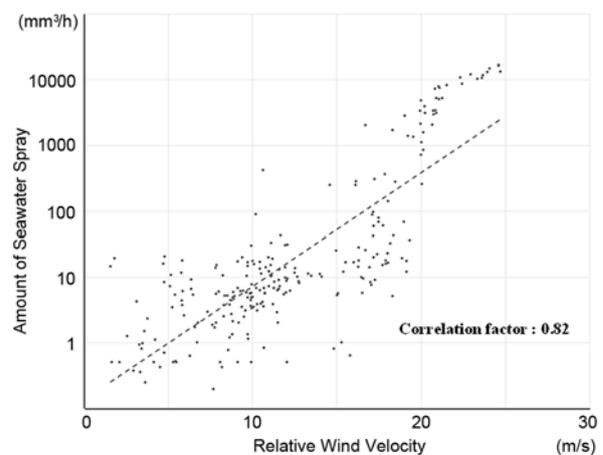


Figure 1 Correlation diagram of the amount of seawater spray measured by the SPC and relative wind velocity.

$$PR = \frac{W_s(T_f - T_a)}{1 - 0.3(T_w - T_f)} \quad (1)$$

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。しかし、(1)式分母では着氷速度がしぶき量によって一義的に決まるという仮定を用いて定数 0.3 を導いており、分子が気温に依存して増加することと矛盾するという指摘がある (Makkonen et al., 1991)。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 $W_s(T_f - T_a)$ の有効性を研究した。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、本研究では防波堤の設置した約 4 m の灯塔を望遠カメラで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。気象データは浜益アメダス (気象庁) の気温、風速、風向を浜益防波堤の値に換算して用いた。また海象データとして海面水温 (気象庁) を参照した。海水の結氷温度は -1.9°C を用いた。Figure 2 に着氷断面積の増加量と $W_s(T_f - T_a)$ との関係を示した。 $W_s(T_f - T_a)$ の増加とともに着氷断面積は単調に増加する結果となった。飛沫着氷は、飛沫の発生、飛沫の飛来、灯台の捕捉率、着氷率 (熱収支など) が総合してその成長量を決めると考えられる。 $W_s(T_f - T_a)$ は着氷率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。これまでも凍結防止剤、電熱や湯、赤外線等によるヒーティング、表面加工による難着氷、電氣的除氷、膨張や振動による除氷対策などが提案され (Ryerson, 2008)、窓の電熱線ヒーターや飛行機の翼前縁の膨張による除氷、飛行場での凍結防止剤散布など実用されているものもあるが、決定的な対策はない状況にある。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。

塩水の場合は撥水性のみならず親水性の材料でも着氷力が著しく低下する (Ozeki et al., 2012)。したがって、2 種類のシート材料 FGT (PTFE と酸化チタンのハイブリットフィルム、高撥水性)、SCC (酸化チタンフィルム、高親水性) と汎用の防水シート (ポリ塩化ビニル、撥水性) を比較した。その結果、FGT と SCC は小さな刺激やシートの変形で着氷を剥がすことが容易であった。したがって、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除氷対策を行うことが有効であることが分かった。

一方、ヒーターは大きな発熱量を必要とするので広範囲に使用するのには現実的ではないが、窓などの重要な箇所だけに選択的に使うのは得策である。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、今後のヒーティング対策品として有効であることがわかった。

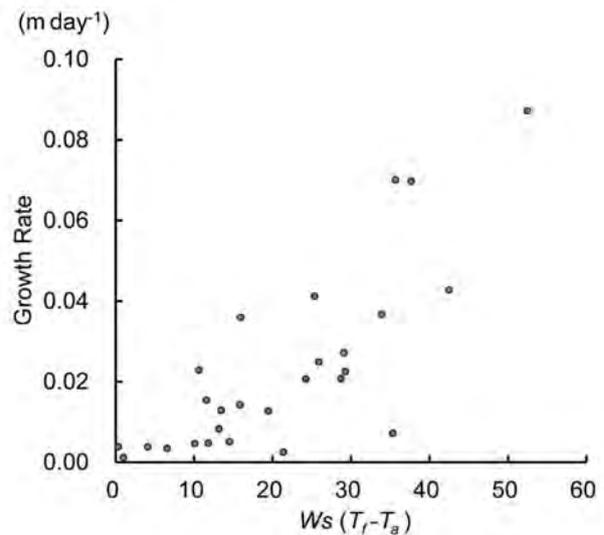


Figure 2 Relationship between predictor (product of air temperature and wind speed) and cross-sectional growth rate.

References

- 1) Jones, K. F. and Andreas, E. L., Sea spray icing of drilling and production platforms, ERDC/CRREL TR-09-3, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Hanover, 54pp, 2009.
- 2) Lozowski, E. P., Szilder, K. and Makkonen, L., Computer simulation of marine ice accretion. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 2811-2845, 2000.
- 3) Horjen, I., Numerical modeling of two-dimensional sea spray icing on vessel-mounted cylinders Cold Reg. Sci. Tech., 93, 20-35, 2013.
- 4) Overland, J. E., Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures, Wea. Forecasting, 5, 62-77, 1990.
- 5) Makkonen, L., Brown, R. D. and Mitten, P. T., Comments on "Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures", Wea. Forecasting, 6, 565-567, 1991.
- 6) Ryerson, C. C., Assessment of superstructure ice protection as applied to offshore oil operations safety, ERDC/CRREL TR-08-14, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Hanover, 156pp, 2008.
- 7) Ozeki, T., Yamamoto, R., Izumiyama, K. and Sakamoto, T., Ice adhesion tests on pliable polymer sheets for protection against sea spray icing, J. Adhesion Sci. Tech., 26, 651-663, 2012.

