

急変する北極気候システム 及びその全球的な影響の 総合的解明

GRENE北極気候変動研究事業

2011-2016 成果報告書



急変する北極気候システム 及びその全球的な影響の 総合的解明

GRENE北極気候変動研究事業

2011-2016 成果報告書

GRENE 北極気候変動研究事業を終えて

情報・システム研究機構
国立極地研究所
所長 白石 和行

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

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

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

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

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

2016年8月

目次

前書き GRENE 北極気候変動研究事業を終えて	3
第 1 章 序論	7
GRENE 北極気候変動研究事業について	
1. 本事業の構成	
2. 本事業の成立の経緯	
3. 本報告書の構成	
第 2 章 戦略研究目標に向けた科学的成果	15
イントロダクション	16
I. 戦略研究目標 1 北極域における温暖化増幅メカニズムの解明	19
1. 北極温暖化増幅メカニズムの総合解析	
2. 個別フィードバックの解析	
II. 戦略研究目標 2 全球の気候変動及び将来予測における北極域の役割の解明	29
1. 北極域の炭素循環	
2. 北極広域雪氷変動	
3. 北極域—中緯度帯間の熱輸送	
4. 北極域の氷河・氷床融解による海水準変動	
III. 戦略研究目標 3a. 北極域における環境変動が日本周辺の気象に及ぼす影響の評価	38
1. 北極—中緯度気候リンク	
2. 日本における寒波、大雪と北極変動の関係	
戦略研究目標 3b. 北極域における環境変動が水産資源等に及ぼす影響の評価	43
3. 北極海・周辺海域の海洋酸性化の実態と基礎生産力の維持機構	
4. 温暖化・海水減少に伴う北極海・周辺海域での優占グループの変化	
IV. 戦略研究目標 4 北極海航路の利用可能性評価につながる海水分布の将来予測	48
1. 海洋熱循環と海水集積効果による海水分布変動	
2. 北極海熱収支の変動と海水	
3. 海水分布予測と航行支援情報	
V. まとめと今後の課題	56
第 3 章 研究課題報告	61
I. 北極気候再現性検証および北極気候変動・変化のメカニズム解析に基づく 全球気候モデルの高度化・精緻化 研究課題 1	62
1. 気候モデルによる北極気候再現性の検証	
2. 北極気候変動・変化の原因特定・メカニズム解明	
3. 要素モデルの開発・改良および感度実験	
II. 環北極陸域システムの変動と気候への影響 研究課題 2	79
1. 温暖化と環北極陸域生態系の変化	
2. 長期観測サイトにおける生態系の変動	
3. GRENE-TEA 観測とモデルの連携研究	
III. 北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響：大気プロセスの包括的研究 研究課題 3	98
1. 北極域におけるブラックカーボン観測	
2. 北極域における雲の広域観測	
3. 北半球中高緯度における対流圏—成層圏結合とそのインパクト	
IV. 地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割 研究課題 4	113
1. 研究実施概要	
2. 北極積雪の変容	
3. 積雪中不純物の空間分布	
4. 氷河表面の微生物由来不純物とその融解への効果	
5. 北極圏山岳氷河の変動	
6. グリーンランドにおける氷損失とそのメカニズム	
V. 北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明 研究課題 5	127
1. 研究実施概要	
2. 温室効果気体の環北極総合観測	
3. 氷床コア・フィルン空気分析による過去 100 年間の温室効果気体の推定	
4. 3 次元大気化学輸送モデルおよび陸上生態系モデルを用いた温室効果気体の放出源・吸収源の推定	

VI.北極海環境変動研究：海水減少と海洋生態系の変化 研究課題 6	145
1. 研究実施概要（観測実施・国際連携など）	
2. 物理・化学環境の変化	
3. 海洋酸性化への影響	
4. 基礎生産の変化	
5. 動物プランクトンへの影響	
6. 高次生態系への影響	
VII.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 研究課題 7	167
1. 海水変動をもたらす基礎メカニズム	
2. 海水生産量マッピングと沿岸現場観測	
3. 北極海の循環と物理過程のモデリング	
4. 長期海水予測システムの開発	
5. 短期・中期海水分布予測	
6. 海水厚モニタリング	
7. 航行支援モデル	
8. 経済性評価および輸送シナリオ	
第4章 研究基盤、他	183
研究基盤・JCAR事務局・国際連携推進について	
1. 全体概要	
2. 海洋地球研究船「みらい」	
3. 外国砕氷船・係留系	
4. 雲レーダー	
5. 北極域データアーカイブ（ADS）	
6. 計算機資源について	
7. 北極環境研究コンソーシアム（JCAR）事務局	
8. 国際連携推進	
第5章 結語	215
全体まとめと今後の展望	
研究業績	219
1. 原著論文（査読有）	
2. 投稿中論文（査読有、submitted）	
3. 著書	
4. 誌上发表（査読無し論文、一般雑誌記事、等）	
5. その他（学会での招待講演、受賞）	
参考資料	WEB版は省略
巻末資料	261
1. 北極研究検討作業部会報告書—中間とりまとめ—	
2. 中間評価票（北極気候変動分野）	
数字で見る GRENE 北極気候変動研究事業	269

表紙：グリーンランド。雪氷微生物で暗色化した氷と融解水（写真：杉山 慎／北海道大学）

裏表紙：GRENE 北極気候変動研究事業の観測・活動が行われた地域

引用文献の記載について

* 本事業の業績を本文中で引用した場合は○○○○ et al.,20xx で表示しています。該当資料の詳細については巻末の研究業績のページをご参照ください。研究業績の 1. 原著論文（査読有）、2. 投稿中論文（査読有、submitted）、3. 著書、4. 誌上発表（査読無し論文、一般雑誌記事、等）のいずれかに含まれています。

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

* 参考資料についてはWEB版では省略していることをご了承ください。

第一章

第 1 章

序論

GRENE 北極気候変動研究事業について

プロジェクトマネージャ：山内 恭

1. 本事業の構成

目的

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

(公募要領)

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

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

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

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

(戦略研究目標)

1. 北極域における温暖化増幅メカニズムの解明
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氷分布の将来予測

(運用基本方針)

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

① 公募による共同研究の実施

② 研究設備等の提供

③ 「北極環境研究コンソーシアム(仮称)」の運営

- ・「北極環境研究コンソーシアム(仮称)」の運営：中核研究機関は、「北極環境研究コンソーシアム(仮称)」において自主的に行う以下の検討等に関し、効率的かつ効果的な活動となるよう支援する。

- 北極域に関する研究課題の検討
- 人材育成や国際協力の在り方などの重要事項に係る検討及び推進
- 北極環境研究のプラットフォーム保有研究機関等に対する当該プラットフォーム活用に関する提言
- 国際シンポジウムの開催などの研究成果の広報
- 観測データの統合・相互利用の検討(衛星観測データなど)
- IASC 等の国際的な北極研究の枠組みへの参画等に関する検討

- ・戦略研究目標(ただし、「運用基本方針」には研究課題と表記されている)：本事業においては、複数の分野の研究者が協同で我が国の将来ビジョンにも深く関わるような研究課題の解明を目指す。また、中核研究機関は、広く異なる分野の研究者を参画させるため、公募を行う。公募にあたっては、日本国民への貢献について具体的かつ明確な説明を求めることとする。

1. 北極域における温暖化増幅メカニズムの解明：

北極域は、地球温暖化による平均気温の上昇が最も大きく、地球上において気候変動による影響が最も顕著に表れる地域の1つとされていることから、温暖化増幅(Polar Amplification)に関するメカニズムについての研究を実施する。

2. 全球の気候変動及び将来予測における北極域の役割の解明：

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

3. 北極域における環境変動が日本周辺の気象や水産資源等に及ぼす影響の評価：

近年、日本においても北極振動が原因と考えられる大雪などの異常気象が発生しており、冬期の気象への影響が注目されている。このような北極域の環境変化が日本周辺の環境変動や生態系の変化が周辺諸国の陸

域や海洋に与える影響の評価を通じて、水産資源等に及ぼす影響の解明につなげる。

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：

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

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

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

研究課題

これを受けて、国立極地研究所では、グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス（GRENE）事業北極気候変動分野「急変する北極気候システム及びその全球的な影響の総合的解明」の研究課題公募を行った。研究コミュニティからは、8月29日の締め切りまでに延べ23課題の応募があり、国立極地研究所に設置した北極気候変動研究事業運営会議の議を経て、一部課題の組替え等を行い、7課題が採択決定された。

7研究課題（Research Theme）は以下の通りである。

- ①北極気候再現性検証および北極気候変動・変化のメカニズム解析に基づく全球気候モデルの高度化・精緻化
（代表：国立環境研究所＝当時、野沢徹）
- ②環北極陸域システムの変動と気候への影響
（代表：北海道大学、杉本敦子）
- ③北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響：大気プロセスの包括的研究（代表：新潟大学、浮田甚郎）
- ④地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割
（代表：国立極地研究所、榎本浩之）
- ⑤北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明
（代表：東北大学、青木周司）

⑥北極海環境変動研究：海水減少と海洋生態系の変化

（代表：海洋研究開発機構、菊地隆）

⑦北極海航路の利用可能性評価につながる海水分布の将来予測（代表：東京海洋大学、島田浩二）

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

研究基盤

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

本事業として整備した研究基盤は、海洋地球研究船「みらい」（耐氷船）、砕氷船・係留系、雲レーダー、そして北極データアーカイブである。「みらい」は1998年以来ほぼ毎年夏期に北極海航海を実施してきたが、2012年航海（MR12-E03；9月3日～10月17日）を本事業の研究基盤として運用し、多くの分野の観測を実施した。我が国には北極で使える砕氷船が無いので、カナダの砕氷船（カナダ沿岸警備隊所有のルイ・サン＝ローラン号及びローリエ号）の航海の一部を備船契約し、海水域での係留系観測ほか海洋観測に供した。北極気候に大きな懸案であった雲の鉛直内部構造や微物理を明らかにすることが期待される高精度の雲レーダーを整備し、2013年9月、ニーオルスン観測所に設置した。以後、無人観測が継続されてデータが蓄積されているとともに、大気・エアロゾル・雲の集中観測にも使用され、今後の活用も期待されている。

観測データを集積、公開する目的で、北極域データアーカイブ(ADS)が整備され、観測終了後すみやかにデータの登録がされた(データポリシーに基づく)。現場観測データだけではなく、衛星観測データ(JAXAとの協力)やモデル・シミュレーション結果も保存され、有効利用促進に寄与した。プロジェクト内での、そしてコミュニティーでのデータの利用を円滑にし、さらにはより多くの人々が多種多様な目的に応じて科学データを利用することが可能となる、オープン・サイエンスの流れにも貢献することとなる。

観測網の展開

プロジェクトでは、2011年開始以来、北極を周る様々な場所、スバルバルから、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(図1.1)。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、大気集中観測を行ってきた。また、北極海では「みらい」航海を基盤として運用したほか、砕氷船の航海が行われ、係留系の観測も進められた。取得したデータは北極域データアーカイブ(ADS)に蓄積され、解析用のインターフェースとともに供されている。また、原理的な物理モデルから大循環モデルまで、様々なモデル研究が進められて来た。

GRENE北極気候変動研究事業の観測・活動が行われた地域

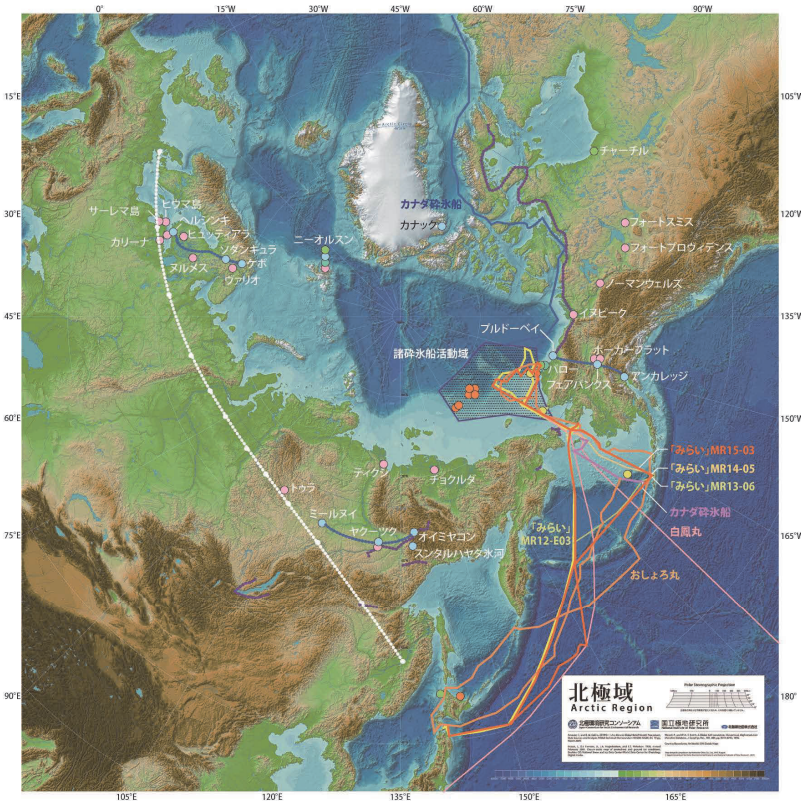


図1.1 本事業における観測点の展開(5年間の総計)。裏表紙に拡大版掲載

2. 本事業の成立の経緯

我が国の北極探検・観測は長い歴史を有している。欧米諸国を中心とした北極探検が1909年のアメリカ人ロバート・ピアリーの北極点到達で一段落した後、ほどなく、我が国も、1920年初の北極海進航に続き、1923年には農商務省水産局の白鳳丸によって武富栄一船長は北氷洋航海をなし、まさにちょうど北極圏、北緯66°30'に到達している。引き続き、1936年からは同じく武富船長が快鳳丸(図1.2)により北極海航海を行い、チャクチ海北緯67°に、1937年には最北は北緯71°23'、西経175°40'、最西は北緯69°58'、東経164°05'、コリマ川河口まで到達し、気象・海洋観測、漁業調査を行っている。さらに1939年にはアラスカ沖北緯68°27'、西経167°18'まで到達、シベリア沖までの横断海洋観測を実施している。そして、極め付きは、1941年の北南極洋周航調査計画で、ベーリング海峡を通過し北極海を横断しドイツ・ハンブルグに至り、さらに航海を続け大西洋を南下しシケープタウンから南大洋ロス海に至り、ウェリントン、シドニー経由で帰国するという、南北両極を巡る壮大な計画であった。特に、北極海の通過は困難が予想されたため、越冬の準備まで整えていた(1878年のノルデンショルドのヴェガ号や1919年のアムンセンのモード号の例に習い)。気象庁の前身、中央気象台からも技師2名が乗船し気象観測を担うという高度な観測計画を有していた。1941年6月16日東京港を出港し一路北上するが、ドイツがソ連へ侵攻した第二次大戦の勃発により、北極海に入る前に航海は中止の止むなきに至った。これら武富船長の一連の北極海航海は、白瀬轟の南極探検に匹敵する北極における壮挙であると評価したい。これまで、あまり一般に知られてこなかった歴史である(永延・小野、2013)。



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

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

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

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

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

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

北極気候変動事業の予算化の決定等を受け、「こうした状況を踏まえ、我が国における一体的・戦略的な北極研究を一層推進していく必要があることから、『北極研究検討作業部会報告書—中間とりまとめ—』に示された我が国における北極研究に関する基本方針を具体化し更に発展していく場として、地球観測部会の下に北極研究戦略小委員会*2を設置する。なお小委員会は、北極研究者のみならずより広い分野における知見を有する有識者をもって構成するものとする。」こととなった(2011年2月28日、科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会、地球観測推進部会「北極研究戦略小委員会の設置について」)。そして、プロジェクトには目的を定め、戦略的に研究を進めて欲しいと言うのが予算当局の文部科学省および北極研究戦略研

究小委員会の意向であった。先の北極研究検討作業部会での議論や報告―「中間とりまとめ」を元に、戦略研究小委員会および作業部会の主査、幹事役の文部科学省研究開発局環境エネルギー課および海洋地球課の意向で4つの戦略研究目標の案が定まったわけである。

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

代表機関となった国立極地研究所では、GRENE北極気候変

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

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

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

○運営会議の役割・権限

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

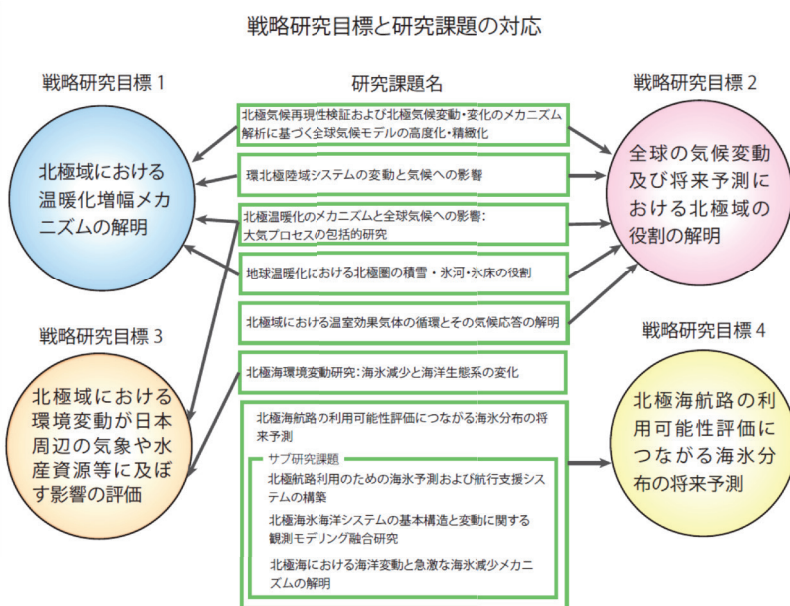


図1.3 GRENE北極気候変動研究事業実施のしくみ 7研究課題と4戦略研究目標の関係。

究計画の修正を求めることができる。

- (6) 代表者及びPIに対し、研究課題間の連携を促し、プロジェクト全体での目標達成を実現する。

○ 代表者の役割・権限

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

○ PIの役割・権限

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

○ 運営会議・代表者・PIの関係

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

とされた。

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

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

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

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

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

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

3. 本報告書の構成

本報告書は本文の5つの章と研究業績一覧、そして参考資料からなる。第1章では本事業の構成、設立の経緯、報告書の構成を述べた。第2章では、戦略研究目標に対する科学的成果を

- 注
 *1 「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス」(GRENE)事業概要(文部科学省、公募要領)：
 ◎安成哲三 名古屋大学地球水循環研究センター教授
 ○山内 恭 国立極地研究所副所長、北極観測センター長
 ◎：主査、○：主査代理

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

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

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

- *2 第6期科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会、地球観測推進部会、北極研究戦略小委員会 名簿(平成23年4月4日現在)：
 浮田甚郎 新潟大学理学部自然環境学科学物質循環科学教授
 浦塚敏彦 株式会社商船三井営業調査室室長代理
 ◎小池勲夫 琉球大学監事
 高村ゆかり 名古屋大学大学院環境学研究科教授
 瀧澤美奈子 科学ジャーナリスト
 深澤理郎 独立行政法人海洋研究開発機構地球環境変動領域長
 福田正己 福山市立大学都市経営学部都市経営学科学教授
 堀川 康 独立行政法人宇宙航空研究開発機構技術参与
 安岡善文 情報・システム研究機構監事
 安成哲三 名古屋大学地球水循環研究センター教授
 ○山内 恭 情報・システム研究機構国立極地研究所副所長
 若土正暁 北海道大学低温科学研究所名誉教授
 和気洋子 慶応義塾大学商学部教授
 ◎：主査、○：主査代理
 ・オブザーバとして議論に加わる関係各省庁
 文部科学省、外務省、環境省、内閣官房(総合海洋政策本部)、国土交通省、農林水産省等

- *3 第6期科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会、地球観測推進部会、北極研究検討作業部会 名簿(平成22年7月6日現在)：
 青木輝夫 気象研究所物理気象研究部第三研究室長
 東久美子 国立極地研究所研究教育系気水圏研究グループ准教授
 阿部彩子 東京大学大気海洋研究所准教授
 五十嵐 保 独立行政法人宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター研究領域リーダー
 石川 守 北海道大学地球環境科学研究院准教授
 榎本浩之 北見工業大学社会環境工科学科教授
 大畑哲夫 独立行政法人海洋研究開発機構地球環境変動領域プログラムディレクター
 島田浩二 東京海洋大学海洋科学部准教授
 杉本敦子 北海道大学地球環境科学研究院教授
 野沢 徹 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター大気圏環境研究領域大気物理研究室長
 原 登志彦 北海道大学低温科学研究所教授(寒冷陸域科学部門)
 原田尚美 独立行政法人海洋研究開発機構地球環境変動領域物質循環研究プログラム古海洋環境研究チームチームリーダー
 福田正己 福山市立大学教授(前アラスカ大学教授)
 藤谷徳之助 地球温暖化観測推進事務局長
 松浦陽次郎 独立行政法人森林総合研究所立地環境研究領域土壌資源研究室長

第二章

第2章

戰略研究目標に向けた
科学的成果

イントロダクション

プロジェクトマネージャ：山内 恭
 連携コーディネーター：高田久美子

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

背景

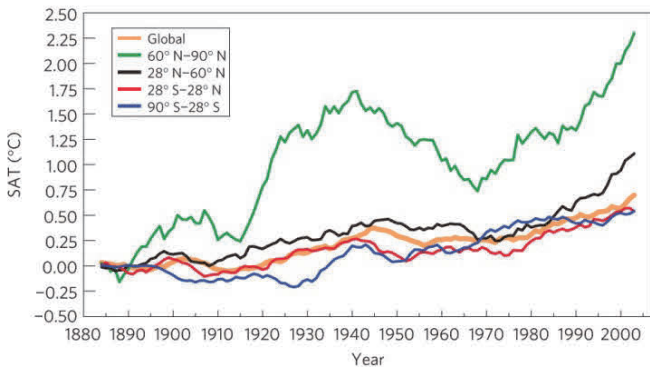


図 2.0.1 1890 年以来的観測された地上気温偏差 (1880-1890 年を基準)、緯度帯毎の 9 年間移動平均。橙色が全球平均、緑が北極域¹⁾

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

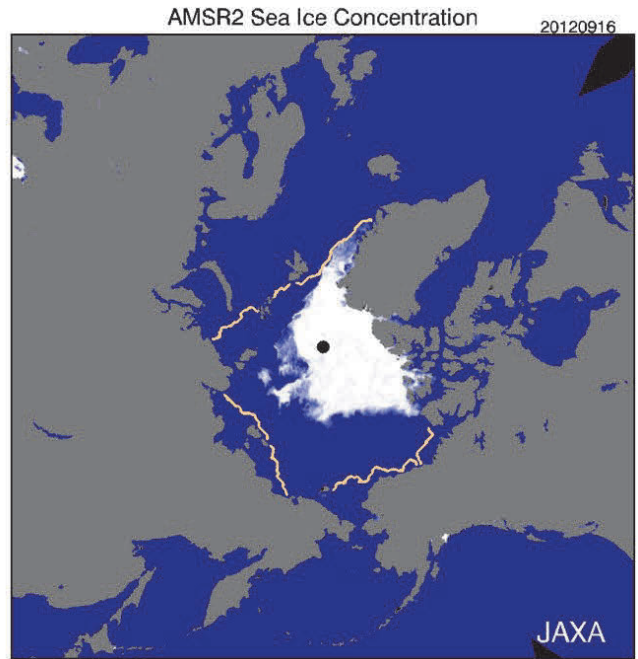


図 2.0.2 2012 年 9 月夏季の海氷最小の広がり。桃色の線は 1980 年代の海氷域

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

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

今問題になることと、わが国でやれること、得意とすること

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

北極研究戦略小委員会の意向であり、4つの戦略研究目標が決められて研究が開始（公募）された。そのいきさつは第1章に詳述した。

4つの戦略研究目標

北極研究戦略小委員会により示された戦略研究目標は以下の4つである：

1. 北極域における温暖化増幅メカニズムの解明
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

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

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

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

気課題が、3bに対しては研究課題6.海洋生態系課題が対応したので、ここでは単純に1対1の対応となった

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

研究を進めるにあたっての基本的立場

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

また、「いつのことを語っているのか」、研究が所掌する時間についても、100年スケールまでの現象を扱うからと言って、100年後の予測を中心にする訳ではない。モデル研究においては、現在と100年後との比較という手段を多用するために、100年後の描像がたびたび登場するが、最終的な論点は「近年の状況」、「今起こりつつある変化」である。北極温暖化が中緯度の冬の寒冷化に影響しているとの議論があるが、これも現状の北極の温暖化状況の基での論議で、このまま100年後まで適用できるとは限らない。

温暖化の考え方にもいろいろある。この100年の全球平均の温暖化は人為起源二酸化炭素の大気中濃度増大によるものとの「地球温暖化」論²⁾(IPCC, 2013など)に準拠するが、だからといって、北極温暖化増幅が、また北極域での強い温暖化が、全て人為起源の温暖化だと主張しているわけではない。北極域には様々な気候変動の仕組みがあり、温暖化を強めているとともに、人為起源変動や太陽活動の変動のように外力の変化(放射強制力の変化)が無くとも、気候システムの中の自然な内部変動の傾向があるものである。大気や海洋の持つ特有な変動とも言われている。図2.0.1に掲げた北極の気温変動でも、1940年にかけての大きな温暖化が見られ、特に北半球高緯度に限定的で、これは様々な研究がなされてきたが、確固たる外力の変化とは認められず、地球の気候システム内部の自然変動が原因ではないかと言われている。「20世紀前半温暖化」と言って、依然大きな課題である³⁾。現在の強い温暖化の中にも、この自然変動の要素も含まれている可能性がある。

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

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

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

引用文献

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

I. 戦略研究目標 1

北極域における温暖化増幅メカニズムの解明

戦略研究目標代表者：野沢 徹

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

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

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

1.北極温暖化増幅メカニズムの総合解析

執筆者：吉森正和 Laine Alexandre 阿部彩子

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

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

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

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

第一に、世界中の気候モデルに共通して見られる「メカニズム」を抽出するために、個々の気候モデルのプログラムを直接必要とせず、限られた出力変数からでも診断できる方法を適用した。具体的には、大気上端でのエネルギー収支解析に使用されていた放射カーネル法を地表面でのエネルギー収支解析に応用した。そして、領域ごとの解析や季節ごとの解析においても耐える精度が保てるように改良や精度確認を行った。詳細については、Laine et al. (2016)のAppendixを参照されたい。

第二に、第一の方法では分解できないが、寄与の大きな項(気

温上昇の寄与) について、詳細に診断する方法 (Climate Feedback-Response Analysis Method (CFRAM)、以下では CFRAM 法と表記する) を適用した。地表面エネルギー収支に基づく解析では、地表の昇温が気温の上昇をもたらし、気温の上昇が地表の昇温をもたらすという循環した解釈に陥るが、エネルギー収支式を地表と大気で同時に解くことにより、この問題が解消される (Yoshimori et al., 2014a)。ただし、この方法では気候モデルのプログラムの一部 (放射伝達部分) を直接使用する必要があるため、解析は日本の気候モデル Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) に限られる。また、異なるバージョンの MIROC モデルに適用するため、放射カーネル法を大気全層にわたって適用する方法を導入し、精度を確認した (Yoshimori et al., 2014b)。さらに、雲と雪氷アルベドの同時変化が引き起こす非線型な放射効果による誤差を改善した (Yoshimori et al., 2016, in prep.)。

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

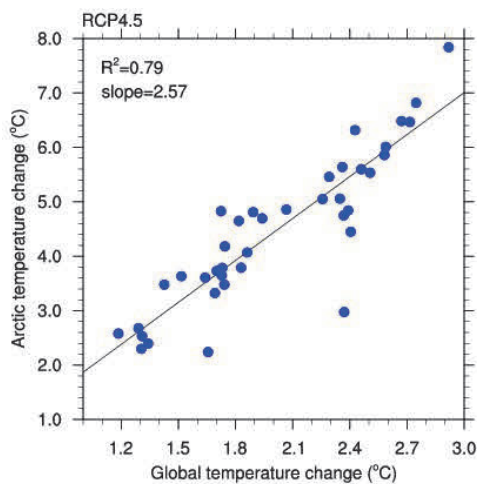


図 2.1.1 RCP4.5 シナリオにおける 21 世紀 100 年間の気温上昇。Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) に参加した 40 の気候モデルによる各世紀末の 20 年平均の差から計算。

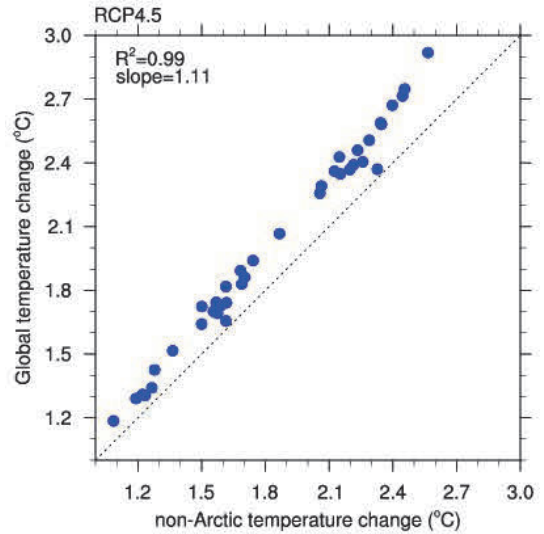


図 2.1.2 図 2.1.1 と同じ。ただし、横軸は北極域を除く全球平均気温。縦軸は北極域を含む全球平均気温。点線は 1 対 1 の関係を表す。

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

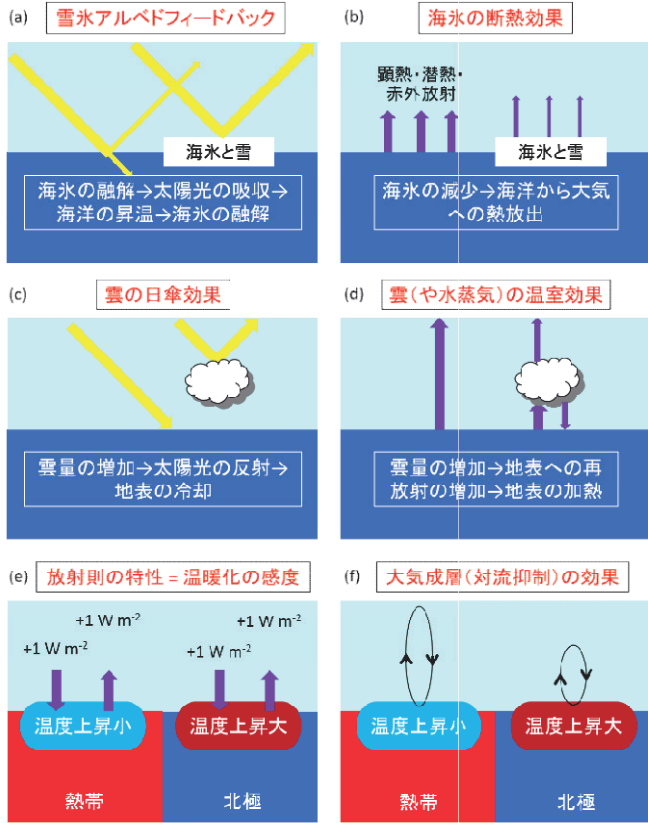


図 2.1.3 地表面のエネルギー収支に影響を与える代表的なプロセス。(a) 雪氷の太陽光反射効果、(b) 海水の断熱効果、(c) 雲の太陽光反射効果、(d) 雲の赤外放射の吸収と再放射効果、(e) ステファン・ボルツマンの放射則の非線型性、(f) 大気成層の効果。

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

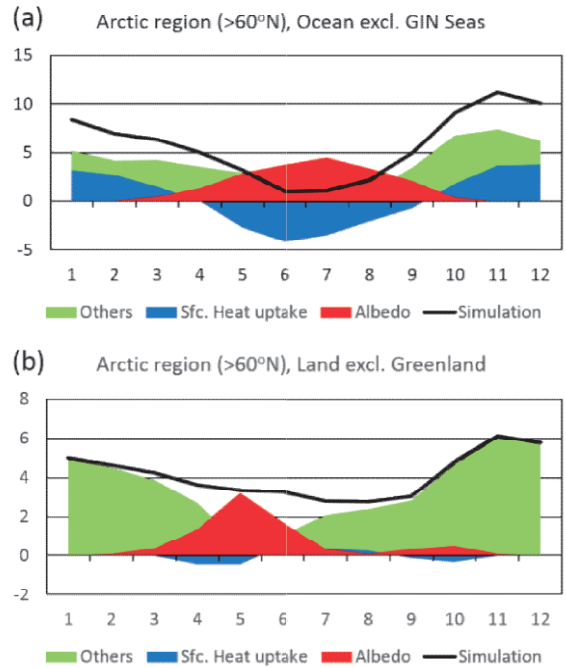


図 2.1.4 アイス・アルベドフィードバック（赤色）、海洋熱吸収-放出（青色）、その他のプロセス（緑色）の北極温暖化への寄与（ $^{\circ}\text{C}$ ）。CMIP5 の 32 モデル平均。(a) グリーンランド海、アイスランド海、ノルウェー海を除く北極域の海洋、(b) グリーンランドを除く北極域の陸上。黒線はシミュレーション結果を表す。(a)と(b)の縦軸の違いに注意。Laine et al. (2016) のデータを基に作成。

図 2.1.5 では、図 2.1.4 のアイス・アルベドフィードバックと海洋熱吸収-放出の効果をもつにまとめ（赤色）、その他の効果の詳細を表示している。なお、図 2.1.5 における地表蒸発と潜熱フラックスは、海洋からの熱放出と深く関わっているはずであるが、本解析では、数値モデル中での取り扱いに従って切り分けられているため、一部の効果が重複して計上されている心配はない。図 2.1.5a によれば、海では、強い大気成層の影響で温度上昇が地表付近に閉じ込められ（黄土色: non-barotropic）、さらに雲による温室効果（灰色）が 10~11 月の温度上昇をもたらすことで大きな温暖化が生じることがわかった。陸でも、海と共通して、10 月以降の秋から冬にかけては、大気成層の影響や雲の温室効果が温度上昇に対して比較的大きく関わることがわかった（図 2.1.5b）。図 2.1.5 の緑色（Warming sensitivity）は、各プロセスの寄与が全球同様と仮定した場合に、図 2.1.3e の放射則の特性（温暖化感度）が北極温暖化に寄与する量を表している。また、図 2.1.5 の紫色（Synergies）は、各プロセスと温暖化感度における北極域の全球平均値からのずれの相乗効果を表す。したがって、秋から冬にかけて、北極域でフィードバックが全球平均よりも正に大きく、かつ温暖化感度が高いことが、大きな昇温に寄与していることが分かる。厳密な計算方法については、Laine et al. (2016) を参照されたい。

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

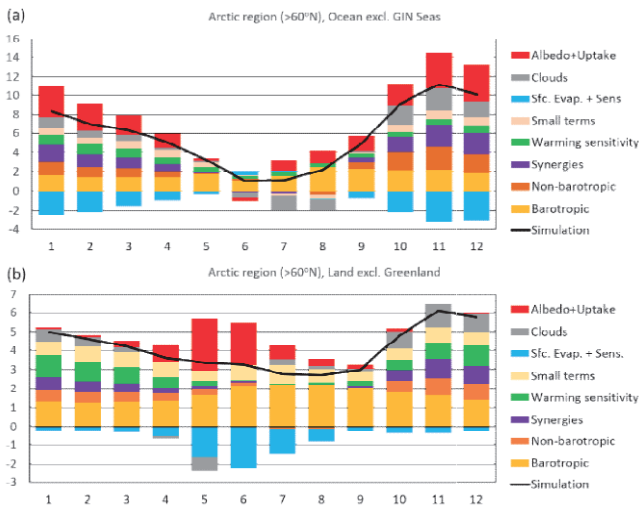


図 2.1.5 個別のプロセスの北極温暖化への寄与 (°C)。CMIP5 の 32 モデル平均。(a) グリーンランド海、アイスランド海、ノルウェー海を除く北極域の海洋、(b) グリーンランドを除く北極域の陸上。黒線はシミュレーション結果を表す。(a)と(b)の縦軸の違いに注意。Laine et al. (2016) のデータを基に作成。"Albedo+Uptake": 雪氷-アルbedoと海洋熱吸収-放出効果の合計、"Clouds": 雲、"Sfc. Evap. + Sens.": 地表蒸発と顕熱フラックス、"Small terms": 微小項の合計、"Warming sensitivity",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

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

である。以上の過程は、地表面エネルギー収支解析において、秋から冬にかけて海洋の熱が放出され、地表付近（および地表面）が暖まることに相当する。

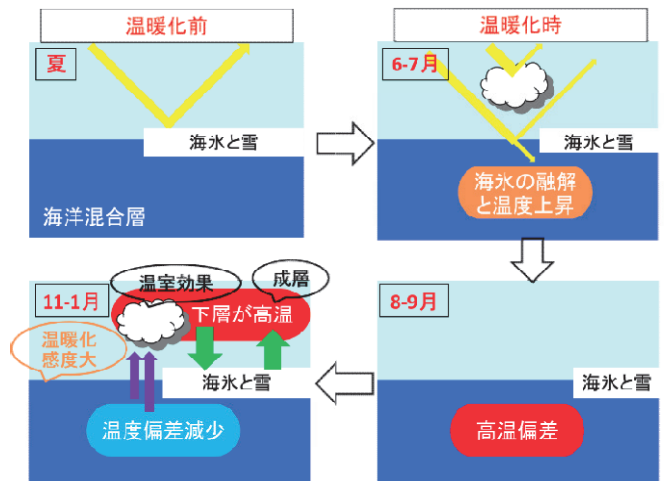


図 2.1.6 北極海における北極温暖化増幅の季節性を表す模式図。

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

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

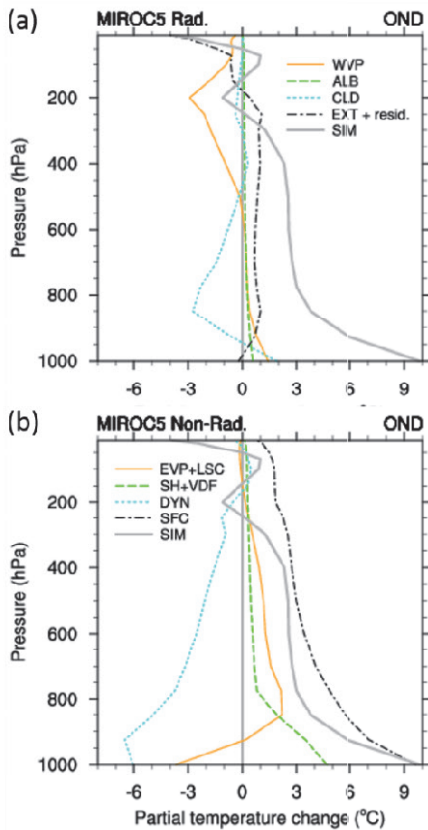


図 2.1.7 MIROC5 気候モデルの RCP4.5 実験における北極域（北緯 70 度以北の主に海洋）の大気温度の上昇（灰色）に寄与する個々のプロセス（21 世紀末と 20 世紀末の差）。季節は 10～12 月平均。Yoshimori et al. (2014b) と同様の方法で解析。(a) 放射効果、(b) 放射以外の効果。EXT: CO₂、WVP: 水蒸気、ALB: 雪氷アルベド、CLD: 雲、EVP: 地表蒸発、LSC: 大規模凝結+対流、SH: 地表顕熱フラックス、VDF: 鉛直拡散、DYN: 移流、RES: 海洋の熱吸収-放出など、SIM: シミュレーション結果。

以上の「北極温暖化増幅メカニズムの総合解析」における一連の研究結果は、気候モデルの不確実性について、次のことを示唆する。気候モデルにおいて、海氷のアルベドは非常に簡略化して表現されており、しばしば「チューニング」によって決定される。特に海氷上のメルトポンドのようなアルベドが時間の経過とともに変化する過程はきちんと表現されていない。アルベドフィードバックは年平均でみた場合に北極域のエネルギー収支変化の最も重要な項であることから（Yoshimori et al., 2014a,b, Laine et al., 2016）、アルベドの定式化の改善が重要と考えられる。また、夏と秋から冬にかけての海洋の熱吸収や放出においては、海洋の混合層深度を正確に表現する必要がある（Yoshimori et al., 2014b, Laine et al., 2016）。鉛直解像度の検討も含め、現在気候における再現性の改善が重要と考えられる。同時に、海洋から放出された熱エネルギーの鉛直分

配や大気成層の強さに関しては、大気境界層の表現が重要となる。また、放射則の非線型性に起因する温暖化感度は、背景場、すなわち現在気候の寒暖バイアスの影響を受けるため、現在気候再現性におけるバイアスの低減も重要と考えられる。さらに、海水融解にともなう雲の増減や混合相雲の表現についてもさらなる検証が必要と考えられる。

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

2. 個別フィードバックの解析

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

(1) 海氷-雲フィードバック

執筆：阿部学、野沢徹、小倉知夫

はじめに

北極域温暖化増幅（Arctic Amplification : AA）の原因として、海氷や積雪の減少に伴うアイス・アルベドフィードバックがよく知られている。この他に、北極域で太陽入射量の少ない秋季から春季においては、温暖化に伴い北極域の雲が増加することで下向き長波放射が増加することも AA の要因として考えられている。近年、地球温暖化の影響により 9 月を中心に北極の海氷が著しく減少しており、それにもなつて低層雲が増えていることが、人工衛星データを使った研究によって報告されている⁴⁾。このような雲の増加による下向き長波放射量の増加が、太陽入射量の小さい、あるいはほとんどない北極域の秋季から春季にも気温上昇や海氷減少へ寄与する可能性があることから、北極海の雲量変化メカニズムや雲量変化による放射収支への影響を解明することが AA のメカニズム解明のための一つの課題となっている。

北極海域での観測データの不足から、鉛直構造を含めた雲変化の実態の把握やメカニズムの検証はまだ難しい。一方、数値モデルによる北極域の気候・気象のモデルの再現性が高くないことも信頼性のあるメカニズム理解を難しくしている原因の一つでもあるが、激しい温暖化を生じる将来見通し実験の結果から、北極海の急激な海氷減少と雲量増加が秋季を中心に顕著に

起こることが確認されている⁵⁾。それに対して、気候モデルが再現する20世紀後半からの近年の温暖化期のような、現実的な条件を与えた実験での海氷変化と雲の変化の関係を調べ検証した研究はみられない。そこで本研究では、気候モデルを用いた過去再現実験における近年の雲変化の再現性を検証するとともに、そのメカニズムや放射収支への影響の理解を通して、近年の気候変動における北極海の家氷減少と雲量変化のフィードバックを考察すべく、全球気候モデルで起こっている海氷減少による気温や水蒸気の鉛直構造や雲量の変化、雲変化による放射量への影響を調べた (Abe et al., 2015)。

モデルと実験

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

結果と考察

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

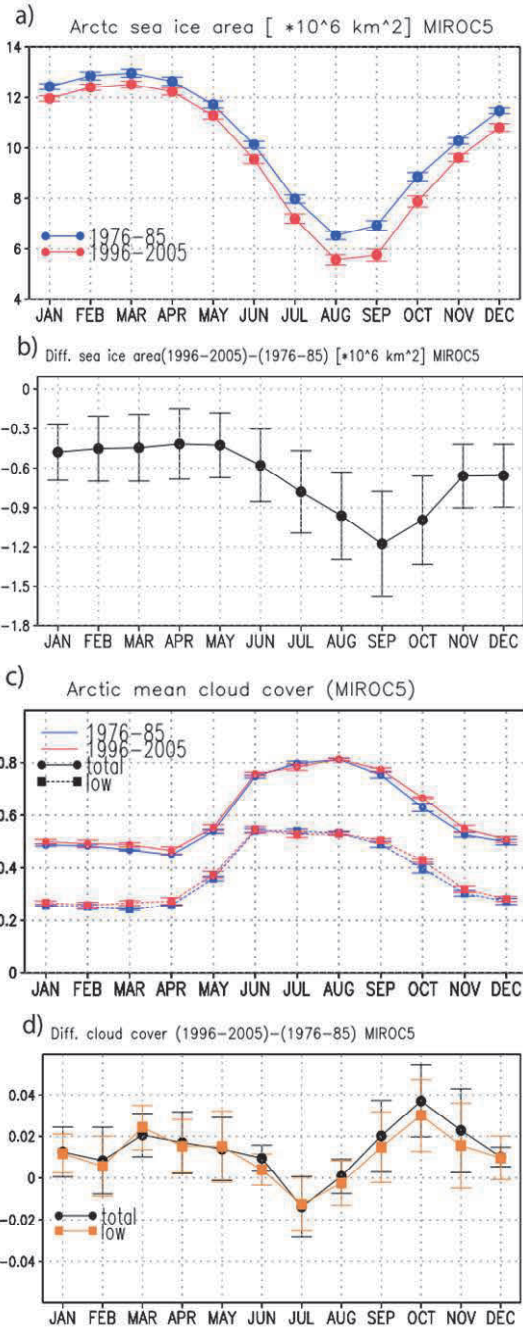


図 2.1.8 気候モデル MIROC5.0 の 20 世紀再現実験における a) 北極海氷面積と c) 北極海域で平均した全雲量と低層雲量の季節変化 (青線: 1976–1985 年平均値、赤線: 1996–2005 年平均値)。それらに関する両期間の差、b) 海氷面積、d) 雲量 (黒: 全雲量、橙: 低層雲量)。エラーバーは 5 本のアンサンブルメンバー間の標準偏差幅。単位: 海氷面積 [$\times 10^6 \text{ km}^2$]。雲量: 次元なし。

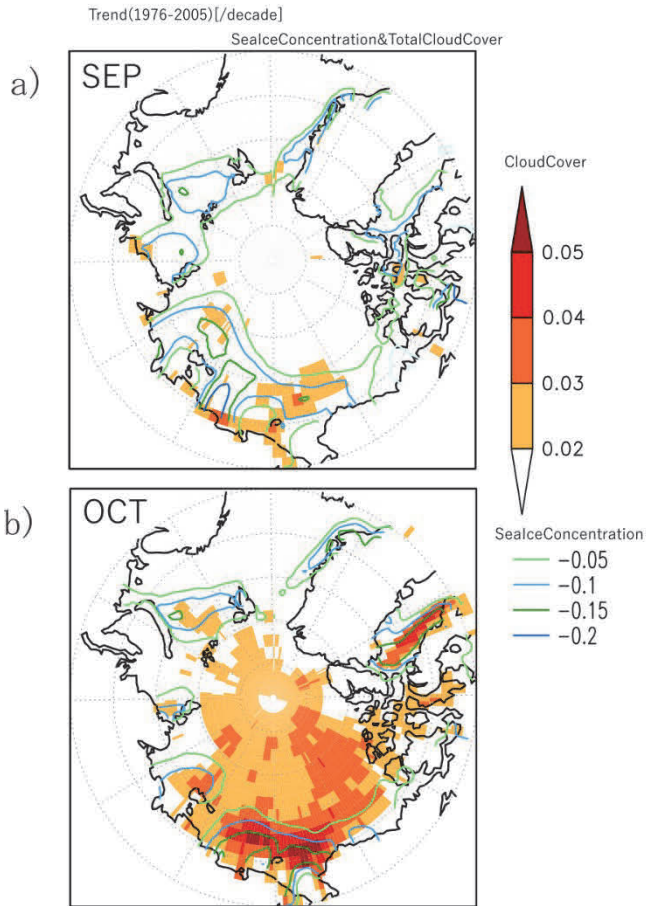


図 2.1.9 気候モデル MIROC5.0 の 20 世紀再現実験 1976–2005 年期間での a) 9 月、b) 10 月の全雲量と海水氷密度の線形トレンド。単位：[/10 年]。

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

10 月の海水氷減少が顕著な地点を平均した雲量、気温、比湿の鉛直プロファイル解析の結果、海面に近い低い層(およそ標高 450m 以下)では強い気温上昇を受けて相対湿度が低下し雲量が低下する傾向、その上の層では相対湿度の増加とともに、雲量が増加する傾向がみられた。この雲量の増加に関しては、

対流性の雲と大規模凝結による雲がともに増加する傾向にあった。

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

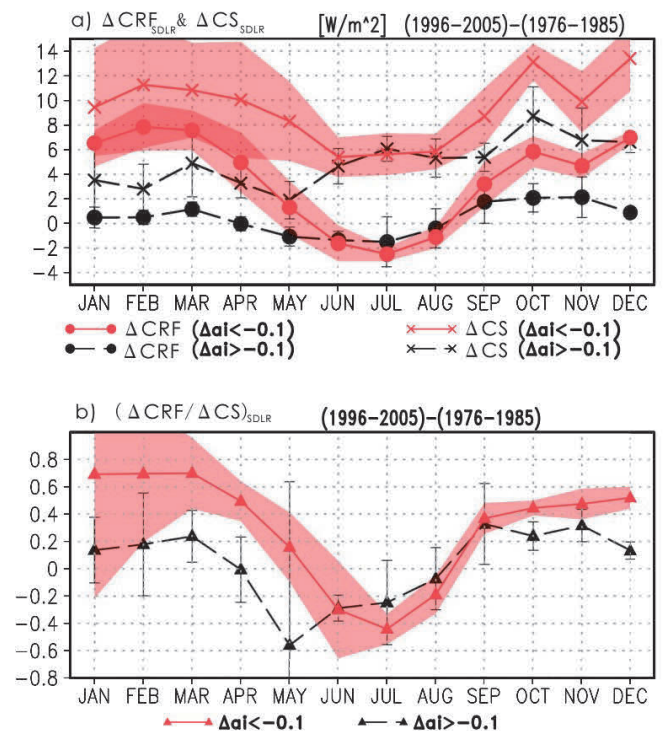


図 2.1.10 a) 気候モデル MIROC5.0 の 20 世紀再現実験における、北極域(66–90°N)の地表面での下向き長波放射量に関して、晴天時(×) $\Delta CRF_{SDLR}/\Delta CS_{SDLR}$ と雲の放射強制力(●) $\Delta CRF_{SDLR}/\Delta CS_{SDLR}$ の変化量の各月の変化。変化量は 1976–1985 年平均値と 1996–2005 年平均値の差として示す。赤線：1976–2005 年の海水氷密度の線形トレンド (Δai) < -0.1 [/decade] であるグリッドの平均値。黒線： $\Delta ai >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

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

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

(2) 大気子午面循環の変化と北極温暖化増幅

執筆者：浮田甚郎

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

この断熱加熱の強度を実験の結果から定量的に見積もった所、元々の境界条件の違いとして与えた北極(北緯 70 度以北)平均での乱流熱フラックスの違いの 3.6Wm^{-2} に対して、 2.7Wm^{-2} に達する事が判った。この事は、海氷が減る事により海洋から大気への熱の供給が増加し大気が直接暖められる事他に、循環場の変調に伴う断熱加熱により、北極の大気が暖めら

れる事を意味する。即ち力学的なフィードバック、それも気候学的に重要なポジティブなフィードバックが働く事を新たな北極温暖化のメカニズムとして示した(図 2.1.11)。

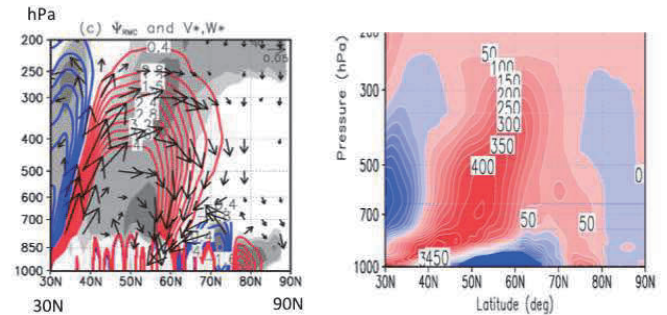


図 2.1.11 東西平均した子午面循環をあらわす。(左) モデルにより計算された、少氷に伴う子午面残差循環(矢印)と流線関数(赤は時計回り、青は反時計回り)。(右) ERA-Interim を用いて計算した、子午面における E-P フラックスの収束・発散に伴う残差循環と流線関数。それぞれ 11-12 月平均で基準化したバレンツ・カラ海海氷インデックスとの回帰係数。

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

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

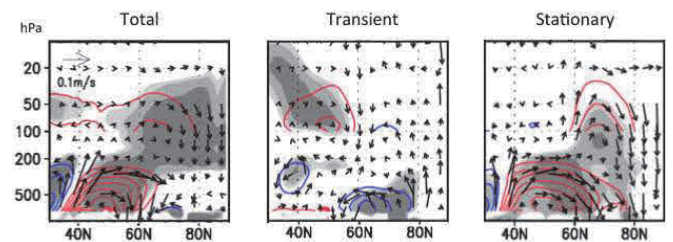


図 2.1.12 東西平均した子午面循環をあらわす。(左) モデルにより計算された、少氷に伴う子午面残差循環(矢印)と流線関数(赤は時計回り、青は反時計回り)。(中)、左図と同様、ただし短周期成分。(右) 左図と同様、ただし月スケールの長周期成分。

(3) 積雪-アルベドフィードバックの定量化に向けて

執筆者：野沢徹、高田久美子、榎本浩之、堀雅裕

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

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

(4) 炭素循環フィードバックの影響

執筆者：野沢徹、杉本敦子、青木周司

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

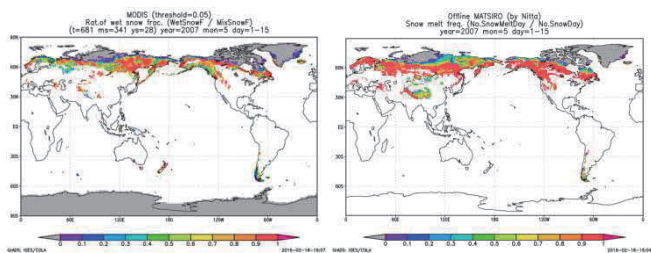


図 2.1.13 融雪期(2007年5月前半)における湿雪被覆率の地理分布。(左)衛星データから新たに推計したデータ、(右)陸面モデルによるオフライン実験結果。衛星データは被覆率 0.05 以下は示していない。オフラインモデルは各グリッドにおける融雪日の頻度で代用している。