船舶と単独氷塊との衝突に関する安全性評価手法の検討

鳴原 達也¹、金野 祥久²

¹ 工学院大学大学院 工学研究科

² 工学院大学 工学部

Examination of risk assessment method on collision between a ship and a bergy bit

Tatsuya Shigihara¹ Akihisa Konno²

¹ Graduate School of Kogakuin University

² Kogakuin University

1. 研究目的

北極海域の氷の減少により，通常船舶が北極海航路に進入しやすくなっている一方で，極点付近の多年氷やグリーンランドなどの氷河から離脱した単体の浮氷が北極航路に増加しているため，通常の船舶が氷塊に衝突するリスクはむしろ増加している．船舶が氷塊と衝突する状況を解析し，リスクを評価できることが望ましい．しかしこのような状況の研究例は限られ，実験データや解析の積み上げが十分とは言い難い．そこで本研究では，上記の問題に実験と数値解析の両面から取り組む．これまでの研究^[1]で小規模の模型試験装置を作製し，模型船舶と氷片との衝突実験を実施するとともに，同様の条件で船舶と氷片が衝突する直前までの状況の数値解析し，互いによく一致する結果を得た．本研究では実船スケールの解析を実施し，またこれを用いた衝突時の荷重推定手法を提案する．

2. 研究方法

本研究では，過去の研究^[1]と同じ船型を用いつつ，レイノルズ数とフルード数を実船と同様の値に設定して実船に相当する数値解析を行う．数値解析には，数値流体解析ソフトウェア STAR-CCM+v8 を用いた．数値解析には水面の表現に VOF 法，船舶と氷片の移動にオーバーセット法，氷の運動には DFBI を用いて解析を行った．

また，本研究では正面衝突時の荷重の見積もり方法を以下のように提案する．

1. 数値解析を用いて船舶と氷塊の相対速度を得る．
2. 運動量保存則を用いて衝突後の速度を求める．ここで衝突は完全非弾性衝突とする．

$$m_s v_s + m_i v_i = (m_s + m_i) v \leftrightarrow v = \frac{m_s v_s + m_i v_i}{m_s + m_i}$$

ここで， m_s は船の質量， m_i は氷の質量， v_s ， v_i は衝突直前の船と氷の速度とする．

3. 衝突後の速度を用いて以下のように衝突によるエネルギー消費量を求める．

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_s v_s^2 + \frac{1}{2} m_i v_i^2 - \frac{1}{2} (m_s + m_i) v^2 = \frac{1}{2} m_s v_s^2 + \frac{1}{2} m_i v_i^2 - \frac{1}{2} (m_s + m_i) \left(\frac{m_s v_s + m_i v_i}{m_s + m_i} \right)^2$$

4. 求めたエネルギー消費量を用いて Daley and Kim^[2]の解析手法より以下の式で船舶にかかる荷重を求める．

$$F_n = P_0 f_a^{(1+ex)} \left(\frac{\Delta E (d(1+ex) + 1)}{P_0 f_a^{(1+ex)}} \right)^{\frac{d(1+ex)}{d(1+ex)+1}}$$

ここで， f_a ， d は衝突部分の氷の形状により決まる定数である． P_0 ， ex は氷の強度による定数だが，本研究では Daley and Kim^[2]と同じ値を用いる．

3. 解析結果及び結論

図1に衝突直前までの船を上から見た様子の数値解析の様子を示す．本解析では，船の速度は5ノットと仮定した．図2に進行方向の右側からの衝突直前の様子を示す．実船の数値解析により衝突直前の氷片の速度は0.812m/s（船速の31.6%）になった．STAR-CCM+v8は衝突が扱えないため船舶と氷片が近づくと解析が強制的に止まる．その時の船と氷の間の距離は約1.8mになった．

Daley and Kim^[2]の解析手法より船舶への荷重を計算する．その際に用いるパラメータを Table1 に示す．

Table 1. Example vessel and ice parameters

Parameter		value	unit
Mass of the ship	M	150	kT
Ice pressure term	P_0	3.0	MPa
Exponent on pressure-area function	ex	-0.1	
Pyramidal angle	ϕ	150	deg.
Representative length of the ice		20	m
Density of the ice	ρ	900	kg/m ³

本研究では、レーダで見つけることが困難な氷塊との衝突を想定している。そのため氷片の直径を 20m と仮定した。また氷の体積を球で求め、衝突する部分は鋭い方が、荷重が大きくなると想定されるため衝突する部分は四角錐形状と仮定した。

解析の結果より船舶にかかる荷重は 9.5MN であり、9.5MN に耐えられるように設計することによって直径 20m の氷塊と衝突しても安全である。

氷の衝突直前の速度を、上記の結果を敷衍して船速にかかわらず 31.6% と表せると仮定し、船速 10 ノットまでの範囲で衝突時の最大荷重を求めた結果を Fig. 3 に示す。Daley and Kim^[2]では船の最大耐荷重を 3.40MN と見積もっているのをこれを適用すると、本研究では氷荷重が最大耐荷重を超えない最大船速は 1.2m/s(2.3 ノット)となった。

今後は本評価法を船舶と氷塊の衝突位置の差異を考慮した解析に拡張していく。

4. 参考文献

- Shigihara T, Ishibashi D, Konno A (2015) Experimental and Numerical Investigation of a Model-Scale Ship and Ice Floe (Second report). Proc 23rd Int Conf Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions.
- Daley C, Kim H (2010) Ice Collision Forces Considering Structural Deformation. 29th Int Conf Ocean, Offshore and Arctic Eng 4:817–825. doi:10.1115/OMAE2010-20657

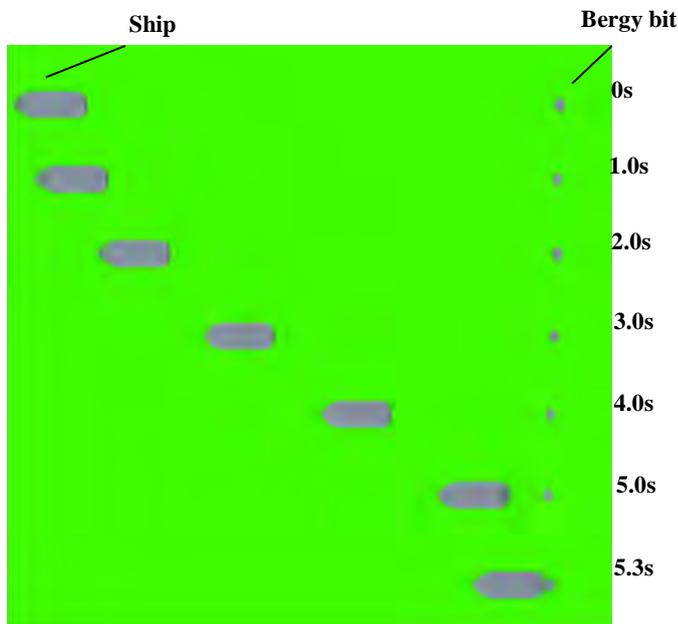


Fig1. Simulation results, top view

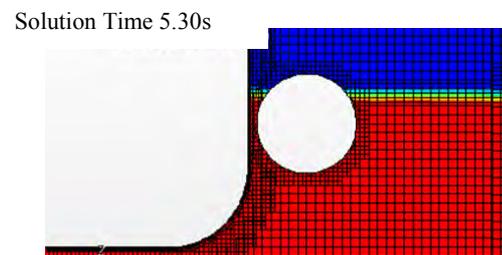


Fig2. Simulation results of just before the collision, starboard side view

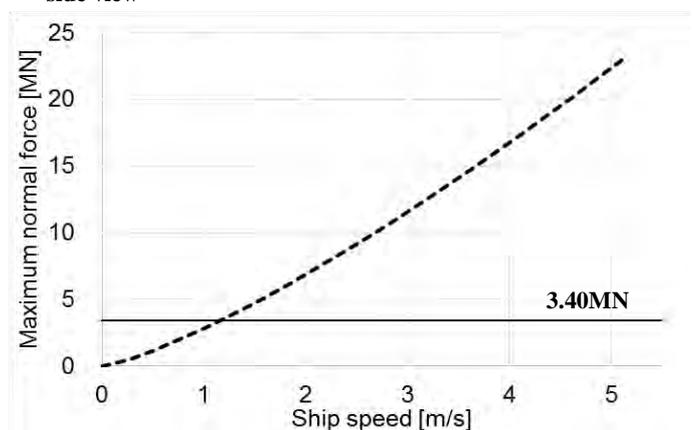


Fig3. Calculated maximum normal force vs. ship speed

船舶レーダ画像を用いた砕氷船の能力に応じた航路選択

高木敏幸¹、館山和孝²¹ 釧路工業高等専門学校² 北見工業大学

Ice navigation according to the ability of the icebreaker using vessel radar images

Toshiyuki Takagi¹, and Kazutaka Tateyama²¹Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Kushiro College²Department of Civil and Engineering, Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology

The sea ice has caused significant damage to vessels in the Arctic. There have been over 200 reported damage events over the past 25 years. It is important to avoid the collision with the sea ice, and to select the route to save the fuel and time safety. However, it is not easy to select the best sea route promptly and safely because the shape and the distribution of the sea ice are very complex. In this paper, the selection of the sea route on the ice sea is formulated as the find-path problem. The path between the start and the goal is decided by using the Dijkstra's algorithm as a query. Our system is introducing not only the distance between the start and the goal but also the ice consternation as a cost function. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

北極海航路は輸送費用削減や資源調達先の拡大など大きな経済効果を東アジア地域にもたらすことが期待されている。しかし、氷海上の船舶の運航において、海氷との衝突を避け、目的地への移動に要する燃料や時間を節約しなければならない。さらに、海氷の衝突により船が損傷し、油流出が起きれば大規模な環境破壊の恐れもあり、北極海航行する船舶の航路の決定は重要な問題である。筆者らはこのような氷海における航路の選択を衝突回避経路計画として考え、確率的ロードマップ法を用い、現在地から目的地までのダイクストラ法によって氷海航路を選択する手法を提案した。しかし、砕氷船のクラスによっては、必ずしもすべての海氷を障害物として避ける必要が無く、船の砕氷能力に応じて航路を決定される。そこで、本稿では、海氷を障害物として開放水面と分離せず、目的地までの距離に海氷密接度に対する船速を評価関数に加え最適航路を探索する手法を提案する。

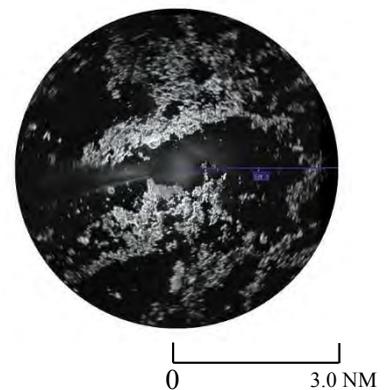


Figure1. A radar image

2. 本システム

Fig.1は2012年8月カナダ沿岸警備隊の砕氷船レイ・S・サンローランによって北緯79°57,236、西経142°31,540で採取された船舶レーダ画像である。Fig.2はFig.1のレーダ画像に対して、10pixelの円内の輝度値の平均値、すなわち、半径117.4m内の海氷密接度を等高線図で示したものである。海氷密接度の大きさは、濃淡によって示しめされている。Fig.3の海氷密接度と船速の関係を示している。図にも示されているように、平水中の到達速度が15ノットと推測され、海氷の密接度が30%から船速が減少していることが示されている。そこで、海氷中のノード間*i*と*j*間距離を*d(i,j)*としたとき、位置*j*における海氷密接度に対する船速を*f(j)*とすると、ノード間の評価関数は次式によって示される。

$$s(i,j) = d(i,j)/f(j)$$

*f(j)*を砕氷船の砕氷特性に対応させることによって、海氷密接度に対する砕氷船の砕氷能力に応じた航路を探索することが可能になる。

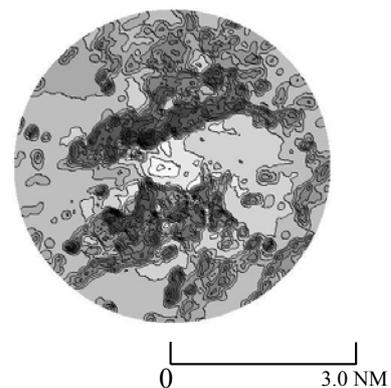


Figure2. A contour map of sea ice concentration

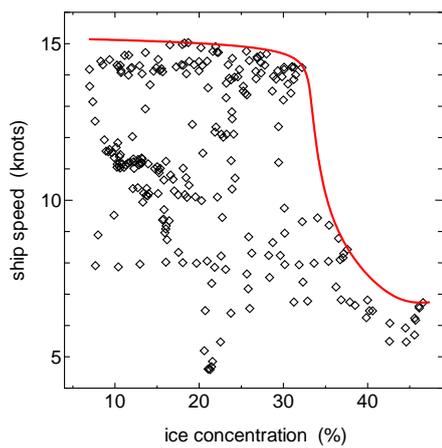


Figure3. Relation between ship speed and sea ice concentration

3. シミュレーション結果

Fig. 4のグラフはFig. 3の海氷密接度と船速の関係を平水中の船速で可能な海氷密接度と航行不能な海氷密接度を接続した3つの区分に分解した区分線形関数に近似することによって砕氷船の砕氷特性を表している。Fig. 4の(a)~(d)において、輝度値の平均値20すなわち海氷密接度が7.8%まで平水中の船速が維持でき、海氷密度の砕氷限界を23%~47%を変化させたシミュレーション結果を示す。砕氷可能な海氷密接度を23%としたFig. 4(a)では、に海氷密接度の高い領域を迂回し、海氷密接度の低い領域上に航路が示されている。現在地を示すレーダの中心から目的地までの航路距離は5613mである。一方、航行可能な海氷密接度を31%に設定したFig. 4(b)では、Fig. 4(a)と異なる航路が選択され、航路距離は3810mと短縮されている。このように航海可能な海氷密接度が増加するにつれて、航路は直線に近づき航路距離が短縮されている。