引用文献

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

II. 戦略研究目標 2
 全球の気候変動及び将来予測における
 北極域の役割の解明

戦略研究目標代表者：杉本敦子

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

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

亜北極域に広がる北方林は、ツンドラ植生と比較すると、面積の大きさ、そして生産性の高さの点から、CO₂のシンクとして重要であるが、植生・気候、そして永久凍土の状態は地域性がある。現在、北極・亜北極域は、大気側からの観測、そして陸域課題で実施した現場観測から、CO₂のシンクとして機能し、短期的には陸上の吸収が強まっていることが示された。しかしながら、環北極域の約600地点の年輪データは、近年、樹木の成長速度が上昇している地域と、低下している地域があることを示した。また、成長速度が低下している地域は、年輪幅と夏の気温が負の相関を示す傾向があることも明らかとなった。CO₂の正味の吸収量は、植生による吸収と土壌からの放出のバランスで決まるが、土壌呼吸は地温とともに増加し、北極全域で増加することがGTMIP Stage 2から示された。一部の地域で見られる成長速度の低下と、土壌呼吸量の上昇から考え、現在の北極はCO₂のシンクとして機能しているが、この機能がいつまでも続くわけではない。

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

1. 北極域の炭素循環

執筆者：杉本敦子 青木周司 高田久美子

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

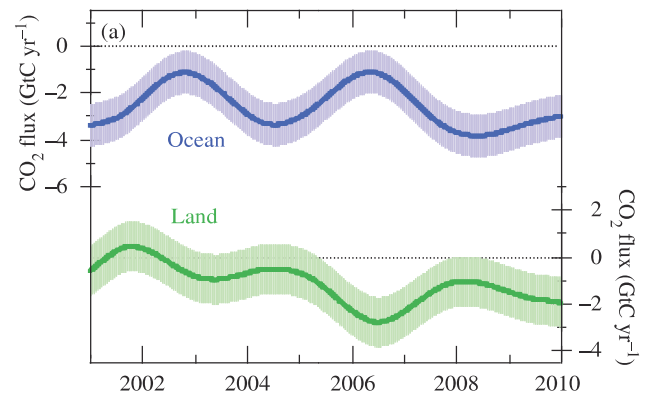


図2.2.2 両極（ニーオルスンと昭和基地）で観測した二酸化炭素濃度とδ(O₂/N₂)比から推定した全球の海洋と陸域のCO₂吸収量の年々変動

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

課題5メンバーの5つの独立したインバージョンモデル（ACTM、GELCA_NIES、GALCA_CAO、JMA、NICAM）により大気CO₂濃度の観測データを用いて地上でのCO₂フラックスを算出した。その結果、北米、北欧、北東ユーラシアのいずれの領域も陸域はCO₂のシンク、そして、北極海とその周辺海域もCO₂のシンクとなっており、IPCC AR5¹⁾で示された結果と同様、北極域は現在（2002–2010年）CO₂のシンクとして機能していることが示された（図2.2.3a）。課題2及び本節でも後述するように、北東ユーラシアの現場で実施したフラッ

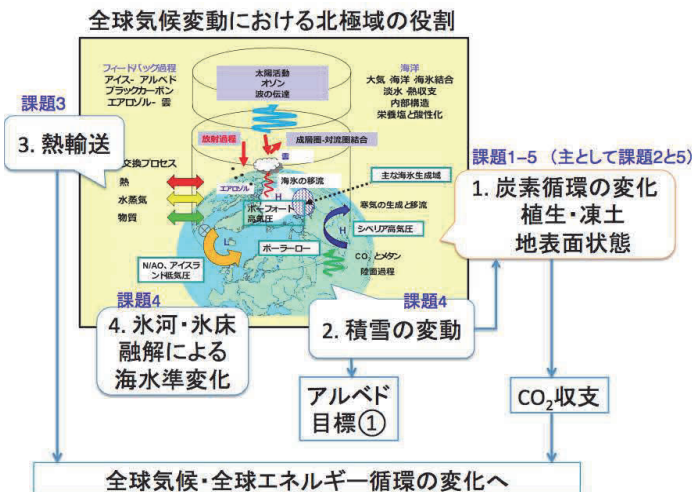


図2.2.1 本節「全球気候変動における北極域の役割」の構成

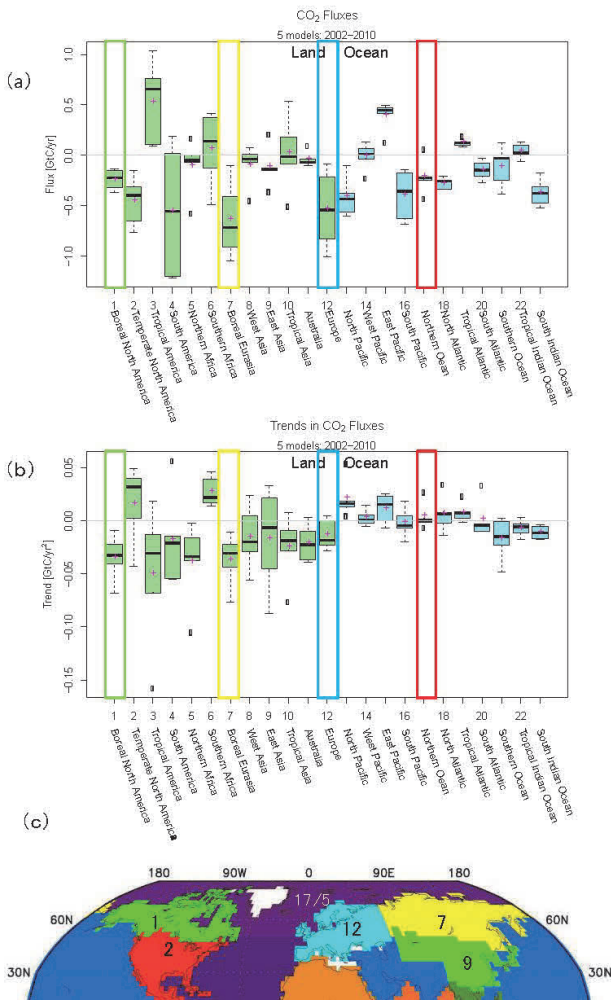


図 2.2.3 5つのインバージョンモデル (ACTM, GELCA_NIES, GALCA_CAO, JMA, NICAM) による 2002–2010 年の CO₂ フラックス (a) と CO₂ フラックスの変化トレンド (b)、および、インバージョンモデルの計算を行った領域を高緯度帯について示した地図 (c)。高緯度帯のデータを各領域の色の枠で囲った。フラックスは、大気から陸または海への CO₂ の移動が負の値で示されている。

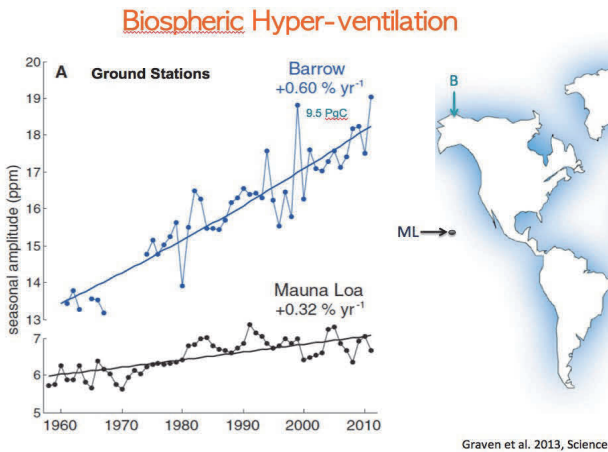


図 2.2.4 ポイントバロー (アラスカ) とマウナロア (ハワイ) の大気 CO₂ 季節変動振幅の変化トレンド (A) と位置 (B)。(Graven et al., 2013)

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

東シベリアタイガ林の樹木は過去も温暖な期間は成長が悪かった

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

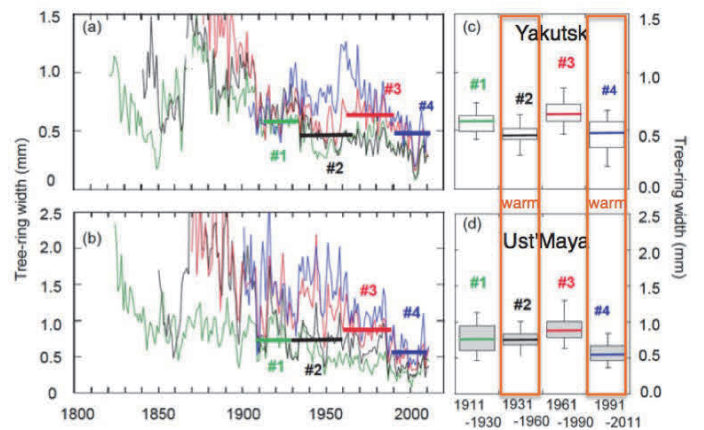


図 2.2.5 東シベリアタイガ林観測サイト YAK と UST の 2 地点の過去 100 年間のカラマツ年輪幅の変化。(Tei et al., 2014)

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

国際年輪データベース (ITRDB) から環北極・亜北極域の年輪幅データを取り出し、1960年代と1990年代(2000年代または1980年代の比較も含む)を比較した(図2.2.6)。多くの地点で近年の成長量が増大している(緑○で示されている)。一方で、東シベリアの乾燥帯の森林域、アラスカ・カナダの内陸部では近年の成長量が低下(小さい赤○)している。前述の

YAKとUSTの成長量の低下はそれらの地点だけの現象ではなく、地域的な広がりをもつ現象であることがわかる。

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

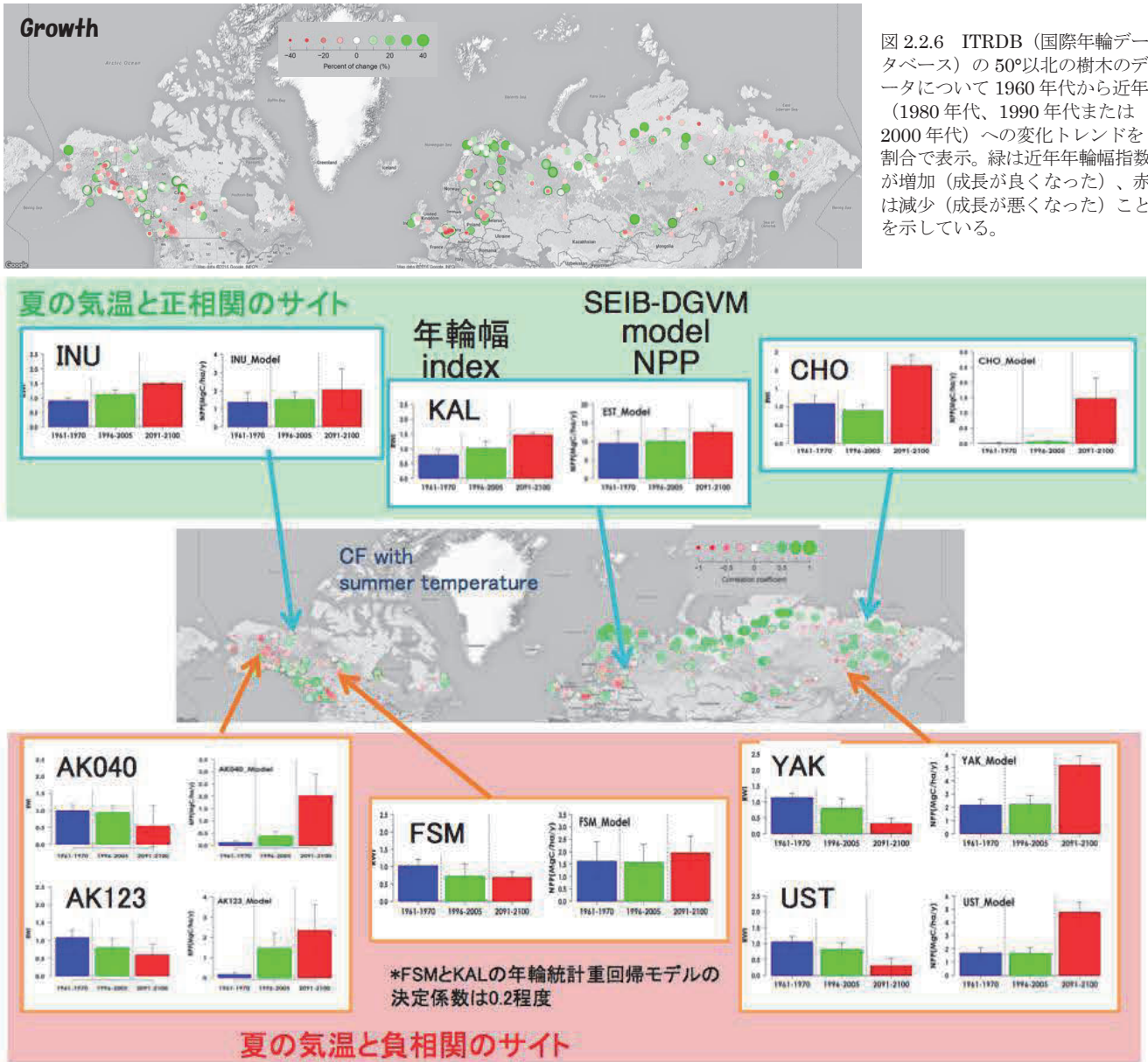


図2.2.6 ITRDB(国際年輪データベース)の50°以北の樹木のデータについて1960年代から近年(1980年代、1990年代または2000年代)への変化トレンドを割合で表示。緑は近年年輪幅指数が増加(成長が良くなった)、赤は減少(成長が悪くなった)ことを示している。

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

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

生態系モデルが予測する将来の環北極域の樹木の成長

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

モデルの現状と課題

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

が観測され、生態系モデルでも再現されているが、生態系モデル、インバージョンモデルともに、モデルごとに相当大きなばらつきがあることがわかる。

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

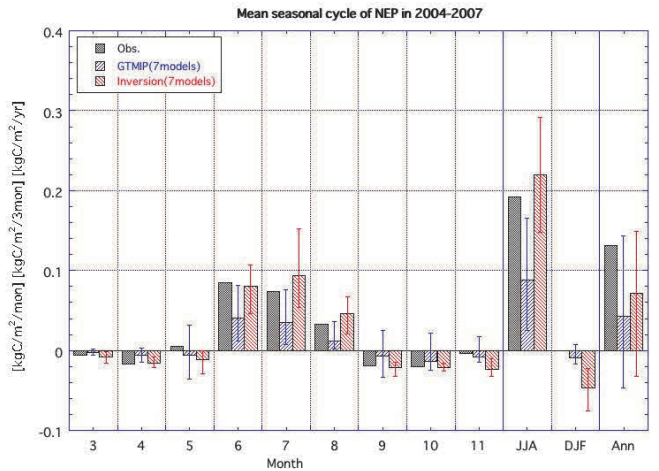


図 2.2.8 東シベリアヤクーツク近郊・スパスカヤパッドにおけるタワーフラックス観測結果と GTMIP、およびインバージョンモデルの NEP (生態系純一次生産) の 3–11 月と夏季 (6–8 月) および冬季 (12–2 月) の比較。

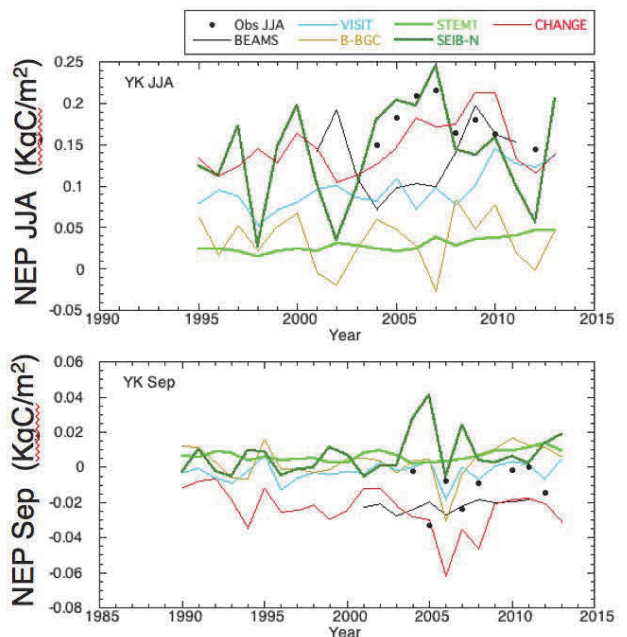


図 2.2.9 東シベリアヤクーツク近郊・スパスカヤパッドにおけるタワーフラックス観測結果と GTMIP の計算結果。成長期間 (6–8 月) の NEP (上) と 9 月の NEP (下)。

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

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

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

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

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

大気メタン濃度の上昇

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

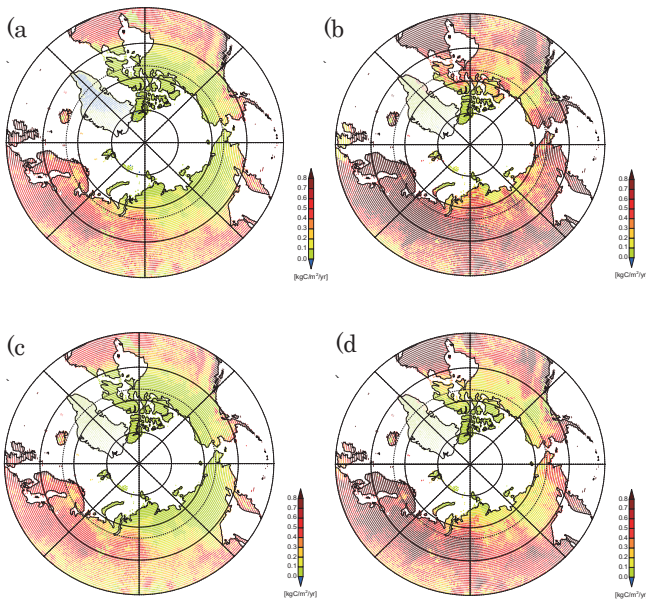


図2.2.10 GTMIP Stage2に参加した3つの生態系モデルのNPPの現在（1981–2010年）(a)と将来（2071–2100年）(b)、および土壌呼吸の現在（c）と将来（d）の比較。

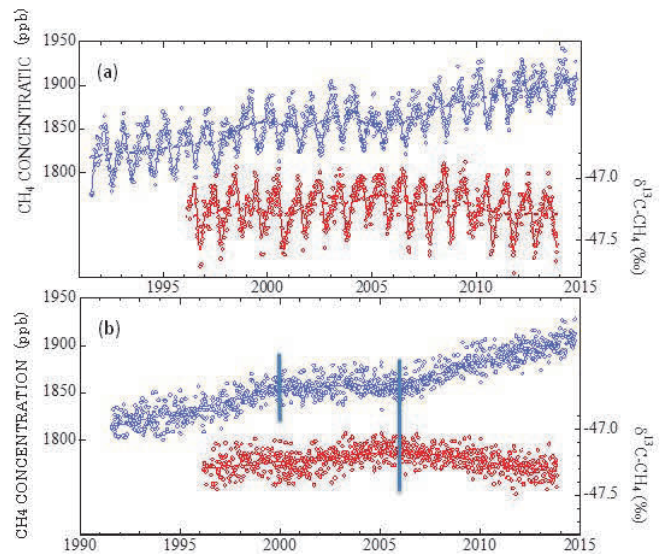


図2.2.11 スパールバル・ニーオルスンにおける大気メタン濃度とメタン炭素同位体比(a)、およびそれらの季節変動成分を除いた変化トレンド(b)

OHラジカル濃度：大気メタン濃度を支配するもう一つの要因

OHラジカルは対流圏における主要なメタンのシンクで、大気メタン濃度を決めている主要な要因の一つである。OHラジカル濃度の直接観測は非常に困難であるため、対流圏ではOHラジカルとのみ反応するメチルクロロホルムの濃度を観測することによって推定されてきた。メチルクロロホルムは自然界で

は生成されず、もっぱら人為起源の物質であり、その放出量は既知である。図 2.2.12 は、OH ラジカル濃度の南北半球の比を変えて大気化学輸送モデルで計算したメチルクロロホルム濃度の南北半球間の差をプロットした図である。これとメチルクロロホルムの観測結果を比較することにより、OH ラジカル濃度の南北半球間の比を求めると、南北間でほぼ同じ (0.99) であると見積もられた。これまでの見積もりでは OH ラジカル濃度は北半球の方が高いと見積もられていた。今回の研究で得られた 0.99 の推定値を用いれば、北半球のメタンソースはこれまで考えられてきた値より小さく、南半球では大きいことを示唆している。

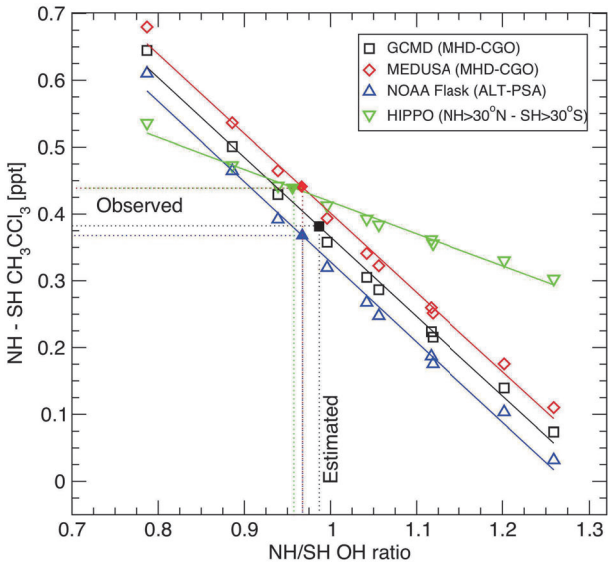


図 2.2.12 大気化学輸送モデルで計算された OH ラジカル濃度の北半球/南半球の比とメチルクロロホルムの北半球と南半球の濃度差の関係

2. 北極広域雪氷変動

執筆者： 榎本浩之 杉浦幸之助 堀 雅裕 東久美子

北極域の融雪期間は短くなってきている

北極陸域の積雪期間は春の顕著な気温上昇に伴い短くなっていることが指摘されている。本事業の雪氷課題では、現地観測及び衛星観測により、積雪変動の実態と陸面モデルの再現性を検証する際に必要となる積雪期間や消雪時期のデータの取得を行なった。北半球積雪域面積の30年超のトレンドを解析した結果、全ての季節において減少傾向を示すことを明らかにした (図2.2.13)。また、乾雪・湿雪の判別を近赤外域反射率と熱赤外域輝度温度の閾値処理にて行う手法を開発して衛星データに応用し、乾雪・湿雪それぞれの分布域を表すデータセットを作成した (Hori et al., in preparation)。その結果、湿雪域の割合が、春季、夏季に増加傾向にあり、同時期の積雪域の融解が進行していることが明らかになった。

積雪被覆期間の経年変化を解析したところ、ユーラシア大陸の東西方向に非対称なコントラスト (西側で大幅な短縮化が進行している様子) を確認した (図 2.2.14)。北極温暖化に伴う

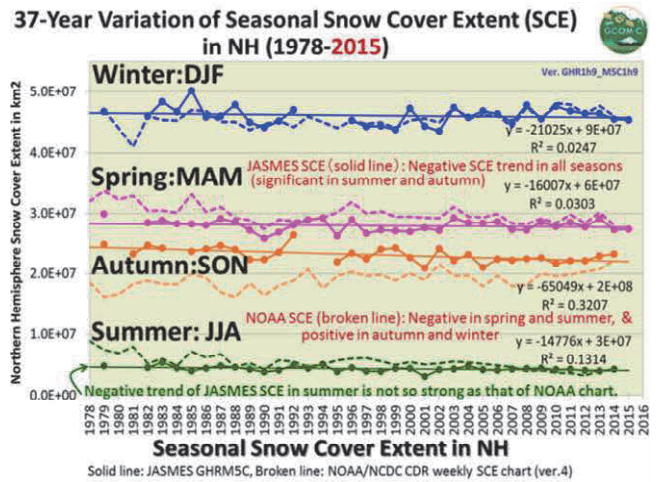


図 2.2.13 季節ごとの積雪面積の長期変動 (1978-2015)。全期間において積雪面積の縮小が起きている。

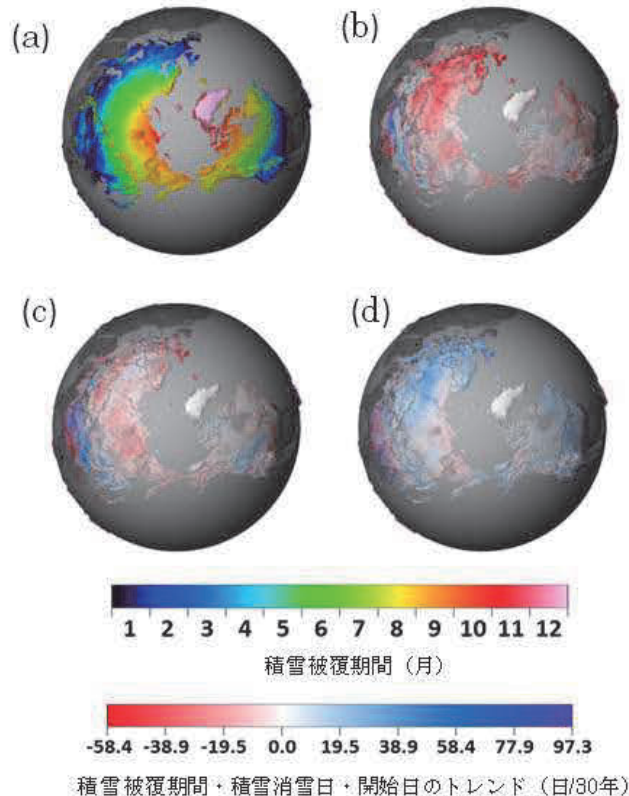


図 2.2.14 過去 30 年間の北半球積雪に関する (a) 被覆期間の平均値 (日)、(b) 積雪被覆期間のトレンド (日/30 年)、(c) 積雪消滅日のトレンド (日/30 年)、(d) 積雪開始日のトレンド (日/30 年)。北極域の積雪期間の気候値および過去 30 年間の変動傾向。ほぼ全域での積雪期間の短期化が起きている。変化が大ききところでは 1 か月以上の短縮化に及ぶ。ユーラシア大陸では北緯 66.5 度以上の地域では積雪期間が長い。一方ユーラシア西部では積雪期間が短く、それがさらに短期化していることがわかる。

積雪域の応答に地域差があり、北欧では積雪期間が1ヶ月程度も短くなっていることがわかった。

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

国際年輪データベースの年輪データの解析結果では、北極・亜北極域の年輪幅指数は春(3月-5月)の気温と正の相関が見られるサイトが多い。一方で、年輪幅指数は夏の降水量への依存性が非常に強いいため、春の融雪時期の変化の影響は明確ではない場合も多い。生態系モデルの出力も同様で、4月と5月の気温との相関が一部に見られるが、降水量との相関が非常に高いため、全体としては春の融雪のタイミングの影響ははっきりしない地域が多い。一方で積雪期間が1ヶ月程度も短くなっていることが示された北欧について、春の気温と年輪幅指数の関係を調べたところ、近年樹木の成長が良くなっている場所では春の気温と年輪幅指数の間に有意な正の相関が見られた。これに対して、成長が悪くなっている場所では、春の気温と年輪幅の間の相関ははっきりしなかった。このことは、成長期間中に十分な水分が利用できる地域(つまり温暖化にともない成長が良くなっている地域)では春の気温が高く成長期間が早く始まるほどその年の成長量は大きくなるが、乾燥によって成長が制限される環境の場所では成長期間が早く始まって成長量が增大するとは限らないということを示している可能性がある。

北極域で観測される顕著な環境変化の一つである積雪期間の減少は、生態系のNPPやNEPに影響をおよぼす可能性がある。春の融雪の早まりと秋の積雪の遅延は、成長期間が長くなる可能性があることを意味しており、それぞれの地域で、その影響を把握していく必要がある。

3. 北極域-中緯度帯間の熱輸送

執筆者：浮田甚郎

中緯度帯から北極域への極向き熱輸送の変化傾向

従来、北半球中高緯度における大気による極向き熱輸送(以下、熱輸送と言う)については、これまでレーウィンズンデ観測、もしくは再解析データを用いた気候値の解析結果しかなく、熱輸送が現在どのように変化しつつあるのかについての知見はほぼ存在しない状況と言える。また、現在進行している温暖化の時間スケールでは、世界気候研究計画第3次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3)のデータを用いた解析から、潜熱

フラックスが相対的に乾燥静的(顕熱+位置)エネルギーフラックスより重要であると考えられている⁴⁾。

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

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

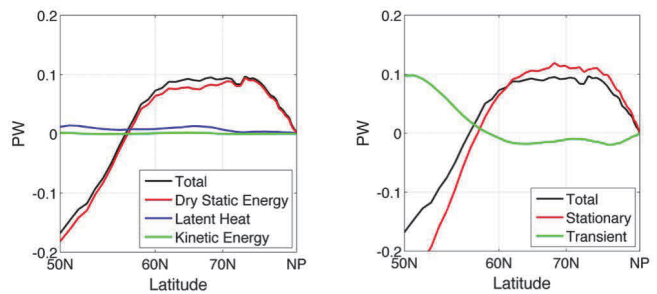


図2.2.15 成分ごとに分解した、1979-1988年と2001-2010年の二つの期間における大気による極向き熱輸送の差。

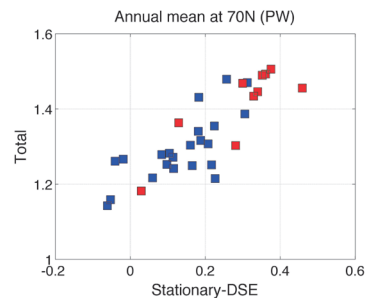


図2.2.16 乾燥静的かつ長周期成分の熱輸送と全熱輸送量の関係。各点は年平均した値を1979-2010年の期間で示す。特に赤は2000年代を示す。

力学的要因による熱輸送の長期変化

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

化が重要であることが分かってきた。このことは、少なくともこの緯度帯では温暖化そのものの影響よりも、温暖化による大気循環場の変調が大気熱輸送の長期変化・変動にとって重要であるという事を示唆している。

熱輸送と大気循環場の変化が全球に及ぼす影響

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

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

4. 北極域の氷河・氷床融解による海水準変動

執筆者：榎本浩之 杉山慎 大畑哲夫 斉藤冬樹 竹内望

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

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

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

も行われた。

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

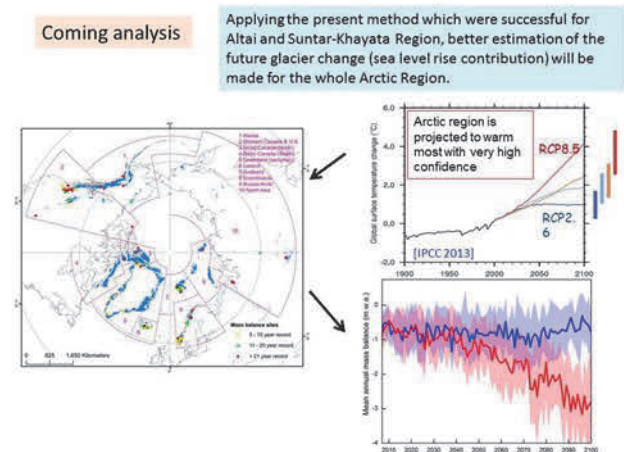


図 2.2.17 国際氷河インベントリーによる北半球氷河群の気候データを用いた将来予測

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

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

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

SeaRISE のモデル間のばらつきについての解析は Saito et

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

Future ice mass loss computed with refined models

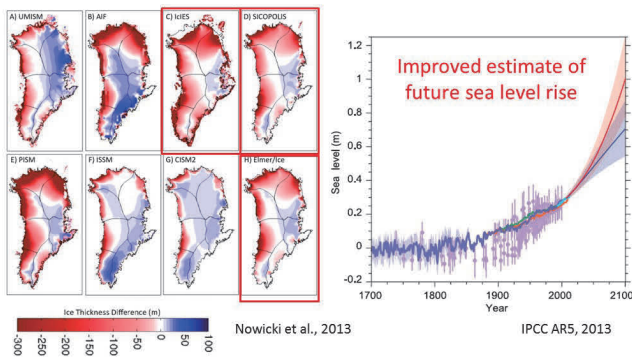


図 2.2.18 グリーンランド氷床変動モデルの比較。日本から三つのモデルが参加し、氷床融解量、海水準上昇を計算した。

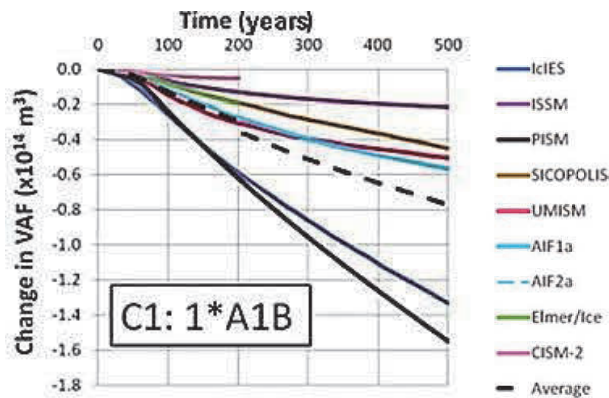


図2.2.19 SeaRISE (Bindshadler et al.,2013) によるグリーンランド氷床の温暖化実験結果。A1B シナリオ下での500年の体積変動を示したもの。SICOPOLIS、 Elmer/ICE、 IcIES が日本から参加したモデル。

引用文献

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

Ⅲ.戦略研究目標3

a.北極域における環境変動が日本周辺の気象に及ぼす影響の評価

戦略研究目標代表者：浮田甚郎

1. 北極-中緯度気候リンク

執筆者：山崎孝治 浮田甚郎

はじめに

北極-中緯度気候リンクに関して日本のグループの研究により、本事業開始以前に海氷の変動が大気循環に対して十分に大きなインパクトを持ちうる事が報告されていたり。この研究では、オホーツク海の海氷変動を対象にしていたが、その拡張として北極海の海氷、とくにバレンツ-カラ海の海氷変動とシベリア高気圧との間に力学的関係が存在すること、またその結果として北極の海氷変動と極東の寒気の強弱に関して関係があることが指摘されていた²⁾。本事業では、これらの研究結果をふまえて、「北極域における環境変動が日本周辺の気象に及ぼす影響の評価」として戦略研究目標3aの設定が行われた。本節では、それをより地域的に広げた、北極-中緯度間の気候、特に冬の気候に関わる関係について本研究で分かったことを以下述べる事とする。

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

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

実験設定とデータ

本研究で実施した数値シミュレーションでは、AGCMとして地球シミュレータのAFES ver.4.1のT79L56（水平解像度約1.5度、鉛直56層で上端を約60km）の仕様を用いた。AFES ver.4.1はHonda et al., 2009²⁾でも用いられたモデルであるが、本研究では、モデル水平分解能をより高く、成層圏-対流圏結合を陽に見るためにモデル上端を高度約30 kmまでから高度約60kmまで引き上げた。数値実験は1979-1983年の5年間

を平均した境界条件（海面水温 (SST) 及び海氷密度 (SIC)）を与えたものを control (CNTL 多氷) 実験とした。さらに、近年の海氷減少をふまえて北半球の海氷だけを2005-2009年の5年間で平均した条件を与えたNICE小氷実験を行った。この二つの実験では1年間のスピンアップ後、各々60年間積分した結果を平均して、さらにそれらの差を見る事で海氷減少の影響評価を行った（今昔実験）。境界条件として用いたSST及びSICの観測データは the Merged Hadley NOAA/OI SST and SIC⁵⁾である。大気データはECMWFのERA-Interim⁶⁾とJRA-55⁷⁾の両方を用いた。AO index やNAO (北大西洋振動) index はNOAA-CPCのデータを用いた。期間はいずれも1979-2011年の33年間である。尚、以下述べる今昔実験の結果の詳細はNakamura et al. (2015b, 2016)、Jaiser et al.

(2016)、Hoshi et al. (2016)にまとめられたものでそれらを是非参照していただきたい。

結果のまとめ

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

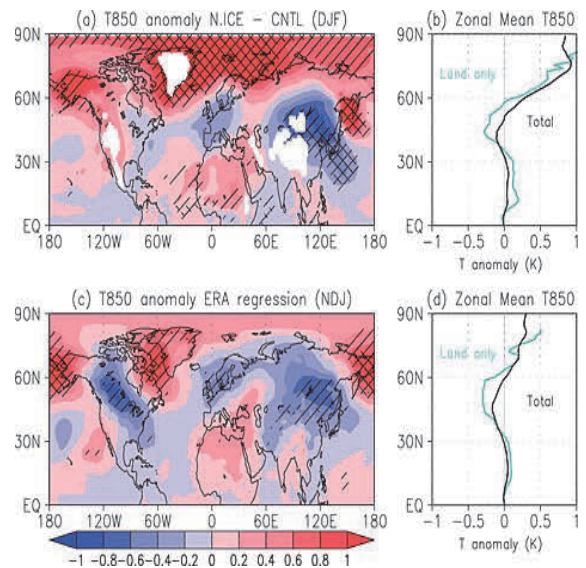


図2.3.1 (a) 冬 (12, 1, 2月) 平均のAFES今昔実験による海氷減少による850hPaにおける気温変化(少氷-多氷)。片シェイド(/)は95%、両シェイド(X)は99%で差が有意な所。単位は℃。(b) 東西平均した850hPa気温変化。薄水色は陸地のみ、黒色は全体。(c) 11月の北極のデトレンドした海氷面積変動に回帰した冬(11, 12, 1月)平均の850hPa気温の偏差。海氷の1σ減少に対応する値。ERA-Interim再解析データによる。(d) (b)と同じ。ただし、ERA-Interim再解析データによる北極の海氷面積の減少に対応する気温の偏差。

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

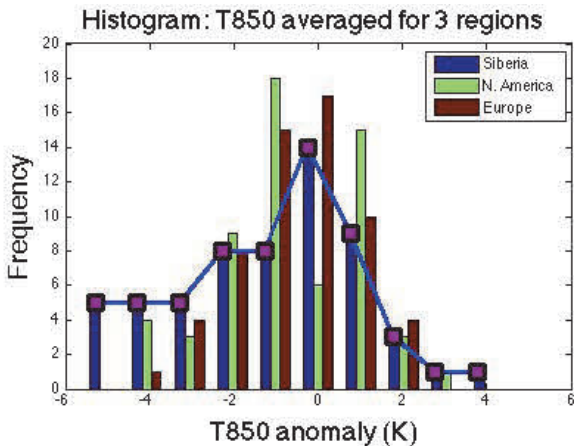


図 2.3.2 冬 (12、1、2 月) 平均の AFES 今昔実験による海水減少による 850hPa 気温の変化 (少氷-多氷)。ここでは少氷実験 60 年分に関して多氷実験の平均からの変化を、シベリア、北米、ヨーロッパ地域で平均した値をヒストグラムで表した。

次に海水の減少に対して大気循環場がどのように応答したかを見た。まず多氷・小氷実験の 60 冬に関して、それぞれの北極振動 (Arctic Oscillation, AO) を計算した。ここで北極振動とは、北緯 30 度以北の 500hPa における高度場に対して主成分 (EOF) 解析を行ったときに計算された第 1 モード (分散の寄与が最大となる卓越する空間パターン) のことで、その指標が負の時 (負の位相) には北緯 60 度を含めた中緯度・亜寒帯域の上空の西風が通常より弱い状態 (東風偏差) となる。図 2.3.3 は多氷実験と少氷実験における北極振動指標の確率密度関数を

比較したものである。これを見ると、明らかに小氷実験では、北極振動が負の位相の向き (左向き) にシフトしている事が見て取れる。一般に北極振動が負の位相になる事に対応して、上空の西風が弱まる事だけではなく、ストームトラックが低緯度側にシフトする事、また中緯度での極端現象の発現頻度が増える事が報告されており、図 2.3.1~2.3.3 の結果は極めて整合的と言える。

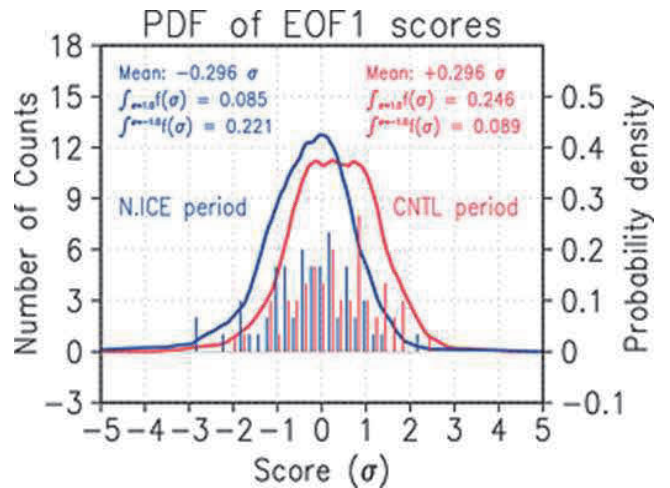


図 2.3.3 北極振動指標のヒストグラム (棒: 左目盛り) と推定した確率密度関数 (線: 右目盛り)。横軸は基準化した指標値。赤は CNTL (多氷) 実験、青は NICE (少氷) 実験。

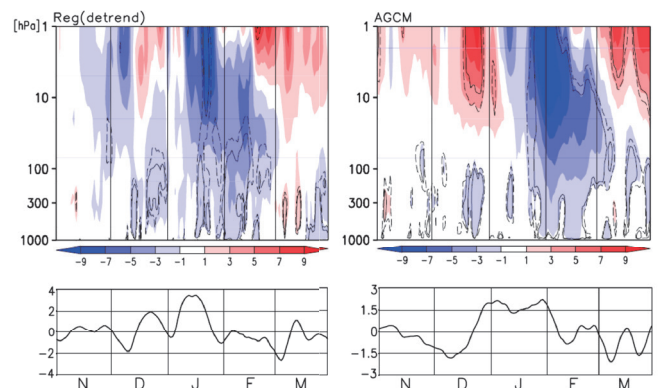


図 2.3.4 (左上) 60°N における東西平均東西風偏差 (m/s) の時間・高度断面図と(左下) 40-90°N、100hPa における渦熱フラックス (K m/s) の時系列。それぞれ 11-12 月平均で基準化したバレンツ-カラ海海氷指標との回帰係数。(右上) 60°N における東西平均東西風偏差の時間・高度断面図 (少氷ラン-多氷ラン)。マイナスの値は、少氷ランにおいて、上空の西風が弱まったことを示す。単位は m/s。(右下) 40-90°N、100hPa における渦熱フラックスの時系列 (NICE-CNTL)。単位は K m/s。

背景で述べたように、北極振動の極性と成層圏の循環には密接な関係があるが、上で述べた北極振動の負の位相へのシフトがどのようにもたらされたかを示すのが図 2.3.4 である。右上に極渦の強さを表すのに代表的な北緯 60 度における東西平

均東西風の時間-高度断面図を示す。これを見ると、12月から1月にかけて成層圏上部に負の偏差（即ち冬季成層圏を特徴付ける西風、極渦、の弱化）が現れ、そのシグナルが2月にかけて下方に伝播し対流圏に達する様子が見える。右下の図では、この成層圏上部の負偏差に先立って、100hPaにおける惑星波に伴う極向きの熱輸送（40°以北の平均）が増加している期間が続いていたことが分かる。即ち、図2.3.3で示された対流圏における北極振動の負の位相へのシフトが、成層圏での波-平均流の相互作用およびその下方へのシグナルの伝播で起きている事を強く示唆している。実際に、これを観測と比べたのが図2.3.4左図になるが、1月に極渦が弱化する事、またそれに先立って極向きの熱輸送が増加していることなど、図2.3.1同様、数値実験の結果と極めて整合的な描像を示す。

ここで鍵となっているのは惑星波に伴う極向きの熱輸送であるが、その時空間の変化は、子午面におけるラグランジュ的循環の変化を伴う事が知られている⁸⁾。ここで詳細は割愛するが、シミュレーションの結果から、中緯度から高緯度にかけての残差子午面循環が強化されていることが分かった。この循環の変化をもたらしたのは、数値実験の設定より海水面積の減少である。実験設定として、海水の境界条件を1979-1983年の多氷時期より2005-2009年の少氷時期に変化させたことで、70°以北の平均値として 3.6 Wm^{-2} の熱が大気下層を暖める。その結果として起きる大気の応答として残差子午面循環が変化されるが、この子午面循環は高緯度域では下降流となり断熱圧縮により大気柱を加熱する。量的に見積ると、850-300 hPaの層に対して加熱（ 2.7 Wm^{-2} ）する事が分かった。また、これまで見てきたように、この海水の減少に伴う残差子午面循環の強化に関しても観測事実と数値実験の結果が極めて良く対応していた。

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

まとめ

ここ数年の間の我々の研究により、海水に関係する北極と中緯度間における気候に関する力学的関係の描像がかなり明らかとなってきた。世界的に見ると、複数のグループがこのテーマに積極的に取り組んでおり、モデル実験の結果と観測事実の積み重ねで成層圏の関与が徐々に明らかにしている^{9), 10)}。また、

ドイツの Alfred Wegener Institute のグループとは今昔実験の結果を共有し解析を進めている（Jaiser et al., 2016、Hoshi et al., 2016）。その他、北極と中緯度間における気候に関する力学的関係に関する AMIP もしくは CMIP 的手法を用いた研究計画（Belmont Forum など）が国際共同研究の枠組みの中で準備されている。今後、気候の予測可能性の分野と融合してこの分野はますます研究が盛んになる事が予想される。今回の本事業の中で戦略研究目標 3a として日本が率先して研究成果を発表した事で、日本がこの分野で世界的にも主導的な役割を果たす事が出来る土台を構築する事が出来たと言える。

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

2. 日本における寒波、大雪と北極変動の関係

執筆者：浮田甚郎 本田明治 岩本勉之

はじめに

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

北極海水変動とシベリアの気温変動

図2.3.5は北極海の海水のなかで、特に中緯度との気候リンクに関して重要であるバレンツ-カラ海の海水時系列と気温との関係を示している。例えば、図2.3.5左で示されているユーラシア東部の青い領域は、前節でも述べたように近年バレンツ-カラ海の海水が少ない夏-秋以降の冬季に極東シベリア域で低温偏差が起きていた事が分かる。例えば、シグナルの強い極東シベリア域を平均した時系列（指標）を計算すると、右図のように極東シベリア域の気温偏差に対して似たような経年変動

をすることが分かる。例えばこれら二つの時系列の相関係数は長期のトレンドを抜いて計算しても 0.45 であった。

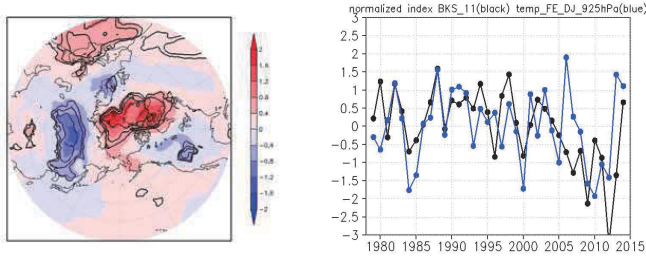


図 2.3.5 (左) 11 月のバレンツ-カラ海 (15-90E, 70-85N) の海水面積に回帰した 12-1 月平均した 925hPa における気温偏差 (海水の 1 標準偏差の減少に対応)。 (右) 黒線は、規格化した 11 月のバレンツ-カラ海の海水面積偏差の時系列。青線は規格化した極東シベリア域 (100-130E, 40-60N) で空間平均した 12-1 月の上空 925hPa 気温偏差の時系列。

シベリアの寒気と日本の積雪

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

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

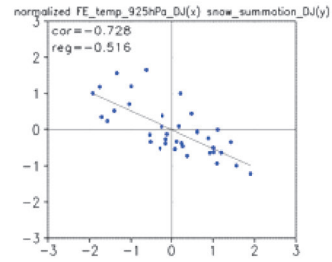


図 2.3.6 横軸は図 2.3.5 で用いた規格化した極東シベリア域 (100-130E, 40-60N) で空間平均した 12-1 月の上空 925hPa 気温偏差の時系列、縦軸は国内 13 ヶ所の 12-1 月で積算した積雪指標。

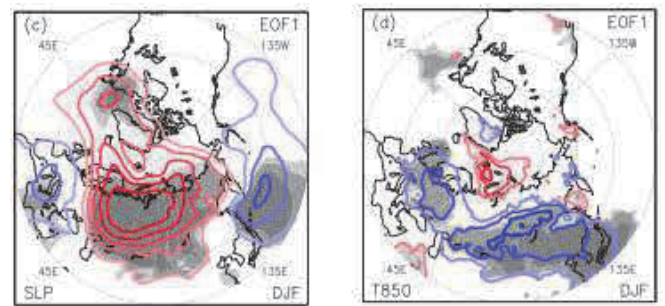


図 2.3.7 (左) 12-2 月で積算した降雪量をもとにした積雪インデックスを国内 185 ヶ所で計算し、その空間分布に関して主成分 (EOF) 解析を行って作成した PC1 で線形回帰した冬 (12-2 月) 平均した海面気圧場。 (右) 同様にして計算した 850hPa の気温場。いずれも赤は正偏差、青は負偏差をしめす。解析期間は 1986/1987 から 2012/2013 の 27 冬である。

以上の結果をふまえて、日本の積雪に関する情報から総観規模での大気擾乱の空間パターンを評価しようと試みたのが図 2.3.7 である。ここでは、先ほど述べた積雪データと比較してより広範囲・高密度の AMeDAS データを用いた (詳細は、Iwamoto et al., in prep.)。これは、日本の国内の積雪変動には強い地域性がある事が分かっており、その地域特性の影響を加味した積雪変動をまず理解するために、冬季日本の積雪に卓越して現れる空間パターン (前項で述べた主成分析を積雪データに施しそこで得られた EOF 第 1 モード) に対応する指標をまず作成して、この新たな積雪変動指標に線形的に関係した大気場偏差を求めたものである。この図 2.3.7 を見ると、日本の積雪が多いときには、シベリア高気圧が強いだけでなく、北西太平洋域が低気圧偏差であること (一部はアリューシャン低気圧の変動と重なる) が分かる。またこの西高東低のパターンが強いときには極東シベリアの 850hPa の気温も低温偏差である事が分かり、図 2.3.5~2.3.6 と整合的である。さらに図 2.3.7 左図では、等圧線がバレンツ海上で南西の北大西洋から暖気移流するパターンを示しており、日本の積雪変動がこの地域的に限定された変動ではなく、北大西洋域の大気変動、さらに

はおそらく海洋の変動をも含む広い地域における現象と係っていることが示唆される。

まとめ

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

引用文献

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

Ⅲ. 戦略研究目標 3

b. 北極域における環境変動が水産資源等に及ぼす影響の評価

戦略研究目標代表者：菊地 隆

3. 北極海・周辺海域の海洋酸性化の実態と基礎生産力の維持機構

執筆者：菊地 隆 西野茂人 川合美千代 平譯 享

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

海洋酸性化への影響

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

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

（炭酸カルシウム結晶形の一つで比較的溶けやすい）が既に未飽和の状態になっていることが観測されている。しかしながら、観測されている時期・海域が限られているため、炭酸カルシウ

ム飽和度の時空間変動（特に冬季の状態）については分かっていた。本研究事業では、係留系を用いた時系列観測の結果を用いて炭酸カルシウム飽和度の季節変動の推定を行った（Yamamoto-Kawai et al., 2016）。

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

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

得られた炭酸カルシウム飽和度について、大気中のCO₂濃度増加の影響を調べた。人為起源によるCO₂放出がなかった頃の大気中CO₂濃度（280 ppm）を仮定して今回の観測結果を元にチャクチ海南部の底層の炭酸カルシウム飽和度を推定した結果、現在に比べて飽和度は高くなり、アラゴナイトに対して未飽和な期間は約1/3（年間約24%）となった。これらの値は生物生産量や有機物分解量に依存するが、温暖化に伴うこれらの変化を考慮したとしても、生物生産と有機物分解が盛んな生物学的ホットスポットでは産業革命以前からアラゴナイト未飽和の状態が起きていたことを示唆している。一方、今後もCO₂濃度が増加して例えば650 ppm（50年後に起こり得る推定値）に達したと仮定すると、アラゴナイト未飽和の時期は年間82%にも達することが推定された。光合成が盛んな一部の季節を除き、

ほぼ未飽和の状態になると言える。カルサイトについても年間約57%が未飽和になると見積もられた。このことは、人為起源CO₂の増加は炭酸カルシウム未飽和の時期（と海域）を大きく拡大することを示唆している。そしてチャクチ海における主要な底生生物や海鳥・セイウチなどの餌である二枚貝などの石灰華生物に大きな影響が及ぶことが考えられる。

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

基礎生産の維持機構とその変化

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

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

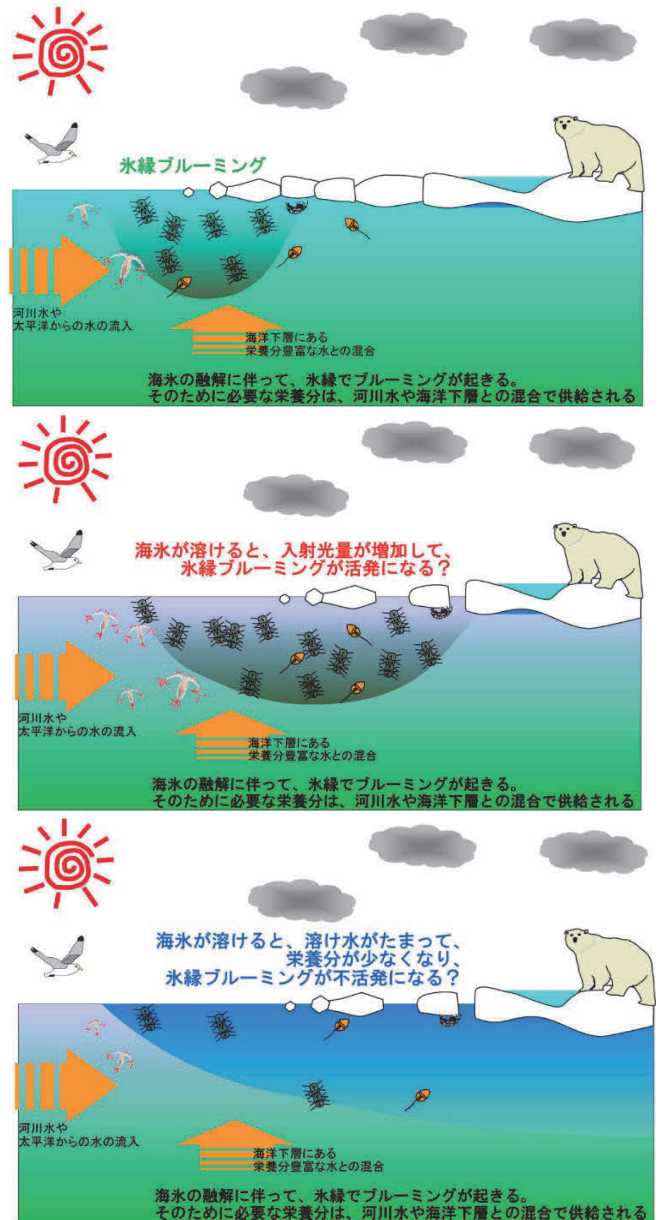


図2.3.8 海氷減少に伴う基礎生産への影響（模式図）。
 (上) 氷縁ブルームのメカニズム、
 (中) 海氷減少による光環境の改善（好影響）、
 (下) 海氷減少による淡水の蓄積（悪影響）

どの変化を季節や海域ごとに調べ、総合的な理解を深める必要がある。

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

(Hirawake et al., 2012)。近年の海水減少に伴って、北部ベーリング海からチャクチ海にかけての陸棚域では基礎生産力が増加している可能性がある。

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

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

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

海洋物理・化学環境の変化に対して、基礎生産力・植物プランクトン群集構造などの応答を調査しつづけるとともに、食物網を介した高次生物との関係を調べていく必要がある。このような知見を蓄積することで、将来の北極海における基礎生産や海洋生態系の予測が可能になると考えられる。

4. 温暖化・海水減少に伴う北極海・周辺海域での優占グループの変化

執筆者：菊地 隆 山口 篤 綿貫 豊

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

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

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

動物プランクトン群集の変化

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

化を明らかにした。

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

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

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

海水減少に伴う北極海的环境変化は、動物プランクトンの群集構造の分布を北側にシフトさせていることが明らかになった。しかしながら、流入した太平洋産種が現時点で北極海に定着することが困難であることも明らかになった。今回の調査ではカ

イアシ類に注目したが、最近の観測からこれまであまり見られなかった動物プランクトン（オキアミなど）が増え始めているとの報告もある。今後の群集構造の変化や、環境変化が流入した太平洋産種にどのような影響を及ぼすかなど、注意深く観測・調査を継続する必要がある。

ホッキョクタラ

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

このホッキョクタラの北部ベーリング海およびチャクチ海における密度の経年変化を調べたところ、1990年代の観測と2007/2008年および2013年の観測結果との間に統計的に有意な違いは見られなかった（わずかな増加傾向は見られた）（Kono et al., 2016）。

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

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

海鳥・海生哺乳類の調査から分かること

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

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

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

今後についての考察

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

現在の北極海（特に陸棚域）の海洋生態系は、春季ブルーム（氷縁ブルーム）による高い基礎生産力があるのが特徴の一つである。しかしながら現時点ではこの春季ブルームの際にまだ海水温が高くないためにこれを捕食する動物プランクトンが十分に活動していない。その結果、多くの有機物が海底に沈降し、底生生物の餌となる環境（Pelagic-Benthic scheme）が作られている。今後、温暖化が進行して海水融解の早期化が更に進むと、春季ブルーム期に動物プランクトンの活動が十分に活発化し、さらにはこれを捕食する浮遊性の魚類が多く現れる状態（Pelagic-Pelagic scheme）になり得ると言われている（図2.3.9）。今回の我々の成果からは、まだそのような大きな変化は起きていないと言える。今後起こることが予想されている更なる海水減少が、どのような過程を経て Pelagic-Pelagic scheme になり得るのか（ならないのか）、注目していく必要がある。

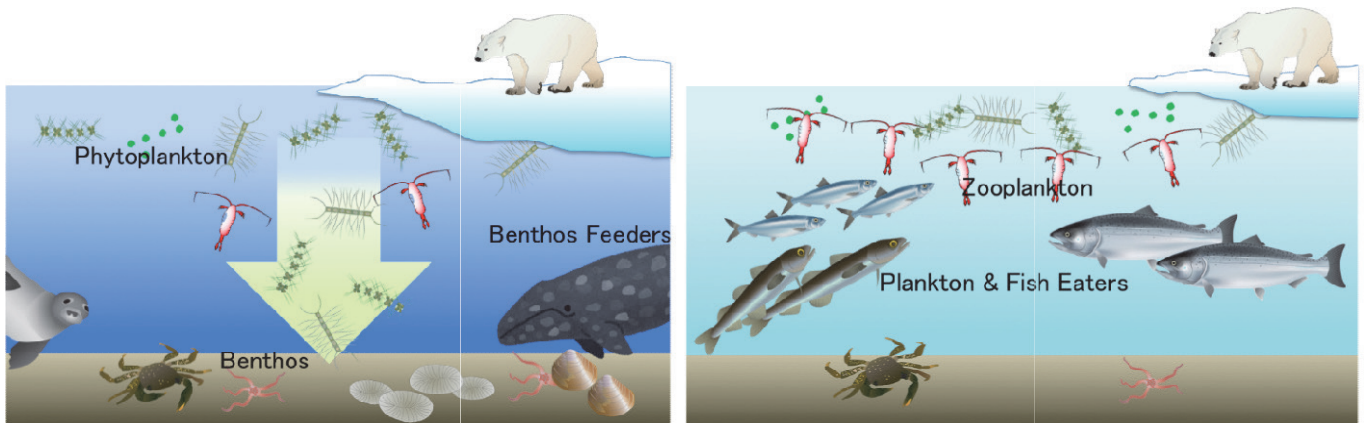


図 2.3.9 北極海海洋生態系の模式図（左）現在の状況（Pelagic-Benthic scheme）、（右）将来起こり得る状況（Pelagic-Pelagic scheme）

Ⅳ. 戦略研究目標 4

北極海航路の利用可能性評価につながる
海水分布の将来予測

戦略研究目標代表者：島田浩二

1. 海洋熱循環と海水集積効果による海水分布変動

執筆者：島田浩二 吉澤枝里

はじめに

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

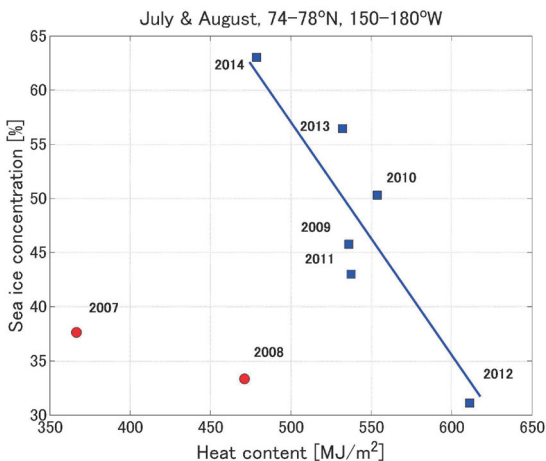


図 2.4.1 太平洋側北極海 (74-78°N, 150-180°W) における、海洋上層 (20-150m) の貯熱量と 7-8 月の海水氷密接度の関係。

高精度なリアルタイム海水速度ベクトル・データの重要性

北極海の寒冷な大気側からの冷却であれば、海水形成の条件

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

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

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

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

海洋循環の変動

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

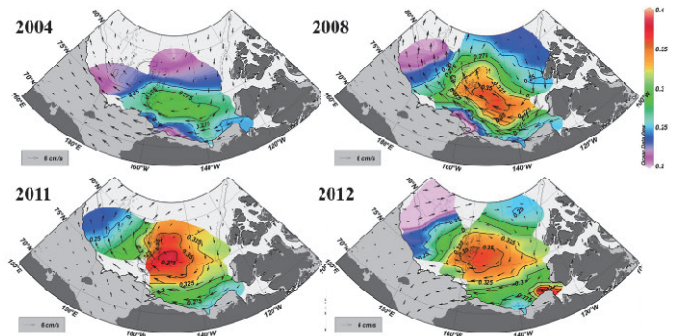


図 2.4.2 100dbar 等圧面における夏 (7-9 月) の力学高度偏差分布 (800dbar 等圧面を無流面と設定)。*ベクトルは直前の冬 (11-4 月) の海水速度ベクトル [cm s⁻¹]。

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

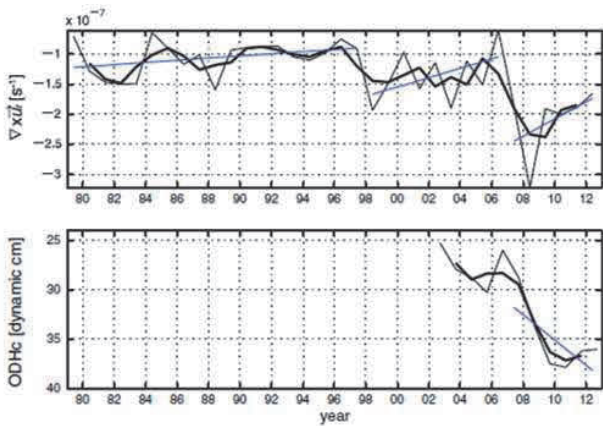


図 2.4.3 (上) 東西バンド帯 (74.4–77°N,130–160°W) における海水速度の回転成分の平均値[s^{-1}]、(下) 循環中心 (74.4–77°N,150–160°W) における力学高度偏差平均値 (=循環流量) [dynamic cm]。Yoshizawa et al. (2015) より引用、改編。

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

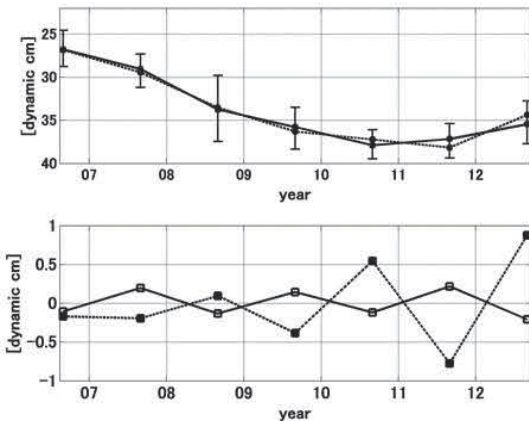


図 2.4.4 (上) 循環中心における力学高度偏差[dynamic cm] (実線: 観測値、点線: 推定値)、(下) 観測値と推定値とのずれ (実線: 再解析海上風速データで推定した場合、点線: 衛星観測データから計算される海水速度データで推定した場合)。Yoshizawa et al. (2015) より引用。

海氷の集積による海氷分布変動

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

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

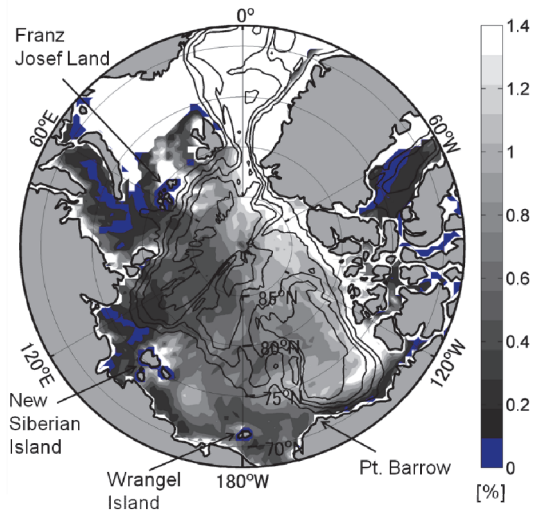


図 2.4.5 5月1日の有効収束積算値の空間分布 (2003–2011年)

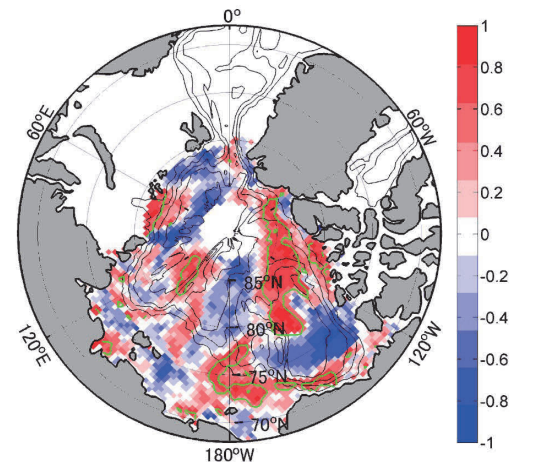


図 2.4.6 5月1日の有効収束積算値と7-9月の海氷密度の相関係数 (r)。(緑色の線で囲まれた海域は有意水準10%で有意 [$r > 0.58$])

2. 北極海熱収支の変動と海氷

執筆：羽角博康

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

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

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

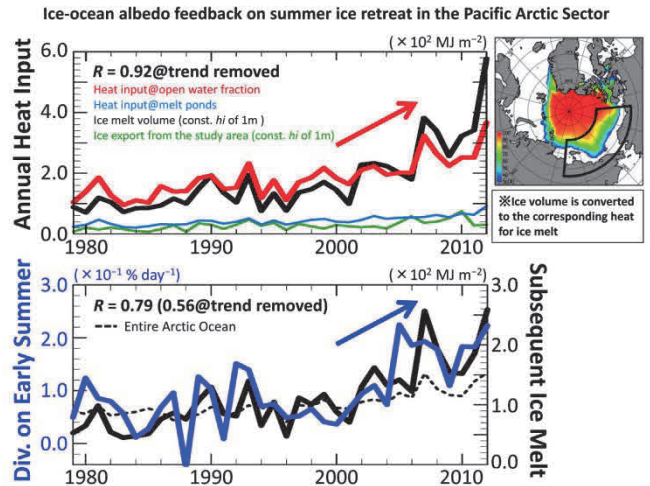


図 2.4.7 北極海太平洋側の熱収支と海氷変動の関係（詳細は本文を参照）。

が北極海太平洋側の海氷量の経年変動を支配していることが示される。

海氷分布を決める要素としては、北極海亜表層から海面に向かって供給される熱も重要であり、ひいては太平洋および大西洋から北極海に輸送される熱の働きが重要である。事実、近年観測されている北極海太平洋側の顕著な海氷減少は、海洋循環の変化に伴って太平洋側陸棚域から海盆域へ輸送される熱が増加したことに起因することが指摘されている（前項参照）。一方、大西洋側からは太平洋側からよりも高温かつ大量の海水が北極海に流入するが、現在までのところその熱のほとんどは北極海の深度 300 m 付近（大西洋水層）にとどまり、乱流混合による弱い上方輸送を除いては直接的に海氷分布に影響を及ぼしていないと考えられている²⁾。しかしながら 2000 年代の継続的な北極海係留観測によって北極海大西洋水層の水温が顕著に上昇していることが示されている³⁾。また、北極海では海氷減少に伴って乱流混合が強化されつつあることも指摘されており、将来的には大西洋からの流入水が北極海氷分布に大きな影響を及ぼす可能性がある。特に、海氷分布の長期将来予測という観点からは大西洋からの流入水の振舞を正しく表現できる数値モデルが必要とされるが、従来の気候モデルでは、大西洋水流入経路の解像度不足により、流入そのものがほとんど表現されていない。

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

北極海大西洋水層を形成する高温水はフラム海峡の東側を

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

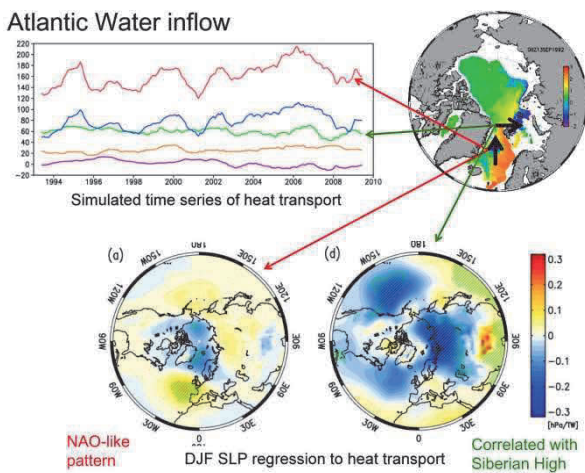


図 2.4.8 大西洋からの熱流入の時系列とそれに相関する大気変動パターン(詳細は本文を参照)。

北極海水分布の長期予測を実際に行うためには、上述のような海洋長期変動を適切に表現できる気候モデルが必要とされることに加え、観測データに基づいて気候モデルを適切に初期値化する手法が必要である。本研究ではアンサンブルカルマンフ

ィルター(EnKF)手法によるデータ同化を気候モデルの初期値化および北極域気候の予測に適用するための開発を行った。EnKFは様々な種類の観測データを容易に気候モデルに同化できるという特徴があり、データ取得やプロセス理解の面で多くの課題が残る北極域研究では有効性が高いものと考えられる。その中でも特に海氷データを同化する手法の開発に取り組み、これを実現した。この新しく開発された手法を適用して実証的予測実験や予測可能性研究を実施するまでには至らなかったが、本事業開始以前に開発済みであった旧来のデータ同化手法を用いてそれらの実験・研究を実施した(データ同化手法および予測実験の詳細については第 3 章 VII. 研究課題 7 を参照)。

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

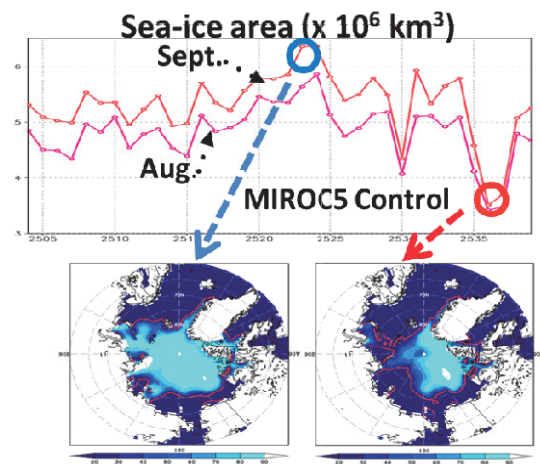


図 2.4.9 気候内部変動による北極海水面積の変動(詳細は本文を参照)。

3. 海水分布予測と航行支援情報

執筆者：木村 明 山口 一

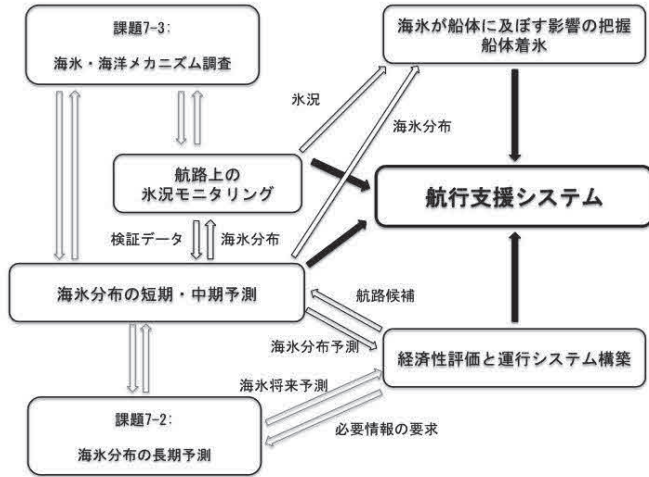


図 2.4.10 課題 7-1 の構成と連携

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

海水厚のモニタリング

1970 年代以降、人工衛星によって毎日の海水分布が観測可能になってきた。ただし、海水の分布だけでは船舶の航行支援のための情報として不十分である。とくに、海水の厚さは氷海の航行のためにもっとも重要な情報の一つである。ここでは人工衛星データから、毎日の海水厚分布を導出する手法の開発に取り組んだ。そのために、北極域で他国の砕氷船を用いて、電磁

誘導式氷厚計やマイクロ波放射計、前方カメラ、さらに目視による観測を行い、カナダ海盆を中心とする海域で海水の種類や厚さ、マイクロ波特性等を観測した。こうして得られた観測結果をもとに、人工衛星搭載のマイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer – EOS (AMSR-E) および AMSR2 による観測データから海水の厚さを推定するためのアルゴリズムの開発をすすめた (Krishfield et al., 2014)。その結果、厚さ 1 m 以下の海水については誤差 20 から 30 cm で海水の厚さ分布を毎日推定することが可能になった。得られた厚さ情報は後述の海水中期予測にも利用され、予測精度の向上に貢献した。

海水短期予測

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

海水中期予測

北極航路の利用計画の立案のためには、春の時点で夏季の海水分布を知るための中期予報が必要である。我々は春季の海水の厚さ分布に注目することにより、夏季の海水分布の予測を試みた (Kimura et al., 2013)。春季の海水厚の正確な推定のため、AMSR-E および AMSR2 による観測データから独自に導出した海水の動き、さらに前述の海水モニタリングにより開発された手法による海水厚を用いた 4 月末までの観測データをもとに解析を行い、7 月から 9 月までの海水分布を統計的に予測した。予測結果は毎年 5 月に英語版と日本語版をウェブ上で公開した (図 2.4.11)。本格的な予測は 2011 年から行い、その後も手法の改良をすすめた結果、海水域の後退の様子、航路の開通時期*1、最小面積などを高精度で予測できるようになった。2015 年の予測では 9 月の最小面積を誤差 2% で予測することに成功し、航路の開通時期も誤差 10 日以内、最少時の海水分布についてもほぼ正確に予測できた。これによって、この予測を

夏季の北極航路利用計画の立案に役立てることが現実的になったと言える。人工衛星のデータを用いて統計的手法によって行うこの予測は世界にも類を見ない独自のものであり、2015年の予測結果は世界でも優れたものであった。また、2015年の手法を用いて過去の予測の再計算をしたところ、とくに極方向からの厚い海氷の流入の影響を受けやすいカナダーアラスカ側の海域で予測精度が改善した。



図 2.4.11 海水中期予測の公開ウェブサイト

航行支援システム

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

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

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

以上の成果としての人工衛星による海氷厚の推定値、海水漂

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

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

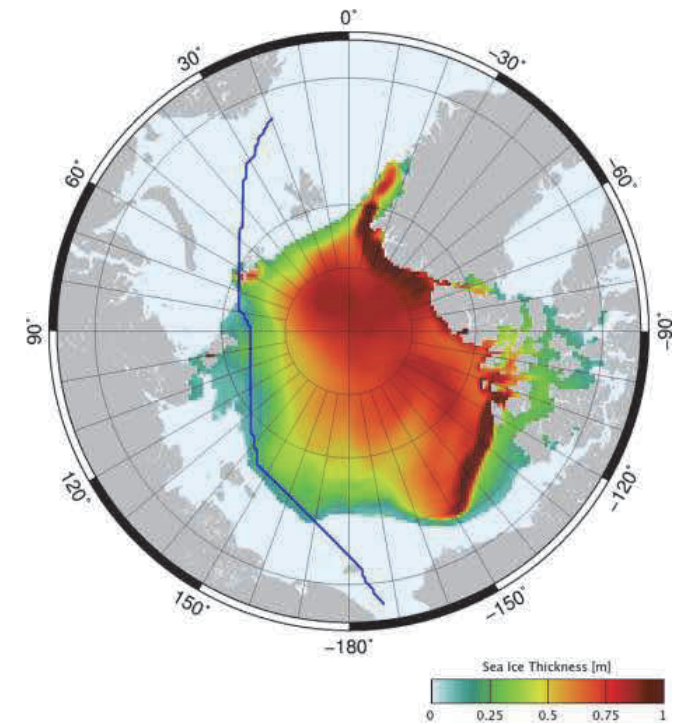


図 2.4.12 北極海全域スケールでの最適航路の選択例

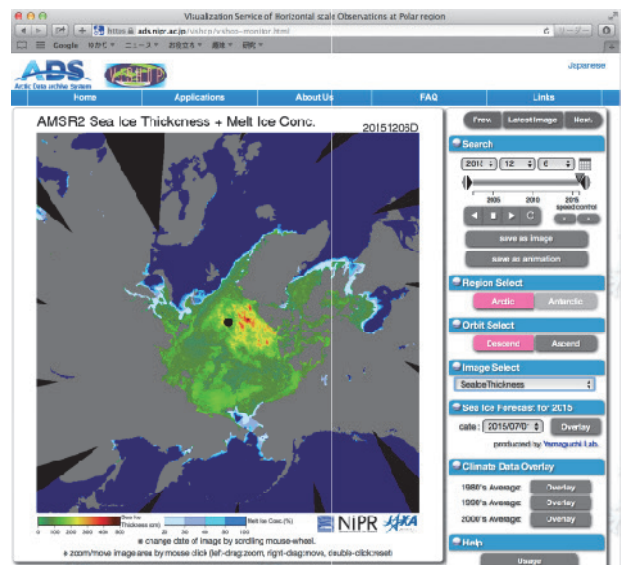


図 2.4.13 ADS での海氷厚の表示例

注

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

引用文献

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

V. まとめと今後の課題

プロジェクトマネージャ：山内 恭
 連携コーディネーター：高田久美子

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

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

目標1: 北極域における温暖化増幅メカニズムの解明
 関係する研究課題:[1]モデル、[2]陸域、[3]大気、[4]雪氷

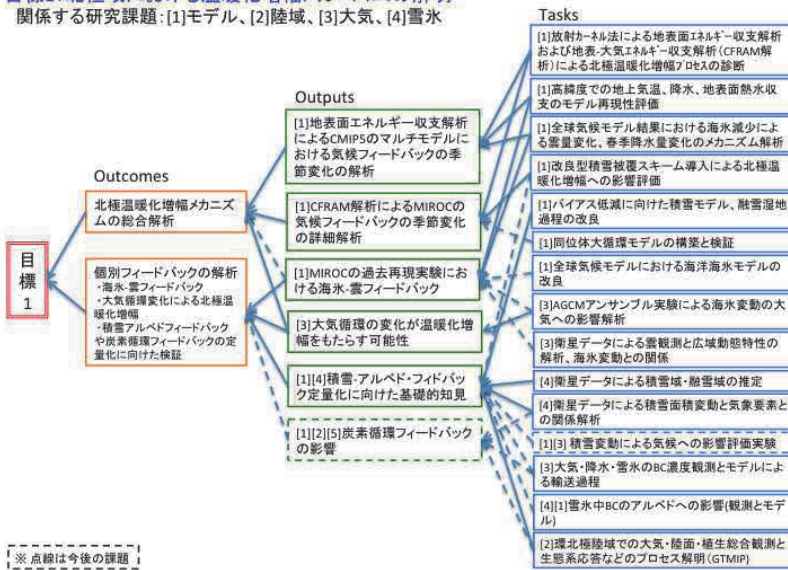


図 2.5.1.戦略研究目標 1 ピラミッド図

目標2: 全球の気候変動および将来予測における北極域の役割の解明
 関係する研究課題:[1]モデル、[2]陸域、[3]大気、[4]雪氷、[5]温室効果気体

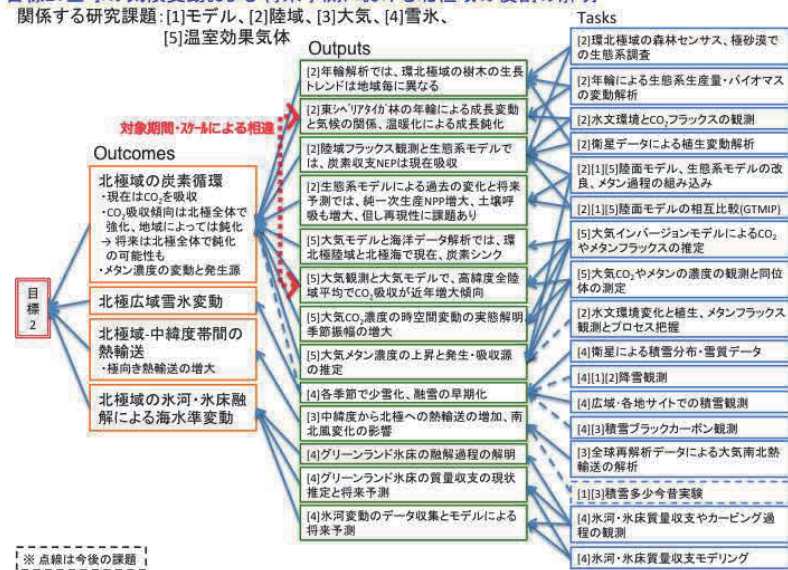


図 2.5.2 戦略研究目標 2 ピラミッド図

ピラミッド議論について

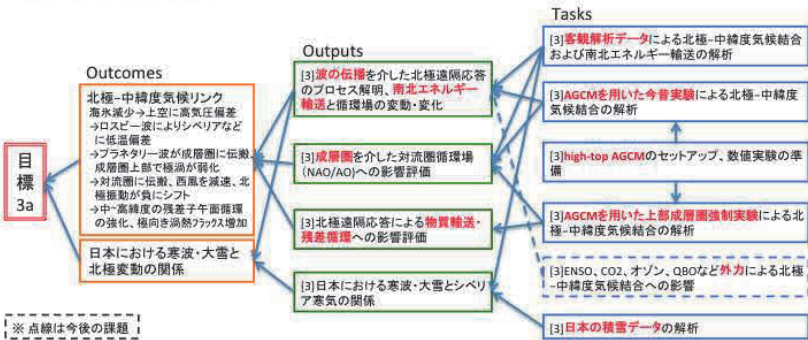
4つの戦略研究目標に対して7つの研究課題での研究成果から「答え」を提示するという本事業の構成については、第1章で詳細に述べた。戦略研究目標を達成するために、分野ごとの研究推進とともに、分野をまたがる連携研究や、観測とモデルの連携研究の推進が強く推奨され、中間評価における今後の留意点としても挙げられた。

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

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

(a)

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



※点線は今後の課題

(b)

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

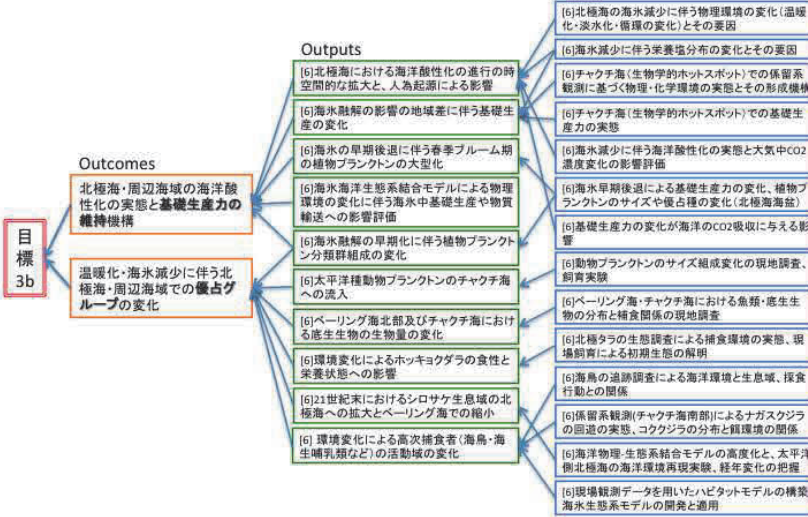
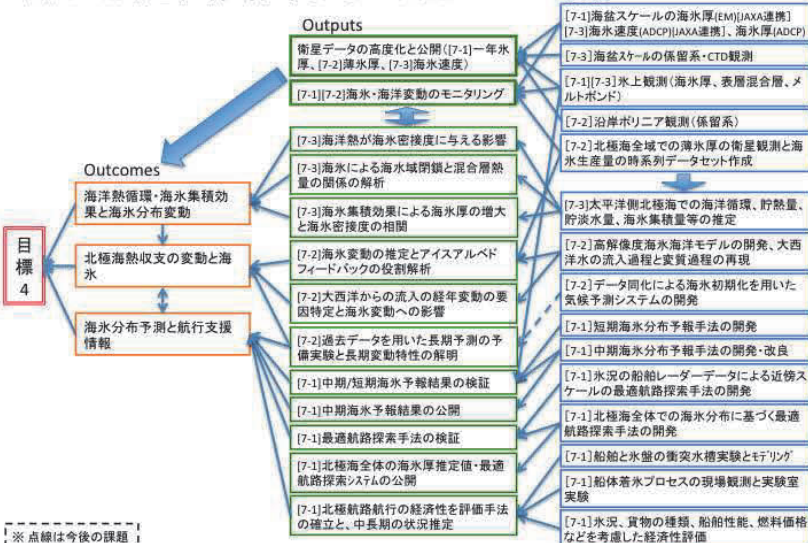


図 2.5.3 戦略研究目標 3 ピラミッド図

目標4: 北極海航路の利用可能性につながる海水分布の将来予測
 関係する研究課題: [7-1] [7-2] [7-3] 海洋海水・北極航路



※点線は今後の課題

図 2.5.4 戦略研究目標 4 ピラミッド図

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

全体まとめについて

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

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

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

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

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

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

北極温暖化の中緯度への影響、「中緯度リンク」と呼んでいるが、特に日本周辺の気象への影響である。既に、わが国の研究を嚆矢に以前から言われてきた関係であるが²⁾、あらためてその連関が成層圏を通じて引き起こされる成層圏・対流圏結合によるものであることが明確化された。即ち、晩秋のパレンツ海・カラ海の海水減少に伴うプラネタリー波の強化が成層圏の極渦を弱め、その影響が再び対流圏に及び偏西風ジェットの南下、蛇行を伴う北極振動(AO;北半球環状モードNAM)負の状態をもたらし、北極の寒気のシベリアから日本への吹き出しをもたらし、寒冬・豪雪を引き起こすという筋である。もう一つは、水産資源への影響(3b)で、北極温暖化に伴う海洋環境変化が基礎生産の変化をもたらし、同時に海洋酸性化を強め、プランクトン種や分布に変化をきたし、ひいては優占する魚類種等の変化まで及ぶということである。

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

今後の課題

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

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

北極温暖化の中緯度リンク

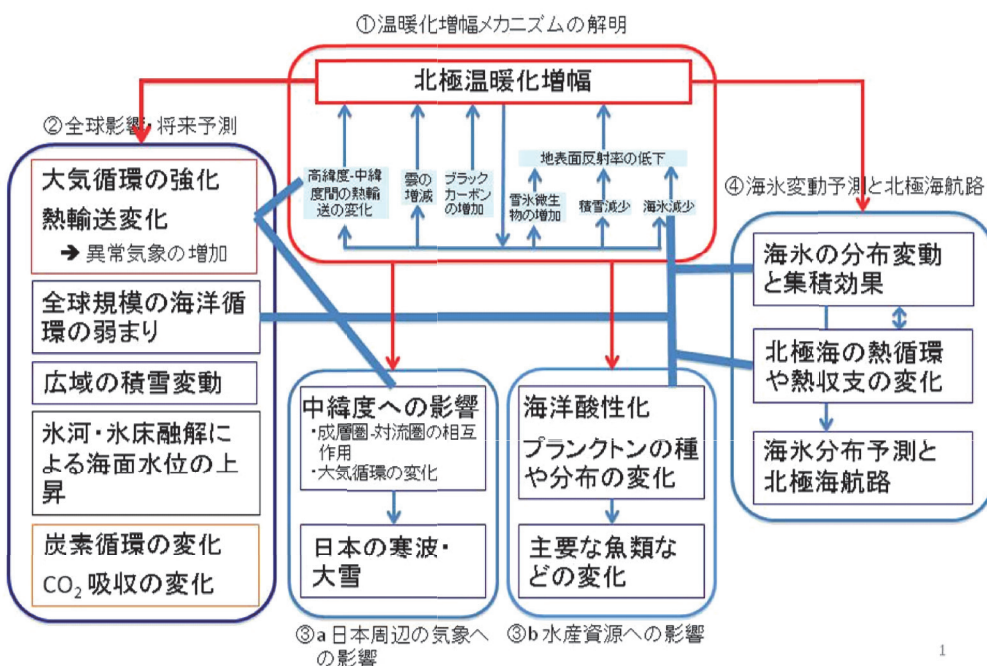


図 2.5.5. 全体のまとめ構想

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

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

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

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

海氷についても、将来の見通しについては本事業でも共通の理解に達したわけではない。2000年代に入ってから海氷急減はステップライクな変化であり、そのままの勢いで減少を続けるのではなく、再び安定化し緩い減少が続くという解釈もあるが、将来、2100年以前にも夏の海氷は全て無くなり、北極は季節海氷域に覆われることになってしまうのか、その行く末は定かではない。同時に、基本的な要素である海氷厚のモニタリングに

ついても、1 m以上の厚さの氷については未だ道半ばである。将来的に厚い多年氷は無くなるという解釈であれば、必要度は低くなるのかもしれないが。併せて、海水の変化に伴う北極海環境の変化が、究極的に生態系に、ひいては高次の生態系、水産資源まで、どのような影響を与えることになるかは、海洋酸性化の問題とともに不明な点が多い。また、海洋・海氷のモデル研究成果では大西洋水の流入路を再現しつつあり、これを拡張して北極海表層の将来像を予測できるとの期待がある。北極海から大西洋に流出する水塊の温度・塩分を変えることも考えられ、グリーンランド海の鉛直混合、さらに全球コンベアベルトの流量と温度・塩分に影響を与えるなら、100年を越える時間スケールで気候変化の予測にも必要な要素となる。

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

最後に

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

引用文献

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

第 3 章

研究課題報告

第 二 章

I. 北極気候再現性検証および北極気候変動・変化のメカニズム解析に基づく全球気候モデルの高度化・精緻化

研究課題1 研究代表者：野沢 徹

全球気候モデルによる北極気候の将来予測精度の信頼性向上を目指し、研究課題1では、以下の三つのサブテーマに関する研究を推進してきた。一つ目は、全球気候モデルによるシミュレーション結果をさまざまな観測データと比較解析することによる「気候モデルによる北極気候再現性の検証」で、北極域陸上におけるモデルの高温バイアスが主には雲と陸面過程に起因すること、などを確認した。二つ目は「北極気候変動・変化の原因特定・メカニズム解明」で、北極域における温暖化増幅メカニズムのより良い理解を得るため、海上および陸上それぞれにおけるさまざまなフィードバック（アイス・アルベドフィードバック、海水-雲フィードバック、など）の相対的な寄与率の季節性に着目して解析を行った。また、個別のフィードバックに関する詳細な解析や、北極域における長期気候変化の要因分析なども実施した。三つ目は北極において重要となる「要素モデルの開発・改良および感度実験」で、一つ目の「気候モデルによる北極気候再現性の検証」により指摘された問題点の一つである、積雪や湿地などの陸面過程を改良することにより、全球気候モデルを高度化・精緻化した。また、同位体モデルの導入や海洋・海氷モデルの改良なども行った。以下では、これら3項目それぞれについて、主要な研究成果を報告する。

1. 気候モデルによる北極気候再現性の検証

執筆者：野沢 徹 阿部 学 廣田渚郎 高敷 緑 高田久美子

(1) 北半球高緯度陸域における地表気温変化トレンドの再現性評価

執筆者：阿部学、野沢徹

気候モデルによる過去の気候場の再現性は、将来の気候変化予測の信頼性を判断する上で大変重要である。多くの再現性検証では時間平均場の空間分布を対象としているが、地球温暖化は20世紀後半にも顕著に表れており、地表気温の上昇傾向の再現性も重要な検証項目である。そこで本研究では、MIROC5を中心に、第5期結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP5）の複数の気候モデルにおける北半球高緯度陸域の地表気温上昇に関する再現性を検証した。使用したデータはCMIP5でデザインされた、観測の海水面温度を与えて行った大気大循環相互比較プロジェクト（AMIP）タイプ実験（1980–2008年）の月平均値である。観測された地表面気温データとして英国 East Angrea 大学が取りまとめているデータ（CRUTEM4¹⁾）を用いた。モデルデータは観測データの水平解像度に変換して季節平均値を作成後、最小二乗法を用いて各格子点での地表面気温の線形トレンドを計算した。

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

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

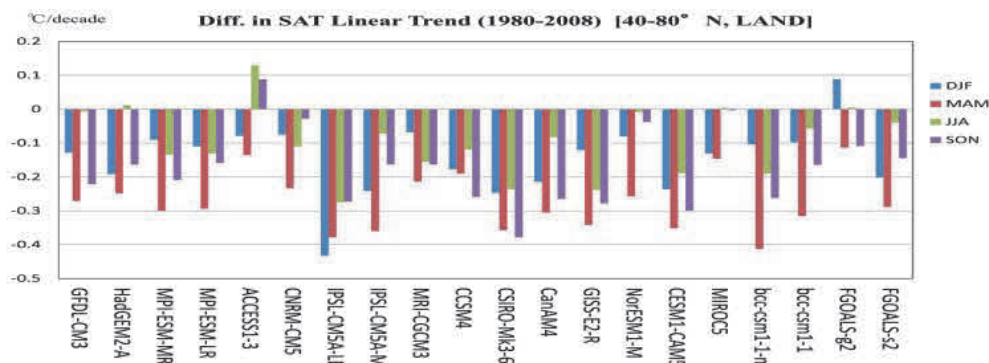


図 3.1.1 40–80° Nの陸域で季節平均した地表面気温トレンドのモデルと観測（CRUTEM4）との差。単位：[K/decade]。青：冬、赤：春、緑：夏、紫：秋。

(2) CMIP5 気候モデルにおける
高緯度陸上降水の再現性評価

執筆者：廣田渚郎、高数雄

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

世界中の研究機関で開発されている気候モデルによる数値実験データ (Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5;

CMIP5) を解析し、気候モデルにおける夏季 (6-8月) の北ユーラシア (0-180E, 45-90N) の降水再現性を調べる。この CMIP5 数値実験データは、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第1作業部会第5次評価報告書 (AR5) で述べられている将来予測の科学的根拠としても用いられているものである。モデルデータとの比較のために、Global Precipitation Climatology Project version 2 (GPCP2)、Asian Precipitation Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation (APHRODITE) などの地上観測データ、Global Satellite Mapping of Precipitation version 5

(GSMaP) や Clouds and the Earth's Radiant Energy System

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

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

Climatological Precipitation (Jun-Aug)

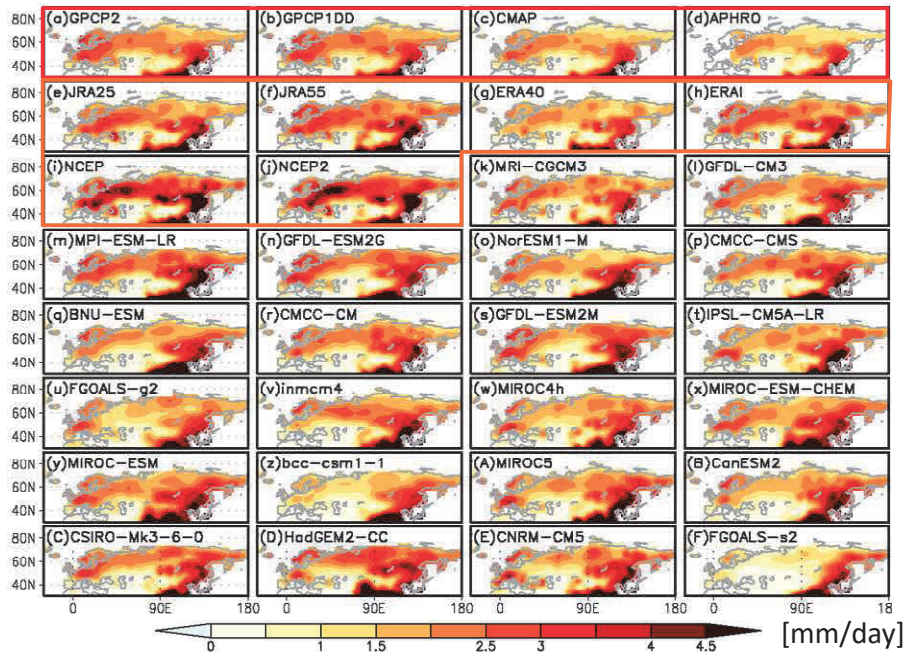


図 3.1.2 観測 (GPCP2、GPCP1DD、CMAP、APHRO)、再解析 (JRA25、JRA55、ERA40、ERA1、NCEP、NCEP2)、CMIP5 の北ユーラシアの夏季気候平均降水量 (mm day⁻¹)。

Precipitation bias from GPCP2 (Jun-Aug)

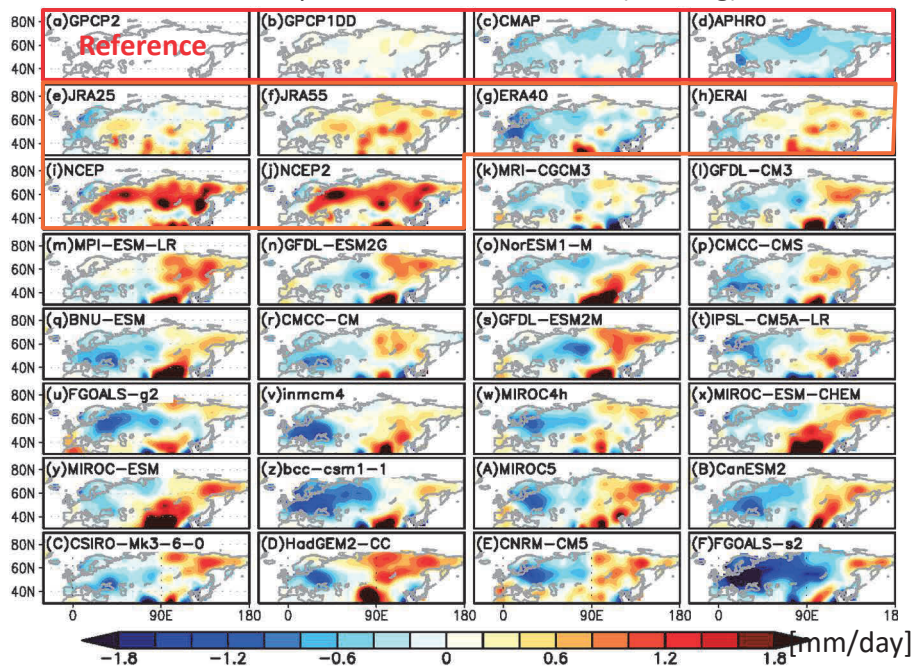


図 3.1.3 北ユーラシアの夏季気候平均降水量の GPCP2 観測からのバイアス (mm day⁻¹)。

受けた降水域が見られる。これらの降水の水平分布は、モデルでもおおよそ再現されている。GPCP2 観測をレファレンスとして、そこからのずれ (バイアス) を図 3.1.3 に示す。CMIP5 モデルには共通して、西部に負、東部に正の降水バイアスが見られる。CMIP5 モデルのバイアスに共通性が見られるため、

まずは、22 個の CMIP5 モデルを単純に平均したマルチモデルアンサンブルミーン (MME) を議論する。モデル間の違いについては、あとで議論する。

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

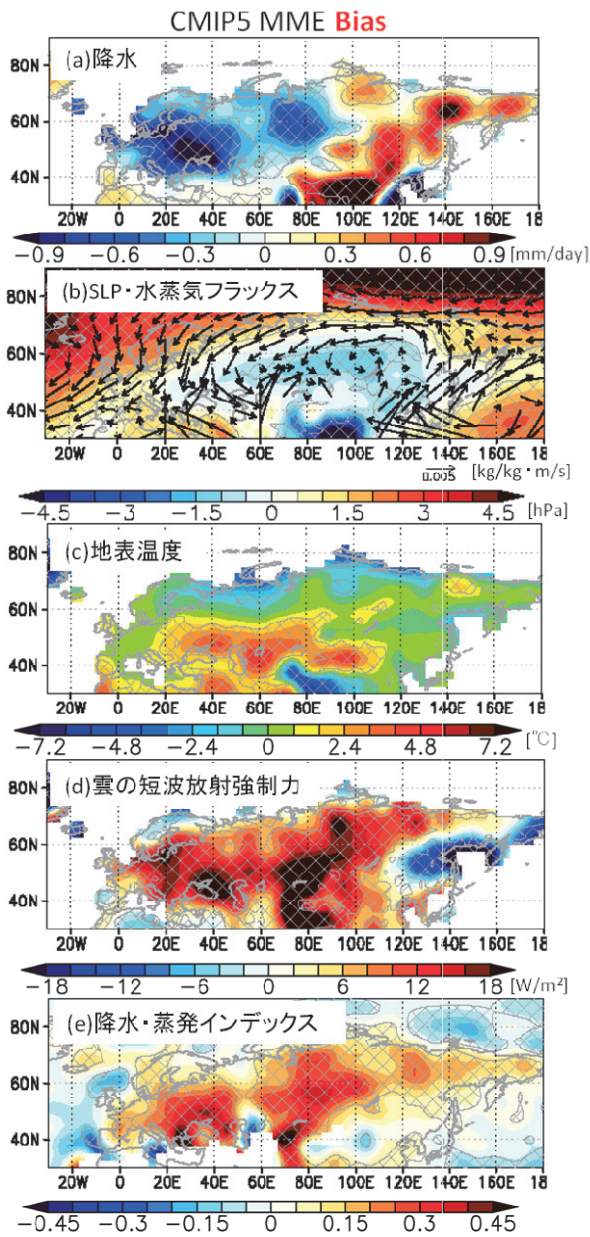


図 3.1.4 CMIP5 マルチモデル平均(MME)の(a)降水、(b)海面更正気圧と 850hPa 水蒸気フラックス、(c)地表温度、(d)雲の短波放射強制力、(e)降水・蒸発インデックスのバイアス。レファレンスはそれぞれ GPCP 観測、ERA 再解析、CRU 観測、CERES 衛星観測、ERA1 再解析。

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

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

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

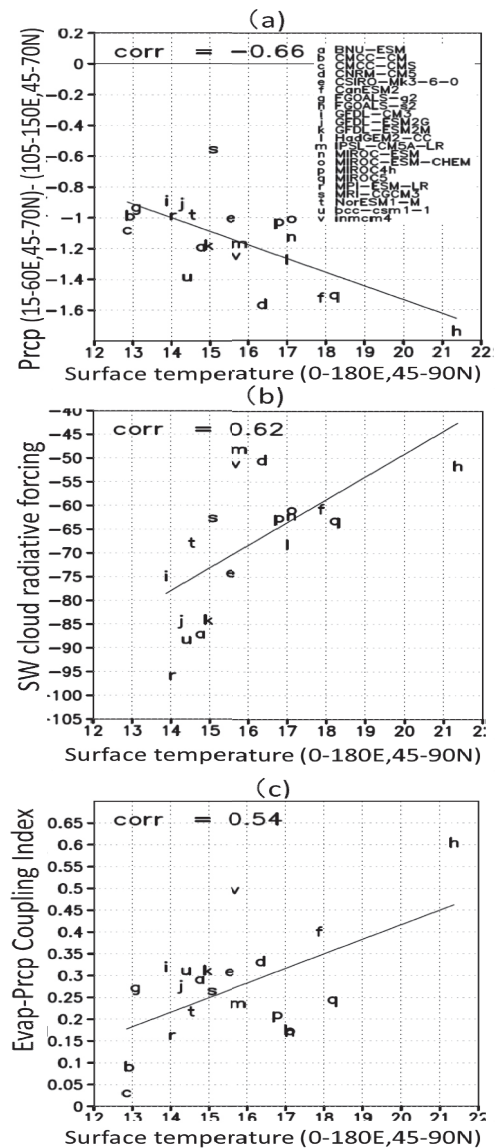


図 3.1.5 CMIP5 モデルにおける北ユーラシア地表気温(横軸)と(a) 西部と東部の降水量の差 (b) 短波雲放射強制力 (c) 蒸発—降水リサイクリングインデックス(縦軸)の関係。

強度を Zeng et. al. (2010) ³⁾ のインデックスを用いて評価すると、図 3.1.4e に見られる様に、大陸の全域で過大であり、MME では ERAI 再解析に比べリサイクリングがより活発である。つまりモデルでは、西（東）ユーラシアで降水が過少（多）になると、蒸発による大気への水蒸気供給も過小(大)になり、更に降水が減る(増える)という正のフィードバックがより強く働く。

ここまで 22 個の CMIP5 モデルの平均 (MME) のバイアスを議論してきた。前述の様に、降水が西部で過少・東部で過多のバイアスは全モデルに共通するが、その大きさはモデル間で異なる。図 3.1.5a に、縦軸をユーラシア西部 (15-60E, 45-70N) と東部 (105-150E, 45-70N) の降水量の差をとり、横軸に北ユーラシアの地表気温をとり、各モデルをプロットする。すると地面気温が高いモデル (図中右のモデル) ほど、西部の降水が東部の降水より小さいこと (図中下) が分かる (相関係数-0.66)。つまり、高温バイアスが高いモデルほど、降水が西部で過少・東部で過多のバイアスが高い。また、前述の短波雲放射強制力 SCRF と蒸発-降水リサイクリングインデックスとの関係を調べると、それぞれが大きいモデルほど、地面気温が高いことが分かる (図 3.1.5b,c; それぞれの相関係数は 0.62 と 0.54)。つまり、降水バイアスの大きさは、雲量の大きさ及び蒸発-降水リサイクリング強度で、ある程度決まっていることが分かる。

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

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

CMIP5 モデルの日変動は、モデルごとに大きく異なっている。IPSL などの非常に日変動の寄

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

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

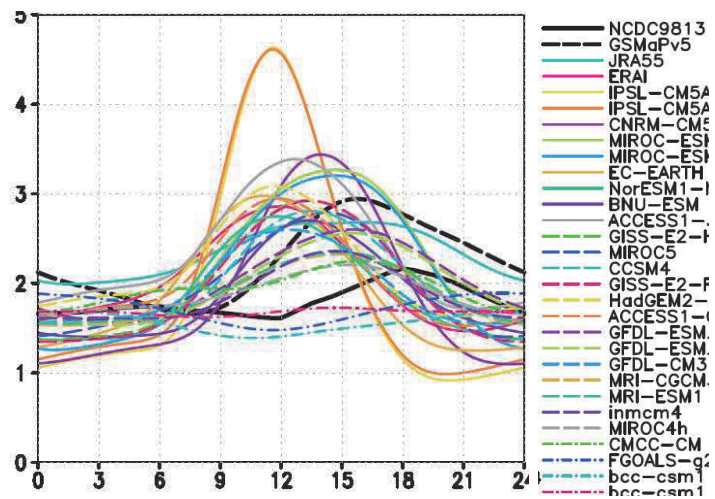


図 3.1.6 夏季(6-8月)北ユーラシア(0-180E,45-90N)における、NCDC9813(黒実線)、GSMaP(黒点線)、CMIP5 マルチモデルの降水日変動(mm day⁻¹)。横軸はローカルタイム。