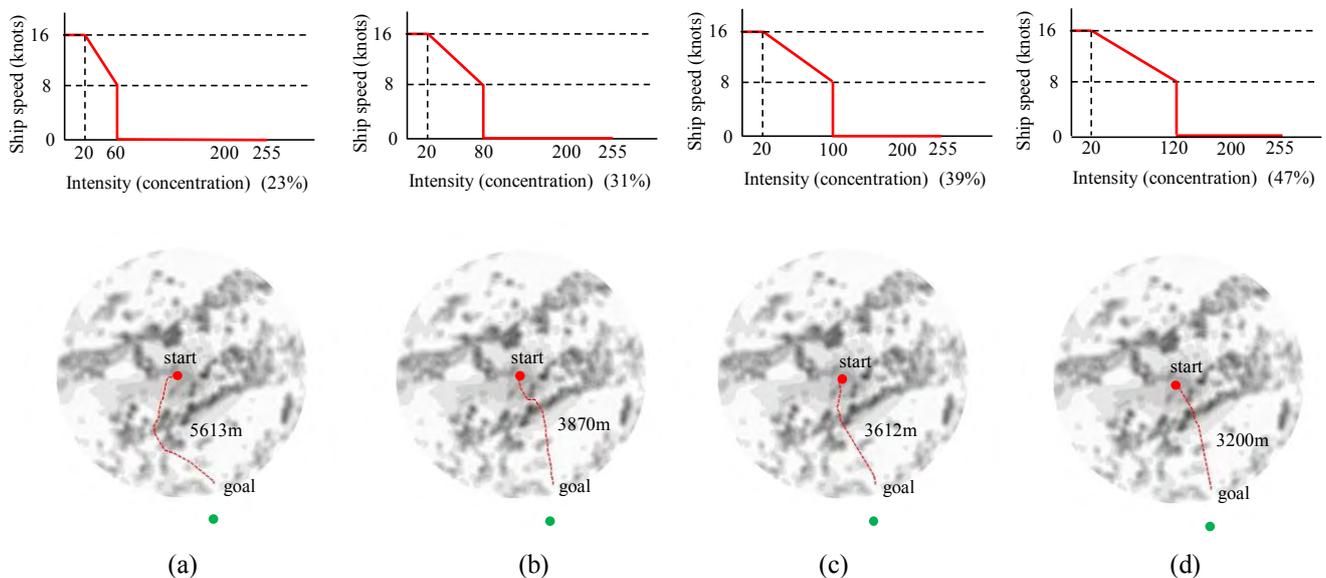


Figure4. Simulation Results

5. おわりに

本稿では、海氷を障害物として開放水面と分離せず、目的地までの距離に海氷密接度と船速の関係を評価関数を加え、砕氷船の海氷密接度に対する砕氷能力に応じた航路を探索する手法を提案した。

References

- [1] Takagi, T., Tateyama, K. and Ishiyama, T., Obstacle Avoidance and Path Planning in Ice Sea using Probabilistic Roadmap Method, 22nd IAHR International Symposium on Ice, 2014
- [2] 高木敏幸, 館山一孝, 砕氷船の能力に応じた確率的ロードマップ法を用いた氷海における航路選択, 第30回寒地技術シンポジウム, 2014
- [3] Dijkstra, E. W., A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik 1: 269–271, 1959.
- [4] Ono, J., Numerical study on a short-term sea-ice prediction for the Northern Sea Route and Northwest Passage, the 22nd IAHR international Symposium on Ice, Singapore, 2014
- [5] Takagi, T., Tateyama, K. and T. Ishiyama, Obstacle Avoidance and Path Planning in Ice Sea using Probabilistic Roadmap Method, the 22nd IAHR international Symposium on Ice, Singapore, 2014
- [6] Minjoo Choi, Yamaguchi, H. and Nakagawa, K. Arctic sea route path planning based on an uncertain ice prediction model, Cold Regions Science and Technology 61-69, 2005

北極海航路に求められる海氷情報の現在と展望

佐川 玄輝
株式会社ウェザーニューズ

Sea ice information needed on NSR navigation

SAGAWA Genki
Weathernews Inc.

北極海の国際的な商業航路利用は 2010 年代で活発化し、それに伴って、海氷情報に対する需要は急速に高まっている。事実、GRENE 事業で得られた種々の研究成果も、既に現場で用いられるようになってきている。本稿では、実際に複数の北極海航路航行をサポートしてきた経験を踏まえ、現場でどのような情報が利用されているかを紹介すると共に、これからどのような情報が求められているかを述べる。

北極海航路における最適航路探索に関する研究

今井 克哉¹、山口 一¹、中野 佑哉²

¹ 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻

² 科学技術振興機構 (研究当時、東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻)

Study of route optimization for the Northern Sea Route

1. 序論

北極海は冬季に海水ではほぼ全域を覆われるが、地球温暖化に伴い、夏季は沿岸部を船舶が航行できるほど海水域が減退する。それゆえ近年、スエズ運河経由の既存航路の他に北極海を経由した北極海航路(NSR, Northern Sea Route)に注目が集まっている。NSR は既存航路と比べて欧州、東アジア間の距離を 30-40%短縮する。それにより燃料消費をおさえて温室効果ガスの削減につながり、地球温暖化防止にも貢献できる。既存航路と大きく異なる点は海水の存在であり、Figure 1[1]に示す様な航行支援システムの構築が北極海航路の利用にあたり重要な課題となる。

Choi et al.(2015)[2]では海水数値モデルによるアンサンブル計算結果から予報の不確かさを考慮した最適航路探索を行った。ここでは船速を密接度と氷厚に比例する単純な低減式で計算した。中野(2015)[3]では、[2]をベースに氷況と船のアイスクラスをひとつの数値で表す Ice Index[3]という指標を用いてより複雑な氷況に対応した船速低減式を導出し、夏季の NSR における最適航路探索を行った。また、実航行データとの比較を行ってその有効性を確認するとともに、海水長期予測データを用いて航路利用の将来性について考察した。

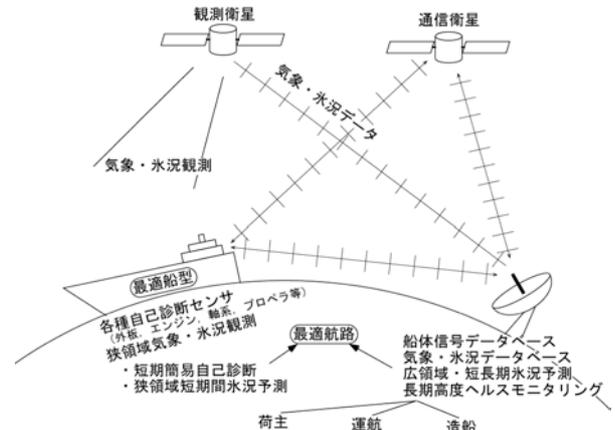


Figure 1. Schema of navigation support system[1].