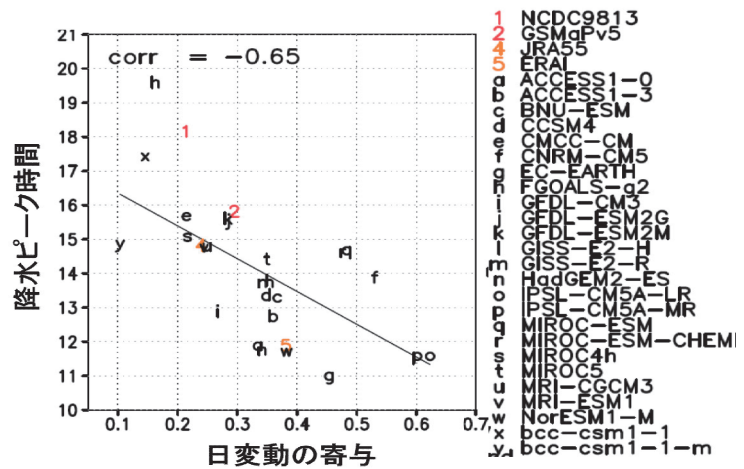


図 3.1.7 夏季(6-8月)北ユーラシア(0-180E, 45-90N)における、NCDC9813、GSMaP、CMIP5 マルチモデルの降水日変動のピーク時間(縦軸)と全降水量に対する寄与。

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

(3) 気候湿潤度による地表面熱水収支の再現性評価

執筆者：高田久美子

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

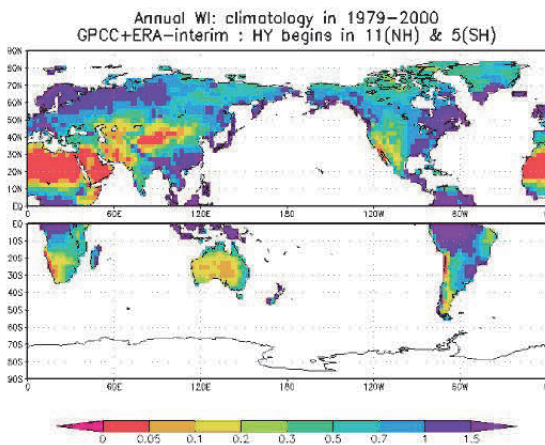


図 3.1.8 気候湿潤度(年間値)の気候値分布。0~0.1 は乾燥地、0.1~0.3 は半乾燥地、0.3~1 は半湿潤地、1 以上は湿潤地に相当する。水文年を考慮して、北半球は 11~10 月、南半球は 5~4 月で年間値を算定した。

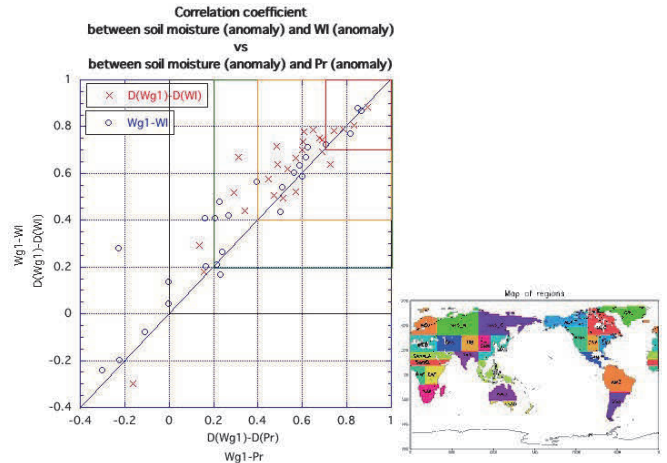


図 3.1.9 (左図)土壌水分-降水量の相関係数(横軸)と土壌水分-気候湿潤度の相関係数(縦軸)の関係。いずれも年間値。○は気候値について地域別に相関係数を算定。×は地域別の年々変動偏差について相関係数を算定。□(赤)が高い正相関、(黄)が中程度の正相関、□(緑)が低い正相関。(右図)地域の区分け。

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

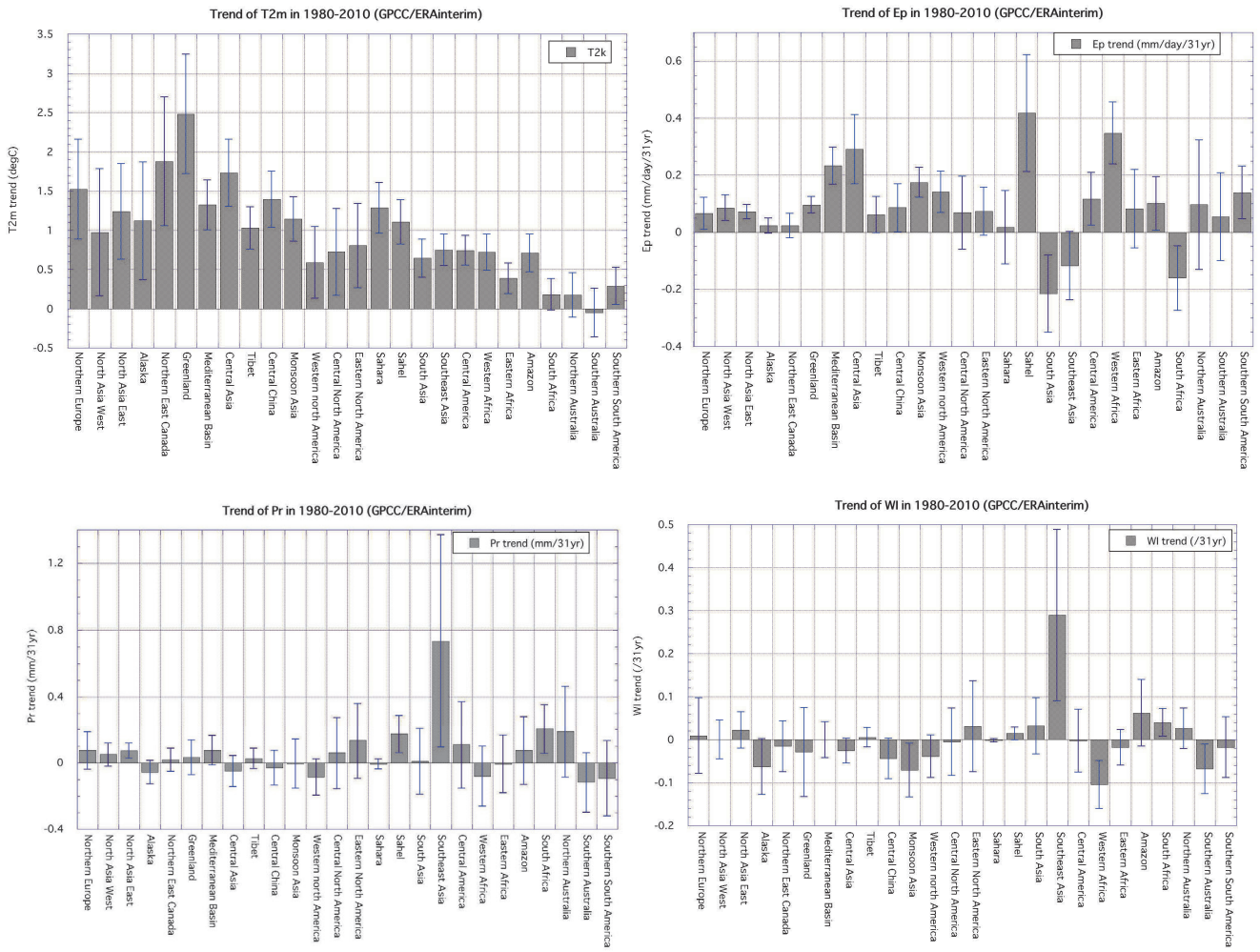


図 3.1.10 1980–2010 年の各地域における年間値の線形トレンド(棒)とトレンドに対する標準偏差(エラーバー)。左上が地上気温(T2)、右上が可能蒸発散量(Ep)、右下が気候湿潤度(WI)、左下が降水量(Pr)。棒グラフは左から右へ、北半球高緯度～低緯度～南半球高緯度。

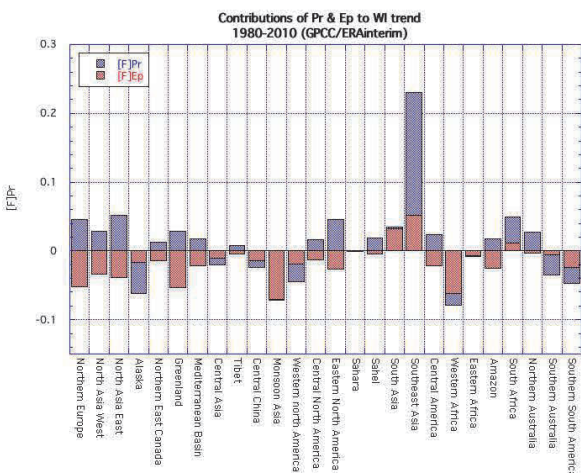


図 3.1.11 気候湿潤度 WI の定義式の一次偏微分式から算定した、各地域での WI トレンドに対する降水量 Pr のトレンドの寄与(青)と可能蒸発散量 Ep のトレンドの寄与(赤)。

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

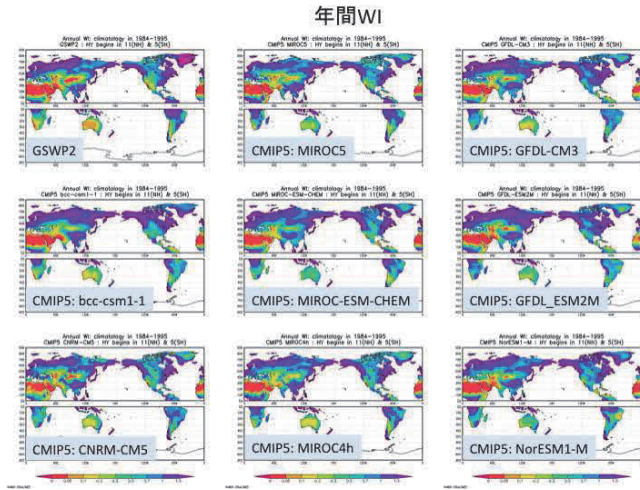


図 3.1.12 GSWP2 と CMIP5 のうち 8 モデルの気候湿潤度の年間値。

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

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

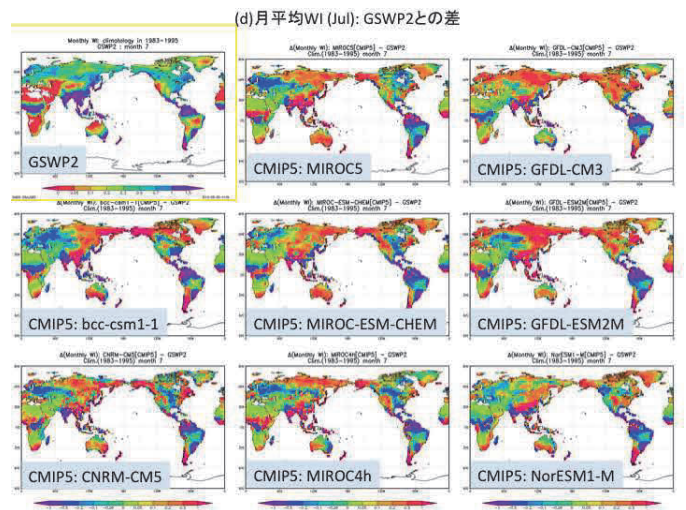
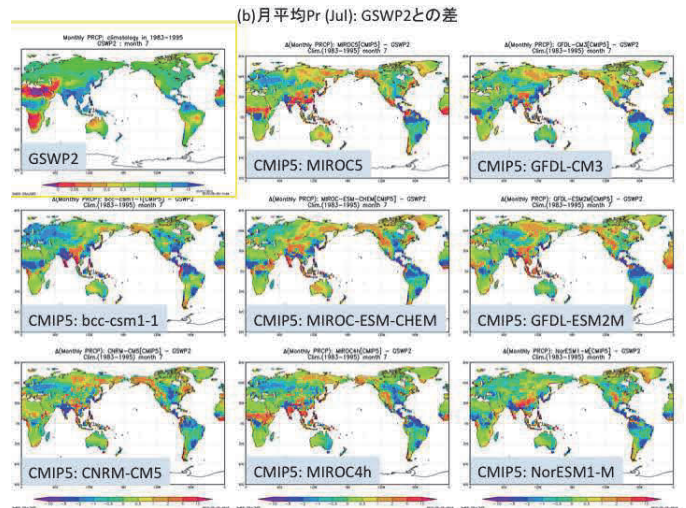
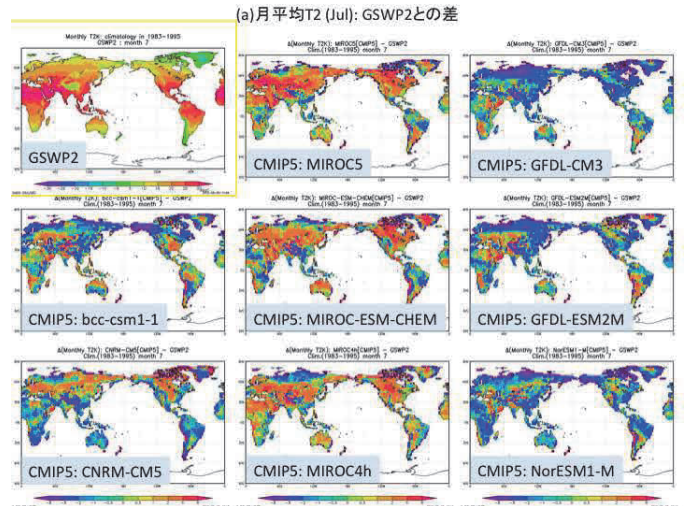


図 3.1.13 (a)GSWP2 の 7 月の地上気温の気候値と CMIP5 のうち 8 モデルの 7 月の地上気温の GSWP2 との差、(b)(a)と同じ、但し降水量、(c)(a)と同じ、但し気候湿潤度。

2. 北極気候変動・変化の原因特定・メカニズム解明

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

(1) 北極域温暖化増幅プロセスの診断

執筆者：吉森正和、Laine Alexandre、阿部彩子、野沢徹

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

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

(2) MIROC における北極海の海氷減少による雲量変化への影響

執筆者：阿部学、野沢徹、小倉知夫、高田久美子

近年の地球温暖化により、9 月を中心に北極海の海水が顕著に減少している。この海氷減少にともない、大気中の低層雲が増加していることが、人工衛星による観測データの解析研究から明らかとなっている。このような、雲の増加にともなう下向き長波放射量の増加が、太陽入射量の小さい、あるいはほとん

どない北極域の秋季から春季においても、気温上昇や海氷減少をもたらす可能性のあることが指摘されており、北極温暖化増幅メカニズムの総合解析においても、重要なプロセスの一つとして認識されている（第 2 章「戦略研究目標 1」の 1. および第 3 章「研究課題 1」の 2-（1）を参照）。このような背景から、本研究では、全球気候モデルで起こっている海氷減少による雲量の変化と、それにとまう放射量への影響について調べた。詳細については第 2 章「戦略研究目標 1」の「2. 個別フィードバックの解析」の（1）海氷-雲フィードバックとして記載しているため、ここではその概要のみを示す。

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

(3) 20 世紀後半におけるユーラシア大陸上の春季降水量変化のメカニズム

執筆者：野沢徹

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

解析に用いたモデルデータは第 3 次結合モデル相互比較プロジェクトに参画した Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) による 20 世紀気候再現実験である⁷⁾。大気側の水平解像度は約 280 km であり、対流圏エアロゾルモデ

ルの簡略化版が含まれている。解析には初期値の異なる10メンバーのアンサンブル平均を用いた。また、温室効果ガスのみ、エアロゾルのみなど、個別要因のみを考慮した場合の数値実験結果も部分的に援用している。

ユーラシア大陸東部の一部を除き、モデルは観測された降水量変化をおおむねよく再現していた。大気中の水収支式に基づく解析により、ユーラシア大陸西部では地表面蒸発量の増加が、ユーラシア大陸東部では大気中の水蒸気収束が、それぞれ降水量増加を引き起こしていると推測された(図3.1.14上段)。地表面での熱エネルギー収支式に基づく解析により、ヨーロッパ

域においては下向き短波放射の増加が、ユーラシア大陸中部では上向き短波放射の減少が、それぞれ地表面蒸発量の増加に寄与していることが分かった(図3.1.14下段)。ヨーロッパでは、20世紀中盤以降に人為起源エアロゾル排出量が減少しており、これにともなって地表面に到達する太陽放射が増加していることが原因と考えられる。一方、ユーラシア大陸中部では、温暖化にともない積雪面積が後退して地表面アルベドが低下したこと(いわゆるアイス・アルベドフィードバック)が原因と考えられる。

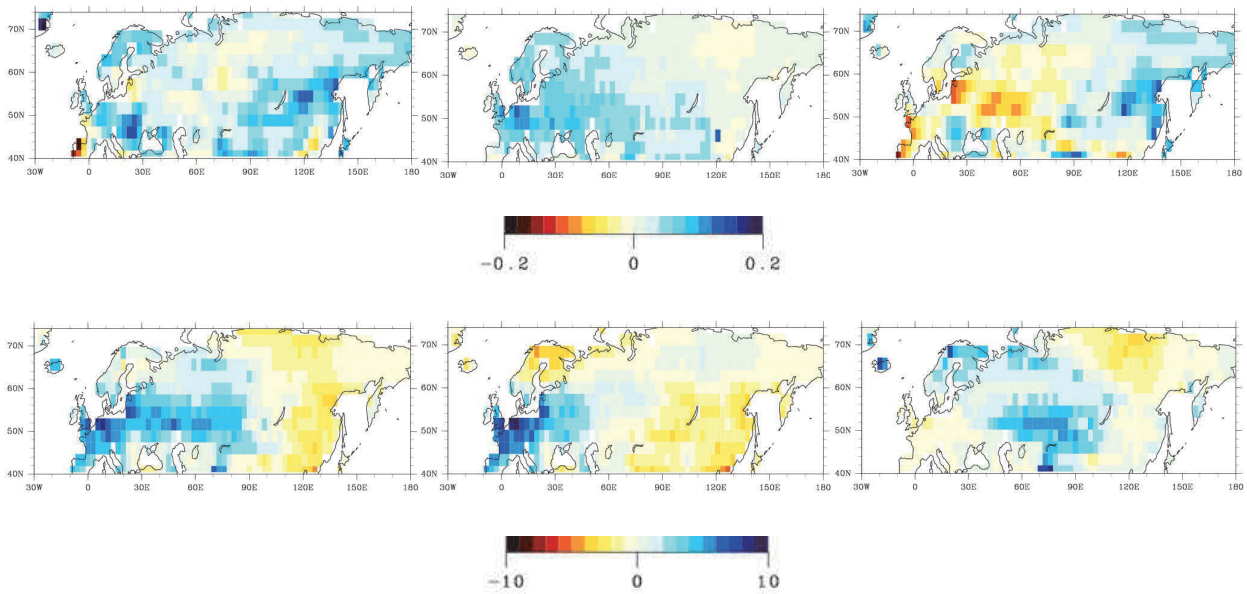


図3.1.14. 1959~2008年の50年間におけるユーラシア大陸の春季平均降水量(左上)、蒸発量(中央上)、鉛直積算水蒸気収束量(右上)の変化 [mm/day/50years] および地表面での正味短波放射(左下)、下向き短波放射(中央下)、上向き短波放射(右下)の変化 [W/m²/50years]。放射量の変化は下向きを正としている。

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

執筆者：大石龍太、新田友子、阿部彩子

はじめに

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

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

結果

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

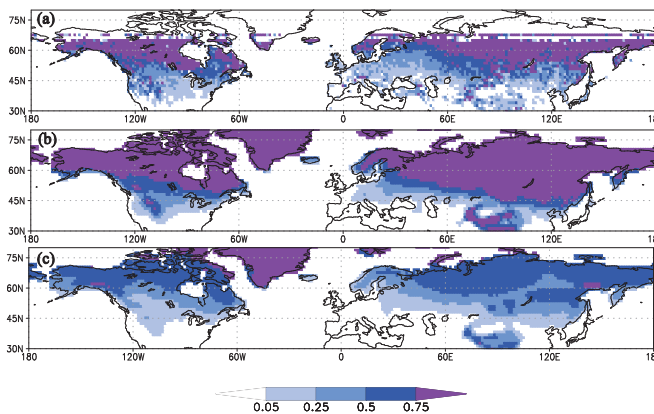


図 3.1.15 11 月の平均積雪被覆率。(a)衛星観測(MODIS)、(b)本研究(SSNOWD)、(c)既存の MIROC。

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

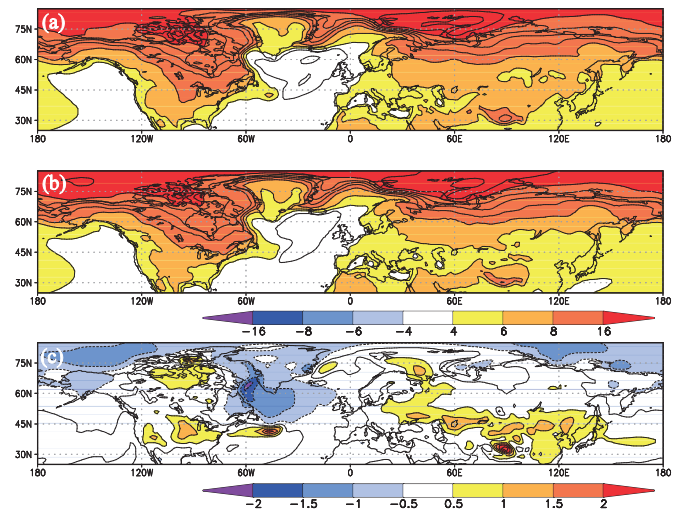


図 3.1.16 大気二酸化炭素 4 倍増時の年平均した地表気温変化の地理分布。(a)は本研究、(b)は既存 MIROC の結果、(c)は両者の差。

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

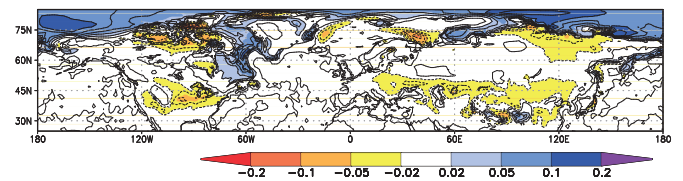


図 3.1.17 図 3.1.16 c に対応する地表面アルベド変化の分布。

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

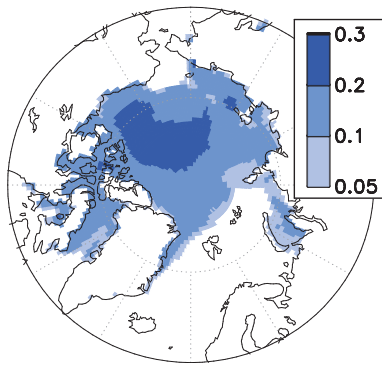


図 3.1.18 : SSNOWD 導入による温暖化時の冬の海水被覆率の変化

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

まとめ

本研究では、サブグリッド積雪スキーム SSNOWD の大気海洋大循環モデル MIROC への導入によって、標準実験設定での積雪被覆率と地表面気温が改善し、現実に近い。温暖化実験を行ったところ、SSNOWD の導入による全球平均した温暖

化に増減は見られなかった。ところが、SSNOWD を導入した大気二酸化炭素濃度 4 倍実験では、北半球中低緯度の陸上で温暖化が強化され、北極海で温暖化が抑制された。そのため、SSNOWD の導入により MIROC で起こる極域増幅は低減されることが示された。本研究の成果は、大気海洋大循環モデル MIROC の次期バージョンの標準積雪スキームとして採用され、IPCC 第 6 次評価報告書に提出する温暖化予測実験等に貢献する予定である。

3. 要素モデルの開発・改良および感度実験

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

(1) 陸面モデルにおける積雪被覆率の改良および簡易湿地モデル開発

執筆者：新田友子、芳村圭、高田久美子、阿部彩子

MIROC の陸面過程モデル Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff (MATSIRO) に組み込まれている標準の積雪被覆率パラメタリゼーションは、積雪量の関数として積雪被覆率を計算するが、単純すぎて再現性がよくないことが分かっていた。そこで、Liston (2004) ⁸⁾ によって開発された Subgrid SNOW Distribution (SSNOWD) というパラメタリゼーションを新たに MATSIRO に組み込み、陸面オフライン実験による検証を行った。SSNOWD は、サブグリッドの積雪水当量分布が対数正規分布に従うと仮定して、そのパラメータは、サブグリッドの積雪水当量の変化を生み出す物理過程を考慮して決定する。積雪期間を堆積期と融雪期に分け、堆積期は積雪被覆率を 1 とし、融雪期はグリッド様に融雪すると仮定する。これにより、これまでの MATSIRO の標準パラメタリゼーションでは考慮できなかった、積雪水当量と積雪被覆率のヒステリシス的な関係を表現できるようになる。

積雪被覆率パラメタリゼーションの検証のために、全球 1 度 × 1 度の解像度で、1979 年から 2007 年までの 29 年間の陸面オフライン実験を行った。実験は、標準の MATSIRO (MAT5 実験) と、SSNOWD を組み込んだ MATSIRO (SSNOWD 実験) を用いた 2 種類である。気象強制力として再解析データと観測降水量を組み合わせて作成された気象データセット (Kim et al., 2009) ⁹⁾ を使い、境界条件とオフライン実験の手法は Global Soil Wetness Project 2 (GSWP2) に則った。

上記 2 種類の数値実験による計算結果を、Niu and Yang (2007) ¹⁰⁾ による観測積雪深と積雪被覆率の関係についての解析、人工衛星 MODIS 観測による積雪被覆プロダクト (Hall et al., 2006) ¹¹⁾、Interactive Multisensor Snow and Ice

Mapping System (IMS) の積雪解析値 (National Ice Center, 2008)¹²⁾、GLOBal SNOW monitoring for climate research (GLOBSNOW) の積雪水当量 (Takala et al., 2011)¹³⁾ と比較した。Niu and Yang (2007)¹⁰⁾ は、北アメリカの主要流域において積雪水当量と積雪被覆率の関係を季節ごとに検討し、

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

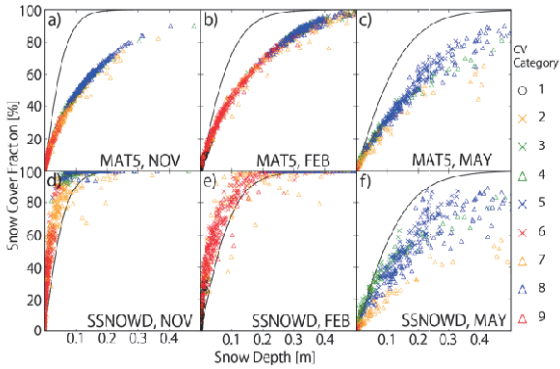


図 3.1.19: 北アメリカ主要流域における積雪深と積雪被覆率の関係。黒線は Niu and Yang (2007)¹⁰⁾ による観測の解析より。SSNOWD の CV カテゴリーごとにプロットしてある。上段は MAT5 実験、下段は SSNOWD 実験の結果で、左から、11月、2月、5月を示している。

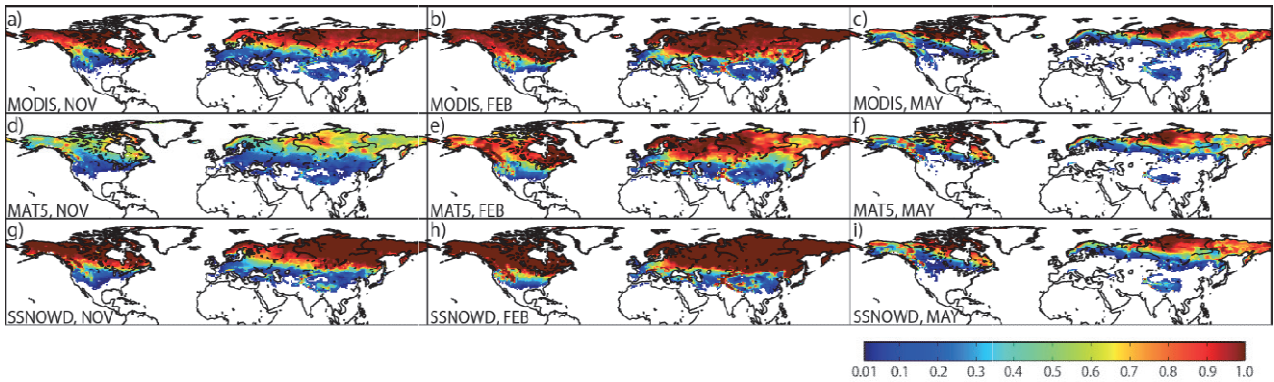


図 3.1.20 積雪被覆率の検証。2001-2007年の月平均値で、a) MODIS 11月、b) MODIS 2月、c) MODIS 5月、d) MAT5 実験 11月、e) MAT5 実験 2月、f) MAT5 実験 5月、g) SSNOWD 実験 11月、h) SSNOWD 実験 2月、i) SSNOWD 実験 5月を示している。

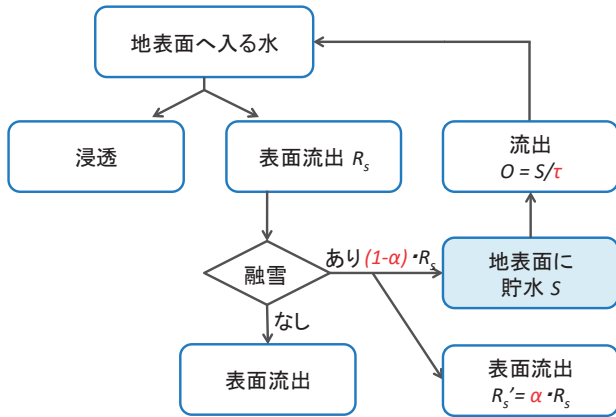


図 3.1.21 簡易湿地モデルの計算フロー。融雪時の表面流出のうち、貯水されずに流出する割合を α 、一時的に貯水される割合を $1-\alpha$ 、貯水された水が流出する際の時定数を τ としている。

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

陸面オフライン実験で計算された表面貯水量は、融雪と同時に増加し、少しずつ流出して、秋にはほとんどの場所で 5 mm 以下まで減少した (図 3.1.22b)。スキームの検証には、Global Lakes and Wetlands Database (GLWD; Lehner and Döll,

2004) ¹⁴⁾ から計算した 1 度 \times 1 度解像度の湿地面積率を用いた (図 3.1.22 a)。開発したスキームは湿地面積率を計算できないため、定性的なスキームの検証として、タンクに貯留された水の量の比較を行い、湿地面積率の高い場所とタンクの水が多い場所がある程度対応していることを確認した (図 3.1.22 a、b)。

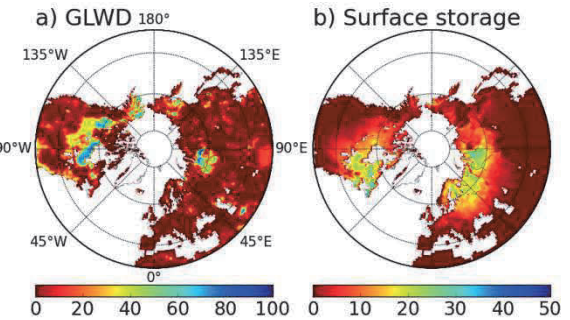


図 3.1.22 a) 湿地面積率 [%] と b) WET 実験の平均表面貯水量 [mm]。

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

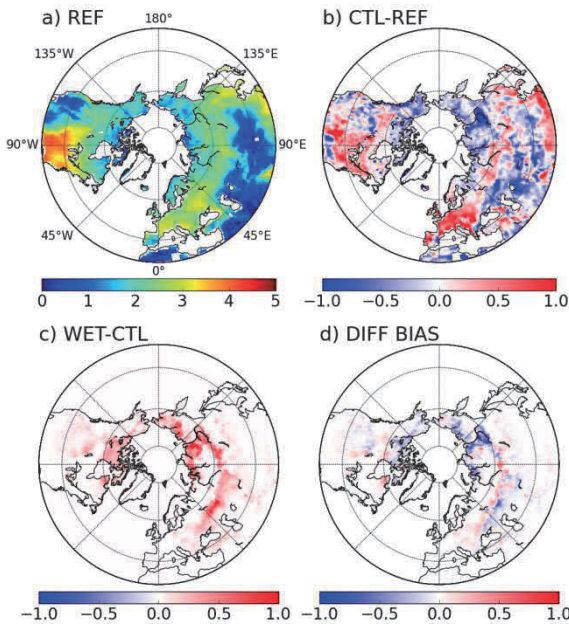


図 3.1.23 2001 年 6-8 月の北緯 30 度以北の蒸発散量。a) 観測値、b) CTL 実験と観測の差、c) 二つの実験 (CTL 実験と WET 実験) の差、d) バイアスの差を示している。

(2) 同位体大循環モデルの構築と検証

執筆者：芳村圭

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

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

図 3.1.24 に降水同位体比年平均値の空間分布を示す。観測から、同位体比が低緯度において高く高緯度で低い、いわゆる「緯度効果」が見て取れる。また、高度の高い場所で同位体比が低

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

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

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

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

表 3.1.1 年々変動が有意に再現された GNIP 観測点数。0 内の数字は全観測点数を示す。

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

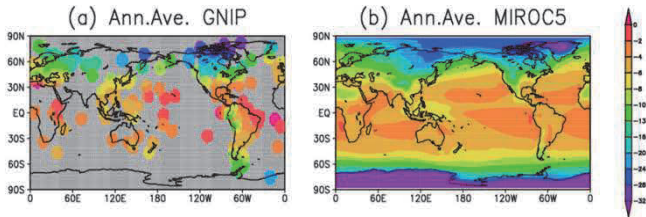


図 3.1.24 (a) 観測、(b)シミュレーションの降水同位体比年平均値(‰)

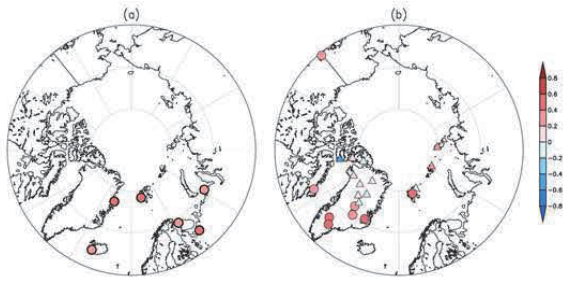


図 3.1.25 (a) GNIP 降水同位体比、(b) アイスコア同位体比とモデル降水同位体比の年々の相関係数。丸は有意な相関 ($p < 0.05$) を示し、三角形は非有意であることを示す。

(3) 全球気候モデルにおける海洋・海氷モデルの改良

執筆者：辻野博之、豊田隆寛、保坂正宏、小室芳樹

はじめに

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

海洋・海氷モデルの改良

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

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

(Umlauf and Burchard, 2003)¹⁹⁾に変更した。さらに、ノルウェー海においては、海氷の漂流速度が小さく、北極海から運ばれる海氷が十分に南方へ流去せず大量に融解するために、表層が低塩分化し、海氷過多となっていることが示唆されたため、海氷の運動の駆動力である大気からの風応力の計算手法を見直

し、より大きな風応力を海氷に与えることができるようにした。これらの変更により、冬季の海氷面積過多の問題が大幅に改善した (図 3.1.26b)。一方、夏季に海氷が融解し過ぎる傾向があり、今後改善を継続的に検討する必要がある。

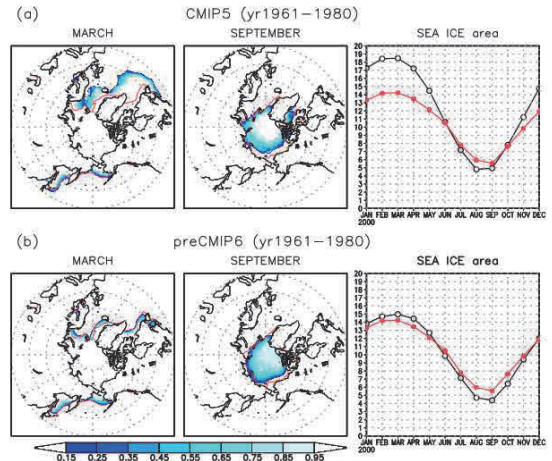


図 3.1.26 (左) 3月、(中) 9月の1961年–1980年の平均海氷密度分布。(カラー) モデル、(赤線) 観測データセット HadISST 1981年–2000年の平均に基づく氷縁 (密度0.15の等値線。参考値)、(右) 北半球の月別平均海氷面積 (黒: モデル (1961年–1980年の平均)、赤: HadISST (1981年–2000年の平均。参考値))。 (a) CMIP5 実験、(b) CMIP6 へ向け準備中の実験。

海洋・海氷モデル相互比較実験

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

北極域の相互比較では、海氷、および海水に含まれる淡水、および全般的な水温・塩分分布や海水収支に着目した比較が行われた。気象研究所のモデルは全般的に参加したモデルの平均的な挙動を示していた。これにより、モデルが大きな問題を孕んでいないことを知る事ができたが、これが必ずしも北極域の再現に優れた性能を持つことを示しているわけではない。同種

類の設定のモデルに共通みられた、北極海中深層における海水高温・高塩分バイアス、表中層の低温・低塩分バイアス、海水厚東西コントラストの過小評価、海水体積の近年の緩慢な減少傾向などに対しては継続的に改良を図らなければならない。水温バイアスについては、大西洋起源水の流入過程とシベリア沖における低温水の形成と分布過程の正確な再現が必要である。

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

海洋・海氷データ同化システムの開発

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

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

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

Toyoda et al. (2016) では、海氷密度観測データを海洋・海氷モデルに同化する際に、密度だけでなく境界条件となる大気温度・比湿、海洋モデル混合層の水温と塩分を同時に修正する実験を行い、その効果を調べた。水温・塩分についての既存のデータ同化スキーム (Toyoda et al., 2011)²²⁾と同様に、海

氷密度の観測データをもとに観測・モデル誤差を考慮して3次元変分法により最適値を推定し、解析インクリメントに Incremental Analysis Updates 法 (Bloom et al., 1996)²³⁾を用いてモデルに挿入した。この密度の修正に際して、海氷の鉛直温度構造は変化させないという条件のもとにグリッド平均表面温度（海氷もしくは積雪の上面温度と開氷域の海面水温の面積平均）の修正量を計算し、これをフォーシングの2 m 気温に反映させた。同様に、海洋モデル1層目の水温が、海氷下の結氷点水温と開氷域の水温との面積平均であるとして、密度修正量から混合層水温の修正量を推定した。ここで、海洋・海氷系の水、塩の総量は保存するように修正を行っている。

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

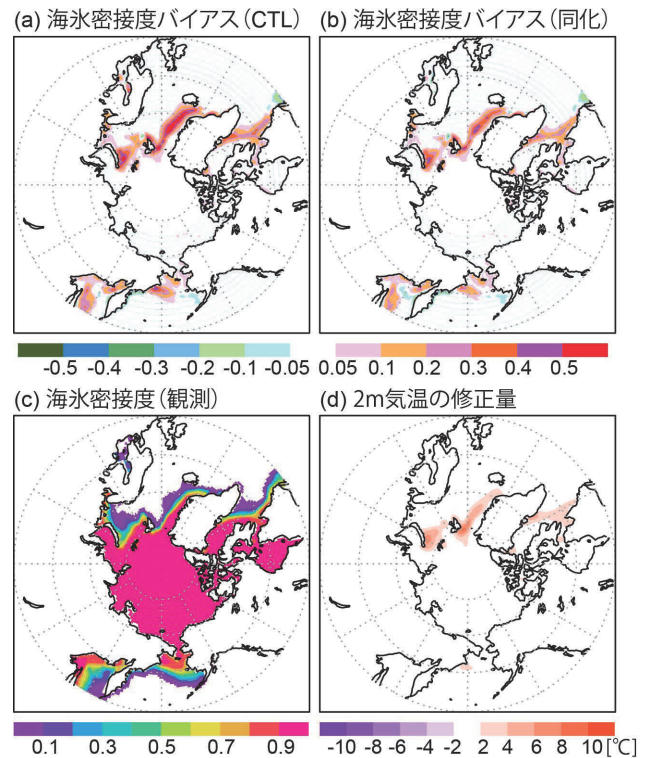


図 3.1.27 3月の平均値(2001-2010年)。(a) 既存のシステムによる水温・塩分のみ同化する実験における海氷密度のバイアス。(b) 加えて密度を同化し、その際に境界条件を修正する実験における海氷密度のバイアス。(c) 海氷密度の観測データ(MGDSST)。(d) (b)の密度同化実験における2 m 気温の修正量。

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

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

引用文献

- 1) Jones, P. D., Lister, D. H., Osborn, T. J., Harpham, C., Salmon, M., Morice, C. P., 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117, D05127, 10.1029/2011JD017139.
- 2) Nishii, K., Nakamura, H., Orsolini, Y. J., 2015, Arctic summer storm track in CMIP3/5 climate models. *Clim. Dyn.*, 44, 1311-1327.
- 3) Zeng, X., Barlage, M., Castro, C., Fling, K., 2010. Comparison of land-precipitation coupling strength using observations and models. *Journal of Hydrometeorology* 11(4), 979-994.
- 4) Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., Parsons, D. B., 2003. The changing character of precipitation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 84, 1205-1217.
- 5) Zhang, X., Zwiers, F. W., Hegerl, G. C., Lambert, F. H., Gillett, N. P., Solomon, S., Stott, P. A., and Nozawa, T., 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448, 461-465.
- 6) Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F. W., 2008. Human-induced Arctic moistening. *Science*, 320, 518-520.
- 7) Nozawa, T., Nagashima, T., Ogura, T., Yokohata, T., Okada, N., Shiogama, H., 2007. Climate change simulations with a coupled ocean-atmosphere GCM called the Model for Interdisciplinary Research on Climate: MIROC. CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT, 12, NIES, pp.79.
- 8) Liston, G. E., 2004. Representing subgrid snow cover heterogeneities in regional and global models. *J. Climate*, 17, 1381-1397.
- 9) Kim, H., P. J.-F. Yeh, P. J.-F., Oki, T., Kanae, S., 2009. Role of rivers in the seasonal variations of terrestrial water storage over global basins. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17402, doi:10.1029/2009GL039006.
- 10) Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., 2007. An observation-based formulation of snow cover fraction and its evaluation over large North American river basins. *J. Geophys. Res.*, 112, D21101, doi:10.1029/2007JD008674.
- 11) Hall, D. K., Salomonson, V. V., Riggs, G. A., 2006. MODIS/Terra Snow Cover Monthly L3 Global 0.05Deg CMG version 5. MOD10CM, MYD10CM, National Snow and Ice Data Center. Digital media. [Available online at <http://nsidc.org/data/mod10cm>.]
- 12) National Ice Center, 2008. IMS daily Northern Hemisphere snow and ice analysis at 4 km and 24 km resolution. National Snow and Ice Data Center. Digital media. [Available online at <http://nsidc.org/data/g02156>.]
- 13) Takala, M., Luojus, K., Pulliainen, J., Derksen, C., Lemmetyinen, J., Kärnä, J.-P., Koskinen, J., Bojkov, B., 2011. Estimating Northern Hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements. *Remote Sens. Environ.*, 115, 3517-3529.
- 14) Lehner, B., Döll, P., 2004. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *J. Hydrology*, 296, 1-22.
- 15) Mueller, B., Hirschi, M., Jimenez, C., Ciais, P., Dirmeyer, P. A., Dolman, A. J., Fisher, J. B., Jung, M., Ludwig, F., Maignan, F., Miralles, D. G., McCabe, M. F., Reichstein, M., Sheffield, J., Wang, K., Wood, E. F., Zhang, Y., Seneviratne, S. I., 2013. Benchmark products for land evapotranspiration: LandFlux-EVAL multi-data set synthesis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 3707-3720.
- 16) Jouzel, J., Russell, G. L., Suozzo, R. J., Koster, D., J. W. C. White, J. W. C., Broecker, W. S., 1987. Simulations of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA GISS general circulation model: The seasonal cycle for present-day conditions. *J. Geophys. Res.*, 92, 14739-14760.
- 17) Blossey, P. N., Kuang, Z., Romps, D. M., 2010. Isotopic composition of water in the tropical tropopause layer in cloud-resolving simulations of an idealized tropical circulation. *J. Geophys. Res.*, 115, D24309, doi:10.1029/2010JD014554.
- 18) Yoshimura, K., Miyazaki, S., Kanae, S., Oki, T., 2006. Iso-MATSIRO, a land surface model that incorporates stable water isotopes. *Glob. Planet. Change*, 51, 90-107.
- 19) Umlauf, L., Burchard, H., 2003. A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *J. Mar. Res.*, 61, 235-265.
- 20) Danabasoglu, G., Yeager, S. G., Bailey, D., Behrens, E., Bentsen, M., Bi, D., Biastoch, A., Böning, C., Bozec, A., Canuto, V. M., Cassou, C., Chassignet, E., Coward, A. C., Danilov, S., Diansky, N., Drange, H., Farneti, R., Fernandez, E., Fogli, P. G., Forget, G., Fujii, Y., Griffies, S. M., Gusev, A., Heimbach, P., Howard, A., Jung, T., Kelley, M., Large, W. G., Leboissetier, A., J. Lu, Madec, G., Marsland, S. J., Masina, S., Navarra, A., Nurser, A. J. G., Pirani, A., Salas y Méla, D., Samuels, B. L., Scheinert, M., Sidorenko, D., Treguier, A.-M., Tsujino, H., Uotila, P., Valcke, S., Voldoire, A., Wangi, Q., 2014. North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part I: Mean states. *Ocean Model.*, 73, 76-107, doi:10.1016/j.ocemod.2013.10.005.
- 21) Inoue, J., Hori, M. E., Enomoto, T., Kikuchi, T., 2011. Intercomparison of surface heat transfer near the Arctic marginal ice zone for multiple reanalyses: a case study of September 2009. *SOLA*, 7, 57-60, doi:10.2151/sola.2011-015.
- 22) Toyoda, T., Awaji, T., Sugiura, N., Masuda, S., Igarashi, H., Sasaki, Y., Hiyoshi, Y., Ishikawa, Y., Mochizuki, T., Sakamoto, T., Tatebe, H., Komuro, Y., Suzuki, T., Nishimura, T., Mori, M., Chikamoto, Y., Yasunaka, S., Kanamaru, Y., Arai, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Nozawa, T., Hasegawa, A., Ishii, M., Kimoto, M., 2011. Impact of the assimilation of sea ice concentration data on an atmosphere-ocean-sea ice coupled simulation of the Arctic Ocean climate. *SOLA*, 7, 37-40.
- 23) Bloom, S. C., Takacs, L., daSilva, A. M., Ledvina, D., 1996. Data assimilation using incremental analysis updates. *Mon. Weather Rev.*, 124, 1256-1271.

II. 環北極陸域システムの変動と気候への影響

研究課題2 研究代表者：杉本敦子

1. 温暖化と環北極陸域生態系の変化

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

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

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

温暖化に伴う土壌有機物の分解速度の上昇は、環北極陸域全

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

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

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

(1) 環北極永久凍土

執筆者：石川守、吉川謙二

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

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

表 3.2.1 GRENE 陸域課題の主な観測サイト

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

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

本研究によって設置されたサイトは400集落に及び(図3.2.1)、そのほとんどが、少数民族の居住地で、彼らの生活もまた永久凍土に密着している。極域の住民の永久凍土利用の一つに地下貯蔵庫がある。また、貯蔵庫のサイズ、利用の目的、年間温度の観測を行い、地域住民の凍土理解に役立てている。本事業でもカナダ、シベリアを中心に観測を行ったが、データをその解析の一部として用いた。長期的な観測成果が得られるまでには時間がかかるものの、短期的なスナップショットデータはサイエンスコミュニティだけでなく参加した地域住民に冊子として配布予定である。アラスカのデータに関してはすでに2013年に *Permafrost in Our Time* (Yoshikawa, 2013) のデータブックを配布したところで、現在ロシア版を作成中である。

カナダ、ユーコンテリトリーでの観測結果の一部を例として



図3.2.1. 本研究で実施された環北極永久凍土観測網(赤丸)。

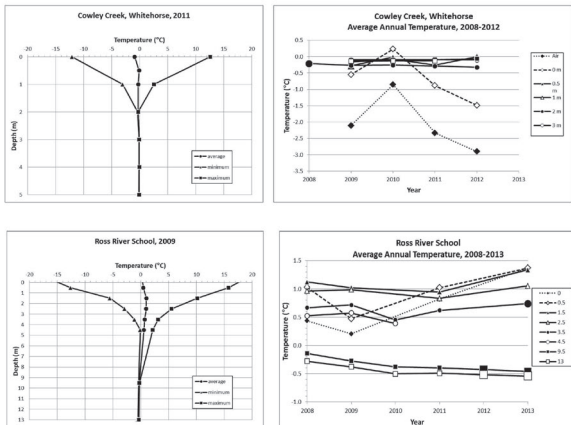


図3.2.2 ホワイトホースとロスリバーの地温プロファイル。両観測地点とも永久凍土温度は、融解点よりわずかに低くなっている。ここ数年間の顕著な温度変化は今のところ、認められない。

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

(2) 環北極森林生態系

執筆著: 松浦陽次郎、大澤晃

林分構造復元の結果と過去の気候要因との相関

現存する林分の毎木調査データと各林分10本程度の樹木個体の樹幹解析データに基づいて林分構造と林分レベルの現存量・成長速度を推定する林分構造復元法^{1),2)}を用いて、周北極域亜寒帯林の過去の林分現存量と成長量を推定した。さらに、推定された林分現存量の年変化に一般的な成長曲線を当てはめ、あてはめられた成長曲線から期待されるある年の林分現存量と、林分復元法によって推定された現存量との差を「現存量偏差(biomass anomaly)」と定義した。現存量偏差は、生物学的に説明可能な林分の中・長期的な成長傾向に比して、気候の年々変動により、実際の林分成長がどのくらい期待される値から外れたかを表すと考えてよい。いくつかのサイトにおいて、各林分での年ごとの現存量偏差が年平均気温または年最高気温と相関があるかどうか解析した。

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

同様の解析をフォートスミス地域のバンクスマツ(Jack

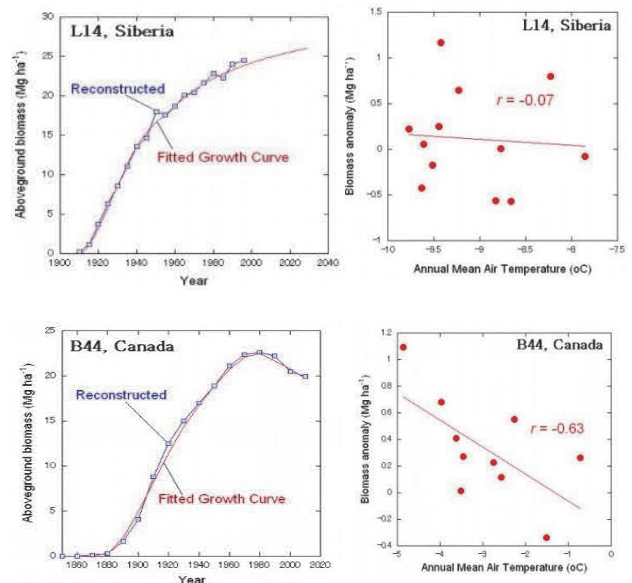
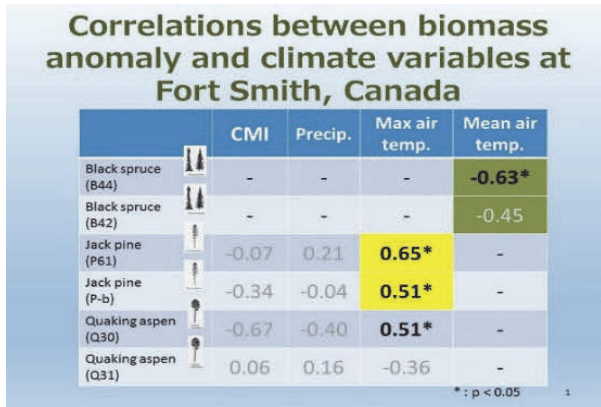


図3.2.3 グメリンカラマツ(中央シベリア)とクロトウヒ(カナダ)の林分復元結果と気候要因の相関。

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

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

表 3.2.2 フォートスミスにおける現存量偏差と気候変数の相関



北方林の土壌特性と凍土深—現存量蓄積の関係

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

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

永久凍土の活動層厚は森林の現存量蓄積に影響していた。活動層が厚いほど地上部現存量の炭素蓄積が大きく、北東ユーラシア (中央シベリアと東シベリア) のカラマツ林とアラスカ内陸部のトウヒ林で、ほぼおなじ傾きの直線関係がみられた (図 3.2.5)。

(3) リモートセンシングによるユーラシア植生成長期間の変化

執筆者: 永井信、鈴木力英

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

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

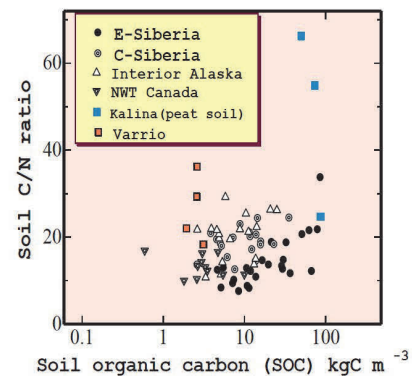


図 3.2.4 周極域森林生態系における深さ 1m までの推定 SOC 蓄積量と CN 比。

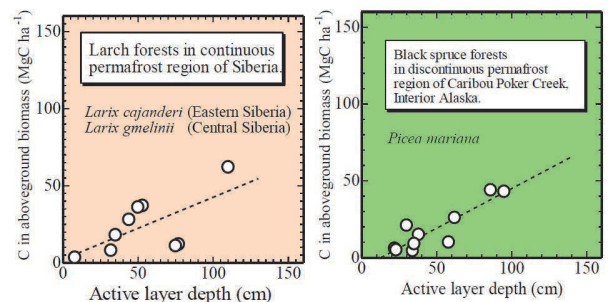


図 3.2.5 凍土深 (活動層の厚さ) と森林の地上部炭素蓄積量の関係。

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

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

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

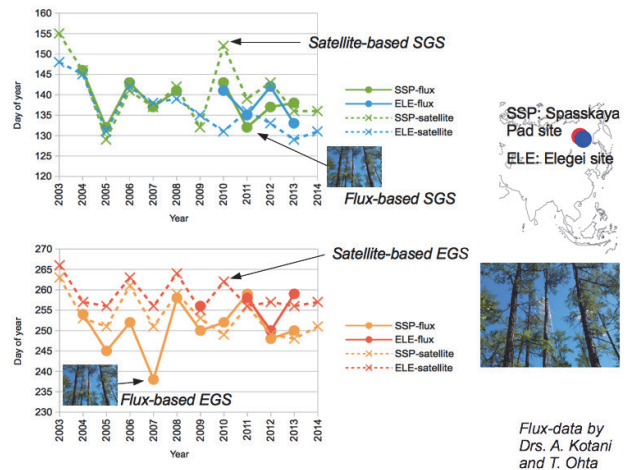


図 3.2.6 500m の空間分解能をもつ Terra と Aqua 衛星に搭載された MODIS センサーで毎日観測した GRVI の解析により検出したスパスカヤパッドとエレゲイサイトにおける機能的な成長期間の開始 (SGS) と終了 (EGS) の期日と CO₂ フラックス観測で得た 3 日積算 NEE 日平均値が 0 を下回った期日 (正味吸収期間の開始日) と上回った期日 (正味吸収期間の終了日) の対応関係。

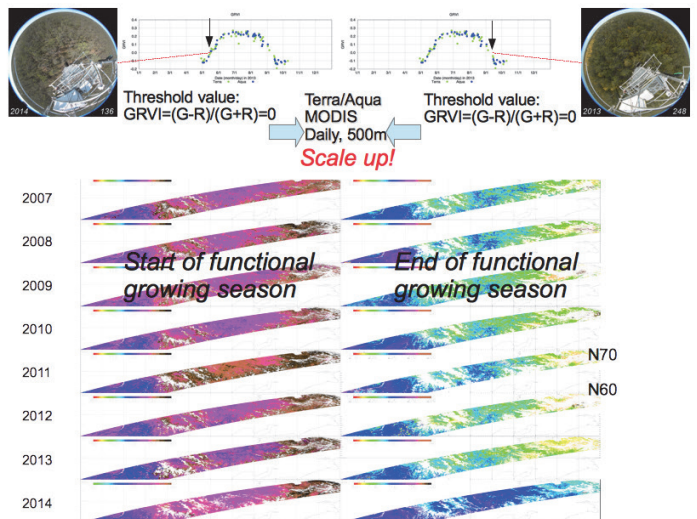


図 3.2.7 500m の空間分解能をもつ Terra と Aqua 衛星に搭載された MODIS センサーで毎日観測した GRVI の解析により検出した東シベリアにおける機能的な成長期間の開始と終了の期日の時空間分布。

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

(4) 年輪と生態系モデルを用いた環北極生態系の変化傾向と将来予測

執筆者：鄭峻介、杉本敦子

周北極陸域生態系の樹木が過去の気候変動に対してどのような応答をしてきたのかを明らかにすることは、過去の現象に関する知見を与えるのみならず、陸面モデル及び物質循環モデ

ルの検証や高度化などを通して、将来予測の精度向上に大きく貢献することができる研究課題である。GRENE-TEAでは、集中的に観測を行っている6森林サイト(カリーナ(KAL)、ヤクーツク(YAK)、ウスチマヤ(UST)、チョクルダ(CHO)、イヌビク(INU)、フォートスミス(FSM)(表3.2.1)において、樹木年輪試料を採取し、過去100年間の樹木年輪幅指数と炭素同位体比($\delta^{13}\text{C}$)の時系列データを作成し、過去の気象データ(CRU TS3.10 data set)と併せて、その解析を行った。

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

大陸性の乾燥気候帯に位置する、東シベリア中央部の二つの森林サイト(ヤクーツク、ウスチマヤ)では、より顕著に樹木成長量が水分環境によって律速されていた。同森林サイトでは、過去60年間に、樹木の成長量は夏季の降水量と正の相関を示すのみならず、夏季の気温と有意な負の相関を示し、近年の急激な気温上昇により樹木成長量が大きく減少していた可能性が示唆された(Tei et al., 2014)。年輪 $\delta^{13}\text{C}$ の変動は、その樹木個体の光合成速度や気孔開閉度など、樹木生理学的な因子の変動を反映する⁵⁾。同森林サイトの年輪 $\delta^{13}\text{C}$ の解析結果から、近年の樹木年輪幅の減少は、気孔開閉度の減少によって生じていること、すなわち、気温上昇により蒸発散量が増加し、乾燥ストレスにさらされたことが強く示唆された。

樹木の過去の気候変動に対する応答を、より広域で調べるために、樹木年輪の様々なパラメータのデータベースである

International Tree-Ring Data Bank (ITRDB, <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html>) から、北緯50°以北で、標高2000m以下、及び時期列が1990年以降まで測定されているサイトの年輪幅データ取得し、年輪幅指数を求めた後、気象データ(CRU TS3.10 data set)との相関分析を行った。その結果、東シベリア中央部に位置するヤクーツクやウスチマヤで観測されたような気温との有意な負の相関関係が、アラスカとカナダの内陸部の多くの森林サイトでも観測された(図3.2.8)。このような森林サイトの多くでは、1960年代に比べて、近年の年輪幅指数が小さくなっていった。

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

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



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

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

域の一部地域における樹木成長量に与える気温上昇の負の効果について、その詳細なメカニズムを明らかにしていくことが重要である。

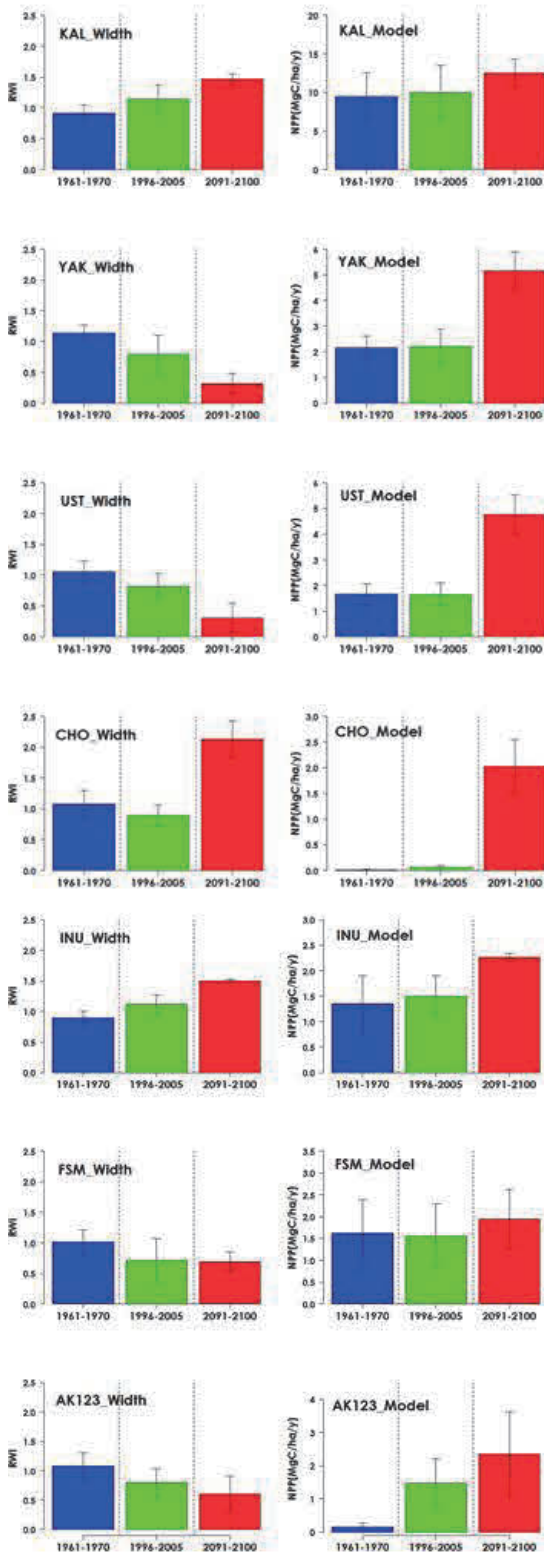


図 3.2.9 年輪-気象重回帰モデルから推定した年輪幅指数 (左) と植生動的モデル SEIB-DGVM から推定した樹木純一次生産量 (右) の過去 (1961-1970; 青色, 1996-2005; 緑色) と将来(2091-2100; 赤色)。

2. 長期観測サイトにおける生態系の変動

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

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

(1) スパールバル極砂漠

執筆者：内田雅己

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

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

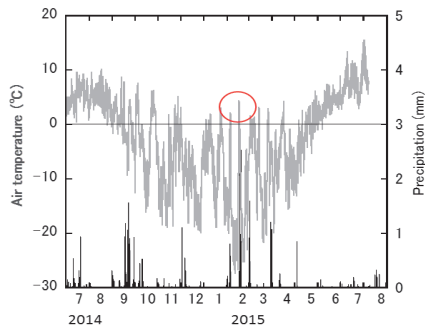


図 3.2.10 調査地に設置した気象計により記録された rain on snow イベント (赤丸内)。気温：折れ線グラフ。降水量：棒グラフ。

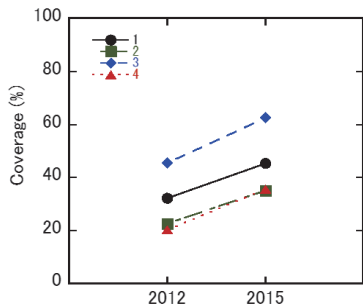


図 3.2.11 3年間の植生被度の変化。

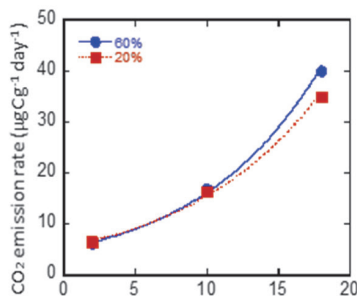


図 3.2.12 異なる土壌水分状態における温度と土壌呼吸速度との関係。

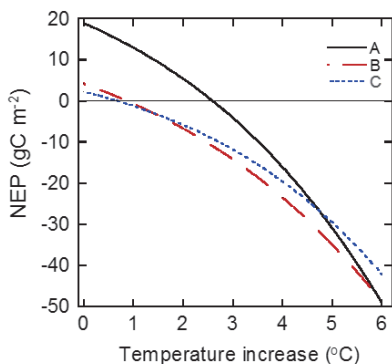


図 3.2.13 地点 (A,B,C) の生態系純生産量に対する温度上昇の影響。

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

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

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

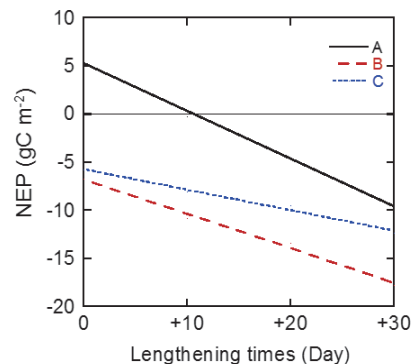


図 3.2.14 地点 (A,B,C) の生態系純生産量に対する無雪期間延長の影響。

(2) 東シベリア北極圏生態系

執筆者：杉本敦子、飯島慈裕、鈴木力英、他

チョクダにおける活動と成果

東シベリア北極圏には、ヤナ-インディギルカ-コリマ河川低地が広がっている。亜北極のタイガ林と東シベリア海沿岸部の間は、ツンドラ植生の中にタイガ林を構成するカラマツの疎林

がパッチ状に広がるタイガーツンドラ境界生態系となっており、ここは環境の変化によりタイガにもツンドラにも変化しうる場所である。このような植生帯に位置するチョクダ周辺にカラマツ疎林の密度が異なる3カ所に観測点を設け、このうち典型的な境界植生帯となっているコダックサイトに気象・渦相関フラックス観測システムを設置した。また、土壌呼吸測定用の自動開閉チャンバーをCO₂とメタンの両方を並列で測定できるように改良し、夏期間の観測が可能なシステムを立ち上げた。

植生は微地形に対応して決まり、カラマツは地表面がわずかに高い場所に分布し、ほとんどのカラマツが生育する場所は土壌水分が40%を超えない場所である。また、カラマツの樹高と胸高直径は設定した観測サイトにより異なり、カラマツの葉1枚の重さと窒素含量も樹木サイズの違いと同様な傾向を示した(図3.2.15)。加えてこれらのパラメータは微地形に依存しており、カラマツが根を張ることのできる比較的乾燥した微地形の広がり大きいほど成長が良いと解釈できる(Liang et al., 2014)。

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

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

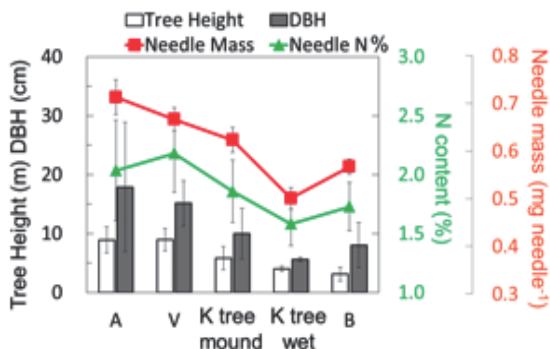


図3.2.15 カラマツの幹の直径と高さ、葉1枚の質量、および葉の窒素含量の関係(Liang et al., 2014。)

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

ティクシにおける活動と成果

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

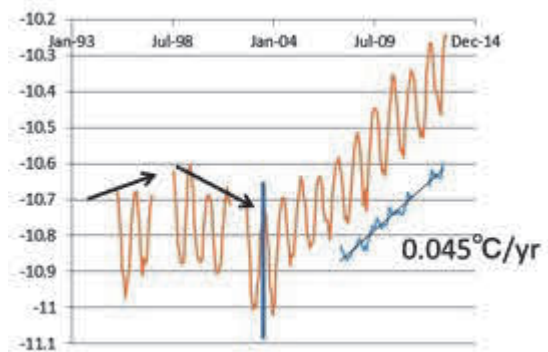


図3.2.16 ティクシ地温ボアホールサイトにおける10m深地温(月平均値)の変化。赤: 1995年設置の旧ボアホール、青: 2006年設置の新ボアホール。

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

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

(3) 東シベリアタイガ林生態系

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

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

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

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

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

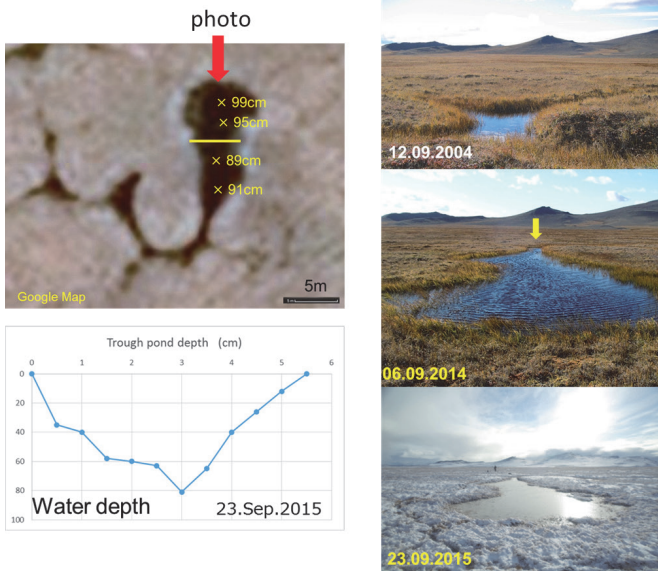


図 3.2.17 ティクシの湿性ツンドラ地域で発達したサーモカルスト池の様子 (写真) と池の水深 (グラフ)。

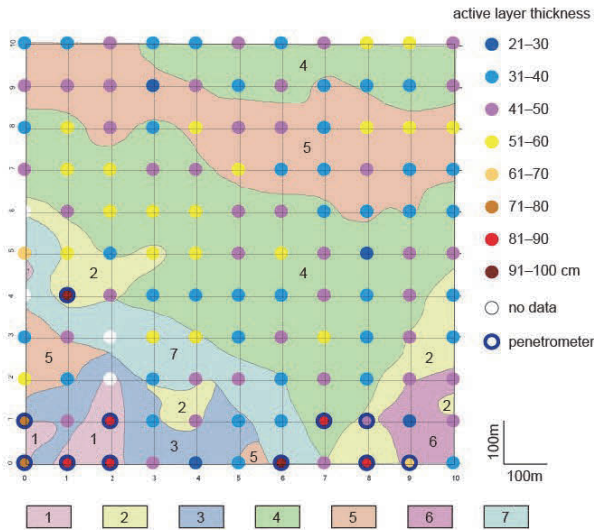


図 3.2.18 ティクシの CALM グリッド (1x1km) における活動層厚分布。

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

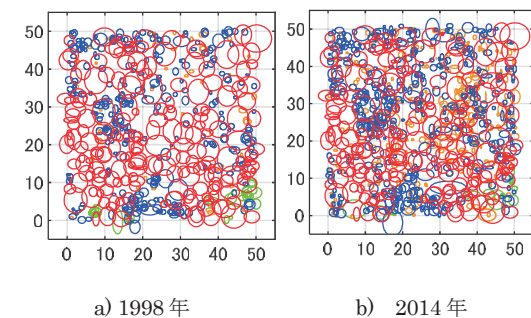


図 3.2.19 スパスカヤパッドにおける主な4樹種の樹冠投影図。赤：カラマツ、青：カンバ、オレンジ：ヤナギ、緑：ハンノキ。a) 1998年と b) 2014年を示す。

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

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

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

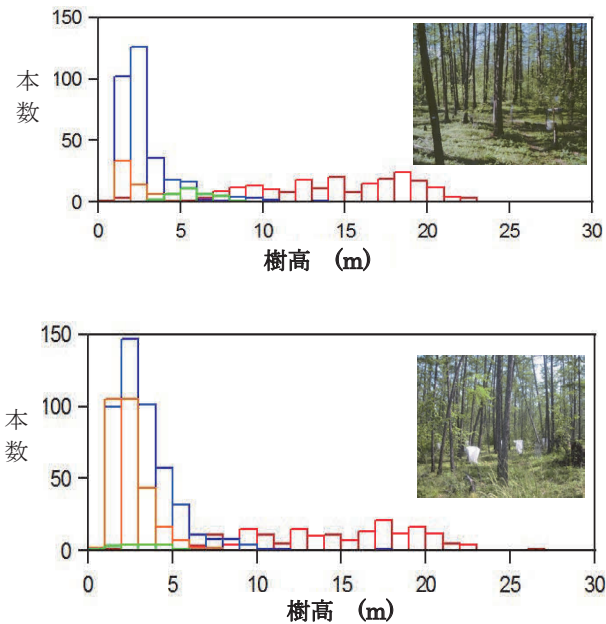


図3.2.20 スパスカヤパッドにおける主な4樹種の樹高分布図
赤：カラマツ、青：カンバ、オレンジ：ヤナギ、緑：ハンノキ。
a) 1998年、b) 2014年を示す。写真はスパスカヤパッド(名古屋大学・太田岳史、小谷亜由美)。

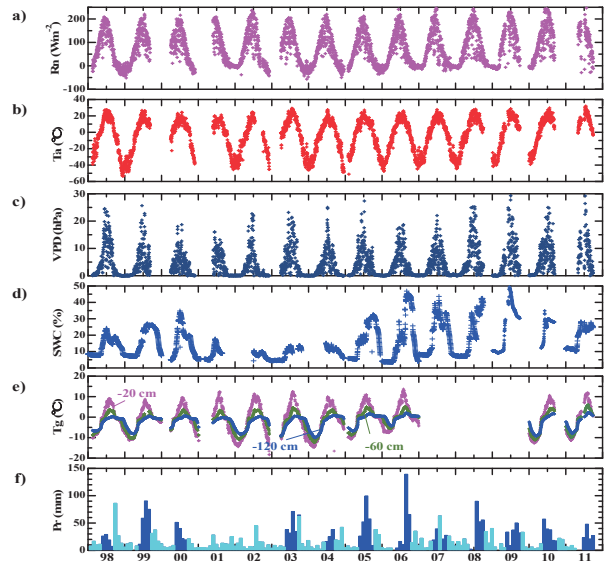


図3.2.21 スパスカヤパッドのタワーで観測した気象データ(Ohta et al., 2014)。a) Net all-wave radiation. b) Air temperature. c) Vapor pressure deficit. d) Soil water content. e) Ground temperature. f) Precipitation.

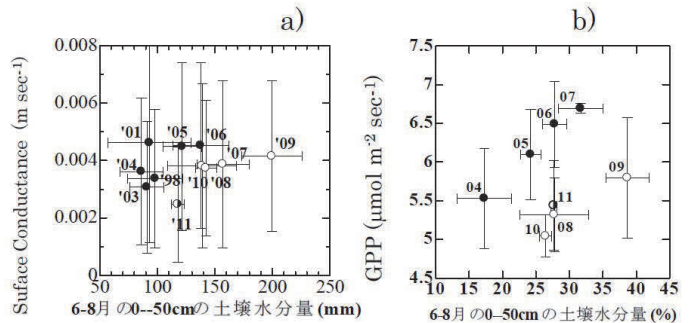


図3.2.22 土壌水分量と群落コンダクタンス(a)と総一次生産量(b)の関係(Ohta et al., 2014)。

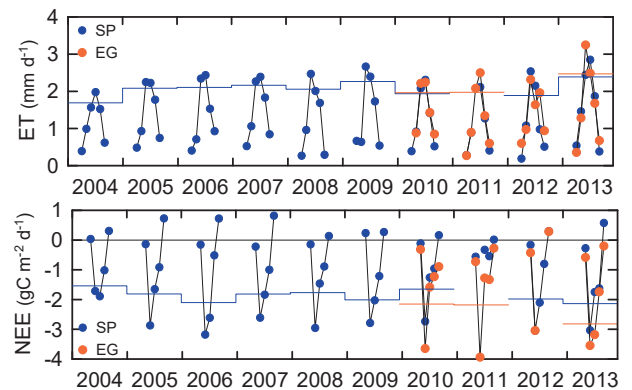


図3.2.23 5月から9月のスパスカヤパッド(青)とエレゲイ(赤)における蒸発散(上)と純生態系生産(下)。水平方向の直線は夏期(6-8月)の平均値(Kotani et al., 2014を改変)。

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

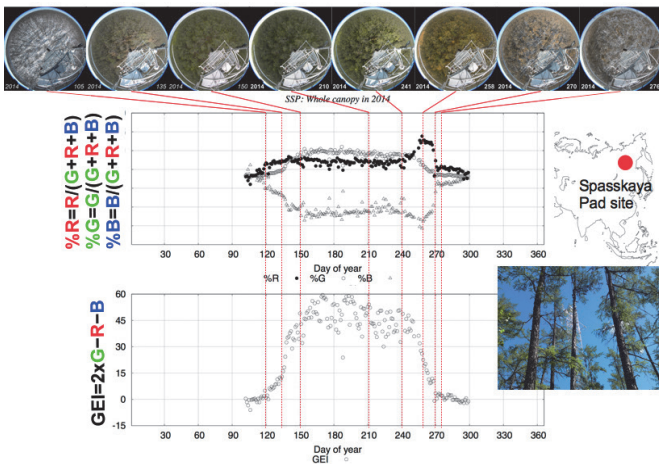


図3.2.24 スパスカヤパッドサイト(カラマツ林)において2014年に撮影したフェノロジー画像の解析により得た%RGBとGEIの季節変化。

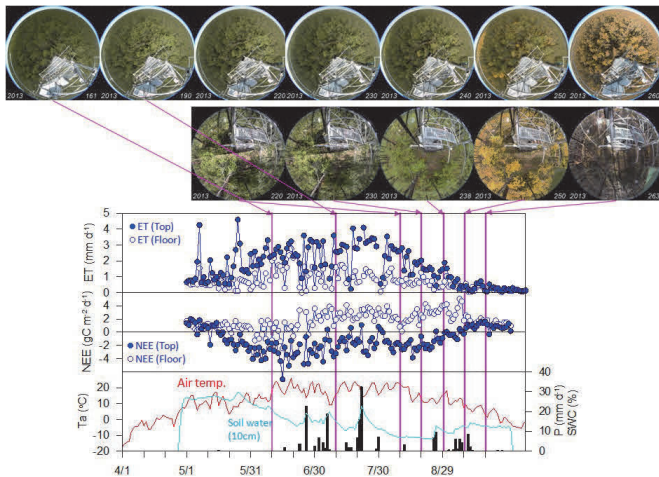


図3.2.25 スパスカヤパッドサイト(カラマツ林)の2013年におけるフェノロジー画像と群落蒸発散量(ET)、生態系正味交換量(NEE)、気温(Ta)、10cm深土壤水分量(SWC)、日降水量(P)の季節変化。

カラマツ林成長期間の評価

毎日撮影したフェノロジー画像からカラマツ林の赤・緑・青のデジタルナンバー(R・G・B)の平均値を抽出し、それぞれのデジタルナンバーの割合($\%R=R/(R+G+B)$ 、 $\%G=G/(R+G+B)$ 、 $\%B=B/(R+G+B)$)とGreen Excess Index (GEI=(G-R)+(G-B))を計算した。 $\%G$ とGEIは融雪期と開葉期に増加し、黄葉と落葉期に減少した。 $\%B$ は融雪期と開葉期に減少した。 $\%R$ と $\%B$ は黄葉期に増加と減少を、黄葉のピーク後に減少と増加をそれぞれ示した(図3.2.24)。これらの結果は、他の生態系を対象とした過去の研究事と同様に⁸⁾、デジタルカメラにより毎日撮影されたフェノロジー画像の解析により、機能的な成長期間の年々変動を定量的に検出できることを示唆した。

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

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

湿潤イベントによる森林の劣化

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

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

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

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

気温上昇が東シベリアタイガ林樹木の成長に及ぼす影響と栄養塩循環

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

ヤクーツクのスパスカヤパッドのカラマツ林において、植物が利用可能な土壤窒素プールの観測を行ったところ、無機態窒

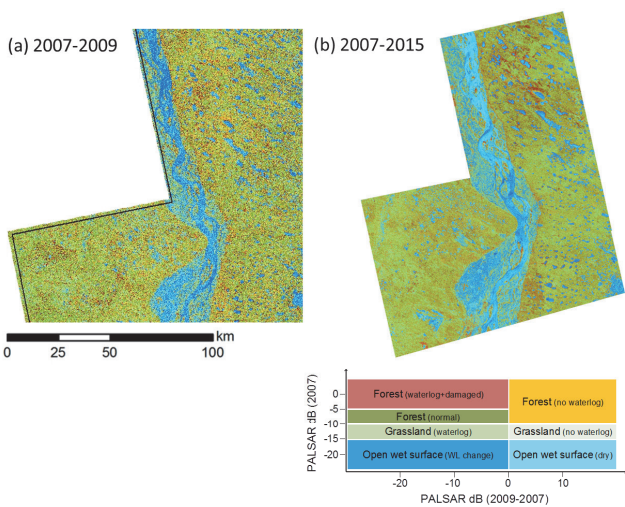


図 3.2.26 レナ川中流域（ヤクーツク周辺）における水域と植生の変化地図。

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

素プールは顕著な季節変化を示し、夏期の前半までは極めて小さく、晩夏に急激に増大した。そして、植物の成長期間が終了後に最大となり、翌年の春には極めて小さな値に戻ることがわかった。このことは、タイガ林土壤中では、植物と土壤微生物の間で窒素をめぐる激しい競争があり、植物は成長期間が終了するころの晩夏によく窒素の獲得ができるようになると考えられる (Popova et al., 2013)。

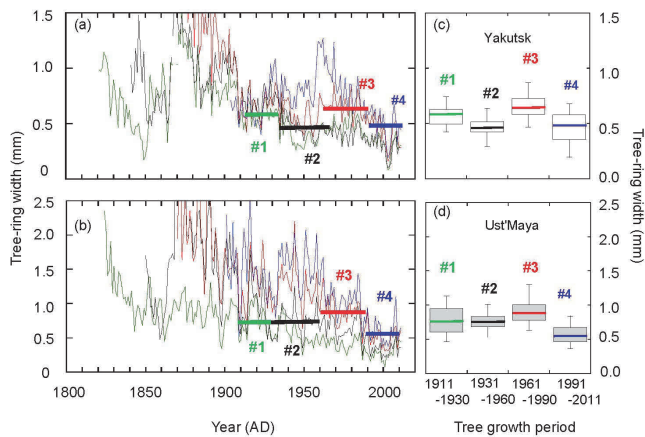


図 3.2.27 ヤクーツク(a, c)とウスチマヤ (b, d) における過去 100 年間の年輪幅の変動

(4) アラスカ湖沼・湿地の温室効果ガス

執筆者：佐々木正史、内田昌男

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

まずアラスカ（北極圏ツンドラ～タイガ）の湖沼表層水中溶存メタン濃度（以下 DM ）を観測し、永久凍土融解の影響を調査した結果を図 3.2.28 に示す。一般に DM は湖沼面積 A が小さいほど高いが、アラスカ北極圏（ツンドラ地帯）の DM - A トレンドは、スウェーデンなどの北欧の湖沼におけるトレンドに一致し、凍土融解による DM の強調効果は認められなかった。 DM と気象条件から推計した湖沼から大気へのメタンフラックスについてもノルウェーやスウェーデンの北欧と同レベルであった。一方、タイガ地帯の湖沼 DM はツンドラに対し、有意に高いレベルであったが、永久凍土融解との関連については明確ではない⁹⁾。

次に連続永久凍土のツンドラ土壤上に円形の湖沼が一つ存在する軸対称 2 次元モデルを作成し、有限要素法 (FEM) による非定常熱伝導解析を実施（ツンドラの代表気象条件としてサグウォンヒルのデータを使用）したところ、全節点 = 0°C の初

期条件では季節変動は計算開始から数年程度で安定化して、湖沼底下にタリクの形成が認められた。湖沼底における年間の熱収支は入熱（鉛直方向）が余剰し、これがタリクの形成（不凍化）・成長を支える。タリク底ではその大きな熱容量のために季節変動は殆ど認められず、通年で入熱の熱流束であった。これによって永久凍土が常時融解（タリクが成長）するが、その速度は高々数 mm/yr と極めて緩慢であった。これが永久凍土の融解に伴う湖水 DM の強調（増加）効果が認められなかった理由の一つではないかと考えられる。

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

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

一方、サーモカルスト湖では永久凍土の融解に伴う活発なメタン放出（バブリング）が報告されている例¹¹⁾も少なくない。今後サーモカルスト湖の熱的不安定（短時間で大量に凍土が融解）が生ずるメカニズムに注目する必要がある。

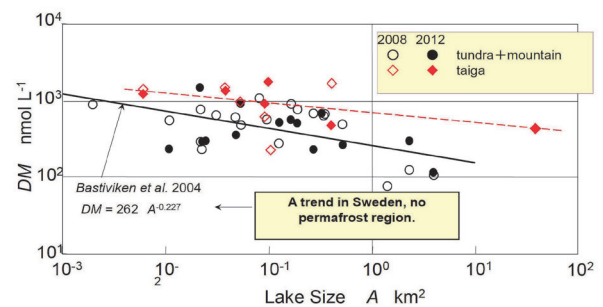


図 3.2.28 溶存メタン濃度 DM と湖沼サイズ A の相関。

3. GRENE-TEA 観測とモデルの連携研究

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

GRENE-TEA陸域モデル相互比較 (GTMIIP) は、①北極陸域の観測とモデル研究の連携体制を構築し、またモデル研究者間の情報交換・協力を実質化・深化させること、また、②物理過程から生物地球化学過程、生態系過程に及ぶ現行の各種陸域モデルにおけるばらつきと不確実性の定量化とそれらが起因するモデル実装過程の違いを評価すること、更に、③それらの結果を次世代寒冷圏陸域モデル構築のために活用することを目的として計画した。

2段階のステージを構成して実施した。Stage 1 は、四つの GRENE-TEA観測サイトにおける直近30年ほどのサイトシミュレーションであり、Stage 2は近代化以降（1850～2100年）の北緯50度以北の環北極域を対象とした広域シミュレーションである。

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

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

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

(1) 観測－モデル連携

執筆者：齊藤和之、GRENE-TEAモデリンググループ

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

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

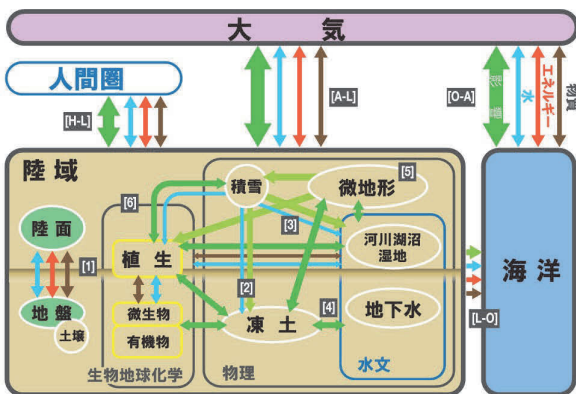


図 3.2.29 北極陸域の（大気－積雪－水文－植生－地形）システム の概念図（Saito et al., 2013bを基に改変）。

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

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

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

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

観測－モデル連携にも幾つか解決すべき障壁があった。詳しくは齊藤他（2014a）の3項を参照されたい。具体的・技術的解決は後に述べるが、まず問題認識のレベルの差異がある。一つにはモデル研究と観測が扱う（代表する）空間規模とその変

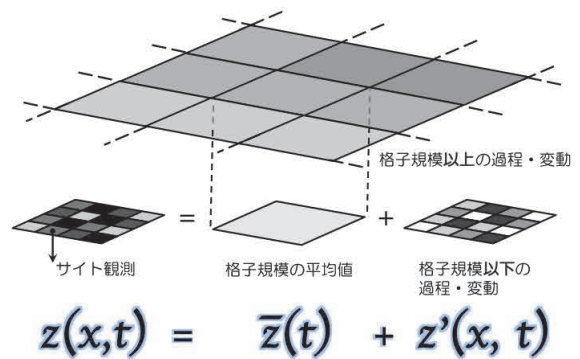


図 3.2.30 サイト観測と、より広域なモデル・観測における認識スキームの差異の概念図（齊藤他,2014aを基に改変）。

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

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

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

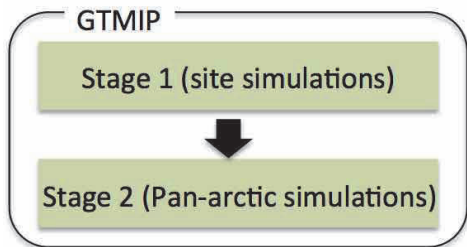


図 3.2.31 GTMIPの構成。

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

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

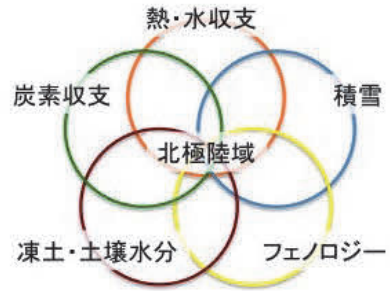


図 3.2.32 GTMIPの評価指標カテゴリー。

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

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

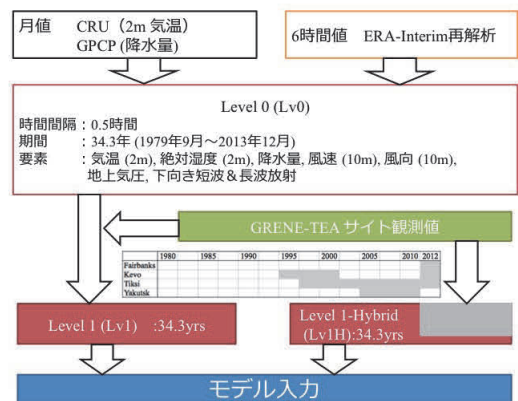


図 3.2.33 Stage 1 データ作成の概念図。

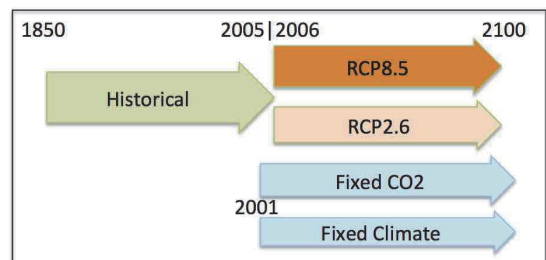


図3.2.34 Stage 2 積分の構成図。

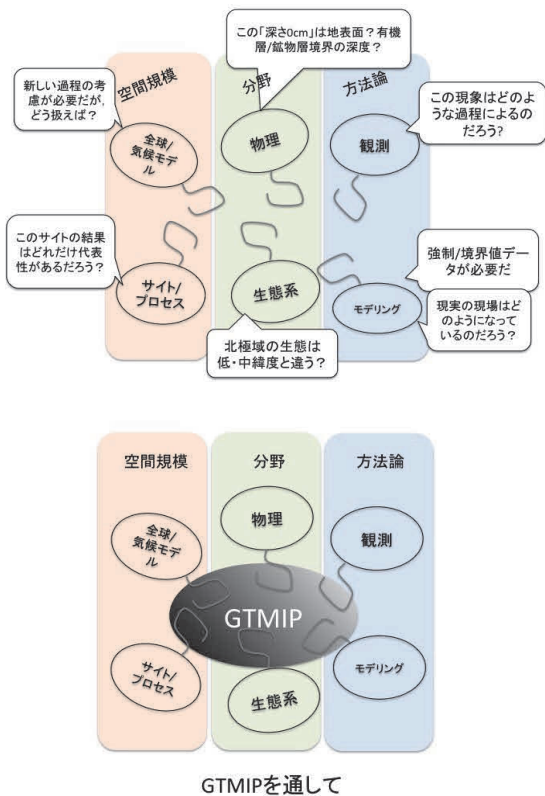


図3.2.35 GTMIP以前の観測-モデル、モデル-モデル連携の必要性(上)とGTMIPによる相互連携のコミュニティの成立(Miyazaki et al. 2015 を基に改変)。

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

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

表 3.2.3 GTMIPの意義と成果

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

(2) GTMIP

執筆者：森淳子、齊藤和之、山崎剛、朴昊澤、末吉哲雄、宮崎真

GTMIP (Miyazaki et al., 2015) では、GRENE 観測サイトを対象とした Stage1 と、環北極域から全球を対象とした Stage2 の二つの MIP を行った。参加モデルと特性分布図を図3.2.36 に示す。

Stage 1

Stage1 では、GRENE-TEA 観測サイトデータを用いて入力用データセット (Lv1) を作成した。対象としたサイト(およびデータ使用期間) はフェアバンクス (2011～2013)、ケヴオ (1995～2012)、ティクシ (1997～2012)、ヤクーツク (2005～2011) である。なお、Lv1 は、格子化された再解析データと機構データから作成した汎用モデル入力用データセット (Lv0) を基にしているが、チョクルダ、トゥラについてはLv0のデータを用いた。Stage 1 のデータセットは、国内外の 21 参加モデルの出力値等とともに ADS にて公開した (Sueyoshi et al., 2016)。

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

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

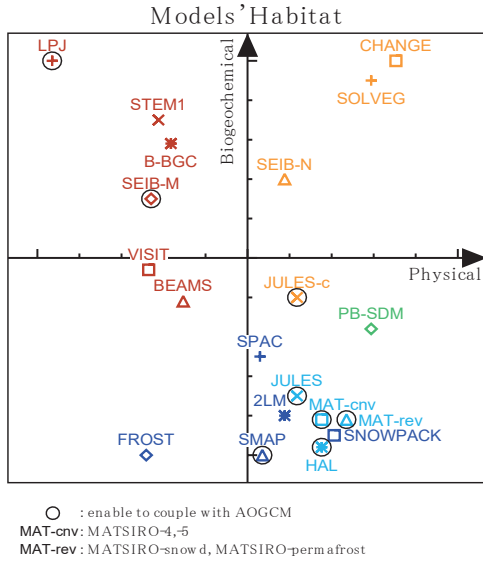


図3.2.36 GTMIP参加モデルとその特性分布。

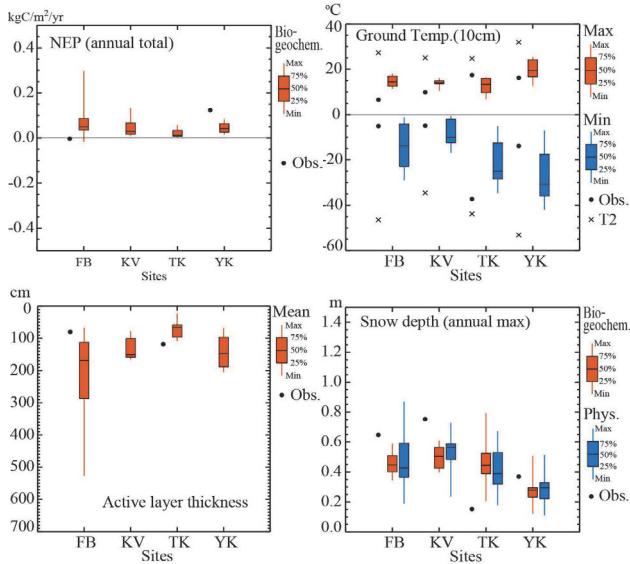


図 3.2.37 左上：NEP のモデル中央値とばらつき。右上：10cm 深年最高地温と年最低地温のモデル間ばらつき。左下：活動層のモデル中央値とばらつき。右下：積雪深のモデル中央値とばらつき。

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

土壤凍結に関わる因子を次に検討する。10cm 地温の年最高温度と最低温度のばらつきを見ると、夏季よりも冬季の地温にばらつきが大きく、観測値との差も大きい(図 3.2.37 右上)。このことから、冬季の地表面温度を決定する要素にまず原因があると考えられる。冬季の積雪をみてみると、積雪の密度変化

が考慮されていないモデルでは積雪深、さらに断熱効果が過少評価されていた(図 3.2.37 右下)。また、冬季に風が強く積雪の再堆積が発生するティクシではどのモデルでも積雪深の再現性が悪かった。

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

Stage2

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

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

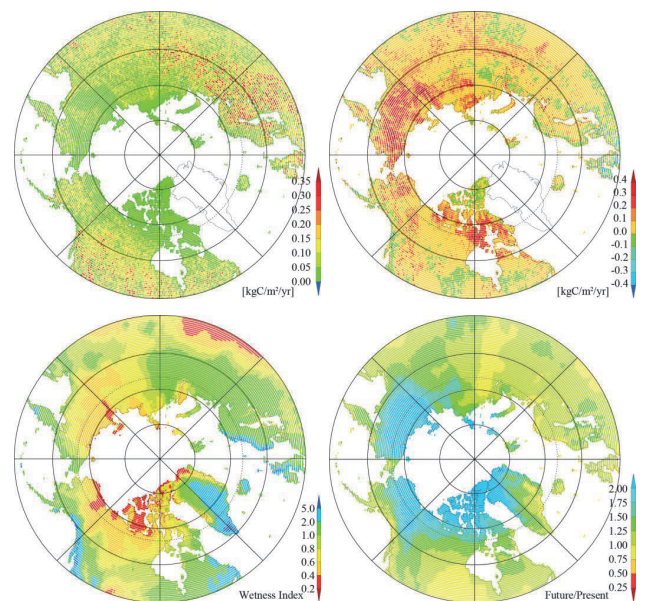


図 3.2.38 左上：NEP のモデル間のばらつき 右上：NEP の現在(1981-2010年)と将来(2071-2100年)の差。正が増加。左下：現在の湿潤度。右下：将来の湿潤度/現在の湿潤度。

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

この結果より、炭素収支関係については、ティクシはシベリアの北極海沿岸を、ヤクーツクは東シベリアを十分に代表しているといえる。

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

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

(3) GTMIP 以外のモデル研究成果（データ同化）

執筆者：伊勢武史

データ同化はさまざまなシミュレーションモデルを最適化する手法として用いられているが、陸上生態系モデルは、その複雑さゆえに、データ同化の応用が進んでいなかった。そこで本研究では、粒子フィルタというデータ同化手法を用いることで、非連続な挙動を示す陸上生態系をモデル化し、データ同化による最適化が可能であることを示した。ケーススタディとしてアラスカ州フェアバンクス付近の落葉広葉樹林の展葉・落葉フェノロジーを取り扱った。人工衛星で観測された葉面積指数（MOD15A2・解像度1km、8日周期の観測）の季節変化を観測データとして用いて、粒子フィルタによるデータ同化を行った結果、モデルの複数のパラメータは総合的に最適化され、シ

ミュレーション結果は観測地と高い整合性を持つにいたった。2年分のデータ同化の結果、展葉・落葉のタイミングと成長期の葉面積指数の変化を的確に推定することに成功した（図3.2.39）。

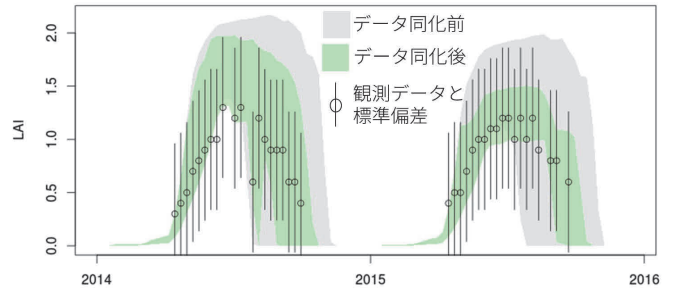


図3.2.39 陸上生態系モデルSSSEMを用いたデータ同化の結果（状態推定）。12のパラメータを同時にランダム化して1000回のシミュレーションを行った。

引用文献

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

Ⅲ.北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響：
大気プロセスの包括的研究

研究課題3 研究代表者：浮田甚郎

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

1. 北極域におけるブラックカーボン観測

執筆者：小池 真 近藤 豊 P.R.Sinha 茂木信宏 大畑 翔
松井仁志 大島 長 塩原匡貴 東久美子

はじめに

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

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

BC 測定手法の開発

大気中 BC の測定法の開発

東京大学では、BC の全質量濃度の連続自動測定が可能な COSMOS 測定器を開発してきた。この装置は BC 以外の揮発性エアロゾルをフィルター捕集前に加熱により除去して BC を選別したうえで、光吸収法により測定する測定器である。本研

究では、北極での低濃度 BC が信頼性高く測定できるように、BC 濃度の導出法に新たな改良を加えた。また中緯度において、COSMOS をより高精度 BC 分析が可能な単一粒子レーザー誘起白熱法 (SP2) と繰り返し比較することにより、その質量濃度の信頼性を確立した (Irwin et al., 2013, Irwin et al., 2015)。BC 濃度が低い北極域ではまた、自然起源の不揮発性エアロゾル (海塩粒子など) の影響を詳細に評価する必要がある。このため、海塩粒子とほぼ同じ屈折率をもつ PSL 粒子を用いて、COSMOS 測定への不揮発性の干渉効果を精密に室内実験で評価した。その結果、北極での BC 質量濃度の測定誤差は約 15% であると推定された。

降雪・降雨中 BC の測定法の開発

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

<実験>

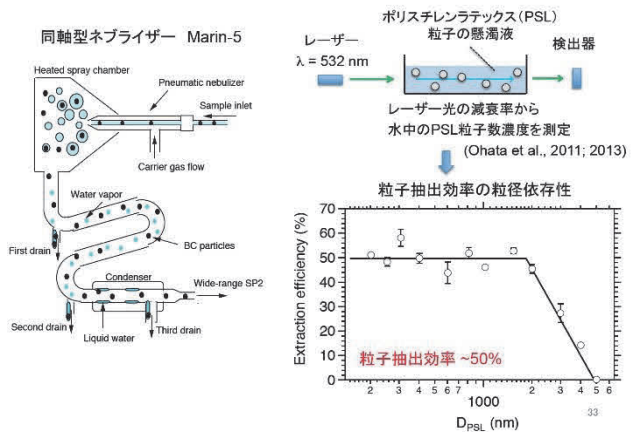


図 3.3.1 ネブライザーの粒子化効率の決定。

降水中の BC の粒径別濃度を観測するためには、ネブライザーで降水試料から BC をエアロゾルとして空气中に抽出したのち、SP2 で BC の粒径別濃度を測定する。この測定で必要となるネブライザーの粒子化効率を定量化するために、水中に分散させた標準粒子であるポリスチレンラテックス (PSL) 粒子の水中での濃度を定量化する方法を考案した。そしてこの濃度が既知の PSL 粒子分散水の測定を SP2 で行い、PSL 粒径毎にネブライザーの粒子化効率を評価した (図 3.3.1)。本研究で

用いるネブライザーMarin-5については、直径2 μm以下の粒子は粒子化効率が50%であり、直径2 μm以上の粒子では粒径の増大とともに粒子化効率が下がることが分かった。大気中・降水中には粒径が2 μmを超える大きなBC粒子はほとんどないため、降水中のBC粒径分布の観測は50%の一定粒子化効率で行えることが示された。

<理論>

ネブライザーで噴霧される一つの霧粒に複数のBC粒子が含まれる場合、その霧粒が乾燥するときの一つの大きなBC含有粒子となるため、空気中で観測されるBCの粒径分布は、水中における真の粒径分布よりも大きくなる傾向がある。この効果を正しく考慮した測定を行うために、霧粒の粒径別数濃度を実験的に決定しておき、その霧粒の粒径分布と観測される空気中のBCの粒径分布から、水中のBCの粒径分布を推定するためのインバージョンアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムの計算によれば、東京のような都市域においても雨水中のBC数密度(数十 μg L⁻¹以下)では、噴霧器で生成される大きさの霧粒に複数のBC粒子が含まれる確率は小さく、空気中で観測されるBCの粒径分布と水中におけるBCの真の粒径分布との差は無視できる事が分かった。この理論的研究により、ネブライザーを用いた方法により水中のBCの粒径分布を精密に測定できる事が示された。

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

北極における大気中BCの観測

アラスカのバローとスピッツベルゲン島のニーオルスンにおいて、前述したCOSMOS測定器でBCの連続測定を2012年から3年間にわたり実施してきた(図3.3.2)。アラスカのバロー観測所では20年以上前からBCの観測が実施され、近年ではアメリカ海洋大気庁(NOAA)のCLAP/PSAP測定器の観測により光吸収係数(b_{abs})が報告されている。そこで本研究では、同時観測が実施された3年間について、COSMOSとNOAAのCLAP/PSAP測定器によって得られた光吸収係数を詳細に比較した(図3.3.3)。この結果、二つの観測は良く相関しており、平均するとCLAP/PSAPによる光吸収係数は、COSMOSの値を21%過大評価していることが分かった。これまでの研究から、単位質量あたりのBCによるCOSMOSで測定される光吸収係数の値(質量吸収係数)が約10%の精度で求められているため、バローで測定されたCOSMOSの光吸収係数から、BCの質量濃度(M_{BC})を推定することができる。ま

たさらにこのCOSMOSの質量吸収係数をもちいることにより、二つの測定手法による光吸収係数の関係から、NOAAのCLAP/PSAP測定器によって得られた光吸収係数に対するCOSMOSの値に規格化されたBC質量濃度を推定することが可能となる。従来、NOAAではこのBCの質量吸収係数の推定ができなかったため、光吸収係数のみを報告し、BC質量濃度を報告してこなかった。このため各研究者がそれぞれBCの質量吸収係数を仮定してBC質量濃度に変換した上で、研究などに使用されてきた。本研究によりNOAAのバローにおけるBCの光吸収測定に対して初めて値付けが可能となった。これは、BCの各種アセスメントや、数値モデル計算の検証の上において、重要な貢献である。

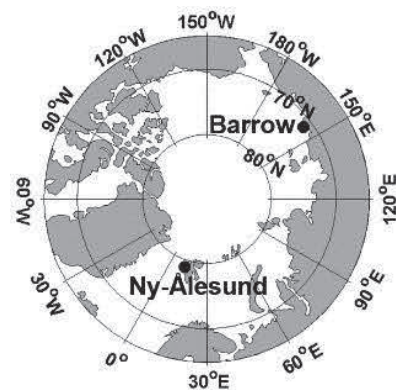


図3.3.2 バローとニーオルスンの位置。

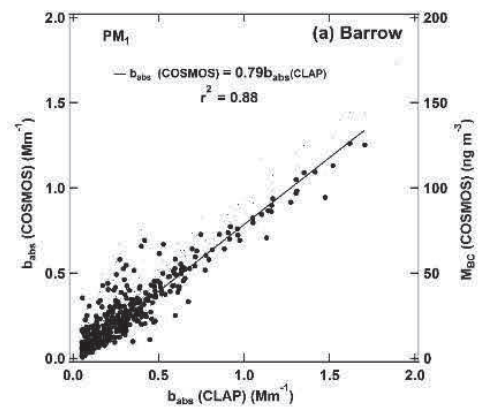


図3.3.3 バローにおけるCOSMOSとCALAP/PSAPの光吸収係数の日平均値の比較。

同様に、もう一つの北極域での長期BC観測であるストックホルム大学が測定を行ってきたニーオルスンにおけるPSAPによる観測とCOSMOSの観測との比較を実施した。ニーオルスンでは直径10 μm以下というCOSMOSと比較して大粒径のエアロゾルまでを測定しているが、PSAPはCOSMOS

の光吸収係数よりも 33%過大評価していることがわかった。COSMOS の BC 質量吸収係数をもちいることにより、ニーオルスンにおいても過去を含めて PSAP 測定から BC 質量濃度を求めることができた。

図 3.3.4 に日平均したバローでの二つの測定器によって得られた BC 質量濃度を比較した。上述の値付け (COSMOS への規格化) によりそれぞれの BC 質量濃度の日々の変動が良く一致している様子がわかる。図 3.3.5 にはさらに遡って過去 10 年間の NOAA およびストックホルム大学の CLAP/PSAP による光吸収係数観測を COSMOS により規格化することにより BC 質量濃度に換算した結果を示す。バイオマス燃焼による BC 発生量や BC の輸送・湿性沈着量などの年々変動により BC 濃度が変動している様子が明らかに見える。このように、長期間の BC の変動を定量的に初めて明らかにすることが可能となった。このデータは、今後の BC の気候影響を評価する数値モデルの検証にも重要な役割を果たすと考えられる。