2. 使用データ、探索手法

使用データは海水・海洋数値モデル Ice-POM(Princeton Ocean Model)による計算値、人工衛星による海水観測データ、NSR 実航行データ、海水長期予測データの 4 つである。Ice-POM は De Silva et al.[4]による海水・海洋連結モデルであり、本研究ではその北極海全域モデル (水平解像度 25km、233×274 格子) による、2011 年 9 月から 10 月の 2 ヶ月間について海水密接度の初期値を ±10% で変化させて 31 回のアンサンブル予測計算を行った結果を用いた。人工衛星データは、実航行航路と比較する最適航路探索を行うためのマイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer 2(AMSR2)による水平解像度 10km の海水分布データを用いた[5]。NSR 実航行データは船速と氷況について解析するため、共同研究者である北日本港湾コンサルタント株式会社[6]の大塚氏の提供による自動船舶識別装置 Automatic Identification System (AIS)のデータを用いた。Ice Index < 15 の範囲での Ice Index と船速低下率の関係を Figure 2 に示す。実航行データなので非常にバラついているが、それでも 0.718 の相関係数が得られている。長期予測データは全球気候モデルのひとつである MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research On Climate, ver. 5) (Watanabe et al. (2010)[7]) による計算結果を用いた。また最適航路探索に際し、A*アルゴリズムを用い航路探索を行う。氷況からの船速推定には Ice Index 法を用いる。

3. 結果

まず、Ice-POM によるアンサンブル予測計算結果を用いて最適航路探索を行った。氷厚 0.6 m まで砕氷可能とし、2011 年 10 月 15 日にチュクチ海を出発してスカンジナビア半島の北を目指す航路とし、Ice Index ≤ 18 の時は砕氷船のエスコートを受けるものとした。アンサンブル計算結果から切断正規分布を仮定した海水厚が砕氷能力を超えて厚くなる確率を失敗率 (failure rate) としてそれを考慮して安全性の高い航路を探索した。探索の際の評価関数は式(1)にした。 $w_1 = 1, w_2 = 100, w_3 = 1,000,000$ として得られた結果を Figure 3 に示す。

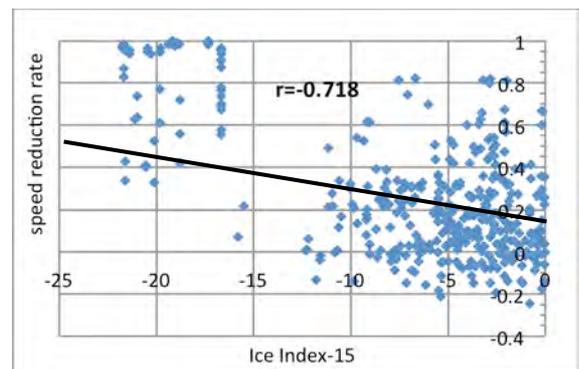


Figure 2 Relationship between ship-speed reduction rate and Ice Index.

$$\begin{aligned} \text{cost function} = & w_1 \times (\text{distance [nm]}) \\ & + w_2 \times (\text{time [hours]}) \\ & + w_3 \times (\text{failure rate}) \end{aligned} \quad (1)$$

4. 結論、まとめ

本研究では船速データと海氷状況に関連づけ、それを基に夏季の北極海航路航行における最適航路探索手法を開発した。また、実航行データとの比較および長期予測データによる将来性の検討を行った。以下に結果をまとめる。

Ice Index 法を用いて実航行の船速データを整理し、船速の推定を行った。

船速を開水面速度に対する減少率に変換することで船型によらない解析を行った。Ice Index が 15-20 の範囲においては実航行データのバラつきが大きい国際北極海航路計画 (INSROP, International Northern Sea Route Programme) で行われた研究結果[8]を参照した。Ice Index が 15 以下においては比較的高い相関関係を示した AIS データを参照することで、船速推定式を得た。

A*アルゴリズムを用いた最適航路探索手法を確立し、アンサンブル予報による予報計算結果のバラつきを考慮した航路探索を行った。

A*アルゴリズムを用いて安全性と最適性を持つ航路探索を行う手法を開発した。海氷厚が船の砕氷能力を超えてしまう確率である失敗率を考慮することで、島の近く等の計算結果のバラつきの大きい海域を避けたより安全な航路を探索できた。

衛星観測データを用いて実航行と同じ期間に航路探索を行い、比較を行った。

AIS による 3 隻の船舶の実航行データと計算による最適航路の比較を行った。沿岸で海氷が厚く、沖合でさほどでもない場合に極点に近い航路を通ることもあったが、おおむね実航行と近い航路を探索することができ、航行距離は約 5-15%、航行時間は約 10-30%と実航行より短縮される結果を得た。また、特定の海峡を通ることを強制することも可能で、島の北を通るか南の海峡を通るか等、複数の航路を提示する形が航行支援システムとしてはよいものと考えられる。

全球気候モデルによる長期予測データを用いて将来の航行時間の変化を検討した。

航行時間の長期的変化を示すことで、航路としての将来の経済性評価に貢献するデータを得た。

今後海氷域が縮小を続けるのに伴って、NSR 通航にかかる時間は 10-20%減少するとともに航行可能期間が拡大する見込みがあり、スエズ運河経由等の南回り航路に対する優位性は増していくものと考えられる。北極海の海氷は気候モデルの予測を大幅に超えて減少を続けており、今後数十年で夏季には海氷の影響を受けない航路選定 (いわゆる Trans-polar route) が出来るようになる可能性もある。