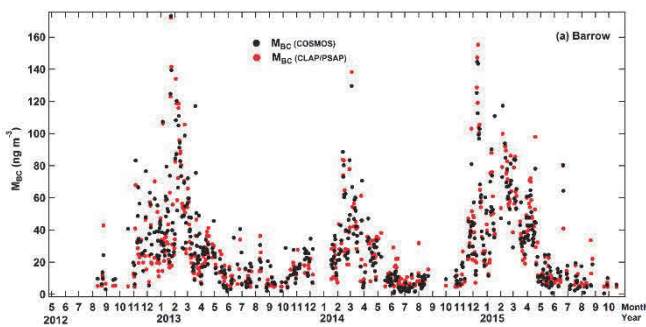


図 3.3.4 バローにおける COSMOS と CALAP/PSAP による BC 質量濃度の日平均値

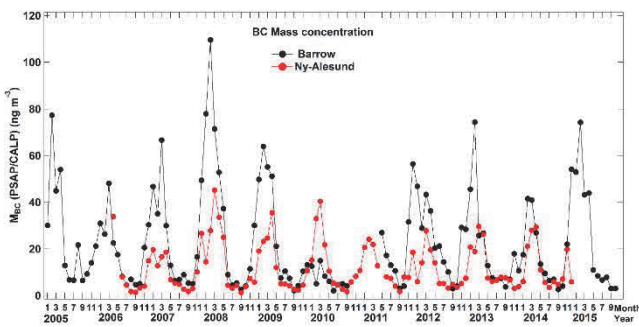


図 3.3.5 バロー (黒) とニーオルスン (赤) における CALAP/PSAP による BC 質量濃度の月平均値

北極における降水・降雪・積雪中の BC 濃度と粒径分布の観測

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

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

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

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

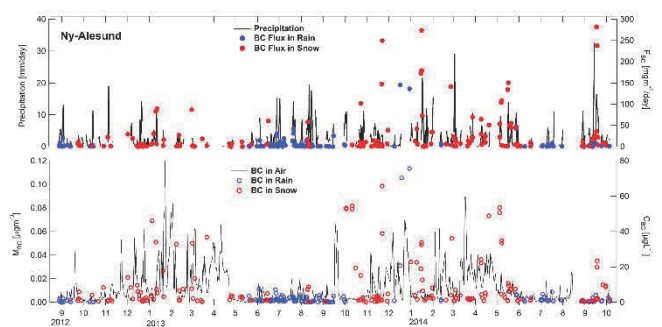


図 3.3.6 ニーオルスンにおける降水観測 上段: 毎日の降水量 (黒実線)、降雪 (赤)・降雨 (青) BC フラックス 下段: 大気中 BC 質量濃度 (黒実線)、降雪 (赤)・降雨 (青) 中の BC 質量濃度。

北極へのBC輸送に関わるエアロゾルモデル開発

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

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

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

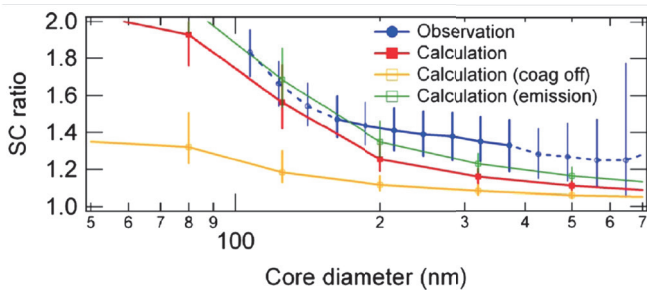


図3.3.7 BCの混合状態を考慮した数値モデル計算結果 (赤) と航空機からのSP2観測 (青) との比較。横軸はBCの体積等価直径。縦軸はBCの体積等価直径に対するエアロゾル全体の乾燥体積等価直径の比率。数値モデルの値は、航空機観測のフライトトラックに沿った場所・高度での値を使用した。感度計算結果も示してある (黄および緑)。

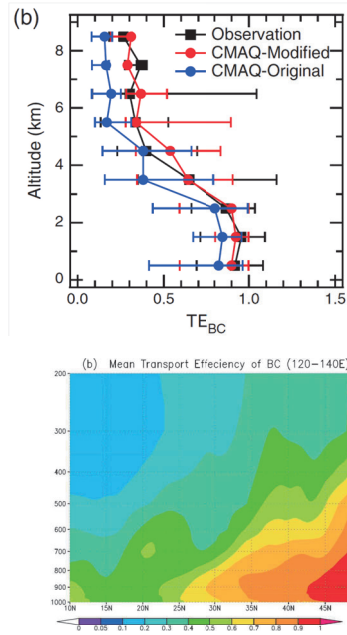


図3.3.8: (上図) オリジナルのモデルと改良されたモデルによるBC輸送効率の比較。観測はアジアでの航空機観測から推定したもの。(下図) 改良されたモデルによるBC輸送効率の緯度-高度断面。

エアロゾルの雲微物理影響

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

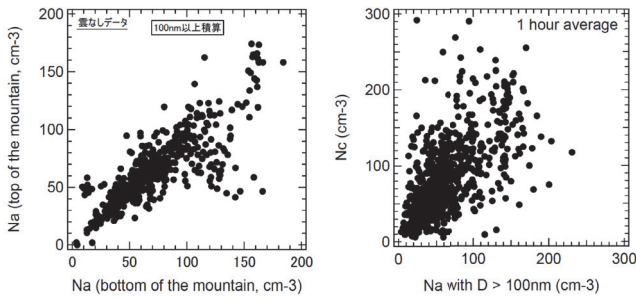


図 3.3.9 (左図) 乾燥直径 100 nm 以上のエアロゾル数濃度を、山頂および山麓の観測 (30 分平均値) で比較した結果。山頂において雲がない状況での比較を示した。

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

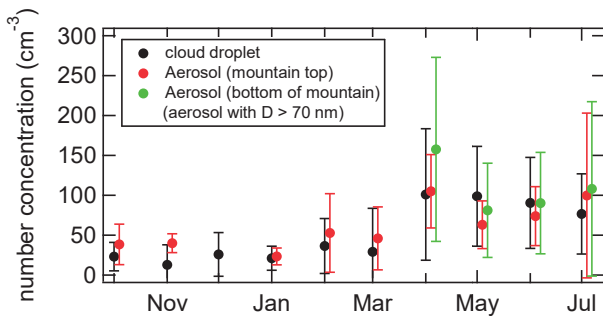


図 3.3.10 ニーオルスンのツェッペリン山山頂で観測された雲粒数濃度 (黒) と、山頂 (赤) および山麓 (緑) で観測された乾燥直径 70 nm 以上のエアロゾル数濃度の季節変化 (2014 年)。

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

まとめ

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

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

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

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

2. 北極域における雲の広域観測

執筆者：岡本 創 佐藤可織 浮田甚郎

はじめに

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

アルゴリズム

ここでは以下の三つの衛星に搭載された4種類のセンサーを解析に利用した。まず、94 GHzの雲レーダー CloudSat 衛星、CALIPSO 衛星に搭載されたライダー CALIOP、水蒸気量の鉛直分布を得ることのできる AQUA 衛星に搭載された赤外サウンダ AIRS センサー、そして同じく AQUA 衛星に搭載されたマイクロ波放射計 AMSR-E である。CloudSat は94 GHzの雲レーダーを搭載し、雲や降水からのレーダー反射因子の観測を行っている。CALIPSO 衛星に搭載された CALIOP センサーは、波長532 nmと1064 nmにおける減衰後方散乱係数と、波長532 nmにおける偏光解消度の観測を行っている。

CloudSat と CALIPSO データの解析には、高度域に分けた雲量に関して雲マスクアルゴリズム (Kyushu University cloud Mask: KU-Mask) を適用した⁵⁾。次に雲の相ごとに分けた雲量解析には、相識別アルゴリズム (KU-Type) を用いた⁶⁾。そして氷雲微物理特性解析アルゴリズム (KU-Micro) を適用した。上の三つのプロダクトの水平解像度は約1.1 km、鉛直分解能は約240 m である。

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

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

解析結果 I. 海氷と水雲と氷雲の雲量の関係

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

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

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

次に、氷雲に関しても同様な解析を行った (図3.3.14)。上層が概ね、他の層の雲量より大きかった。下層と中層の氷雲の

雲量は、7、8月に各年で極小を示していたが、極大に関しては、明確な月は存在していなかった。上層の水雲の雲量は、極小となる月は年によって異なり、一方で極大は毎年12月であった。総じて、氷雲と海水との対応関係は良くなかった。以上の水・氷の雲量の変動解析と海水の対応から、7月の下層の水雲の減少が、下向きの地表面への放射量の増加を招き、その熱の蓄積によって9月の海水の減少につながった事が示唆される。また、その海水の減少が、9、10月の下層の水雲の発生につながっている事が同時に示唆される。

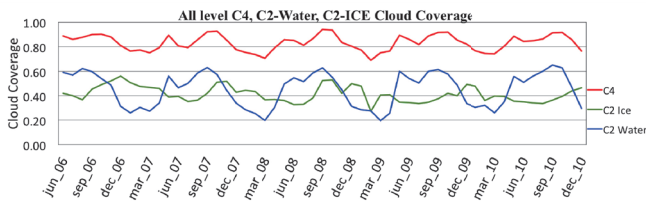


図 3.3.11 CloudSat と CALIPSO 衛星の同時利用から求めた北極域（北緯 65 度以上）の雲量の 2006 年 6 月から 2010 年 12 月までの全雲量、氷雲の雲量、水雲の雲量の変動を示す。

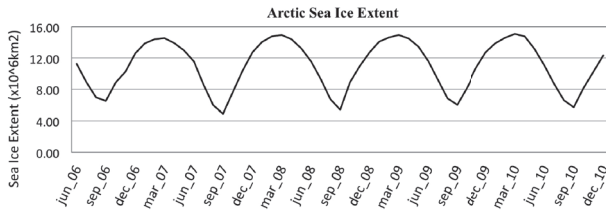


図 3.3.12 AMSR-E から求めた緯度 65 度以上の海水面積の変動。解析期間は図 3.3.11 と同じ。

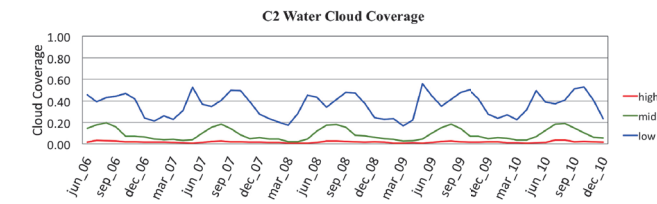


図 3.3.13 CALIPSO 衛星から求めた北極域の水雲の各高度域別の雲量の変動。赤は上層、緑は中層、青は下層を示す。

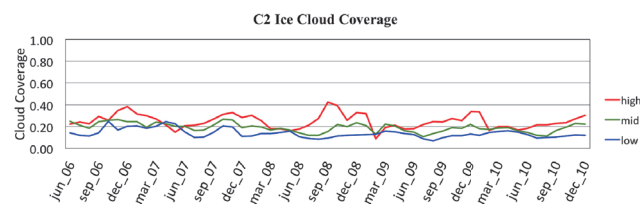


図 3.3.14 図 3.3.13 と同様だが、氷雲の各高度域別の雲量の変動。

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

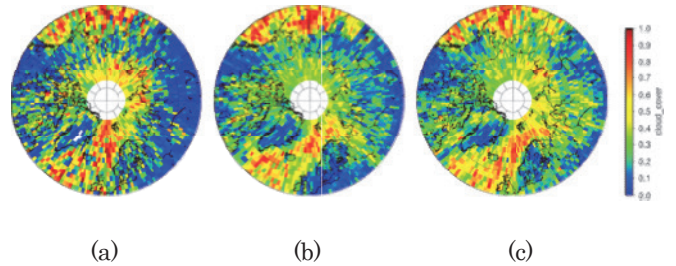


図 3.3.15 北極域における下層の水雲の雲量の緯度経度分布の 1 ヶ月平均値。(a) 2006 年 6 月、(b) 2006 年 7 月、(c) 2006 年 8 月。

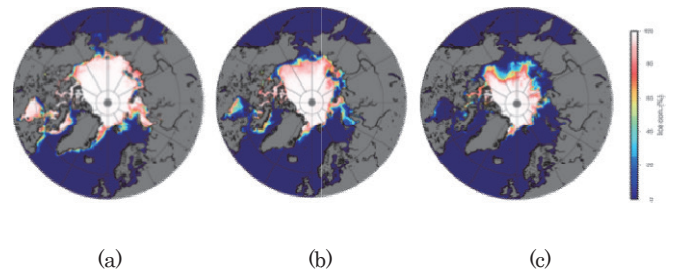


図 3.3.16 北極域における海水密接度の緯度経度分布の 1 ヶ月平均値。(a) 2006 年 6 月、(b) 2006 年 7 月、(c) 2006 年 8 月。

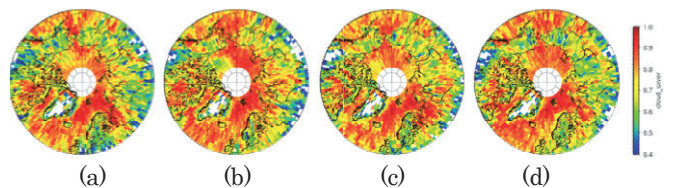


図 3.3.17 下層の全雲量の緯度経度分布の 9 月から 11 月の 3 ヶ月平均値の年々変動。(a) 2006 年、(b) 2007 年、(c) 2008 年、(d) 2009 年。

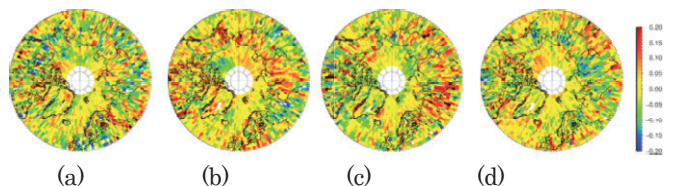


図 3.3.18 図 3.3.17 の雲量の 4 年平均値からの各年の偏差。(a) 2006 年、(b) 2007 年、(c) 2008 年、(d) 2009 年

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

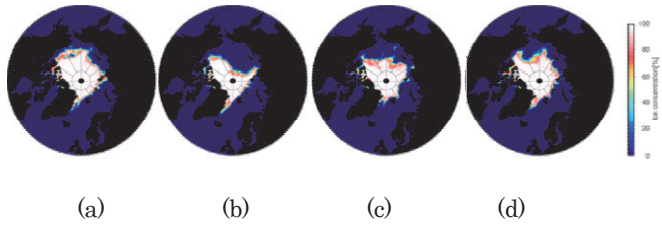


図3.3.19 9月の海水密度の緯度経度分布の平均値。(a) 2006年、(b) 2007年、(c) 2008年、(d) 2009年。

解析結果Ⅱ. 氷雲と水蒸気量の関係

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

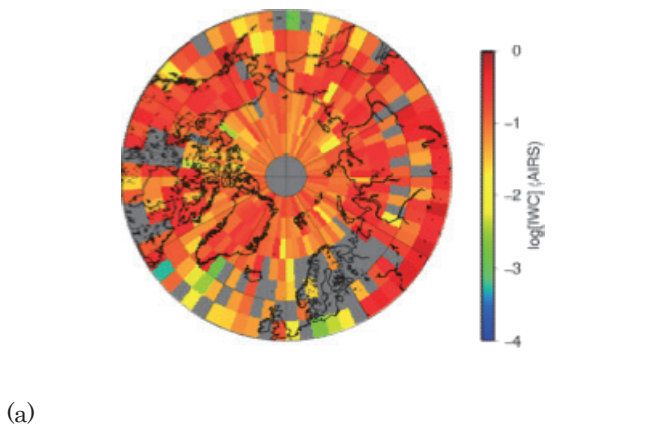
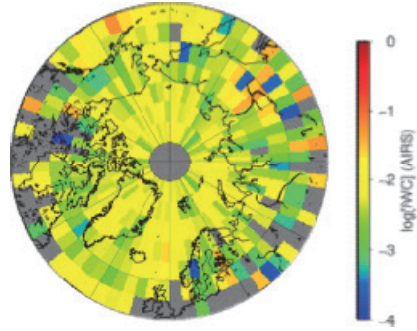
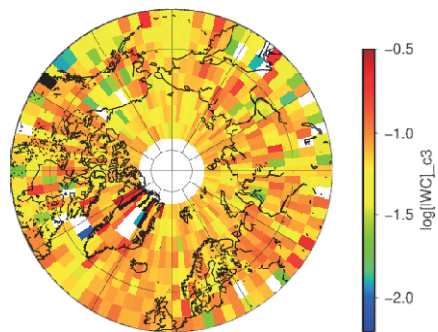


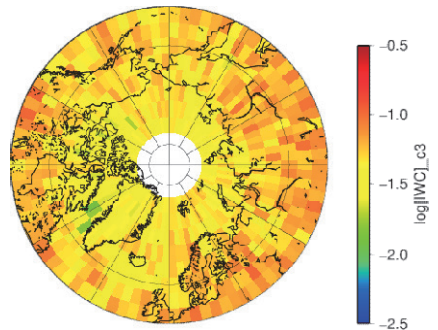
図3.3.20 AIRSから求めた氷過飽和度から推定された氷水相当量 [g/m³]。(a) 中層。(b)上層。2009年7月の1月平均値。



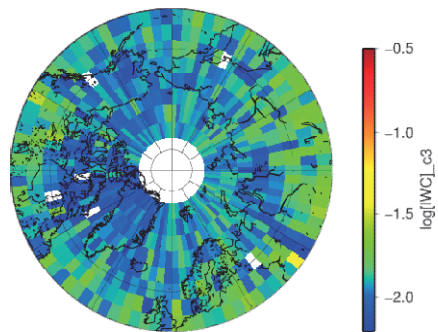
(b)
図3.3.20(b)



(a)



(b)



(c)

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

このような氷過飽和と雲の対応関係があったため、さらに、氷過飽和度が100%以上の水蒸気がすべて氷粒子となったと仮定して、氷水量相当量を求めた(図3.3.20)。解析期間は2009年7月の場合である。中層では氷水量は 0.1g/m^3 以上の値をとる場合もあった。また陸上で海上より大きな値をとる傾向であった。極に近くなる程、小さい値を示していた。上層では1桁程度中層より小さい値を示していた。海陸の差は小さくなっていた。次にCloudSatとCALIPSOの同時解析から氷水量を抽出し、氷水量相当量との比較を行った(図3.3.21)。氷水量は、下層、中層、上層と高度が上がるにつれ小さい値を示していた。また、中層では極に近いほど小さい氷水量の値であり、水蒸気量と整合性があった。上層の氷水量は水平に様であり、これは水蒸気のパターンとは異なった特徴であった。これらは氷粒子の生成条件に中層と上層で異なっていることを示唆している。

解析結果Ⅲ. 地上設置型雲レーダーとライダーによる雲解析

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

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

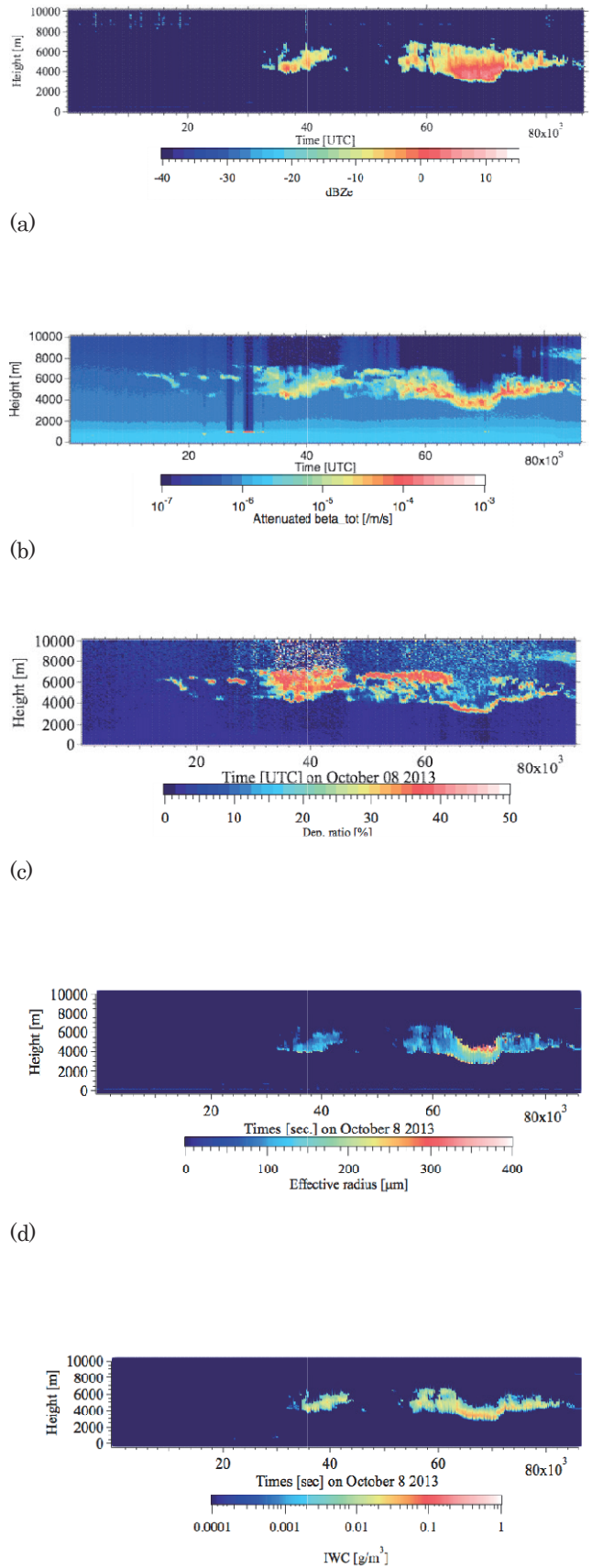


図3.3.22 ニーオルスンに設置された95GHz雲レーダーとマイクロパルスライダーの観測と氷粒子の微物理量の解析結果。(a)レーダー反射因子、(b)ライダー後方散乱係数、(c)偏光解消度、(d)氷粒子の有効半径、(e)氷水量。

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

3. 北半球中高緯度における対流圏-成層圏結合とそのインパクト

執筆者：山崎孝治 三好勉之 中村 哲

はじめに

北極域の海氷面積は近年急速に減少しており、地上気温は全球平均の2倍の速さで温暖化している。このような北極域の変動が北半球中緯度の気候に影響を及ぼしている可能性がある。最近の研究で海氷減少は冬の気候循環を変えユーラシアに寒波をもたらすことが示唆されている^{7),8),9),10)}本研究では晩秋の北極域の海氷の近年の減少が大気循環場を変調し、その結果冬の北極振動 (Arctic Oscillation (AO)¹¹⁾) / 北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation: NAO) が負になるプロセスについて観測データ解析と大気大循環モデルを用いた数値実験で調べた。

今昔実験：データと方法

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

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

次項の結果は Nakamura et al. (2015b) にまとめられたものである。

観測と今昔実験による海氷の効果

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

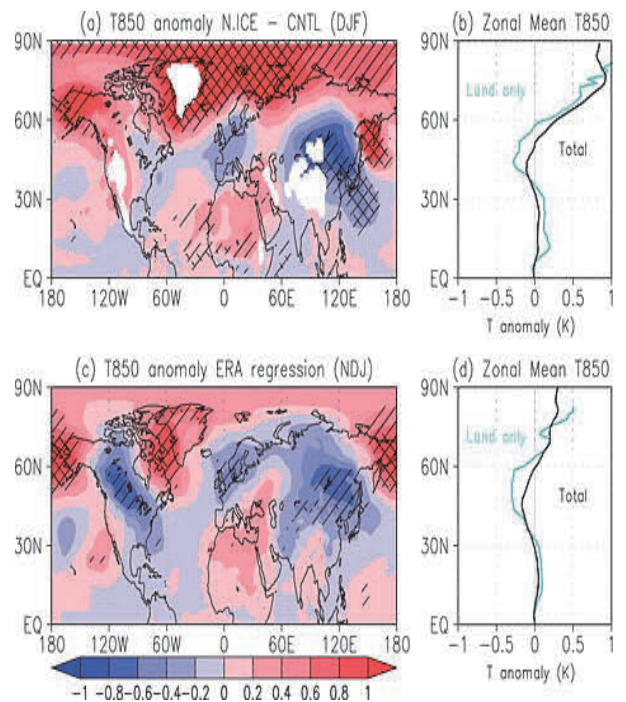


図 3.3.23 (a)冬 (12、1、2 月) 平均の AFES 今昔実験による海氷減少による 850hPa 気温偏差 (N.ICE-CNTL)。片シェイド(〇)は 95%、両シェイド(X)は 99%で差が有意な所。単位は°C。(b) 東西平均した 850hPa 気温偏差。薄水色は陸地のみ、黒色は全体。(c) 11 月の北極のデトレンドした海氷面積変動に回帰した冬(11、12、1月)平均の 850hPa 気温の偏差。海氷の 1σ 減少に対応する値。ERA-interim 再解析データによる。(d) (b)と同じ。ただし、ERA-interim 再解析データによる北極の海氷面積の減少に対応する気温偏差。

このような偏差が生じる元々の原因は晩秋から初冬にかけてバレンツ海・カラ海の海氷面積が減少すると暖かい海表面から

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

では海氷減少に伴いAOはどのように変化しindexの分布はどのようなのであろうか。図3.3.24a,bは北半球(20°N以北)の冬平均500-hPa高度場のCNTL、N.ICEでの第1主成分(EOF1)である。それぞれのランにおいて北極域で負のときは中緯度域で正になるAO的な変動が最も卓越することが確認される。二つのランを比べるとN.ICEの方が北極域の活動中心がより強くやや低緯度にシフトしている。図3.3.24cは、二つのランを一緒にして求めたEOF1であり、図3.3.24dはそのスコアの120年間の時系列である(前半はCNTL、後半はN.ICE)。

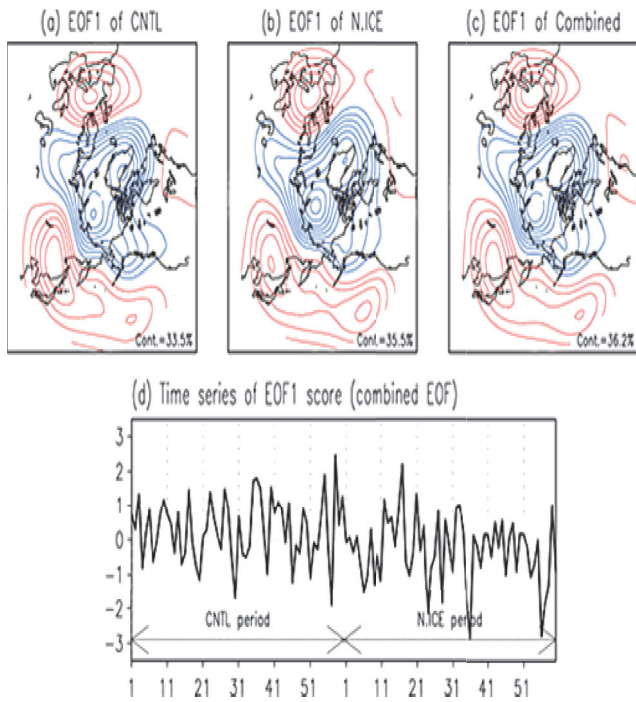


図3.3.24 冬(12、1、2月)平均500hPa高度場のEOF1パターン。(a)CNTL、(b)N.ICE、(c)CNTL+N.ICE、(d)結合したEOF1スコア時系列。CNTL欄での60年とN.ICEランでの60年を結合した。

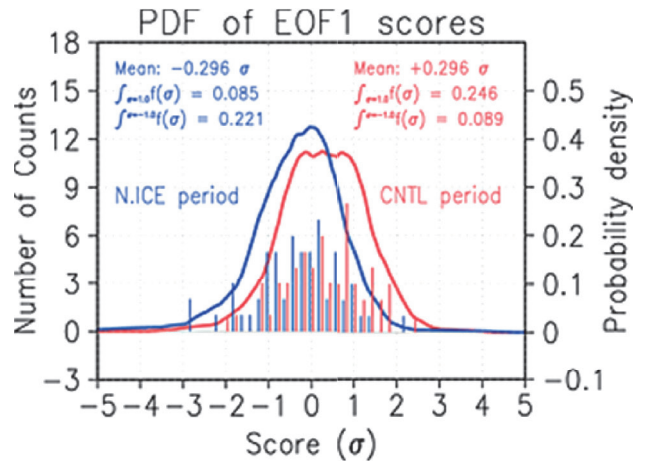


図3.3.25 EOF1スコアのヒストグラム(棒:左目盛り)と推定した確率密度関数(線:目盛り)。横軸はスコア。赤はCNTLラン、青はN.ICEラン。

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

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

成層圏の応答

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

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

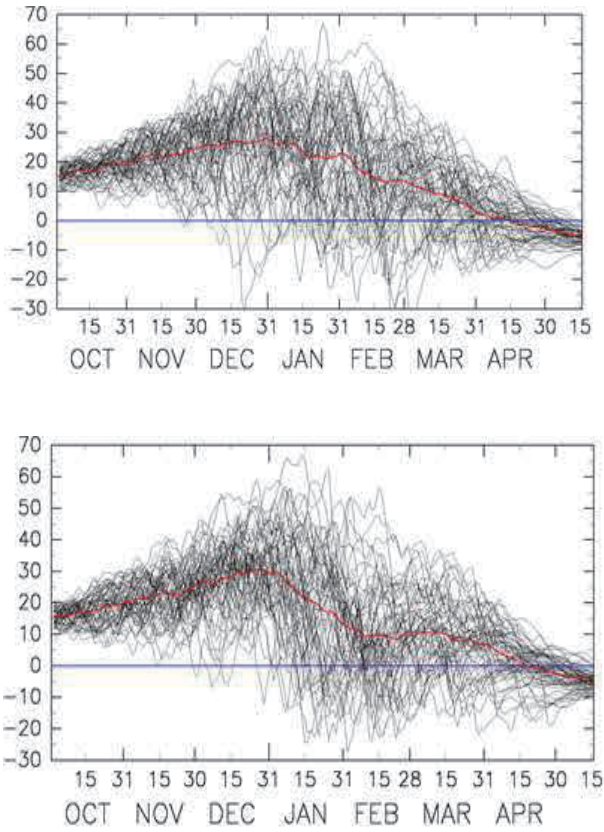


図 3.3.26 60°N、10hPa における東西平均東西風のそれぞれのランにおける 10 月から 5 月中旬までの日々の変動。単位は m/s。(上) 黒線は CNTL ランの 60 年分を重ねて描いている。赤は 60 年平均値の時間変化を示す。(下) N.ICE ランの同様な図。

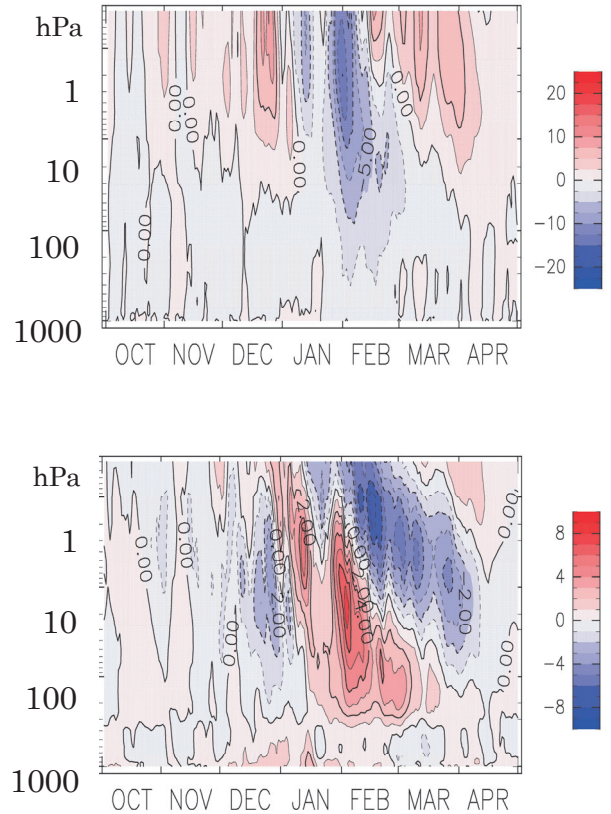


図 3.3.27 (上) 60°N における東西平均東西風偏差の時間・高度断面図 (N.ICE-CNTL)。マイナスの値は、N.ICE ランにおいて、西風が弱まったことを示す。単位は、m/s。(下) 80°N における東西平均温度偏差の時間・高度断面図 (N.ICE-CNTL)。プラスの値は、N.ICE ランにおいて昇温となることを示す。単位は°C。

の実験での差 (N.ICE-CNTL) を図 3.3.27 上に示す。12 月までは、N.ICE ランの方が成層圏極夜ジェットが強化されているのに対して、1 月から 2 月にかけては、成層圏極夜ジェットは弱まっていることがわかる。この西風ジェットの弱まりは、時間と共に下方に伝播し、2 月では、対流圏上部から中部にかけての西風が弱まっていることがわかる。このように、海水の影響はまず成層圏上部に現れ、対流圏へと伝わっていく様子が見られる。同様に、北極域の東西平均温度についても、対流圏—成層圏結合過程がみられる (図 3.3.27 下)。1 月になると、N.ICE ランでの成層圏極夜ジェットの弱まりに伴い、北極域の成層圏の温度は上昇する (最大で 5-6°C)。この温度上昇のシグナルは、時間と共に下方に伝播し、2 月には、北極域の対流圏上部から中部にかけて、顕著な昇温がみられる。対流圏北極域の昇温は、3 月中旬くらいまで続く。図 3.3.27 下では、500 hPa より下層では、12 月から 2 月にかけて昇温がみられるが、これは、海水減少に伴う直接の応答である (観測と今昔実験による海水の効果の節を参照) のに対して、2 月から 3 月にかけて対流圏上部から中部にかけて現れる昇温は、対流圏—成層圏結合過程の結果生じたものといえる。

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

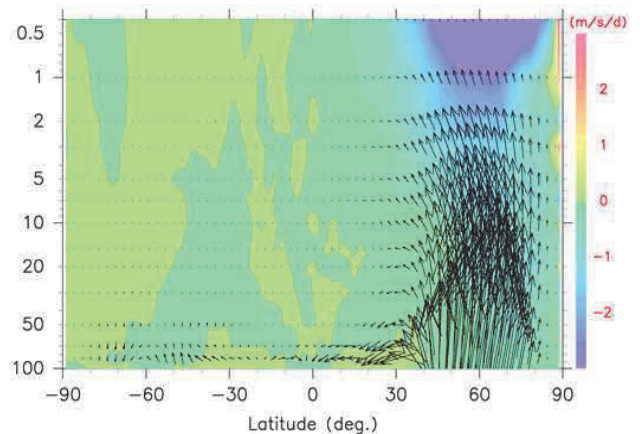


図 3.3.28 ベクトルは、E-P flux の N.ICE と CNTL との差をしめす。コンターは、E-P flux の発散の N.ICE と CNTL との差をしめす。単位は、m/s/day であり、マイナスの値は、西風の減速量が増加したことを示している。

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

成層圏の役割 (RS 実験)

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

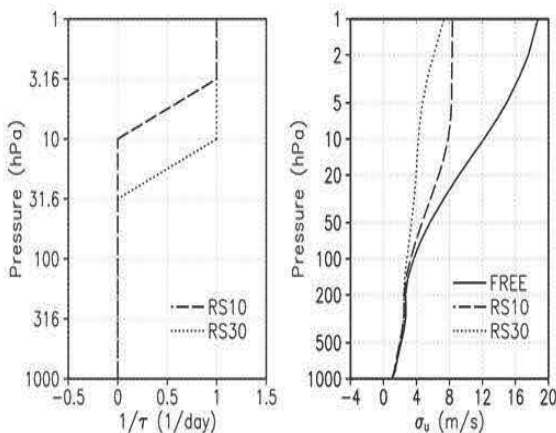


図 3.3.29 (左) RS10 及び RS30 ランにおける damping 係数の鉛直分布。(右) 各ランにおける 1 月の 60°N の帯状平均東西風の標準偏差。FREE ランは、CNTL ランの 60 年積分から計算。

RS 実験の結果

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

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

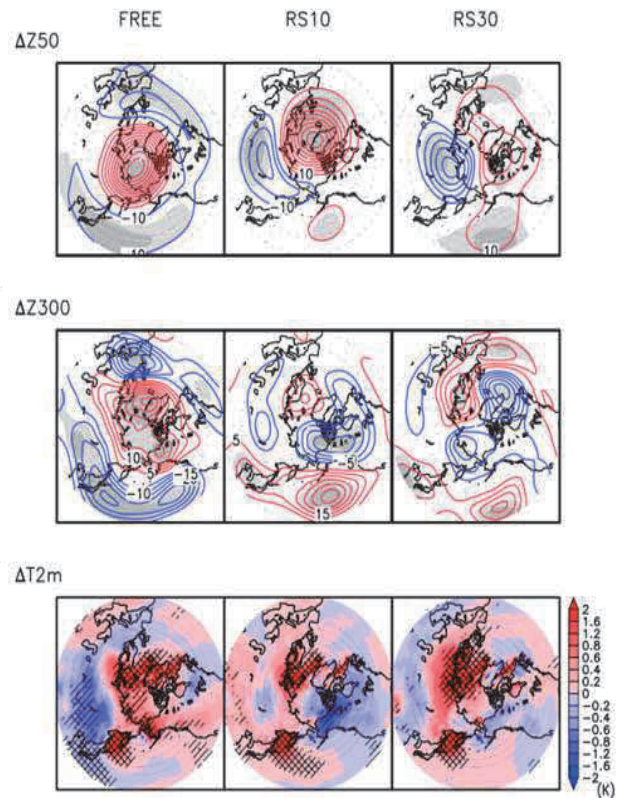


図 3.3.30 冬 (12、1、2 月) 平均の N.ICE ランと CNTL ランの差。(上) 500 hPa のジオポテンシャル高度。等値線間隔は 10 m。(中) 300 hPa のジオポテンシャル高度。等値線間隔は 5 m。(下) 地表 2 m 高度の気温。等値線間隔は 0.5 K。いずれも赤は正、青は負でゼロ線は省略。薄い (濃い) 灰色の影は差の統計的有意性が 95 (99)%以上のところ。(左) FREE ラン、(中) RS10 ラン、(右) RS30 ラン。

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

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

まとめ

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

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

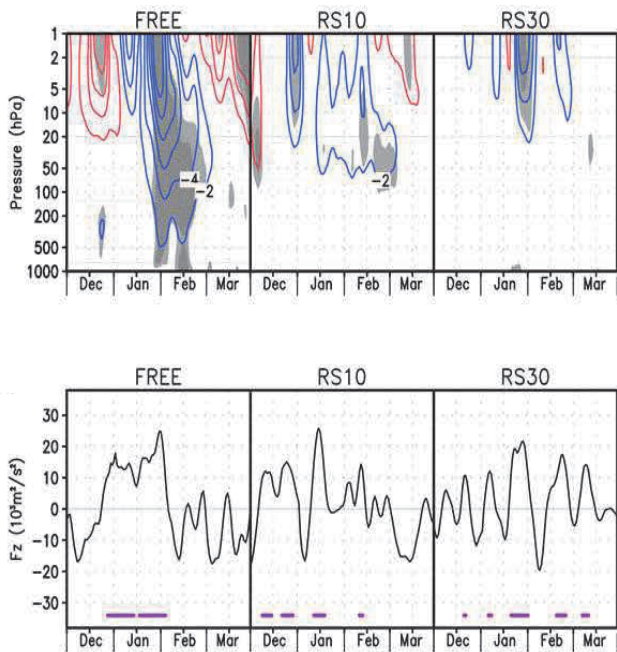


図 3.3.31 (上) 60°N の日平均帯状平均西風偏差の時間・高度断面図。等値線間隔は 2 m/s。正は赤、負は青。差が 95(99)%で有意な所に薄い(濃い)影。(下) 50-80°N 平均の 100 hPa での EP flux の鉛直成分 (Fz) 偏差。偏差が 10⁴ m²s⁻²以上の所を紫で示す。

引用文献

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

IV.地球温暖化における
北極圏の積雪・氷河・氷床の役割

研究課題4 研究代表者：榎本浩之

1. 研究実施概要

執筆者：榎本浩之

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

- ・北極域における広域積雪時空間変動
- ・北極域の雪氷中不純物
- ・氷河融解を促進する雪氷微生物
- ・北極域氷河変動と将来予測
- ・グリーンランド氷河氷床：氷床変動メカニズムと将来予測および海水準への影響

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

2. 北極積雪の変容

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

北極域北方林における高精度の降積雪観測

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

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

カで多分野連携にもとづく通年の高精度な自動降積雪観測を実施した。

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

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

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

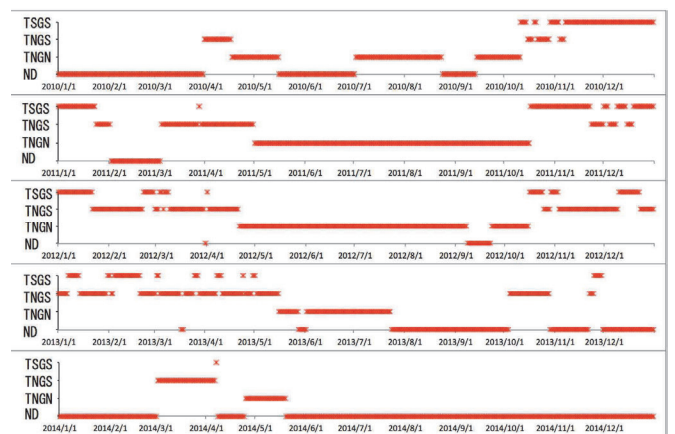


図3.4.1 アラスカ・ポーカーフラットリサーチレンジ観測サイトにおける森林への着雪氷の頻度。TSGS：森林着雪氷あり積雪あり、TNGS：森林着雪氷なし積雪あり、TNGN：森林着雪氷なし積雪なし、ND：観測データなし。(Sugiura in preparation)

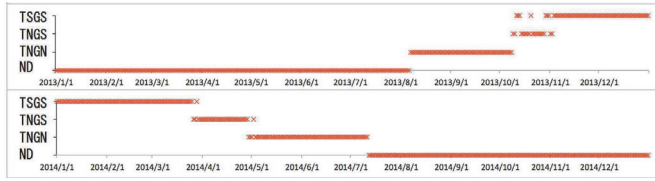


図 3.4.2 シベリア・スバスカヤパッド観測サイトにおける森林への着雪氷の頻度。TSGS：森林着雪氷あり積雪あり、TNGS：森林着雪氷なし積雪あり、TNGN：森林着雪氷なし積雪なし、ND：観測データなし。(Sugiura in preparation)

続いて、大気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アルベドを0.3と仮定して、北方林が着雪氷で覆われなくなった場合の全球地表面の平均温度を求めたところ、約0.5Kの上昇となった。シベリアおよびアラスカでの観測結果による着雪氷の被覆期間の違いから、アラスカよりシベリアの方が今後に昇温するポテンシャルが高いことが示唆される。

衛星観測に基づく北半球積雪域面積の長期トレンド抽出

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

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

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

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

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

していた (図 3.4.3b)。

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

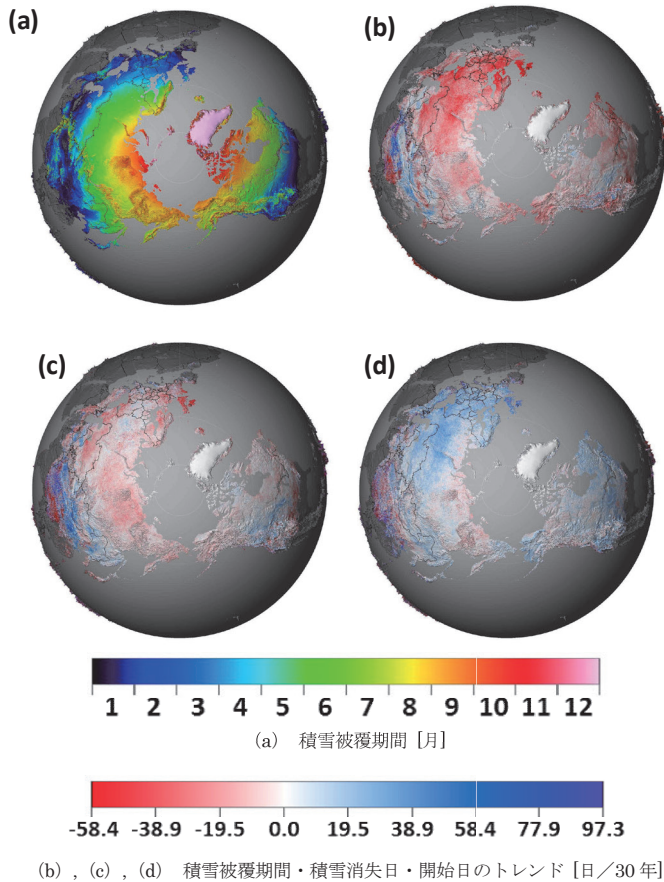


図 3.4.3 過去 30 年間の北半球積雪被覆期間の (a) 平均値、および (b) 積雪被覆期間、(c) 積雪消失日、(d) 積雪開始日のトレンド (Hori et al., unpublished data)

北極の温暖化増幅に関しては、アイス・アルベドフィードバックの重要性が確認されている (研究課題 1)。アイス・アルベドフィードバックは夏季において北極海の海水域で顕著であるが、北極海での海水融解が始まる前に環北極の陸域で積雪の融解が進む。アラスカにおいての観測からカナダ内陸部や太平洋岸から開始した融雪地域がアラスカを北上し、北極海に至ったあと、海水の表面融解と後退が始まるのが観測されている。

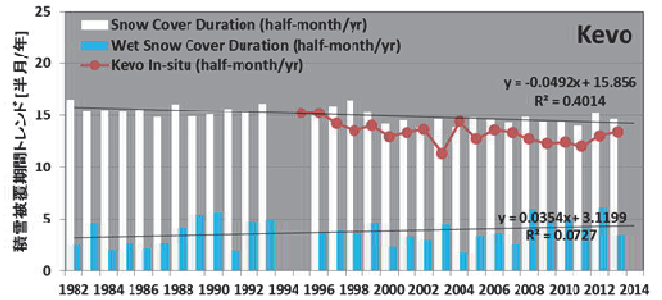


図 3.4.4 衛星 (全積雪: 白棒、湿雪: 水色棒) および現地観測データ (赤丸) から抽出したフィンランド・ケボにおける積雪被覆期間の年変動 (Hori et al., unpublished data)

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

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

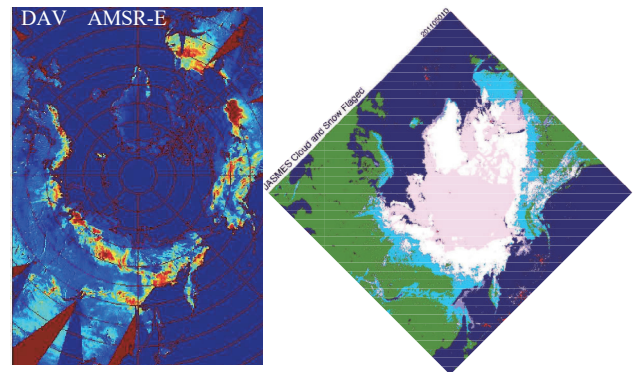


図 3.4.5 環北極域の春 (4 月) 融解情報。(左) AMSR-E (赤色が融雪域を示す)、(右) JASMES による (白色: 乾雪、水色: 湿雪、灰色: 海氷)。

3. 積雪中不純物の空間分布

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

北極域における積雪サンプルの採取と分析

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

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

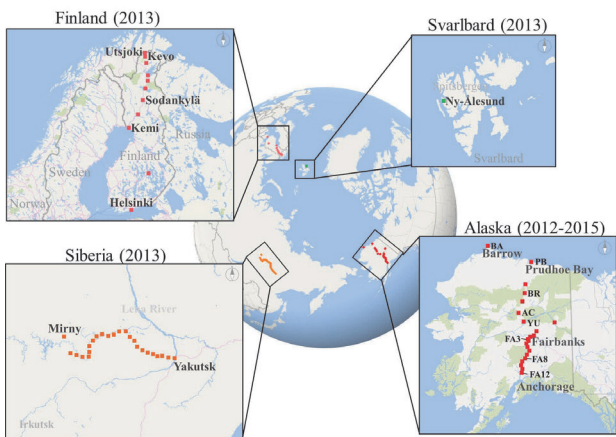


図 3.4.6 北極域積雪採取地点

積雪中不純物の空間分布

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

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

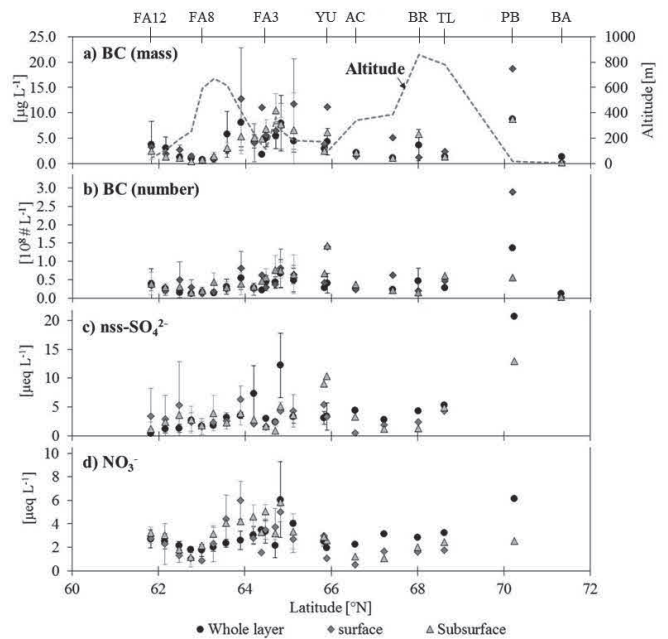


図 3.4.7 アラスカ積雪中の不純物濃度の緯度分布。各データは2012年から2015年の平均値、エラーバーは1σを示す。

BC濃度の高い中部の中心であるフェアバンクスは、周囲が山岳で囲まれた場所にあり、大気境界層の底部が冷却され逆転

層が形成されやすい冬季は気塊が滞留する。このためフェアバンクスでは冬季に人為起源の大気中のエアロゾル濃度が高くなると考えられる (Ward et al., 2012)。

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

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

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

表 3.4.1 先行研究との比較

文献	観測場所, 観測期間	深さ	平均濃度 [$\mu\text{g L}^{-1}$]	濃度範囲 [$\mu\text{g L}^{-1}$]	測定方法
Clarke and Noone (1985)	Barrow, 1983Apr, 1984Mar		22.9	7.3-60.4	IP
Hegg et al. (2009)	North America, 2007, spring	Surface	>20		ISSW
Doherty et al. (2010)	Canadian and Alaskan Arctic, 2007 and 2009	Surface, Subsurface	8		ISSW
	Canadian sub-Arctic, 2007 and 2009	Surface, Subsurface	14		
Sterle et al. (2013)	Eastern Sierra Nevada, 2009Jan-Apr (accumulation period)	snow pit (10cm intervals) Surface (top-2cm)	3 25	<1-89 3-81	USN/SP2
Doherty et al. (2014)	Pacific Northwest, 2013, Jan-Mar	Surface	35		ISSW
		Subsurface	32		
	Intramountain Northwest, 2013, Jan-Mar	Surface	37		
		Subsurface	27		
	Northern U.S. Plains, 2013, Jan-Mar	Surface	44		
		Subsurface	78		
	Canada, 2013, Jan-Mar	Surface	19		
		Subsurface	22		
Pedersen et al. (2015)	Barrow, 2008Apr	Surface (top-5cm)	9	0-36	TOT
This study	Alaska, 2012-2015, Feb-Mar	Surface (top-2cm)	1.6		M5/WR-SP2
		Subsurface (2-10cm)	1.1		
		whole layer	1.3		

アラスカ、シベリア、フィンランド、スバルパルの各地域で、複数のサンプル採取地点での積雪全層の BC 濃度と一冬の堆積量の平均値を計算した結果を図 3.4.8 に示す。濃度はシベリア、フィンランド、アラスカ、スバルパルの順に高く、堆積量はフィンランド、シベリア、アラスカ、スバルパルの順に高かった。本研究で求めた高精度の濃度と堆積量のデータは、

BC の輸送・沈着モデルや衛星データの検証に貢献することが期待される。また、BC が融雪に及ぼす影響を評価する上でも重要である。今後、BC だけでなく、ダストについても同様の研究を進める予定である。

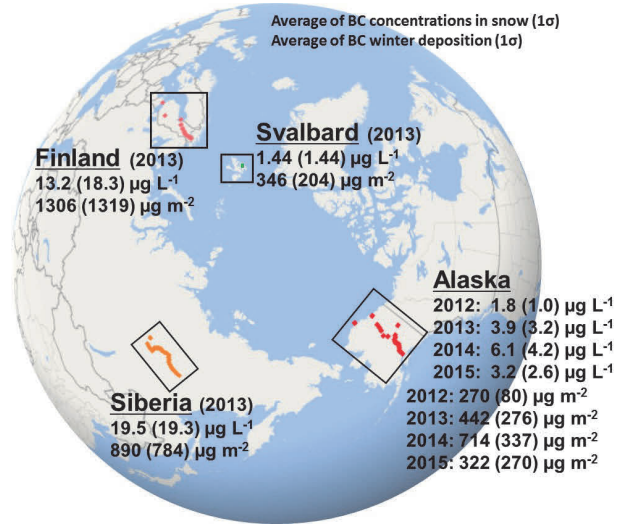


図 3.4.8 北極域の各地域の積雪における BC の濃度 (上段) と堆積量 (下段)

北極域積雪中ダストの起源推定

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

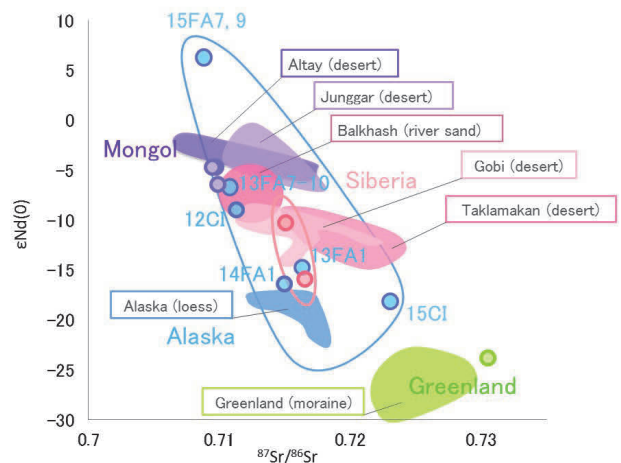


図 3.4.9 北極積雪中ダストの同位体比 (丸印) とダスト発生源地域の同位体比 (エリアで示す) の比較。

図 3.4.9 から、北極域に飛来するダストの供給源は地域や年によって大きく異なることが分かる。アラスカの中でも場所と年により差が見られた。アラスカ山脈より南ではアジアの砂漠や火山灰など遠方起源のものが供給されており、その起源が年によって異なっていた。これに対して、アラスカ山脈より北に位

置するフェアバンクス周辺では主にローカルなダストが供給されており、年による違いは少なかった。また、フェアバンクスの北北東に位置するサークル (CI) では、年によって起源が異なり、2015年にはアジアからのダスト供給が多かった。一方、シベリアとモンゴル、グリーンランド沿岸では、ローカルなダストが主であった。ダスト同位体比はダストの起源推定と輸送過程の推定に有効な手段であるが、まだ測定例が少ないため、今後、更に分析を進める予定である。

4. 氷河表面の微生物由来不純物とその融解への効果

執筆者：竹内 望 永塚尚子 中沢文男

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

温暖化と生物学的融解加速過程

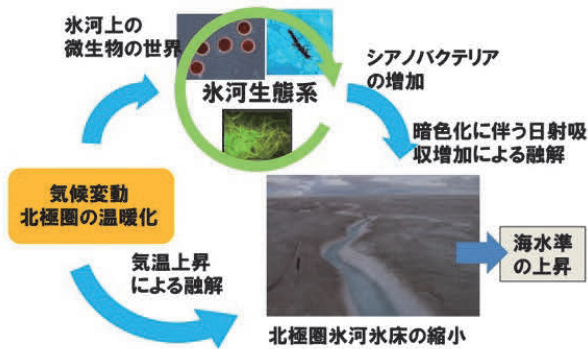


図 3.4.10 北極圏の温暖化による生物学的融解加速過程 (竹内望)。

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

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

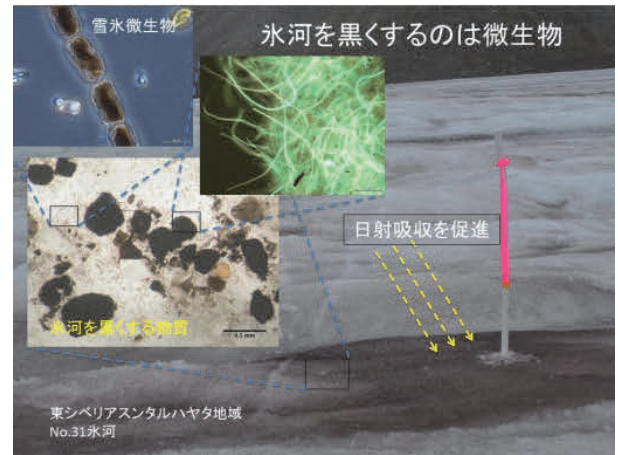


図 3.4.11 スタラルハヤタの氷河表面の不純物と、そこに含まれていた微生物(雪氷藻類)の顕微鏡写真 (Takeuchi et al., 2015)。

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

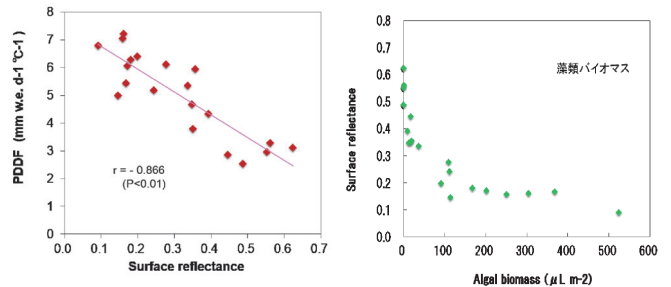


図 3.4.12 融解速度 PDDF (Positive Degree Day Factor) に対する表面反射率 (左)、および表面反射率に対する微生物量 (右) の関係 (Takeuchi et al., 2015)。

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

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

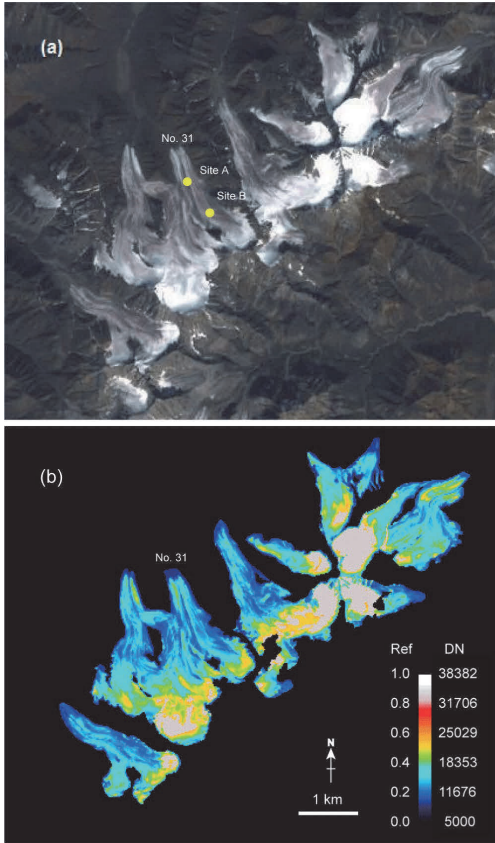


図 3.4.13 Landsat-8 衛星画像から求めた、スタルハヤタ山域の氷河上の暗色域の分布。(a) Band 2、3、4 の Natural color 画像。(b) Band 2 の反射率をカラーTable で強調した画像。暗色域は氷河中流部分に分布し、平均反射率は 0.290 できれいな水に比した融解速度は 1.8 倍となることがわかった (Takeuchi et al., 2015)。

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

5. 北極圏山岳氷河の変動

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

20 万あると言われる地球上の氷河・氷帽のうち北極圏には半数近くが分布しており、「縮小する世界の氷河の海面上昇寄与」の議論では重要な地域となっている。重要性にも関わらず、変動予測にとって重要となる氷河の量と特性に関して十分な精度で予測するための知見の蓄積がない。本研究では、第一に情報の空白地帯である東シベリアの氷河の現地調査、変動特性解析を行うことで、北極氷河の知見のギャップを埋め、また第二として北極他地域を含め、広域評価を行うためのモデリング開発を行った。なお現地観測は、ロシア科学アカデミー・永久凍土研究所 (MPI) などの協力を得つつ、本事業と海洋研究開発機構の共同研究として実施された。

東シベリア・スタルハヤタ山域北部の氷河の基本情報

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



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

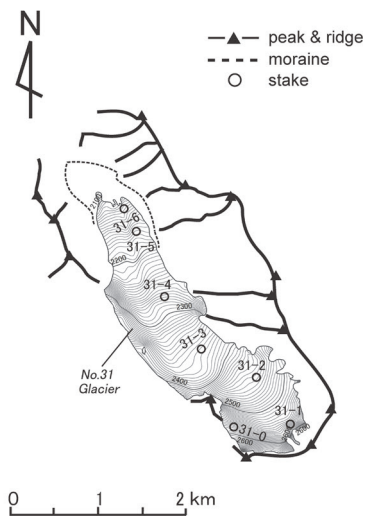


図 3.4.15 DGPS 測量成果から作成した No.31 氷河の DEM (白川作成)。

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

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

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



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

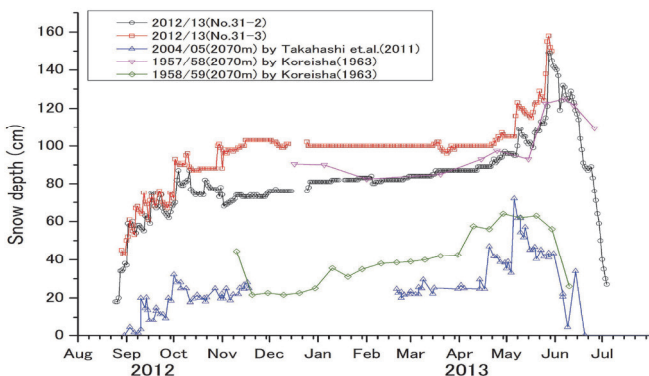


図 3.4.17 No.31 氷河上の積雪深の推移 (過去の観測結果との比較) (白川作成)。

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

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

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

氷河の規模の長期的変化の解明

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

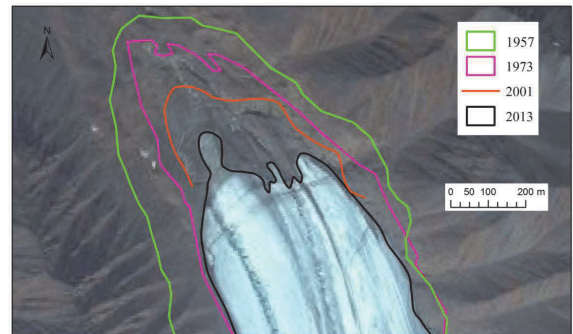


図 3.4.18 No. 31 氷河。IGY から本事業実施時期にかけての氷河末端位置の変化。IGY 時の地図、衛星写真、DEM (2013) 年を合成したもの (白川・鈴木作成)。

IGY と本事業実施時期の表面質量収支を比較すると、IGY 期には涵養域が存在したが、本事業期には、上端まで全面融解域になり、涵養域が存在しなくなっていた。それでも長期的質量損失量は、北極の中では中程度であることも分かった。この氷河が長期的温暖化の影響で氷河縮小は進んでいて、1995 年以降はそれが強まったことで、涵養域がない年が発生しつつ損失・縮小が加速化し、それに伴い動きが鈍化していると言える。この状況は、No. 31 氷河がいわゆる氷河の基本的特徴を失いつつ、

消失する方向に向かっていることを示している。また Galanin et al. (2013, 2014) は、モレーン年代、岩石風化の調査、コケの成長、航空写真(1940年代)の総合的解析から、この地域のムスハヤ山塊では、氷河面積が小氷期から1940年代までに5~7%減少、1940年代から2012年までに、36%減少したことを明らかにした。No.31 氷河のみならず、当該地域全体で氷河が縮小していることを示している。

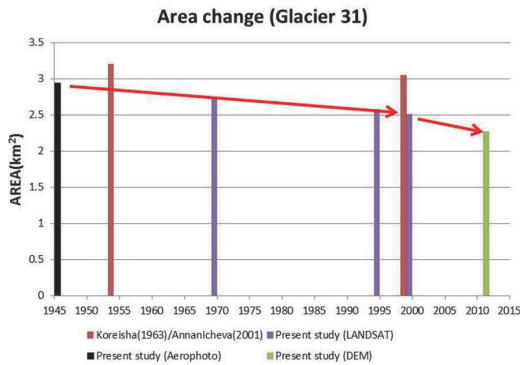


図 3.4.19 1945年から本事業観測時期にかけての No.31 氷河面積の変化。赤：1957年から2001年にかけて (Koreisha,1963⁶⁾、Ananicheva et al., 2005⁷⁾)、黒：空撮写真の解析結果、青：LANDSAT 画像の解析結果、緑：作成した DEM2013 による (大畑作成)。

北極域・環北極域の氷河変動のシミュレーション

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

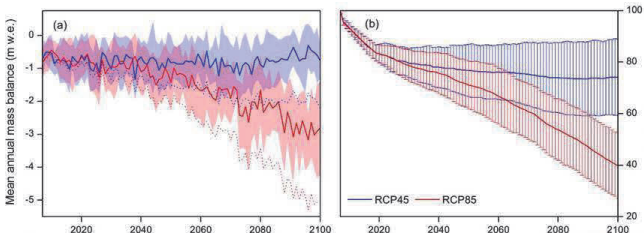


図 3.4.20 アルタイ山脈全体の氷河についてシナリオ RCP4.5 と RCP8.5 の二つの場合に関して推算した氷河質量収支 (a) と 2005 年に対する氷河面積の長期変化。(Zhang et al., 2016a)

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

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

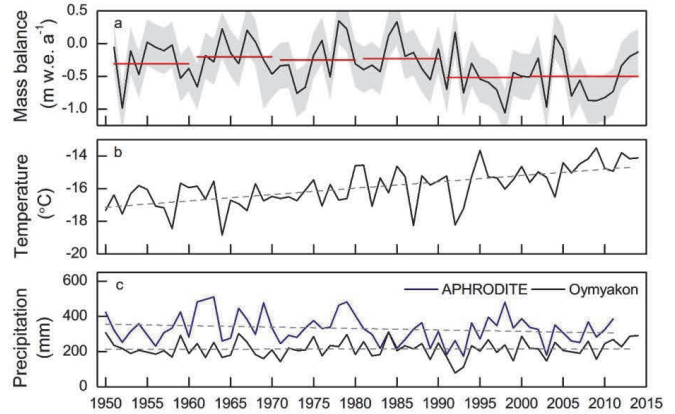


図 3.4.21 HYOGA モデルを用いた 1950 年から 2014 年までの No. 31 氷河の質量収支 (a)、年平均気温 (b) と二つの方法 (Oymyakon 気候値および APHORODITE データセット) で得られた年降水量 (c) の長期的変化。図中の線は、10 年毎の平均値 (a) および線形回帰直線 (b と c)。

6. グリーンランドにおける氷損失とそのメカニズム

執筆者：杉山 慎 齋藤冬樹 的場澄人

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

以上の背景に基づいて、グリーンランドにおける氷損失の定量化とそのメカニズム解明に取り組んだ。特に北西部カナック村の周辺では (図 3.4.22)、野外観測、衛星データ解析、数値実験など総合的な研究を実施した。グリーンランド北西部は、2005 年以降に氷損失の加速が報告されているが、南部と比較し

て観測データが不足している地域である。また、グリーンランド全域を覆う氷床モデルを改良して運用し、一連の数値実験によって、氷床縮小が海水準に与える影響を解析した。

人工衛星データによる氷河氷床、海洋の変動解析

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

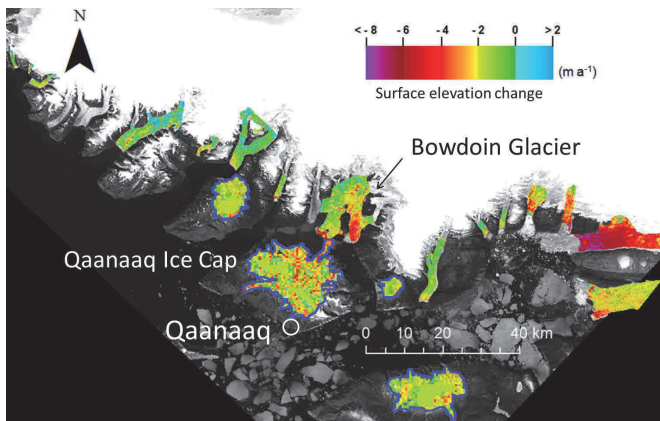


図3.4.22 2006年から2010年における、カナック周辺の氷帽およびカービング氷河の表面高度変化。氷帽の質量損失は近年加速しており、一部のカービング氷河では年間5 m以上の氷が失われている（Saito et al., 2016b, 片山修士論文, 2016）。

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

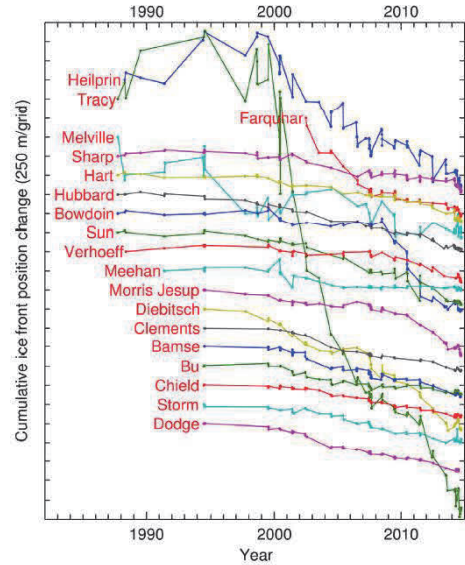


図3.4.23 カナック周辺に流入するカービング氷河の末端位置変化。1980年代以降、全ての氷河が後退傾向にある（榎原博士論文, 2016）。

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

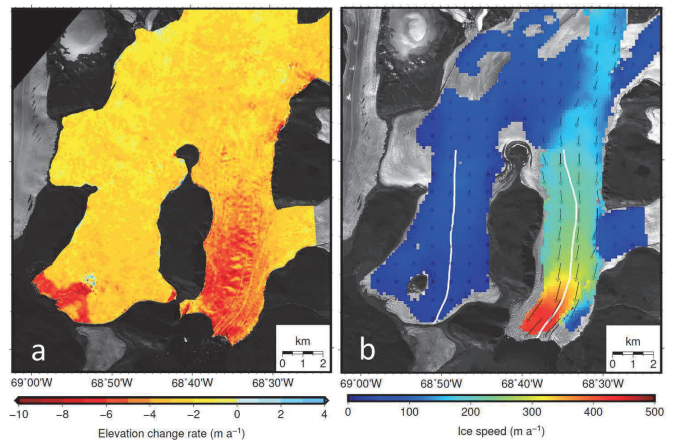


図3.4.24 Bowdoin氷河(右)とTugto氷河(左)における、(a) 2007年から2010年の表面高度変化速度、および(b) 2007年の流動速度。海に高速で流入するBowdoin氷河でより大きな氷厚減少が確認された（Tsutaki et al., 2016）。

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

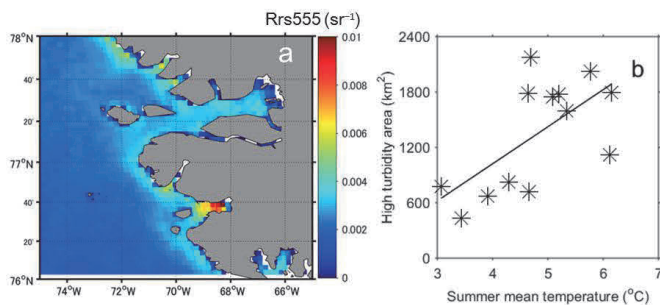


図 3.4.25 (a) グリーンランド北西部沿岸海域における、波長 555nm のリモートセンシング反射率。暖色で示された反射率の高い領域が高濁度の氷河流出水に覆われた海域を示す。(b) 2002–2014 各年における高濁度水域の最大拡大面積と、夏期平均気温との相関関係。気温の高い夏に氷河からの流出が増加して、より広い範囲まで海洋が高濁度水に覆われることを示している (Ohashi et al.,2016)。

野外観測による氷損失定量化とメカニズムの理解

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

2008 年以降の急速な後退 (図 3.4.27a) が判明した Bowdoin 氷河では、その変動メカニズムを明らかにするため、2013 年から 2015 年にわたって現地観測を実施した。氷河と海洋の底面地形をアイスレーダーとソナーで測定したところ、2008 年まで氷河末端が安定していた海底に高さ約 50 m の凸地形が見出さ

れた (図 3.4.27b)。また氷河末端部では、氷の約 90% が海水面下にあることが判明した。これらの観測結果から、海底の突起によって安定していた氷河が、水深に対して十分な氷厚を保てなくなったためカービングが増加し、急激な後退が始まったと考えられる。

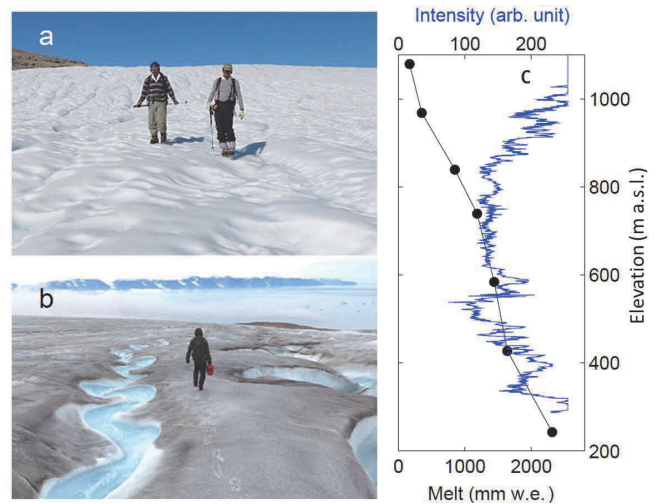


図 3.4.26 カナック氷帽の (a) 標高 250 m および (b) 750 m における表面状態。(c) 各標高における衛星画像輝度 (青線) (ALOS PRISM 2009 年 8 月 29 日)、および 2012 年 7 月 18–29 日の融解量 (●印) の標高による変化 (Sugiyama et al., 2014)。

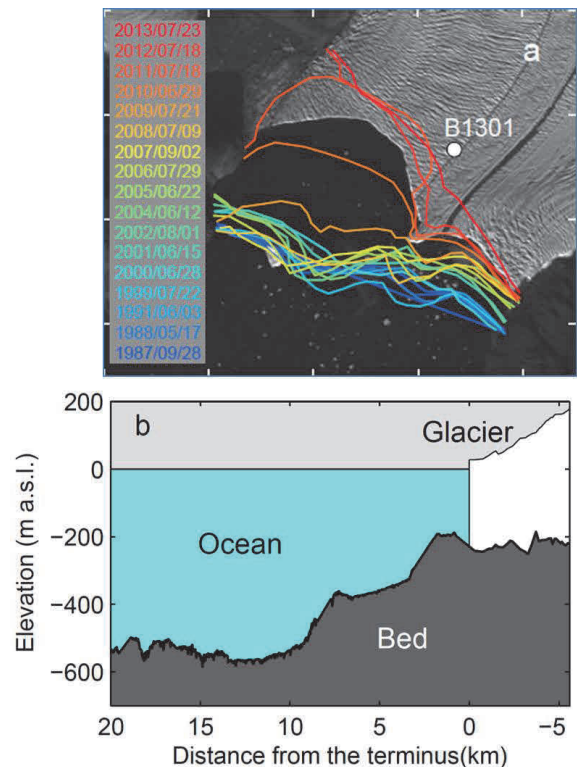


図 3.4.27 Bowdoin 氷河における (a) 1987–2013 年の末端位置変動と、(b) 氷河および海底地形を示す断面図 (Sugiyama et al., 2015)。

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

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

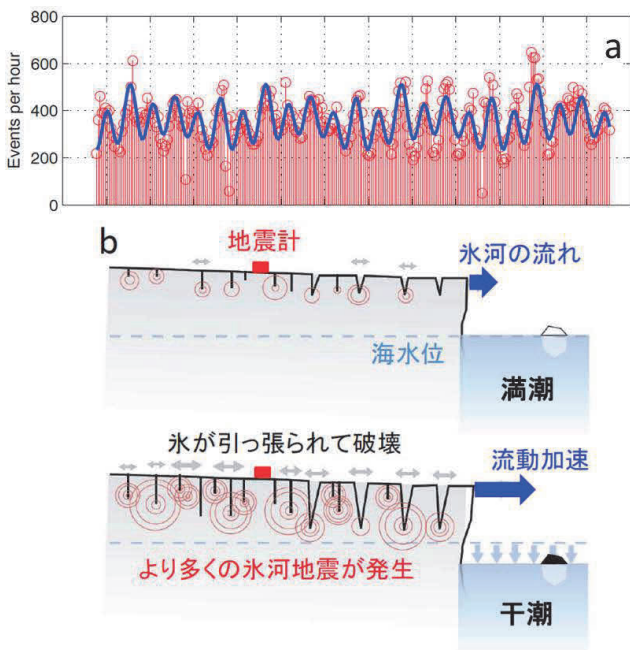


図3.4.28 (a) Bowdoin 氷河末端から250 mにおいて測定した氷河地震の発生頻度。一日に2回ピークを持つ周期的な変動を示す。(b) 潮汐に駆動される氷河地震の発生メカニズム (Podolskiy et al., 2016)。

グリーンランドのカービング氷河が近年急激な後退に転じた原因の一つとして、海洋の温暖化・循環の変化が指摘されている。この仮説を検証するデータを得るため、Bowdoin 氷河前のフィヨルドにおいて海洋観測を行い、フィヨルドの温度構造を明らかにした(図3.4.29)。フィヨルド深部は外洋から流入する比較的暖かい水塊で満たされており、表層部には氷河融解水を起源とする冷たく塩分濃度が低い懸濁水が存在する。この結果は、氷河底面からの融解水湧昇がフィヨルドの循環を駆動し、

氷河末端融解を促進するとする仮説と整合するものである。このようなカービング氷河と海洋の相互作用は、地球規模の気候変動を駆動する海洋循環の変化とも密接に関係するプロセスである。したがって、本研究で明らかになった海洋構造の長期的な変化、および氷河氷床・海洋相互作用の詳しいメカニズムの解明が、今後の課題として示された。

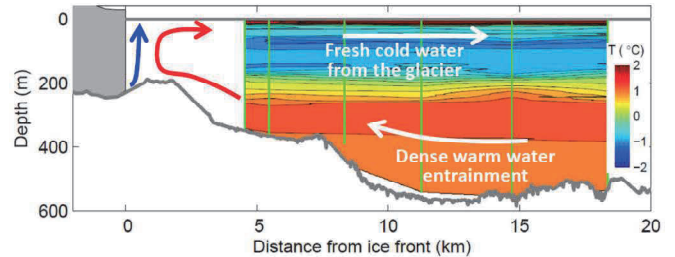


図3.4.29 Bowdoin 氷河前のフィヨルド地形と海水温度分布。底層に塩分濃度の高い暖水、表層に融解水を含む冷水の存在が明らかになった(杉山他, 2015)。

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

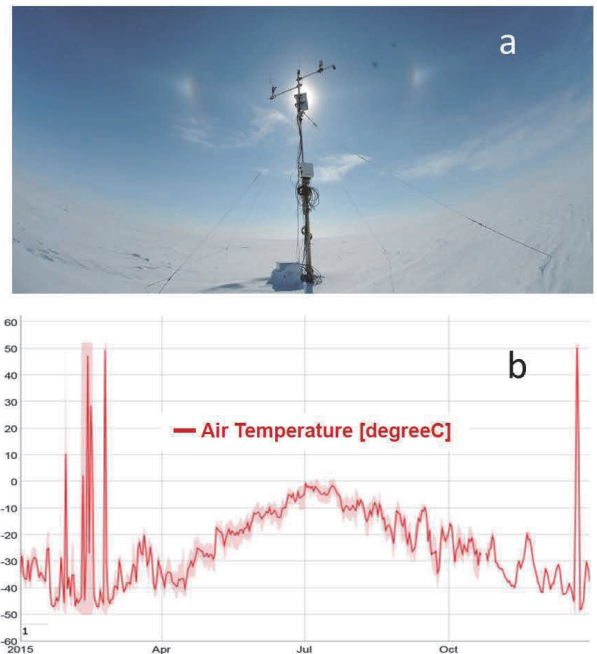


図3.4.30 (a) 氷床内陸(SIGMA-D: 北緯77.64度、西経59.12度、標高2100 m a.s.l.)に設置したAWSと、(b) ADSに公開中の気温データ(Matoba et al., 2015)。

またSIGMA-D地点では2014年5月に225 mのアイスコアを、標高1500 mのSIGMA-A地点(北緯78.05度、西経67.63

度)と標高 1800 m 地点の SIGMA-A2 (北緯 78.10 度、西経 64.08 度)でそれぞれ 19 m、7m の雪氷コアを採取し、水同位体比とナトリウムイオン濃度の季節変動から、過去の涵養量の変化を推定した (図 3.4.31)。

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

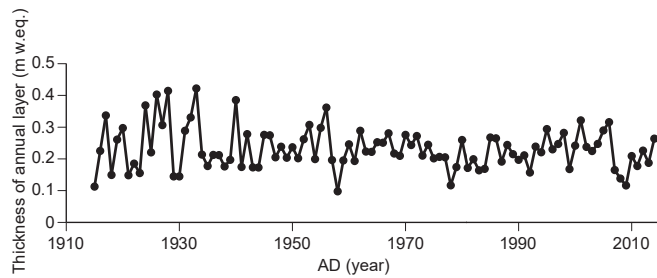


図 3.4.31 アイスコアから推定された涵養量の時間変化。小氷期以降、涵養量はほぼ一定であることが示された (門田修士論文, 2016)。

数値実験によるグリーンランド氷河氷床変動の解析

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

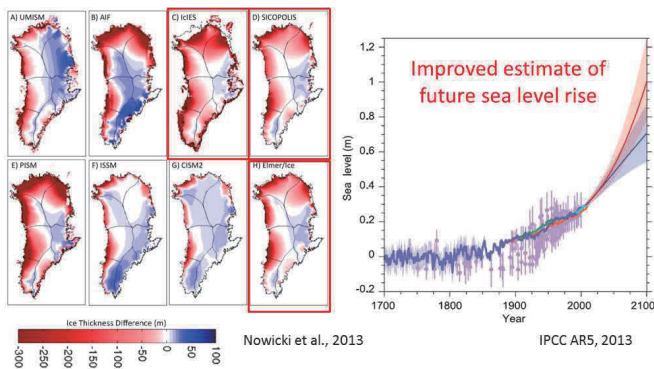


図 3.4.32 IPCC AR5¹⁾におけるグリーンランド氷床モデルの比較。国際比較における三つのモデル結果の提出を行なっている (Nowichi et al., 2013)。

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

や Saito et al. (2016a) としてまとめられた。

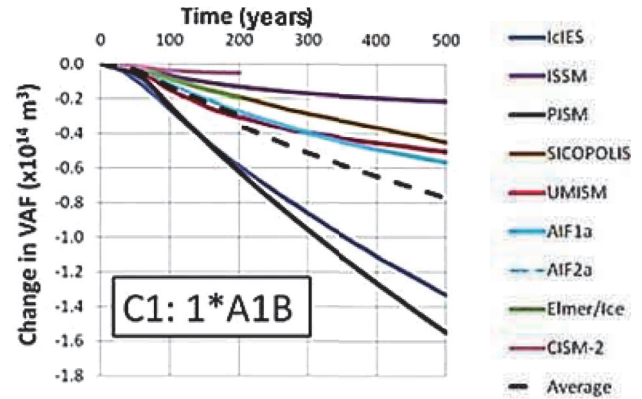


図3.4.33 SeaRISE (Bindschadler et al., 2013) によるグリーンランド氷床の温暖化実験結果。A1B シナリオ下での500年の体積変動を示したもの。SICOPOLIS、Elmer/ICE、IcIESが日本から参加したモデル。

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

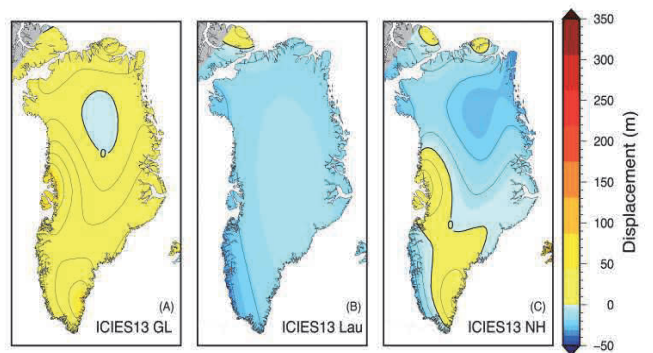


図 3.4.34 固体地球モデルによって求められた現在のグリーンランド氷床上の地殻変動量の再現。(A) グリーンランド氷床のみの寄与 (B) 過去の北米氷床変動の寄与 (C) 全体の変動。

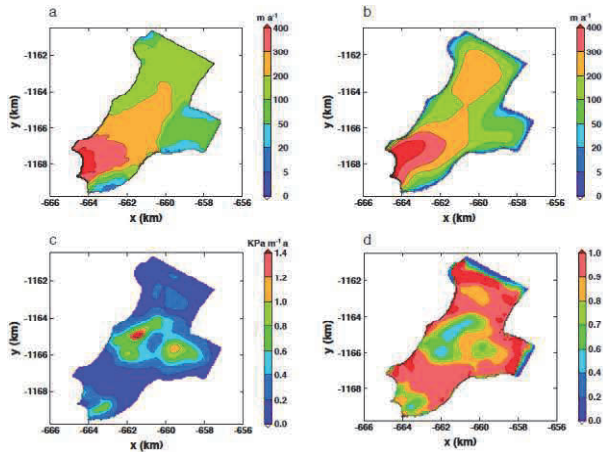


図 3.4.35 (a) 衛星データで測定したボードイン氷河の流動速度。(b) 数値実験によって計算された流動速度、(c) 底面流動係数、(c) 底面流動が全流動速度に占める割合 (Seddik et al., unpublished data)。

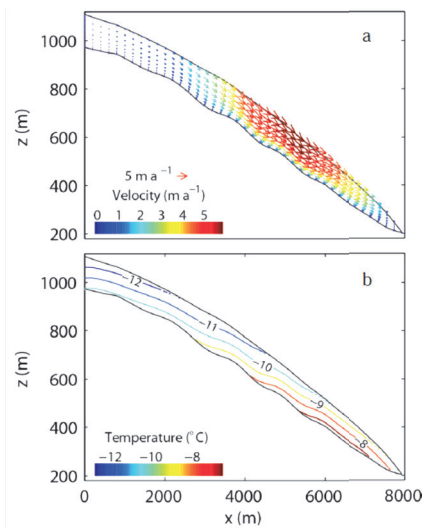


図 3.4.36 カナック氷帽縦断面について計算された (a) 流動速度と (b) 氷温度の分布 (Sugiyama et al., 2014)。

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

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

引用文献

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

V. 北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明

研究課題5 研究代表者：青木周司

1. 研究実施概要

執筆者：青木周司

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

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

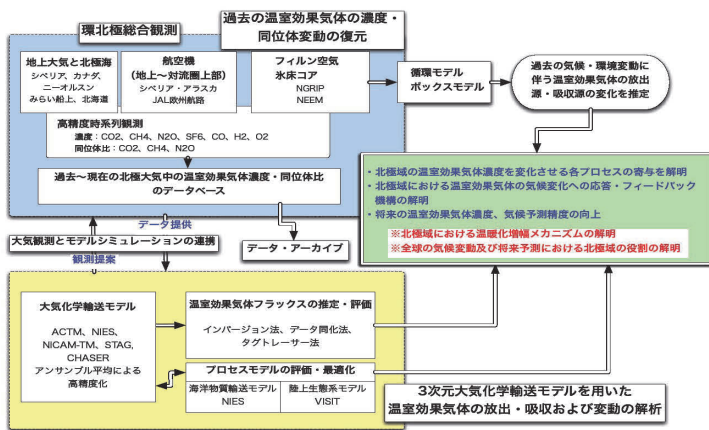


図 3.5.1 本研究の実施体制

まず、本研究では図3.5.2に示すような観測網を展開し、温室効果気体の現状や過去の変動を詳細に把握した。具体的には、北半球高緯度域における大気中のCO₂やメタン、一酸化二窒素などの温室効果気体やそれに関連する酸素などの濃度および同位体の分布や変動を、地上基地、航空機、船舶を用いた総合的な観測から詳細に明らかにした。さらに、グリーンランドなど

で採取された氷床コアやフィルン空気を分析することにより、過去から現代までの温室効果気体の濃度と同位体の変動も明らかにした。また、温室効果気体および関連物質の変動では北極海も重要な役割を果たしていると考えられているが、その実態はほとんど知られていなかったため、「みらい」による海洋観測も毎年実施した。

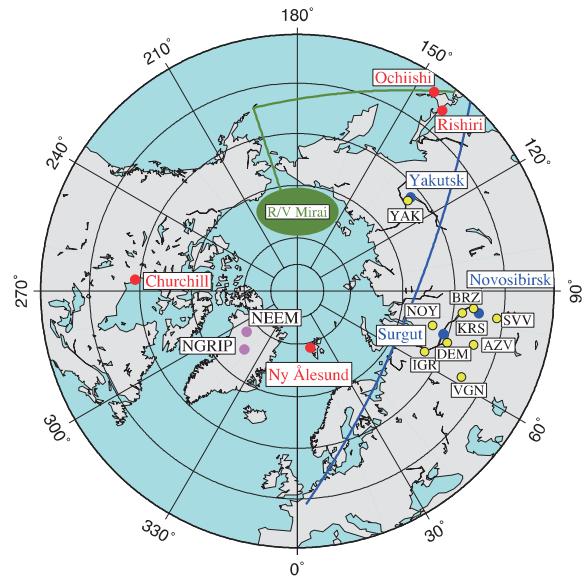


図 3.5.2 本研究で構築した温室効果気体の環北極観測網。図の赤丸は地上観測基地、黄色の丸はタワー観測地点、青丸は小型航空機を用いた観測地点を示す。また、青線は日本と欧州を結ぶ定期旅客機を用いた観測線を、緑の領域は「みらい」による航海観測領域を、紫の丸はグリーンランドの氷床掘削およびフィルン空気採取地点を示す。

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

2. 温室効果気体の環北極総合観測

執筆者：後藤大輔、村山昌平、森本真司
町田敏暢 石井雅男

要旨

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

(1) 地上観測基地を利用した温室効果気体観測

執筆者：後藤大輔、村山昌平、森本真司

ニーオルスンでの大気中 CO₂ 濃度、O₂ 濃度観測による CO₂、O₂ 収支の解明

化石燃料の消費によって大気に放出された CO₂ は、一部は海洋に、一部は陸上生物圏に吸収され、残りは大気中に残留して大気中の濃度増加として観測される。海洋と陸上生物圏に吸収される CO₂ の量的な理解は、将来の CO₂ 濃度予測する上で最も重要な情報である。本研究では、海洋および陸上生物圏の CO₂ 吸収量を定量的に評価するため、スバル諸島ニーオルスンにおいて、フラスコサンプリング法による系統的な大気中 CO₂ 濃度および O₂ 濃度 (O₂/N₂ 比: δ (O₂/N₂)) の高精度時系列観測を実施した。さらに、大気中 δ (O₂/N₂) および CO₂ の様々な時間スケールの変動をより詳細に把握するため、ニーオルスン現地での連続観測を開始した。

化石燃料の燃焼や陸上生物圏の呼吸・光合成において CO₂ と O₂ は同時に交換されるが、大気海洋間ではそれぞれ独立して交換される。このような CO₂ と O₂ の振る舞いの違いを利用することで、大気中の CO₂ と O₂ の濃度変化から海洋と陸上生物圏の CO₂ 吸収量を分離して推定することが可能になる。観測される大気中の CO₂ および O₂ の濃度変化をそれぞれ ΔCO₂、ΔO₂ とすると、大気中の CO₂ および O₂ の収支は以下のように表すことができる。

$$\Delta CO_2 = F - B - O \quad (1)$$

$$\Delta O_2 = -1.4F + 1.1B - Z \quad (2)$$

ここで、F は統計データから得られる化石燃料燃焼による CO₂ 放出量、B および O は陸上生物圏、海洋による CO₂ 吸収量、1.4 及び 1.1 はそれぞれ化石燃料の燃焼と陸上生物活動による O₂ と CO₂ の交換比、Z は海洋からの正味の O₂ 放出量である。式 (1)、(2) を解くことにより、陸上生物圏の吸収量 B 及び海洋の吸収量 O は次のように計算される。

$$O = (-0.3F - \Delta O_2 - 1.1\Delta CO_2 - Z)/1.1 \quad (3)$$

$$B = F - \Delta CO_2 - O \quad (4)$$

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

$$O = (-0.3F - \Delta APO - Z)/1.1 \quad (5)$$

本研究においても海洋の吸収量 O の推定に (5) 式を用いた。

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

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

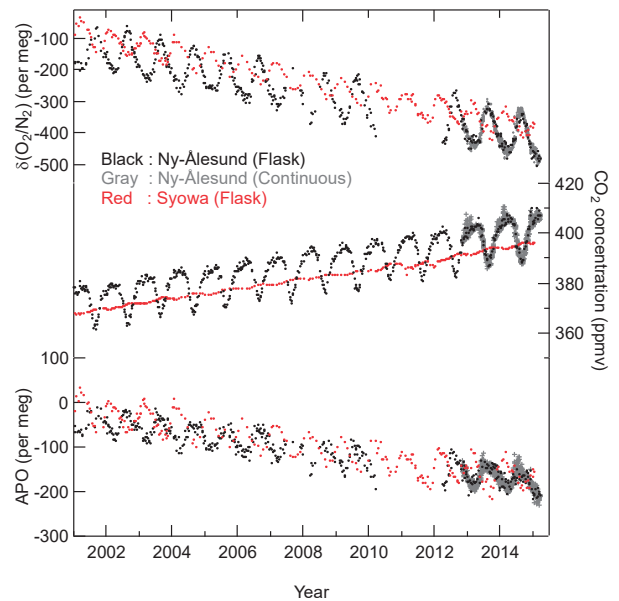


図 3.5.3 ニーオルスン (黒) 及び昭和基地 (赤) で観測された大気中の δ(O₂/N₂) (上)、CO₂ 濃度 (中) および APO (下) の変動。ニーオルスンにおける 2011-2012 年の欠測は大気サンプリングシステムの不具合による。灰色はニーオルスンにおける連続観測結果 (日平均値) を示す。

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

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

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

ニーオルスンで観測された大気中CO₂、CH₄、CO濃度の変動とその起源解析

北極域を含む北半球高緯度域には、温室効果気体の全球規模循環に影響を与える放出・吸収源が多数存在している。この緯度帯では、温暖化に伴って自然起源の温室効果気体の放出が増大する一方で、北方林によるCO₂吸収が強化される可能性や、海氷面積減少に伴って大気–海洋間の物質循環が変化する可能性等が予想されている。同緯度帯での温室効果気体の放出・吸収源は時間的に大きく変動する上に空間分布が不均一であるため、大気中の濃度は大気輸送の影響を受けて大きく変動する。その変動要因を詳細に明らかにするには、高時間分解能の連続観測が必要となる。また、放出・吸収源を特定するためには、複数成分のデータを組み合わせた解析が有効であると考えられ

る。このような背景の元で、本研究ではレーザー分光法を用いたCO₂、CH₄、COの3成分同時連続観測装置を開発し、2013年9月にニーオルスンにおいて連続観測を開始した。

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

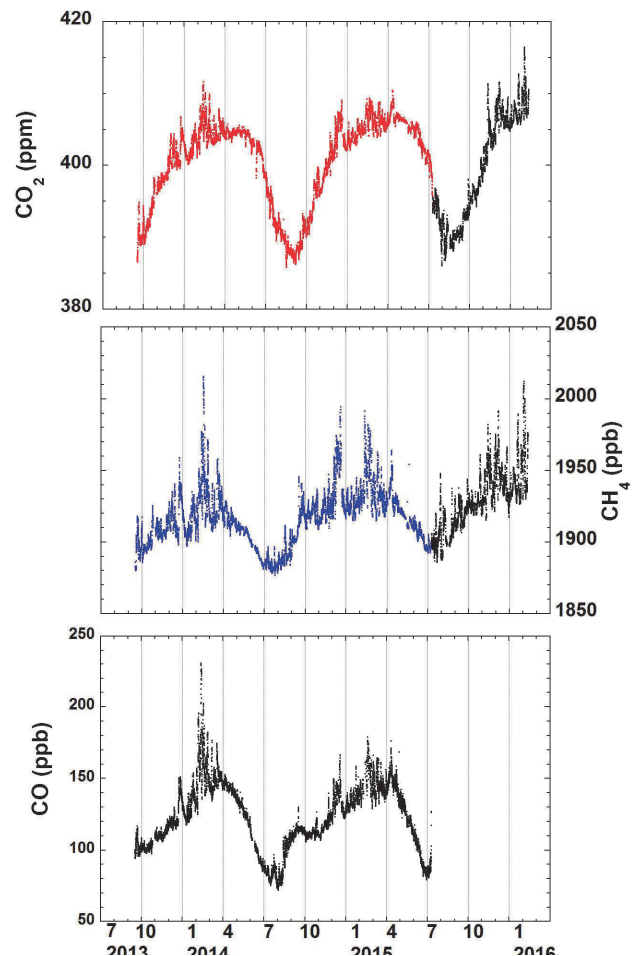


図 3.5.4 ニーオルスンで観測されたCO₂ (上)、CH₄ (中)、CO (下)濃度の1時間平均値の変動。分析計の交換(本文参照)の前後で、プロットの色を変えている。

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

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

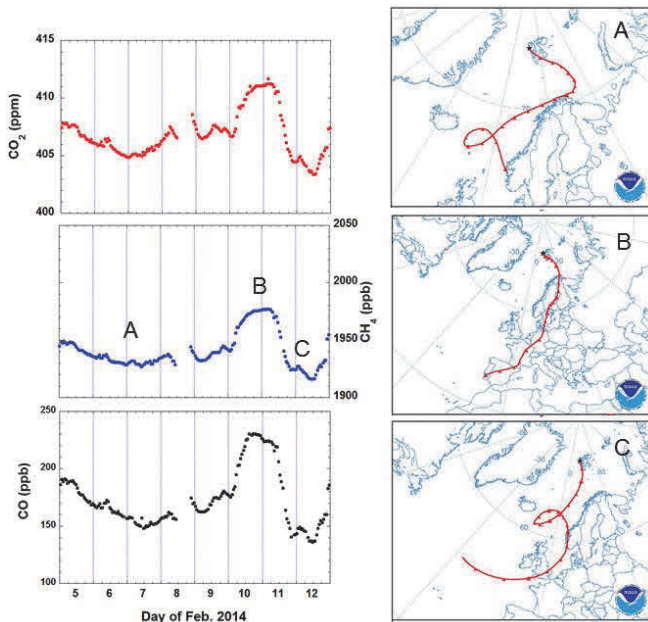


図 3.5.5 数日スケールの濃度変動イベント (CO₂ (上)、CH₄ (中)、CO (下)) と NOAA の流跡線解析モデルにより得られたイベント時のニーオルスンに到達した気塊の 5 日間後方流跡線の例

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

本研究により、北極域における大気中 CO₂、CH₄、CO 濃度に関する高時間分解能の観測データが得られた。今後さらに観測を継続してデータを蓄積し、大気輸送モデルや陸域生態系モデル等を用いた解析を行って各成分濃度の変動要因を明らかにしていくことにより、急速に進む北極域の気候変動が温室効果気体の循環に与える影響を推定する際の不確定性の低減に貢献することが期待される。

北極域での CH₄ 同位体比観測による、大気中 CH₄ 濃度変動原因の推定

CO₂ に次いで重要な温室効果気体である大気中の CH₄ について、その濃度変動の原因、つまり地球表層での CH₄ 収支の変化を明らかにすることは将来の CH₄ 濃度予測の高精度化に不可欠である。しかし、CH₄ の放出源が湿地域での有機物分解や反芻動物の腸内発酵、化石燃料採掘や森林・泥炭火災まで非常

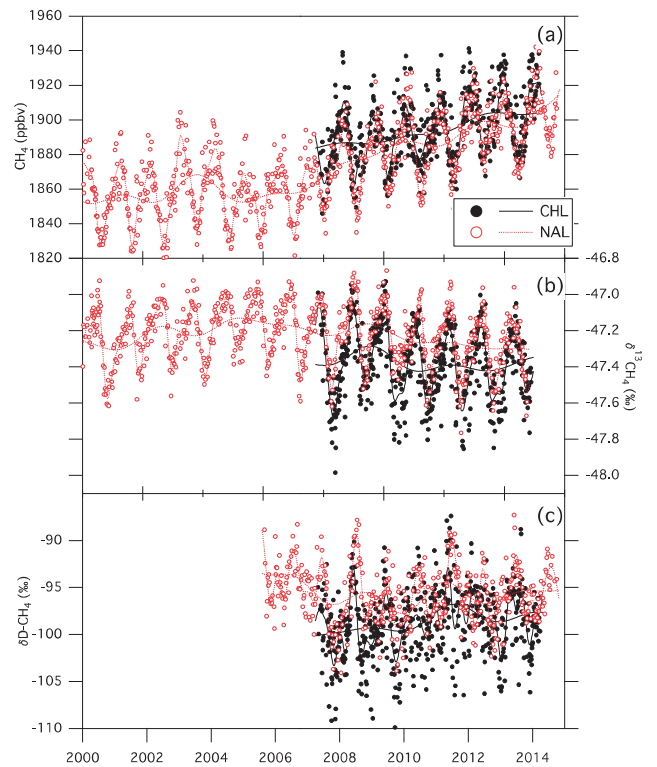


図 3.5.6 ニーオルスン (赤)、チャーチル (黒) で観測された大気中 CH₄ 濃度 (上)、 $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ (中)、 $\delta\text{D}-\text{CH}_4$ (下) の変動

に多岐にわたるため、観測された大気中 CH_4 濃度の変動のみからその変動原因を解釈することは困難であった。本研究では CH_4 濃度の変動原因についての知見を得ることを目的として、スバル諸島・ニーオルスン及びカナダ・チャーチルにおいて、 CH_4 濃度と CH_4 放出源に関する情報を持つ CH_4 の炭素・水素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$) の系統的な観測を実施した²⁾。ニーオルスンは近傍に CH_4 放出源が存在しないため、北極域大気のバックグラウンド状態の観測に適している。一方のチャーチルはハドソン湾低地の湿地域北端に位置しており、重要な CH_4 放出源の一つである湿地域の影響を強く受けると考えられる。また、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ は、 CH_4 の放出源毎に特徴的な値を示すことが知られているため、 CH_4 濃度と $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ の同時高精度観測によって CH_4 濃度の変動原因を推定することが可能である。

図 3.5.6 に、ニーオルスン (2000 年以降)、チャーチル (2007 年以降) における CH_4 濃度、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ の観測値と、ベスト・フィット・カーブ及び長期変化成分の変動を示す。

ニーオルスンでは、 CH_4 濃度、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ それぞれに明瞭な季節変動が観測された。 CH_4 濃度と $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ の季節変動はほぼ逆位相であり、 CH_4 濃度の極大・極小値および $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ の極小・極大値はそれぞれ 1-3 月、7 月に観測された。一方で、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ の季節変動には CH_4 濃度、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ と比較して位相が異なっており、極大・極小値はそれぞれ 9-10 月、6 月に観測された。 CH_4 濃度、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ の平均的な季節振幅はそれぞれ 45 ppb、0.42 ‰、5.9 ‰であった。一方、チャーチルでの観測値は、ニーオルスンと比較して CH_4 濃度が高く、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ は同位体的に軽い値を示した。これは、チャーチル周辺の湿地から大量の CH_4 が放出されていることを反映していると考えられる。チャーチルで観測された CH_4 濃度、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ の季節変動をニーオルスンと比較すると、 CH_4 濃度の極小値、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ の極大値の出現時期が全て 1 ヶ月程度早いことが明らかとなった。また、 CH_4 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ の季節変動の平均振幅はそれぞれ 37.8 ppb、4.5 ‰であり、ニーオルスンよりも小さいが、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ の振幅は 0.44 ‰と同程度であった。ニーオルスン、チャーチルにおける CH_4 濃度、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ の季節変化について CH_4 、 $^{13}\text{CH}_4$ 、 CH_3D の収支を解析し、微生物起源、化石燃料起源及びバイオマスバーニング起源 CH_4 それぞれの、 CH_4 濃度の季節変化に対する寄与を見積もった。その結果、 CH_4 濃度の季節変化は主に 6-9 月の微生物起源 (湿地など) の CH_4 放出と OH との反応による CH_4 消滅のバランスによって生じており、バイオマスバーニングと化石燃料起源 CH_4 の影響は相対的に小さいことが明らかになった。また、微生物起源 CH_4 の影響が最大になる時期は、

チャーチルの方がニーオルスンよりも約 1 ヶ月早いことが示唆された。

ニーオルスンで観測された CH_4 濃度は 2000 年までは年々増加していたが、2000 年から 2005 年までは濃度増加が停滞し、その後 2006 年から再度増加するという複雑な変動を示した。2006 年以降の CH_4 濃度の再増加について、OH ラジカルとの反応による CH_4 消滅量に経年的な変化がなかったと仮定した上で、 CH_4 濃度と $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ の観測値を用いて CH_4 、 $^{13}\text{CH}_4$ の収支解析を行った。その結果、2006 年以降に観測された CH_4 濃度の再増加は、微生物起源・湿地起源の CH_4 放出量の増大に起因することが示唆された。

CH_4 濃度と同位体比の同時高精度観測データは、 CH_4 放出源の変動を評価する上で最も重要な拘束条件の一つである。将来の温暖化による永久凍土の融解や海水温上昇によって地球表層でのメタン収支がどのように変化するかを明らかにするために、今後も CH_4 濃度・同位体比の系統的な観測を維持することが必要である。

(2) 航空機観測

執筆者：町田敏暢

航空機観測サブグループでは、チャーター機を利用したシベリア上空でのデータの収集および、民間航空機を利用した北極域上空における温室効果気体の観測を実施した。

チャーター機による観測

シベリア域におけるチャーター機を使った温室効果気体の観測は国立環境研究所のモニタリングプロジェクトによって、スルグート (61° N, 73° E)、ノボシビルスク (55° N, 83° E)、ヤクーツク (62° N, 129° E) の 3 か所上空において高度約 7km までの大気をサンプリングし実験室に持ち帰ってサンプル大気中の濃度を分析する方法で実施されている (Sasakawa et al., 2013, Umezawa et al., 2012)。本課題では観測データを処理し、同じ課題内のモデリングサブグループに提供して温室効果気体の発生源の定量に利用した。

スルグート上空では 20 年以上のデータの蓄積がある。例としてスルグート上空における CO_2 濃度の時系列を図 3.5.7 に示す。高度 1km における CO_2 濃度の季節振幅は約 23 ppm であり、これは同緯度帯の沿岸域で観測される振幅 (15-18 ppm) に比べて明らかに大きく、内陸ではシベリアの植生の影響を直接受けて経度方向に CO_2 濃度の不均質を作り出していることがわかる。高度 7km の季節振幅は高度 1km の約半分であり、 CO_2 は大気中で化学的に安定なので地上で陸上生態系が作り出

した季節変動のシグナルは上空に伝搬するにあたって減衰していることがわかる。高度 7km における夏季の最低値の位相は高度 1km に比べて約半月遅れている。一方、CO₂ 濃度の年平均値は高度方向の差がほとんどないことから、スルグート域では CO₂ の放出量と吸収量がほぼ均衡していると考えられる。