5. 今後

本研究では今後、 $w_1 \sim w_3$ の各評価関数の値の変更とそれに伴う航跡の変化、新たに w_4 (money[USD]) を導入し、燃料消費との関係性について着目していく。また、船速推定式の船型によらない ice index 法と船型に依存した抵抗推定式を両立させることで新たな船速推定を行う。

References

- [1] Yamaguchi, H., Proc. of INSROP Symposium Tokyo '95, (Ship & Ocean Foundation, Tokyo, 1995), 39-90.
- [2] Choi, M., H. Chung, H. Yamaguchi and K. Nagakawa, Cold Regions Science and Technology, 109, 61-69, 2015.
- [3] 中野佑哉, 北極海航路における最適航路探索に関する研究, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科, 修士論文, 2015
- [4] De Silva, L. W. A., H. Yamaguchi, and J. Ono, Polar Research 2015, 34, 25008, <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v34.25008>
- [5] <https://ads.nipr.ac.jp>
- [6] <http://white-sapporo.sakura.ne.jp>
- [7] Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi et al., Journal of Climate, 23, 6312-6335, 2010.
- [8] 北川弘光, 小野延雄, 山口一, 泉山耕, 亀崎一彦, 北極海航路・シップ・アンド・オーシャン財団, ISBN 4-916148-94-0, 2000

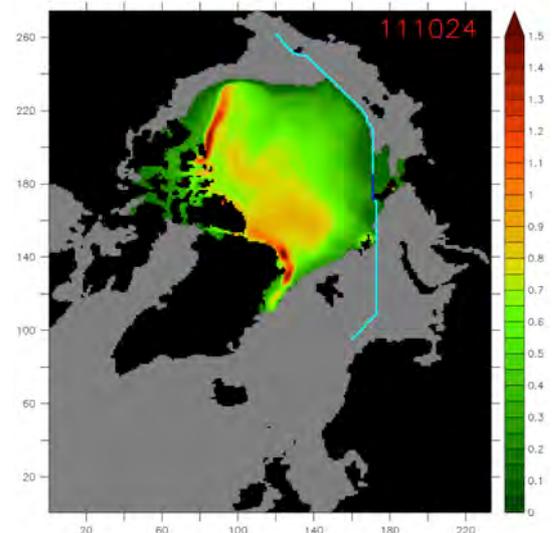


Figure 3 Optimized route (light blue: independent, blue: escorted by icebreaker) Color indicates mean ice thickness [m] on Oct. 24, 2011.

北極海航路における氷海航行と経済合理性

大塚夏彦¹、森下裕士²、舘山一孝³

¹北日本港湾コンサルタント株式会社

²北見工業大学大学院

³北見工業大学

Navigability and Economic Feasibility of the Northern Sea Route

Natsuhiko OTSUKA¹, Hiroshi MORISHITA², Kazutaka TATEYAMA³

¹North Japan Port Consultants Co., Ltd.

²Graduate School of the KITAMI Institute of Technology

³The KITAMI Institute of Technology

Feasibility of the Northern Sea route is examined in terms of navigability and shipping cost. Parameter which multiplying sea ice concentration by sea ice thickness along the Northern Sea Route showed good relationship between actual ship speed that detected by satellite AIS. And shipping cost of iron ore, liquid bulk, finished car, LNG and container via the Northern Sea Route is analyzed and compared with existing shipping route scenarios.

1. はじめに

北極海の夏期海水勢力減退が進むなか、2010年以來、北極海航路を利用した欧州・アジア間の天然資源および関連貨物の輸送が実施されるようになり、2013年には71航海、136万トンの貨物が輸送されるまでに増大した。しかし2014年～2015年は一転、北極海航路を横断した欧州・アジア間の輸送は激減した。これは、北極海航路が商用航路として失格の評価を受けたわけではなく、アジア地域の天然資源需要、ならびに船舶燃料・天然資源・アジア欧州間海上輸送価格市場の下落や、対ロシア経済制裁を市場が嫌ったことなどが生じたためと考えられる。一方この間に、北極海航路航行に関する多くの情報や経験が蓄積されるとともに、沿岸国ロシアの航行管理制度も更新され、北極海航路は未開・未知の領域ではなくなってきた。本論では、最近の実際の航行記録および海水状況をもとに北極海航路の航行実態を明らかにし、北極海航路における氷海航行の実行可能性を検討した。さらに、北極海航路を利用する各種貨物を想定し、その輸送コストについて、既往南回り航路による輸送コストと比較分析を行い、北極海航路の経済合理性ならびに実現可能性について考察した。

2. 北極海航路の航行

近年、北極海航路の夏期の航行は6月末～11月末の約5ヵ月間となっている。また、2010年以降の北極海航路を横断した航海の平均速度は、8月以降は約10kn、海水の状況がまだ厳しい6～7月は航海日数が多くなっているが、8月以降は安定して約10日間の航行時間で横断航行が完了している (Figure1)。

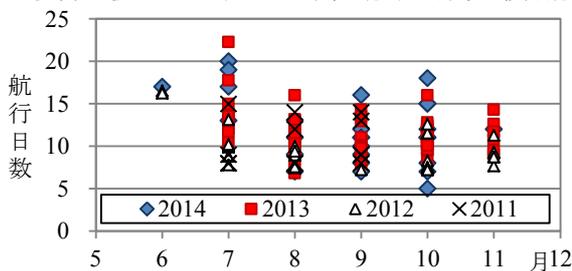


Figure 1. 北極海航路横断航行日数.

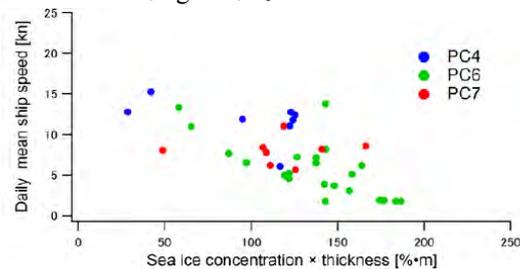


Figure 2 [密度×氷厚]と船速の関係

筆者らは2014年から、北極海航路を航行する船舶の実際の航行位置及び船速を衛星AISにて取得してきた。このうち2014年6～8月及び10月における19隻の航行事例について、航行位置における海水密度及び氷厚と航行速度の関係を分析した。ここに、海水密度は衛星搭載マイクロ波放射計AMSR2観測データを基にJAXAが提供する10km×10km精度の日平均データを利用、海水厚は推定式 (R. A. Krishfield, 2014) を用いて同じくAMSR2の輝度温度から計算した。海水密度と氷厚を乗じたパラメータと、日平均の船速の関係を調べた結果をFigure 2に示す。アイスクラスPC4の船は、海水があっても夏期なら単独航行する能力があり、この事例の中では氷況によらず10kn程度を超える速度で航行する傾向が見られる。一方、アイスクラスPC6～7の船は、海水状況が厳しい場合はロシアの砕氷船支援を受けることになるが、航行速度は氷況が厳しくなるにつれて低下する特徴が確認できる (大塚ほか, 2015)。こうした情報を蓄積・分析することにより、数値モデルによる航行シミュレーションと合わ

せて、単独航行並びに砕氷船支援での航行に関し、安全に航行できる限界や安定的に航行できる速度などを定量的に評価・予測することが可能となるであろう。

3. 北極海航路による輸送コストの分析

北極海航路の大きな特徴は、欧州北部の主要港と東アジア主要港との間の距離が 30~40%短縮されることである。そこで欧州及び北極圏と東アジアの間で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、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産地と消費地間の 1 対 1 の輸送となり、同じ産地と消費地であれば、距離の短い北極海航路輸送は、燃油費の削減効果が大きく発現し、加えて輸送日数短縮による船の原価償却費や操船経費の削減も加わり、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通航料と同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、輸送コストに占める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(Nagakawa et al., 2015.)。LNG はその傾向がさらに大きくなる。したがって、今後北極海で生産されるヤマル LNG のアジア地域への輸送コストは、LNG タンカーが短い期間で輸送できるかどうかによって、距離がわずかに遠い中東産 LNG の輸送コストと競合できるかが決まるであろう(Otsuka et al., 2015)。

一方コンテナ輸送においては、北極海を航行可能な規模の船型として 4000TEU 級の耐氷船を想定し、夏は北極海、冬はスエズ運河を通る通年運航モデル、スエズ航路については現行規模の船型(9,000~19,000TEU))を取り上げて検討した。この結果、4000TEU 耐氷コンテナ船による通年運航は、9,000TEU 級船によるスエズ運河利用時と同等程度の輸送コストとなった。しかし近年、アジア・欧州航路には 20,000TEU 級の超大型船が導入され始めた。この超大型船は、定格航行速度を下げて最適化した船型と高効率のエンジンにより、輸送コストを劇的に下げるものとなった。このため、北極海航路によるコンテナ輸送は、今後の海上輸送市場の環境動向によって、経済合理性を持ちうるか流動的となっている(Table 2) (古市・大塚, 2015)。

Table 1. 北極海航路による輸送コスト分析

シナリオ	鉄鉱石(USD/ton)		液体バルク(USD/ton)		完成自動車(USD/car)		LNG(USD/m ³)		コンテナ(USD/TEU)	
	NSR 北欧~日本	既往 アジア産	NSR スエズ 欧州~日本	スエズ 欧州~日本	NSR スエズ 欧州~日本	スエズ 欧州~日本	NSR ヤマル~日本	カタール	NSR 欧州~日本	スエズ 欧州~日本
船型	7.5 万 DWT	25 万 DWT	10 万 DWT		3800CEU	6500CEU	砕氷型 17 万 m ³	14.7 万 m ³	4000TEU	9000TEU 20000TEU
距離	6,135NM	12,694NM	8,125NM	12,337NM	7,107NM	11,617NM	5,084NM	6,670NM	7,356NM	11,417NM
輸送コスト	14.6	13.5	18.3	27.1	330	389	23.7	17.5	1,186	1,109 715

※コンテナ輸送コストの上段は 9,000TEU 船,下段は 20,000TEU 船のもの

4. まとめ

北極海航路の氷況と航行可能性の関係についての知見が集まるようになり、計画的に航行できる可能性が出てきた。実際の航行環境も緩和する傾向にあり、夏期は安定的に航行されている。北極海航路輸送コストの分析では、バルク系貨物でのコスト優位性が確認できた。さらに、それ以外の各種貨物についても、利用可能性を検討した。なかでも北極海産 LNG は、アジア及び欧州への通年輸送開始が間近となっている。その経済合理性では、北極海での航行速度が速まることが、輸送コスト面での経済性を高めることを示した。ただしコンテナについては、世界のコンテナ輸送市場の動向次第で大きく合理性が変わる状況である。またいずれの貨物事例においても、北極海航路の航行能力を定量的に評価及び計画する技術が重要な要素となる。

References

- Krishfield, R. A., Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1271-1305, 2014.
- 大塚夏彦、永川圭介、森下裕士、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、日本海洋学会・日本船舶海洋工学会、2015.
- Nagakawa, K. et al., Shipping Cost Analysis of Northern Sea Route; Iron Ore and PCC, 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2015.
- Otsuka, N. et.al., Shipping Cost Analysis of Northern Sea Route; LNG and Naphtha, 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2015.
- 古市正彦、大塚夏彦、東アジア~欧州航路における NSR・SCR 組合せ輸送の経済的フィージビリティーコンテナ輸送、完成自動車輸送、LNG 輸送一、第 49 回土木計画学研究発表会、2015.

極域を対象とした衛星データ可視化 Web サービスの開発と解析

照井 健志¹、杉村 剛¹、矢吹 裕伯^{1,2}

¹ 国立極地研究所

² 海洋研究開発機構

現在、あらゆる研究分野で観測装置や解析結果から得られるデータ量は膨大になっている。日常的にギガバイト級のデータ量を取り扱わなければならない、自然科学の分野において、科学データを効率的に扱う手法や簡易にデータを解析できる体制の構築が不可欠である。すでに米国の海洋分野では NOAA による NODC といったデータセンターが存在しており、各分野のデータ基盤としてデータ科学の中心的な役割を担っており、新しいデータ解析技術の研究開発も行われている。増え続ける科学データを扱うためにはデータの収集だけではなく、データの利用と公開を進めるための開発基盤が不可欠である。

国立極地研究所では、北極域に関するデータの一元的な収集・蓄積・公開を行い、研究者へデータを届けられる体制を目指して「北極域データアーカイブシステム」(以下、ADS : Arctic Data archive System) の基盤構築を進めている。現在、ADS では、次のような 3 つサービスを開発運用している。1) 極域研究に関わる他分野のデータの相互流通を実現する KIWA。2) 衛星データおよびモデル計算結果のグリッドデータをブラウザ上で可視化・解析する VISION。3) 地球観測衛星データを利用した極域監視ウェブサイト VISHOP。本研究発表では VISHOP による衛星データの準リアルタイム可視化サービスを紹介したい。

VISHOP(Visualization Service of Horizontal scale Observations at Polar region)は、地球観測衛星によって得られた衛星データを準リアルタイムで可視化を行う Web サービスである。日々更新される衛星データは、JAXA より ADS へ転送される、転送されたデータの可視化および表示を ADS のサーバー上で行っている。可視化された最新の衛星データは ADS の Web サイト(<https://ads.nipr.ac.jp/>)にアクセスすることで確認することができる。このような衛星データを可視化する類似の Web サービスは海外の研究機関によって行われることが多かったが、GRENE 事業期間中に、国内でも類似のサービスが多く始められるようになった。有名な例として、NICT によって運用されている「ひまわり 8 号リアルタイム Web」が存在する。このように最近では可視化されたデータの配信サービスの重要性が高まっている。ADS の VISHOP では、衛星データだけではなく、東京大学山口研究室より提供された北極海海氷分布予測や海氷流動場ベクトルについても発信を行っている。Web サービスを通じて予測と実際の観測結果の比較の参照を瞬時に行うことが可能になった。

このほかにも様々な機能の実装が行われている。マウス操作のみで行える画像の拡大縮小の加工やアニメーションの作成機能である。このように Web 上の可視化サービスは、様々な機能を付与することで研究者向けの画像作成支援という応用的な利用の可能性も生まれてきた。

VISHOP はサービス開始から、約 2 年を迎える。サービス開始からこれまでの改良履歴とそれに伴うアクセス解析の結果を紹介したい。また Web サービスを通じた研究業務支援についての考察を行い、今後実装されるデータや機能について紹介を行う。

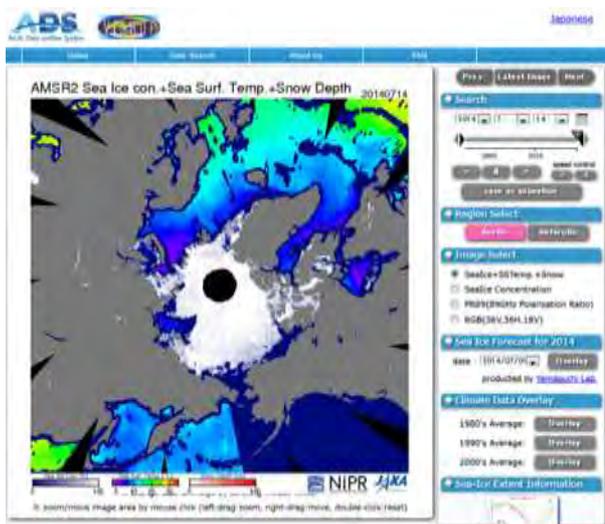


図 1: VISHOP トップページ

データ特性の視覚化を目的としたオンライン可視化アプリケーション VISION の開発

杉村剛¹、照井健志¹、矢吹裕伯^{1,2}¹ 国立極地研究所² 独立行政法人海洋研究開発機構

我々は、北極域研究に関するデータを収集・蓄積・公開するためのデータ基盤として「北極域データアーカイブシステム」(ADS: Arctic Data archive System)*の構築を行っている。このシステムは、観測データやサンプル、およびその分析データ、あるいはモデル計算結果といった様々なデータを系統的に保管・管理し、各分野間でデータセットの相互利用を円滑に進めることを目的としている。

しかしながら、現在は分野間のデータ相互利用はあまり活発に行われてはいない。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。すなわち、データ内の情報や特性を容易に把握できるシステムを構築できれば、異分野のデータを利用しやすくなり、分野間でのデータ相互利用の促進につながると考えられる。このため、ADS では、データベースによるデータの公開だけではなく、データ相互利用を促進するための情報把握システムを構築することも目的の一つとしている。

データの特徴を把握するためには、データ可視化はとても有効な手法である。しかしながら、データ可視化の際には煩雑な処理が必要となることが多く、現状では容易に利用できる状況とは言い難い。例えば、データのファイルフォーマットは作成者によって様々な形式を採用しているが、可視化アプリケーションが扱えるファイルフォーマットは限られており、フォーマットの変換を必要とする場合が多い。また、可視化アプリケーションが使い慣れていないものであった場合、使い方の習得には学習コストを要する。

このような可視化に要するコストが大きい反面、最終的に得られた結果が当初目的としていた情報と違うという場面にも良く遭遇する。特に、取得したい情報が含まれるデータが特定できていない場合、すなわちデータアーカイブなどから情報を取得したい場合には、目的とする情報が含まれるデータを予測したうえで可視化作業を行うことになる。しかし、この可視化結果より得られた情報が目的としていたものではなかった場合、データの取得から再度やり直す必要がある。このように、データの可視化には多くの作業が必要であり、膨大な時間と労力を要することが多い。

我々は、これらの可視化に伴う煩雑な作業を軽減することを目的とし、オンライン可視化アプリケーション“VISION”の開発を行っている。本発表では、現在の開発状況と機能を紹介する予定である。

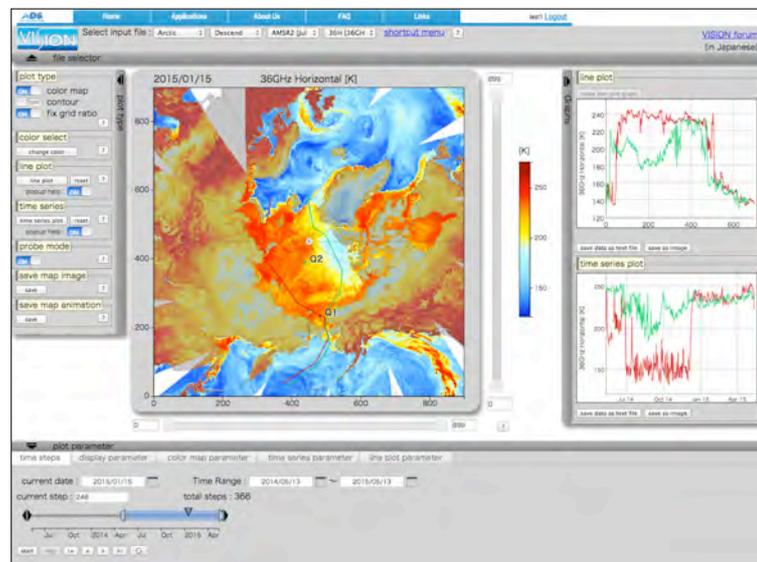


Figure 1. Visualization result of AMSR2 36GHz Horizontal Brightness Temperature using VISION.