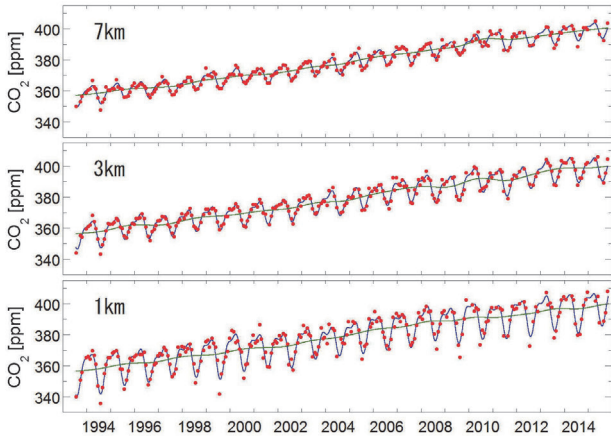


図 3.5.7 スルグート上空の高度 7km、3km および 1km における CO₂ 濃度の変動。赤丸が観測値、青線と緑線はそれぞれフィッティングカーブと経年変動曲線を表す。

スルグート上空では 2005 年より SF₆ 濃度の観測も行っている (図 3.5.8)。観測期間中の SF₆ 濃度はいずれの高度においても 0.30-0.31 ppt/year の割合で一方向的に増加している。

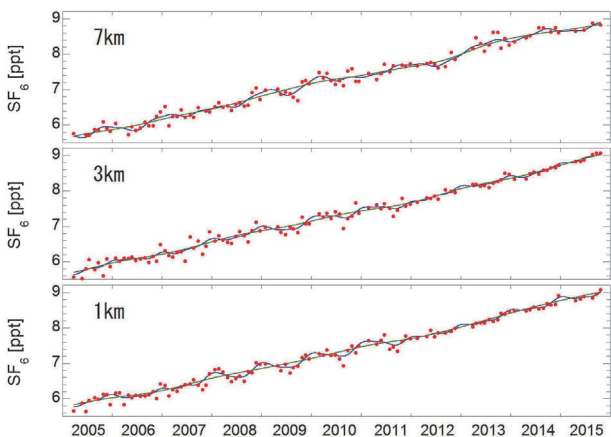


図 3.5.8 スルグート上空の高度 7km、3km および 1km における SF₆ 濃度の変動。

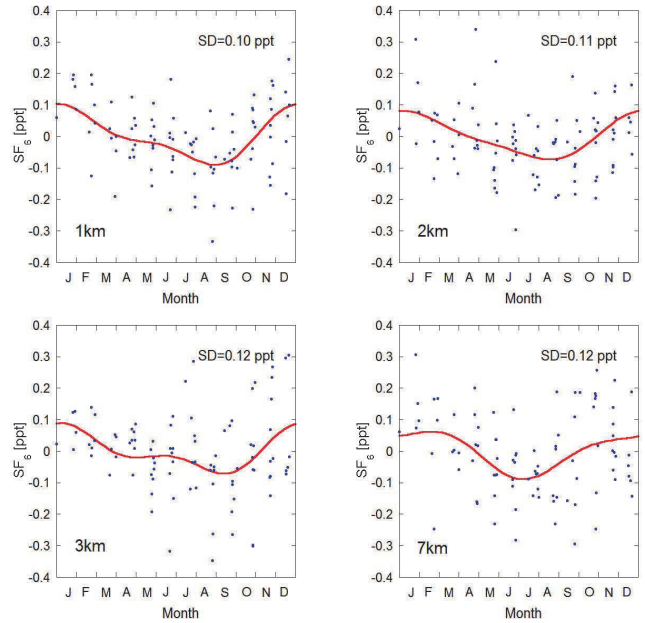


図 3.5.9 スルグート上空における SF₆ 濃度の平均的な季節変動。青丸は経年変動を差し引いた観測値、赤線はフィッティング曲線を表す。SD は観測値のフィッティング曲線からの標準偏差である。

SF₆ は大気中の寿命が 3000 年以上であるので対流圏での季節変動はほとんど報告されていないが、スルグート上空で観測された SF₆ 濃度にはわずかな振幅の季節変動が見られる。図 3.5.9 はスルグート上空における高度別の平均的な季節変動である。季節変動の振幅は観測データのばらつきと同じレベルであるが、低高度で夏季から秋季にかけて濃度が低くなっていることが確認できる。これらの観測値について研究課題 5 のモデリングチームが利用する複数の大気輸送モデルと比較を行ったところ、いずれの計算結果も観測値の位相との一致が見られなかった。SF₆ に関してはこれまで知られている放出源分布または大気輸送に見直しが必要であると言える。

ノボシビルスク上空で採取された大気サンプルは温室効果気体の濃度分析に加え、N₂O の同位体比を測定した。ノボシビルスク上空 500m における N₂O は、濃度が経年的に増加しているのに対し、窒素同位体比は減少していることが確認された。

民間航空機を使った観測

民間の旅客機を利用した観測は、日本と欧州を結ぶ路線上でシベリア上空における高度 10-12km 付近の大気をサンプリングし、CO₂、CH₄、N₂O、SF₆、CO、H₂ の各濃度および CO₂ と CH₄ の安定同位体を測定した。サンプリングは 2012 年 4 月より月に 1 回の頻度で自動大気サンプリング装置 (ASE) を日本航空が運航するボーイング 777-200ER 型機に搭載して行われた。ASE を搭載できる 777-200ER 型機は 2014 年 3 月を最

後に欧州路線を飛行しなくなったために、2014年4月から2015年9月までは日本航空の協力を得て観測者が航空機に搭乗して手動大気サンプリング装置 (MSE) を使って同じ頻度で観測を続けた。なお、同路線の MSE 観測は2015年10月以降も ArCS 予算を利用して、頻度を下げた形で継続している。北極域は圏界面の高度が低いために航空機の巡航高度であっても成層圏を飛行することがある。本研究では気象庁の客観解析データを使って渦位が“2”である高度を圏界面とし、圏界面からの温位差によってサンプリング地点の空気塊を分類した。

図 3.5.10 は圏界面からの温位差 ($\Delta\Theta$) ごとに分類した空気塊の CO_2 濃度、 CH_4 濃度、 N_2O 濃度、 SF_6 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、正の値は成層圏の空気であり、値が大きいくほど高高度であることを示す。上部対流圏の CO_2 濃度は、チャーター機による観測でも見られるように陸域生態系の光合成・呼吸のバランスで夏季に低い濃度を示すが、成層圏の濃度は逆に春季から夏季にかけて上昇しており、対流圏とは逆の位相が観測された。成層圏における夏季の濃度上昇は、上部対流圏の低緯度にある大気が圏界面を横切って高緯度の下部成層圏に輸送されるメカニズムによって引き起こされていると考えられる。一方、秋季から春季にかけての成層圏の CO_2 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 CO_2 が冬季に沈降してることが要因と思われる。

成層圏の CH_4 と N_2O には化学的な消滅反応があるために対流圏との濃度差が明確であり、成層圏における鉛直濃度勾配も大きい。上部対流圏の CH_4 濃度と N_2O 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 CH_4 濃度は OH ラジカルとの反応によって地上付近では夏季に低くなる明瞭な季節変動を示すが、上部対流圏のような低圧下では OH ラジカルとの反応性が低くなるために季節変動は明瞭ではなくなる。また、シベリアのような内陸域では夏季に対流圏内の鉛直輸送が盛んになるので、低高度の高濃度気塊が上空に達しやすいことも季節変動を明確にしない要因と考えられる。 N_2O は対流圏での寿命が長いので濃度の季節変動は見にくい。これに対して成層圏の CH_4 濃度と N_2O 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 CO_2 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、 CH_4 と N_2O は対流圏と成層圏の濃度差ならびに成層圏における鉛直濃度勾配が CO_2 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。

SF_6 は N_2O と同様に対流圏での寿命が長いので、スルグート

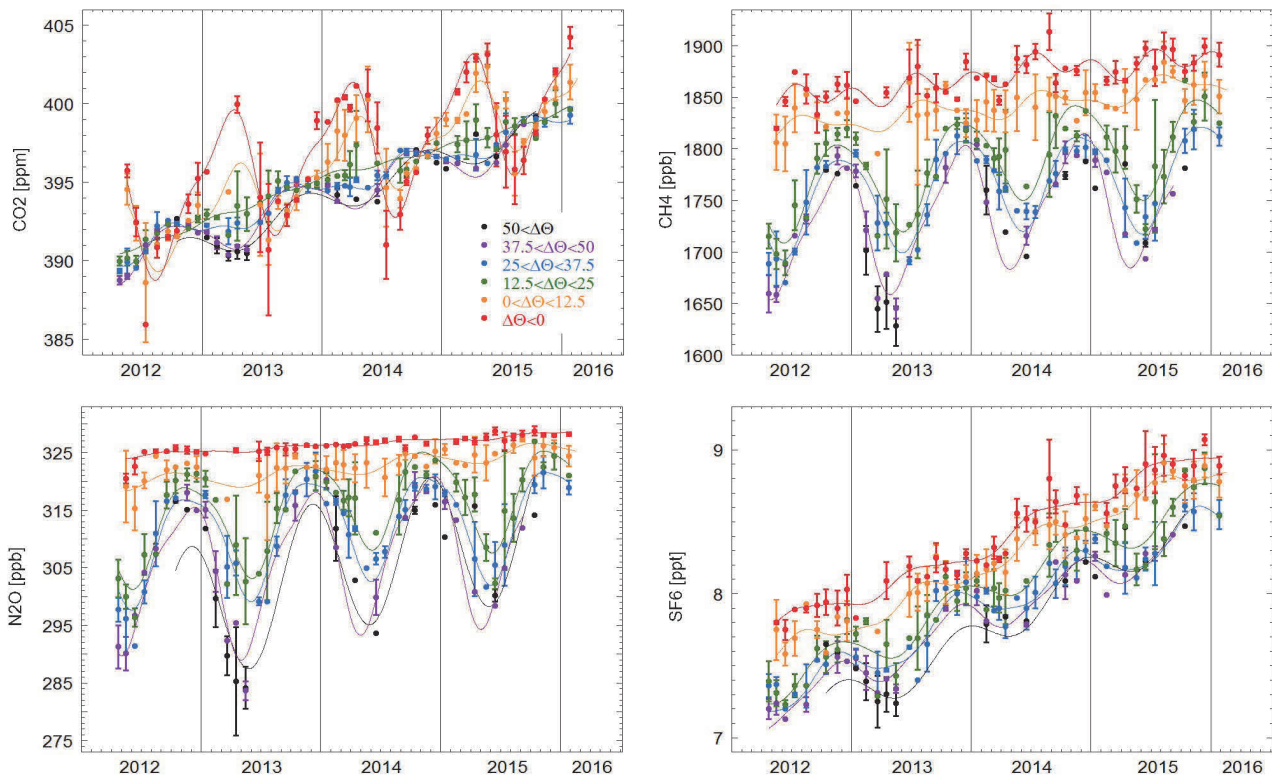


図 3.5.10 2012年4月から2016年1月にかけて北極域上空の上部対流圏と下部成層圏で観測された CO_2 濃度、 CH_4 濃度、 N_2O 濃度、 SF_6 濃度の時系列。色の違いは圏界面からの温位差 ($\Delta\Theta$) を表す。実線はそれぞれの温位差のデータに対して FFT と調和関数でフィッティングした曲線。

上空での観測値と同様に上部対流圏では濃度の季節変動が見いだしにくい。成層圏では対流圏との濃度差と鉛直方向の濃度差があるので、夏季と冬季の輸送によって明瞭な季節変動が観測されている。 SF_6 が大気中で安定であることを利用して、本研究で成層圏において観測された空気塊が対流圏を離れてから経過した平均的な時間（年齢）を知ることができる。成層圏大気の大部分は赤道域の上部対流圏から供給されていると考えられるので、同様な民間航空機による豪州路線で観測された低緯度上部対流圏の SF_6 濃度と高緯度下部成層圏の濃度を比較したところ、 $\Delta\Theta$ が37.5-50 Kの下部成層圏大気は5月に22か月の、11月には9か月の時間差が存在していることが明らかになった（Sawa et al., 2015）。

上部対流圏から下部成層圏で観測された CO 濃度の時系列を図3.5.11に示す。 CO 濃度も対流圏と成層圏での差が明瞭であるが、 CH_4 濃度や N_2O 濃度とは違って $\Delta\Theta$ が25 K以上の成層圏における鉛直勾配がほとんどないことがわかる。これは成層圏に CO にとっての顕著な消滅源が存在しないことと、 CO の経年増加がほとんどないために空気年齢による濃度差が小さいためであると考えられる。

一方、上部対流圏には季節変動が存在し、春季から初夏にかけて極大値を示している。 CO の対流圏における主たる消滅源は OH ラジカルとの反応であり、主に夏季に消滅が盛んになるので、このメカニズムだけでは図3.5.11の季節変動を説明できない。夏季に上部対流圏の CO 濃度を上昇させる要因として、地表付近の大気の鉛直輸送が考えられる。シベリア上空における夏季の鉛直輸送は CH_4 濃度や CO_2 濃度の季節変動も矛盾なく説明できる。大気の鉛直混合は夏季の内陸域での微量気体の変動を考える上で非常に重要な要素であることが、本課題による観測結果から言うことができる。

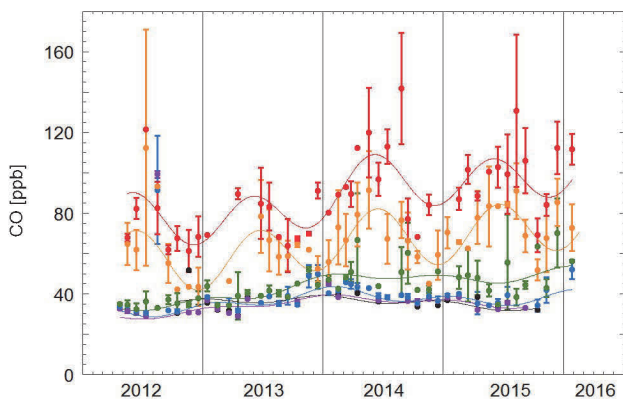


図 3.5.11 図 3.5.10 と同様。ただし CO 濃度の時系列。

(3) 船舶観測

執筆者：石井雅男

要旨

北極海では、夏に海氷面積の縮小が顕著に進行している。2012 年から 2015 年の 9 月中旬の平均海氷面積は、1980 年代の同時期の平均海氷面積の 60%にまで減少した。海氷面積や氷厚の減少は、海洋表層の塩分構造、光環境、熱フラックス、大気・海洋相互作用などを変化させ、さらに海洋の循環、物質循環、生物生産、生態系を変化させることで、温室効果気体の動態にも顕著に影響していると考えられる。

2012 年から 2015 年の毎年 9 月から 10 月に実施された海洋地球研究船「みらい」の MR12-E03、MR13-06、MR14-05、MR15-03 の各航海に担当者が乗船し、研究課題 6 の参加者と協力して、海氷面積が 1 年の中で最も縮小する 9 月初めから 10 月初めに、チャクチ海とカナダ海盆域において、温室効果気体に関わる洋上大気と海洋表層水の航走観測や試料採取を行った。測定項目は、大気が CO_2 濃度とその $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比、 CH_4 濃度、 O_2/N_2 比など、表層海水が CO_2 分圧、全炭酸濃度、溶存 O_2 濃度、 CH_4 分圧、クロロフィル蛍光、水温、塩分など多岐にわたった。これらのデータから、表層海水と大気間の CO_2 、 O_2 、 CH_4 の動態や、それらに対する海氷融解や生物活動の影響などについて評価した。

海洋表層の夏の二酸化炭素分圧の変動

チャクチ海とカナダ海盆では、海洋表層の CO_2 分圧が空間的に極めて大きく変化した。たとえば 2013 年 9 月の観測では、最低値が 151 μatm だったのに対して、最高値は 532 μatm に達した。しかし、観測値は概ね 200 μatm から 350 μatm の範囲にあり、大気の CO_2 分圧（ $\sim 385 \mu\text{atm}$ ）に対して未飽和の状態にあった（図 3.5.12）。水深が 100m より浅いチャクチ海では、海洋表層の CO_2 分圧が特に低かった（ $235 \pm 44 \mu\text{atm}$ ）。人工衛星からの海色観測によると、チャクチ海では 6 月から 7 月に植物プランクトンが大増殖する。チャクチ海で海洋表層の CO_2 分圧が特に低かった原因は、それ以後の生物生産により CO_2 が多く消費されたためである。

これに対して、水深が 1000m を超えるカナダ海盆では、海洋表層の CO_2 分圧がチャクチ海に比べると平均しておよそ 100 μatm 高く（ $330 \pm 27 \mu\text{atm}$ ）、表層海水中の CO_2 分圧が大気の CO_2 分圧に近かった。また、塩分はチャクチ海が概ね 29–32 だったのに対して、カナダ海盆では 27 以下だった。チャクチ海やカナダ海盆域では、これらの海域にベーリング海峡を通過して流入する太平洋の表層水（塩分 32.9）に、河川水や海氷融解水が加わることで表層の塩分が低下している。 CO_2 分圧と全炭酸濃度などの観測データから全アルカリ度を計算し、その塩分と

の関係を調べることで、カナダ海盆の塩分低下に対する河川水と海水融解水の加入の寄与をそれぞれ評価したところ、河川水の混合比率が平均 10% だったのに対して、海水融解水の混合比率は平均 16% に達した。海洋上層の鉛直分布を見ると、塩分が特に低い層は水深 10m から 20m までに限られており、主に海水融解水の流入によって密度成層が形成されていた。それ以深では、溶存酸素が $10\text{--}40\ \mu\text{mol kg}^{-1}$ ほど過飽和の状態だったと同時に、全炭酸濃度と全アルカリ度などから計算した CO_2 分圧が、チャクチ海の表層と同じ程度に未飽和だった。

これらのことから、カナダ海盆でも海洋表層下では、生物生産が高いために CO_2 未飽和の状態になっていたが、表層は栄養塩の乏しい海水融解水に覆われることで生物生産が抑制されており、 CO_2 の吸収は弱くなっていたことが分かった。このことは、今後、夏の海水融解がさらに進行したとき、表層の成層構造を崩すような擾乱が広い範囲で起きない限り、北極海の CO_2 吸収が大きく増えるとは言えないことを示している。

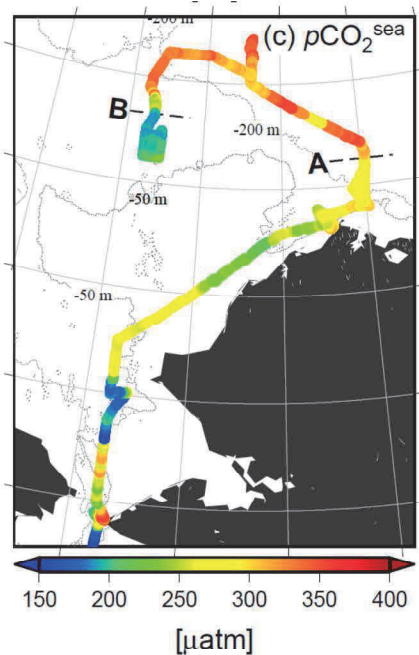


図 3.5.12 MR13-06 航海 (2014 年 9 月) で観測したチャクチ海とカナダ海盆域の海洋表層の CO_2 分圧。

北極海の二酸化炭素吸収

1997 年 1 月から 2013 年 12 月までの 204 ヶ月それぞれについて、北緯 60 度以北の北極海及びその周辺海域全体を対象に海洋表層の CO_2 分圧分布を推定し、大気・海洋間 CO_2 フラックスの季節変化・年々変化とそれらの海域分布を評価した。 CO_2 分圧の観測データは、データベース SOCATv3、LDEO V2014 及び本研究においてチャクチ海やカナダ海盆で取得した

MR12-E03 や MR13-06 航海の観測データや、GLODAP の全炭酸濃度・全アルカリ度データから計算で求めた値を使用した。これらのデータに、水温、塩分、海水密度、大気 CO_2 濃度、緯度・経度に基づく自己組織化マッピング法を適用して、 CO_2 分圧を時間・空間的に内挿・外挿した。 CO_2 フラックスの計算には、NCEP2 再解析データの風速場を利用した。

1997 年から 2013 年の 17 年間の大気・海洋間 CO_2 フラックスの平均値は $-180 \pm 210 \text{TgC yr}^{-1}$ で、北極海は大気からの CO_2 の吸収域であると推定された。しかし、ユーラシア海盆や東シベリア海などでは観測データが著しく少ないことや、海水密度とガス交換係数の関係に不確かさが大きいことから、 CO_2 フラックスの評価にも大きな不確かさがある。海洋への CO_2 吸収速度は、風が強い冬のグリーンランド海・ノルウェー海 ($>15\ \text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$) とバレンツ海 ($>12\ \text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$) や、本研究でも観測を行った夏のチャクチ海 ($\sim 10\ \text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$) で大きく、これらの海域では季節変化の振幅も $10\ \text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ と同等かこれを超えるほど大きかった (図 3.5.13)。これに対してユーラシア海盆、カナダ海盆、ラプテフ海、東シベリア海では、大気から海洋への CO_2 フラックスは年間を通じて比較的小さく、誤差 ($3.4\text{--}4.6\ \text{mmol m}^{-2} \text{day}^{-1}$) 範囲内と推定された。 CO_2 フラックスの季節変化は、主に風速の変化に支配されているのに対して、その年々変化は主に海洋表層の CO_2 分圧の変化に起因していた。グリーンランド海とノルウェー海では、近年の水温低下傾向に伴う大気海洋間 CO_2 分圧差の増大により、海洋への CO_2 吸収が増加する傾向が見られた。近年海水氷が減っているバレンツ海では、北部で CO_2 吸収が増加する一方、南部では減少する傾向が見られ、海水減少に対する CO_2 吸収の変化は、海域によって異なっていた。

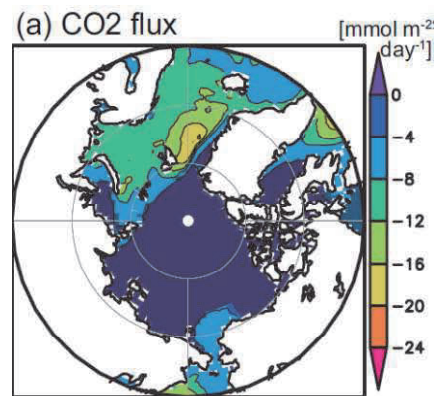


図 3.5.13 北極海における大気・海洋間フラックスの平均分布 (1997-2013)

大気・海洋間の酸素フラックス

海洋地球研究船「みらい」で採取した北極海域内の大気の O_2/N_2 比は、毎年 9 月から 10 月初めの観測期間中に、 $30\text{--}50\ \text{per meg}$ ほど低下した。これと同期して大気中の CO_2 濃度の上昇や

その $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の低下も観測されたことから、 O_2/N_2 比の低下は、主に北極海を取り巻く陸の植生の呼吸の季節的な増加に起因すると考えられる。しかしながら、 O_2/N_2 比と CO_2 濃度の観測値から求めた APO (Atmospheric Potential Oxygen = $\delta(\text{O}_2/\text{N}_2) - 1.1 \cdot x\text{CO}_2/x\text{O}_2 - 2000$) も、10–20 per meg ほど低下していることから、海洋への O_2 吸収も、この季節の O_2/N_2 比の低下に寄与していることが分かった (図 3.5.14)。

特に、APO の時間変化の中でも数日スケールの変化は、海洋表層の溶存 O_2 濃度などに基づいて計算した大気・海洋間の O_2 フラックスの変動によって概ね矛盾なく説明することができた。このことは、チャクチ海などで観測された活発な生物生産が、表層水温の変化とともに、大気・海洋間の CO_2 フラックスだけでなく、 O_2 のフラックスにも顕著な影響を及ぼしていることを示している。化石燃料消費や土地利用変化によって人為的に排出された CO_2 の収支を、大気 O_2 濃度の変化に基づいて評価する上で、大気・海洋間の O_2 交換は、評価の不確かさを生む要因となっているが、この観測結果は、スバルバルや仙台での観測結果とともに、海洋における生物生産に伴う O_2 フラックスの変化を考慮する必要性の高さを示している。

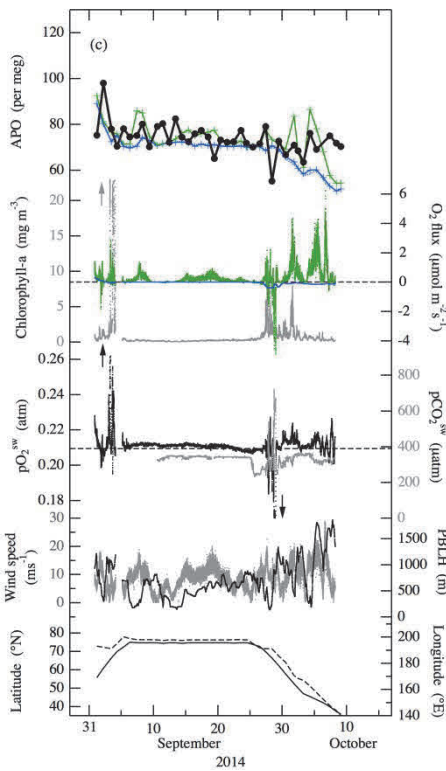


図 3.5.14 「みらい」MR14-05 航海 (2014 年 9 月~10 月) において北極海で観測した APO、海洋からの O_2 フラックス、クロロフィル濃度、海洋表層の O_2 分圧と CO_2 分圧、風速、大気境界層の厚さ、緯度・経度の時間変化。

海洋表層の夏のメタン分圧の変動

洋上大気と海洋表層の CH_4 分圧観測を実施するため、北極海観測では世界で初めてキャビティリングダウン分光法を導入し、 CH_4 分圧を高い時間解像度で航走観測することに成功した。

海洋表層の CH_4 分圧は、多くの場合 $2 \mu\text{atm}$ 程度の数値を示し、他の海域と同様に大気中のメタンに対していくらか過飽和の状態にあった。しかし、アラスカのバロー岬沖、ベーリング海峡付近、チャクチ海の北部では、それぞれ $6.1 \mu\text{atm}$ 、 $4.5 \mu\text{atm}$ 、 $3.6 \mu\text{atm}$ の高メタン域が見つかった (図 3.5.15)。

バロー沖・ベーリング海峡付近とチャクチ海北部では、海洋表層でメタン分圧がスポット状に高かった原因が、全く異なっていた。バロー沖とベーリング海峡付近の沿岸域海洋表層の CH_4 分圧が高かった場所では、海水の CO_2 分圧や酸素消費 (AOU) も高かった。また、バロー岬沖では表層水に多くの懸濁粒子が含まれていた。これらのことから、バロー沖やベーリング海峡付近では、海底堆積物の影響を受けた海水が、沿岸の湧昇流などによって表層に運ばれたために、 CH_4 分圧が上昇したと考えられる。一方、チャクチ海北部では、 CO_2 分圧や AOU は低く、クロロフィル蛍光値は高かった。これらのことから、チャクチ海北部の高い CH_4 分圧は、現場付近の生物活動 (たとえば動物プランクトンの消化器官からの発生) に起因していることが示唆された。

なお、ラプテフ海のシベリア沿岸域で広く見つかっており、海底の永久凍土融解に起因するとされるような、分圧が数十 μatm にも上る高メタン域³⁾は、チャクチ海やカナダ海盆では今のところ見つかっていない。

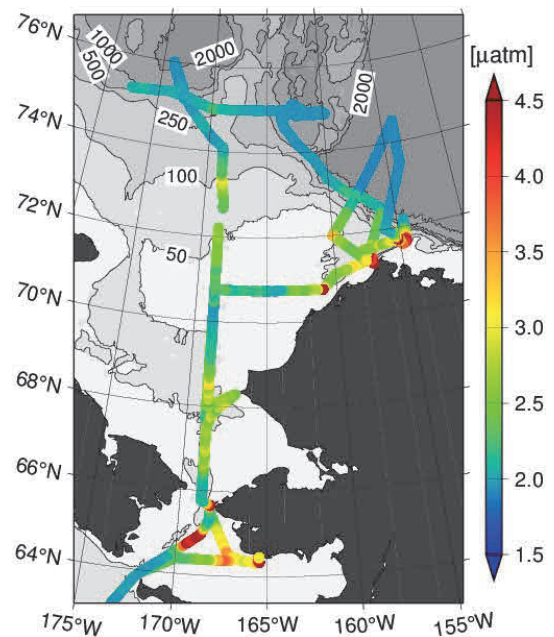


図 3.5.15 MR12-E03 航海 (2012 年 9~10 月) で観測したチャクチ海とカナダ海盆域の海洋表層の CH_4 分圧

3. 氷床コア・フィルン空気分析による過去 100 年間の温室効果気体の推定

執筆者：菅原敏、川村賢二

要旨

(1) NGRIP フィルン空気を用いた温室効果気体の分析結果とフィルン空気拡散モデルを用いた解析によって、北極における過去 100 年間程度のメタン濃度の変動を明らかにした。さらに、モデル研究グループと共同して、フィルン空気から得られた結果と 3 次元大気化学輸送モデルを用いた数値シミュレーションとを組み合わせ、過去のメタン収支を調べた。その結果、特に濃度増加が著しい 1940~1990 年の期間の全球放出量は、従来のボトムアップ研究による放出量データよりも大きいことがわかった。これらの結果は、両グループの共同執筆論文として発表した (Ghosh et al., 2015)。

(2) 希少なフィルン空気や氷床コアの空気の分析には、分析精度を低下させることなく試料量や分析時間を減らす必要があった。そのための新たな分析装置の開発および自動化を実施した上で、工業化前の温暖期 (完新世) を対象として NEEM 氷床コアの分析を行い、メタン濃度変動を約 50 年の時間分解能で復元した。従来ならノイズと区別が付かなかった大気中の詳細変動を復元できる道が開かれた。

(3) 氷床コア連続融解装置と組み合わせ、融解水から空気を連続抽出しメタン濃度を分析する手法を開発した。北西グリーンランドで 2014 年に掘削された氷床コアを本装置により分析し、過去 100 年のメタン濃度を復元した。

(4) フィルン内のガス輸送・分別を検討しモデル化する国際共同研究に参加し、フィルン空気から温室効果ガス同位体の復元の際の問題点について特に検討した上で、論文を共同執筆した。(Buizert et al., 2012、Witrant et al., 2012)

以下に上記 (1) ~ (4) について詳述する。

(1) NGRIP フィルン空気の解析

重要な温室効果気体である大気中のメタンは、過去 100 年間に急激に増加していたことが知られている。しかし、その増加は単調なものではなく、地球上の様々なソース・シンクの影響を受けることによって、複雑に変化していることが近年の研究で報告されている。一例として、大気の詳細観測が拡充されつつあった 1990 年代以降には、大気中の濃度増加率が徐々に低下しはじめ、2000 年から 2008 年にはほぼ増加が止まり、その

後現在にかけて再び増加しつつある。このような極めて特異な濃度変動の原因はまだ十分に理解されておらず、今後の将来予測にとって大きな困難となっている。メタンの循環の解明のためには、現在の大気モニタリングに加えて、過去の大気の変遷を明らかにすることが重要である。特に人間活動の影響が強く、地球の歴史の中で最も急激な変化があったと考えられる過去 100 年間の大気の変化については、南極や北極の氷床コア中の気泡解析とフィルン空気の解析が有効である。これまでの先行研究では、主に南極における氷床コア・フィルン空気を用いた過去の大気濃度の推定が行われてきた。しかし、全球的なメタン循環の解明のためには、北極における過去の大気濃度の変遷を明らかにしなければならない。そこで、本研究では北極グリーンランドのノースグリッブ (NGRIP) において採取されたフィルン空気の分析結果を再解析し、北極におけるメタン濃度の変遷を明らかにし、さらに、その南北両半球のメタン濃度と数値モデルによるシミュレーションを組み合わせ、過去 100 年間のメタンのソース・シンクの変動を明らかにした。

NGRIP におけるフィルン空気中のメタン濃度は、深くなるにつれて低下していき、深さ 65m 以深では急激に濃度が下がっている (図 3.5.16)。フィルンの中では空気の成分が主に分子拡散に支配されており、深いほど古い年代の空気が存在している。得られた濃度の深度分布から過去の NGRIP 表層の大気中の濃度変化を推定するためには、フィルン空気の分子拡散を考慮して、それぞれの深度の空気がいつの時代のものであるのかを決定する必要がある。そこで、本研究では鉛直 1 次元のフィルン空気拡散モデルを用いた。ただし、南極のフィルン空気のために用いられた既存の数値モデルでは、NGRIP のフィルン下層にあるロックインゾーンで起こる空気の隔絶と拡散現象を十分に再現できないため、従来の鉛直分解能を 100 倍にした高分解能モデルを開発した。フィルン内におけるメタンの拡散係数は、同じフィルン空気を用いて分析されている CO₂ 濃度の

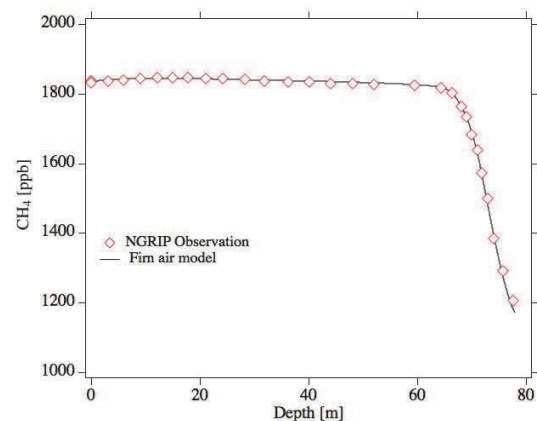


図 3.5.16 北極 NGRIP フィルン空気を分析して得られたフィルン内の濃度の鉛直分布 (◇) とモデルによるシミュレーションの結果 (実線)。

鉛直プロファイルを利用して推定した。観測された深度のメタン濃度に対応した年代の決定は、有効年代決定法を用いた。すなわち、初期条件として与えられた大気中のメタン濃度の時間変化を用いて、フィルンの中の鉛直分布をモデルによって再現し、観測深度におけるモデル計算値が初期条件の時系列の中に現れる年代を求める。このような方法で決められた年代により、観測された深度分布を時間軸上の変動に置き換えることができる。新たに求められた時間変動を初期条件の時間変動と置き換えて、同じ操作を繰り返すことで、有効年代を決定した。この繰り返しは数回程度で収束した。このようにして得られた北極におけるメタン濃度の変動を図 3.5.17 に示した。本研究で得られた結果は、同様に北極で行われた NEEM フィルン空気の結果と極めて良い一致を示している。さらに、南極フィルン空気の結果との比較から、1950 年代以降の急激な濃度増加に伴って、濃度の南北差が徐々に拡大してきたことが明らかになった。

モデル研究グループと連携することにより、NGRIP フィルン空気の解析により得られた北極のメタン濃度変動の観測結果を、3 次元化学輸送モデル (ACTM) ⁴⁾ を用いた解析に利用し、過去 100 年間のメタン収支を調べた。ACTM の計算に EDGAR-HYDE⁵⁾などのボトムアップ研究に基づくメタンの地表における放出源強度シナリオを用いた場合、南北両半球のメタン濃度の計算結果は観測値と著しく異なることがわかった。そこで、フィルン空気などから観測された大気中の濃度変動をよりよく再現するように放出源強度の最適化を行った (図 3.5.17)。その結果、濃度の急上昇が見られる 1940 から 1990 年にかけて、ボトムアップ・データの全球放出量が 30%程度過小評価であることがわかった。また、メタンの炭素同位体を含

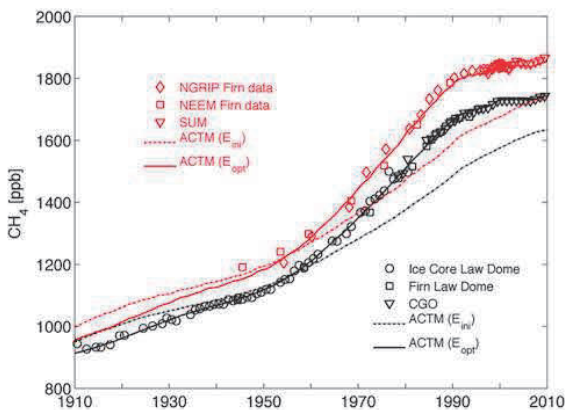


図 3.5.17 グリーンランド NGRIP のフィルン空気から推定された CH₄ 濃度の変化。北極 NEEM フィルン空気、南極 Law Dome の氷コアおよびフィルン空気による観測結果、および ACTM の結果との比較。

めた収支の解析により、この期間の放出量の増加にバイオマス燃焼が大きく寄与していることがわかった。

(2) NEEM 氷床コアの解析

約 1 万年前に始まり現在まで続く温暖期 (完新世) には、氷期-間氷期のような気候の大変動がなかったにも関わらず、大気中メタン濃度が大きく変動したことがこれまでの氷床コアの解析から知られている。近年のメタン濃度の変動メカニズムを理解し将来予測に役立てるためにも、この間のメタン濃度を両極の氷床コアから詳細に復元し、環境要素の情報と照らし合わせる必要がある。しかしながら、グリーンランドの高地で掘削される氷床コアに共通する問題として、完新世の大部分が、高圧の気泡のために氷が脆くなる深度域 (ブリトル・ゾーン) に当たっているため、気体の抜けやクラックへの大気への侵入等により、分析結果の信頼性が低いことが挙げられる。加えて、過去の分析においては多くの場合、分析精度や時間分解能が低いことも問題であった。そのために、高精度・高時間分解能でのメタン濃度の復元が求められている。

本研究では、グリーンランドの NEEM 氷床コアの気体分析を行った。試料は、配分された約 50 年間隔のコアから目視できるクラックのない部分を切り出し、汚染除去のため表面を切削した氷である。新たに開発した融解法空気抽出装置とガスクロマトグラフ分析により、試料量を約 80 g と従来の半分以下に減らしつつ、分析精度を 2.4ppb (1σ) と 2 倍以上に引き上げた。分析対象は、完新世以前の約 14500 年前から工業化開始頃の約 200 年前の期間で、試料数は 181 である。

完新世におけるメタン濃度は、完新世初期の約 11000 年前を中心に最高濃度が 750ppb と高い時代があり、その後、約 5000 年前にかけて長期的には減少を続け、極小値である約 610ppb を取り、その後再び増加した。本結果は、過去 2500 年間においては GISP2 コアから最近得られたデータ ⁶⁾ と良く一致し、また、9500~14500 年前にかけては連続融解分析装置による NEEM コアの分析結果 ⁷⁾ と良く一致し、新たな分析システムによるデータの信頼性の高さを示した。

(3) 氷床コアの連続融解法によるメタン濃度解析

氷床コアを掘削現場または実験室において連続的に融解し、リアルタイムで分析したり水試料を採取したりする「連続融解分析」 (Continuous Flow Analysis、以下 CFA) が近年可能になってきた。我が国でも CFA の開発が国立極地研究所において進められ、実用化の目処が立ってきていた。この CFA の融解水から連続的に気体を抽出し、レーザー分光式のメタン分析装置 (Picarro G2301) に導入して分析するための装置を開発した (図 3.5.18)。

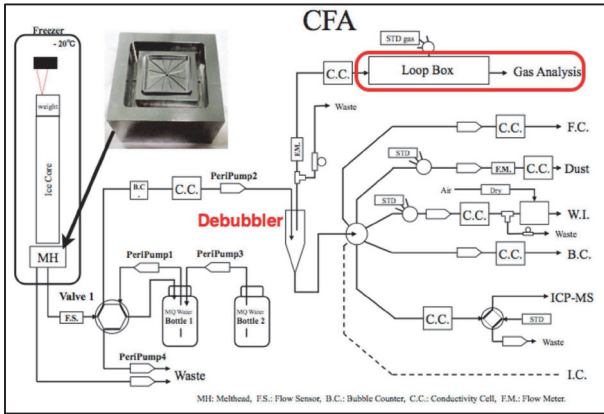


図 3.5.18 連続融解装置の概念図。左端にあるヒーター部で発生する融解水を気液分離器 (Debubbler) に導入し、大部分の水と空気を分離する。

この目的のため、従来開放系であった CFA の流路を全て気密とした上で、空気を水から 2 段階で分離・抽出した。1 段目の分離には、ピペット先端形状に類似した先細った空間に融解水を導入し、その底部から気泡が含まれない水を、上部から水混じりの空気を取り出す「気液分離器」を用いた (図 3.5.18 の Debubbler)。2 段目の空気抽出には市販の脱気チューブを使用した (図 3.5.19)。そのように抽出された空気を、ナフイオン水トラップで乾燥したうえでレーザー分光式分析装置 (キャビティ圧を 40Torr に下げた特注仕様の Picarro G2301) に導入しメタン濃度を測定した。

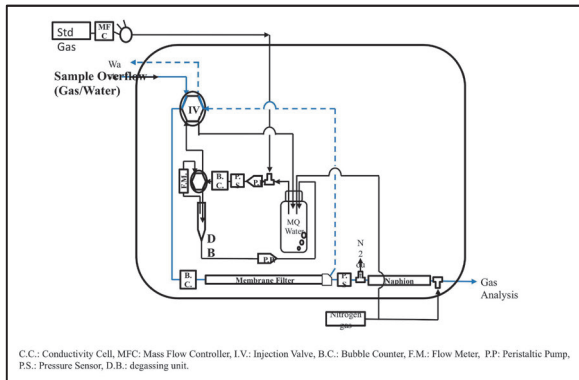


図 3.5.19 空気抽出部の概念図。気液分離器の後、空気と水が混合した試料から脱気チューブ (Membrane Filter) により空気を抽出し、ナフイオン水トラップで乾燥したうえで分析装置 (低圧仕様の Picarro G2301) に導入する。

脱気チューブの気体抽出効率が 100%に満たないため、このように測定された気体濃度は、アイスコア中の値から変化する。メタンの場合、水への溶解度が窒素や酸素より僅かに大きいため、濃度が低くなる。そのため、3 種類の標準ガスを脱気した超純水に 3 種類の圧力で混入し、実際の空気抽出に近い方法で分析することで、様々な濃度と圧力下での補正を可能にした。

CFA 分析は、50 cm 長の氷試料を順次積み重ねつつ行うため、サンプル間の継ぎ目から部屋の空気が混入して試料空気が汚染される可能性がある。この効果を、みずほ氷床コアの 380 m の試料で検証したところ、継ぎ目を精密に整形した場合には (コア間の継ぎ目が平面かつ水平)、試料に混入する大気量が少なく検出できない場合も多いことが分かった。継ぎ目から汚染した場合は、それが収まるまで 20 cm 程度分のデータを破棄する必要があることも分かった。

このようにして、CFA の融解水から空気を連続的に抽出してメタン濃度を分析する手法を確立し、グリーンランド北西部の SIGMA アイスコアを分析した (図 3.5.20)。図の左端が約 1900 年、右端が現在に近い年代である。100 年間の上昇トレンドが明瞭に現れており、それに多数のスパイク状の高濃度が乗った結果となった。スパイク状の値は明らかに汚染によるが、その発生頻度と深度間隔から、前述した継ぎ目からの大気混入でなく、コア内でのメタン発生が疑われる。このことは NEEM コアでも報告されている⁸⁾。化学成分やブラックカーボンとの比較により、今後アイスコアからより高精度のメタン濃度復元を可能にするための基礎データが取得できた。

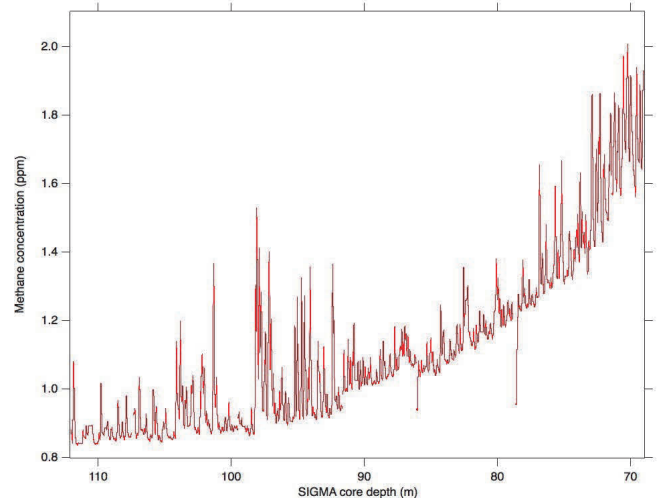


図 3.5.20 CFA による SIGMA コアのメタン濃度分析結果。

4. 3次元大気化学輸送モデルおよび陸上生態系モデルを用いた温室効果気体の放出源・吸収源の推定

執筆者：Prabir Patra

フラクスタワー観測を用いたCO₂インバージョンシステムの評価

北半球高緯度帯が温暖化するにつれ、シベリアの炭素吸収量やメタン貯蔵量は影響を受けると考えられている。研究課題2と研究課題5の協力により、シベリアのフラクスタワー観測、陸域生態系モデル及び大気インバージョンから得られたCO₂フラックスの比較解析を行った。GELCA-EOF (NIES・ロシアCAO)、ACTM (JAMSTEC)、NICAM-TM (MRI-JMA)、NIES-TM (NIES) によるインバージョンの結果については観測サイトを中心とした5×5度の領域を平均した。

図3.5.21に示す通り、インバージョンによる月平均のCO₂フラックスは観測値とおおよそ良い一致を示した。これは、観測サイトの周辺が比較的均一な土地被覆であること、地形が平坦であることによると考えられる。しかしながら、CO₂フラックスの年々変動を見ると、モデル推定値と観測値の違いは特に夏季と冬季に顕著であり、差の要因については今後の課題となった。

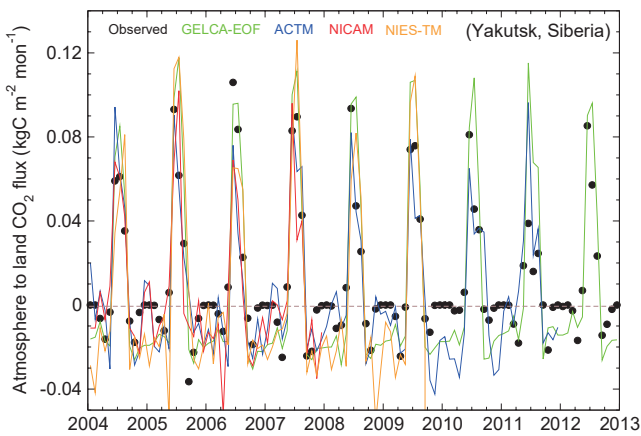


図3.5.21 シベリアのヤクーツクにおけるタワー観測値とインバージョンによるCO₂フラックス推定値の比較。

シベリア上空におけるCO₂, CH₄, SF₆の変動

2-2(2)で記した2012年より行われている日本-欧州間を飛行する民間航空機を用いた温室効果ガス観測について、観測により得られたCO₂とCH₄の濃度データと大気輸送モデルNICAM-TMによるシミュレーションとの比較を図3.5.22に示す。この比較解析により、上部対流圏における濃度変動がよくモデルによって再現されていることがわかった。一方、モデル内で上部対流圏-下部成層圏間の物質混合速度が、実際より速くなっていることが示唆された。これは、用いたモデルの解像度が水平(格子間隔~240km)、鉛直(40層)ともに十分で

はないためであると考えられる。同様の比較解析は、N₂OやSF₆も含めて、他の大気輸送モデルACTMやNIES-TMでも行われており、特にN₂Oの解析では、成層圏空気の流入の影響と見られる大きな濃度変動がモデルでも再現された。

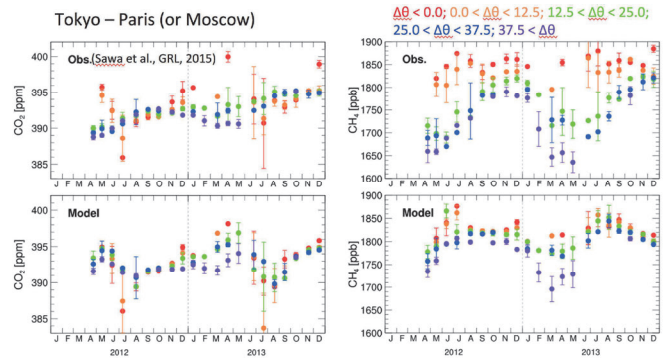


図3.5.22 日本-欧州間でCONTRAIL-ASEにより観測されたCO₂とCH₄の季節変動(上段)とそれに対応するNICAM-TMのシミュレーション結果(下段)。赤が対流圏界面PV=2で定義された上部対流圏のデータを示し、他の色は下部成層圏(橙、緑、青、紫の順に成層圏上層)のデータを示す。

日本-北極海航路におけるCO₂, O₂/N₂ およびCH₄変動

2012年から2015年の4年間の9月から10月の期間に、JAMSTECが所有する観測船「みらい」による大気中のCO₂、CH₄、CO濃度およびO₂/N₂比の観測が日本から北極海に渡る広範囲で実施された。この航海観測では陸域および海洋の様々な発生源/吸収源シグナルを追跡することを目的とした(詳細は前節2-(3)を参照)。

図3.5.23に2012年の航海(MR12-E03)における大気中CH₄、CO₂、O₂/N₂比、および、APOの観測値と、二つの大気輸送モデル、ACTMおよびSTAG、によるシミュレーションの結果を示す。「みらい」が北極圏に向かう途中でCH₄濃度の増加が見られた。これは、北緯40度付近では北半球の夏季に支配的なOHラジカルによるCH₄分解の影響がまだ残っている一方で、北緯65度以上の領域では高緯度地域からのCH₄放出の蓄積の影響がより支配的であることを反映したものである。およそ1ヶ月後の北極海から日本への帰路では、OHラジカルの減少によってCH₄放出の影響が支配的となり、中緯度帯でもCH₄濃度の増加が見られた。一方CO₂については、北極海に向かう途中の北緯50度までは濃度減少が見られたが、これは中国・日本・韓国といった化石燃料起源CO₂の放出地域から徐々に遠ざかることでその影響が減衰することを反映したものである。また、CO₂濃度は秋季に一般的に見られるように時間とともに増加傾向が認められる。ACTMによるシミュレーションは、観測されたこれらの緯度分布に加えて、CO₂やCH₄の顕著な濃度上昇イベント、特に2012年9月4日に日本の沖合で観測されたCO₂のピークをよく再現している。

O₂/N₂比および APO は、秋季に一般的に見られるように、時間とともに値が減少する傾向を示した。ACTM および STAG によるシミュレーションはこの減少傾向を概ね再現した。しかしながら両モデルは、特に APO に見られる日々変動を過小評価している。このような過小評価は、シミュレーションに用いた大気海洋間 O₂ フラックスの気候値と「みらい」航海で観測された溶存酸素濃度に基づく大気海洋間 O₂ フラックスとを比較した結果、現実の大気海洋間 O₂ フラックスが気候値に反映されない大きな日々変動を示すことに起因することが示唆された。

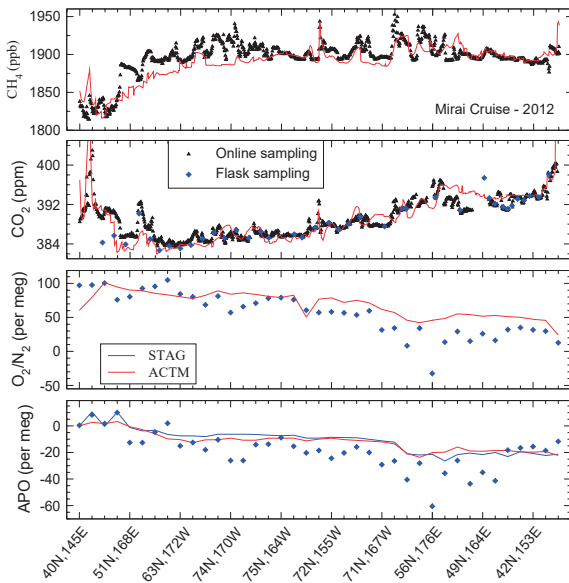


図 3.5.23 2012 年 9–10 月に実施された MR12-E03 航海において観測された大気 CH₄濃度、CO₂濃度、O₂/N₂比、および APO と、ACTM (赤線)および STAG (青線)モデルによるシミュレーションの結果の比較。黒三角で示された CH₄と CO₂は船上連続観測の結果を、青ひし形で示された CO₂、O₂/N₂および APO はボトルに採取された大気試料の分析結果を表す。

国際地球観測年 (IGY) 以降の CO₂季節変動振幅の変化

大気中 CO₂濃度の直接観測は、1957 年に南極で、1958 年にマウナロアで開始された。航空機を用いた上部対流圏での観測は 1958 年から 63 年にかけてスクリップス海洋研究所の C. D. キーリングによって開始され、近年では HIPPO 航空機観測プロジェクトが 2009–2011 に行われている。これら地上と航空機による CO₂ 観測値を用いて緯度ごとの季節変化の振幅の変化を解析した (図 3.5.24)。その結果、マウナロアを含む低緯度対流圏よりも、北半球高緯度の対流圏 (ポイント・バロー、700mb、500mb) において、CO₂ 季節変動の振幅の増加率が大きいことが明らかとなった (Graven et al., 2013)。この振幅の増加は、施肥効果により陸域生態系の CO₂ 交換が促進されたことが一因として挙げられる。しかしながら、大気モデルによ

る数値実験では、観測されるほどの CO₂ 振幅の増加は得られなかった。最近の研究では、北半球中緯度での農業活動の活発化、CO₂ 施肥効果、気候への植物の応答、気候変動等が、CO₂ 振幅の増加の原因となっているとされている。

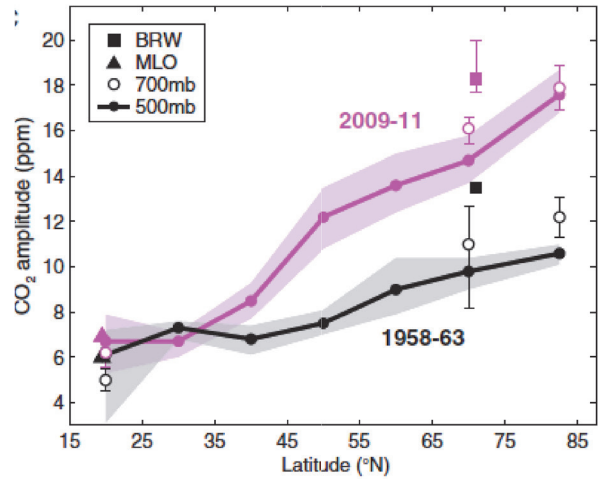


図 3.5.24 1958-63 年と 2009-2011 年における地上 2 地点 (ポイント・バロー BRW、マウナロア MLO) 及び対流圏 700mb と 500mb において観測された CO₂ 濃度の季節変動の振幅 (Graven et al., 2013)。

大気輸送モデル STAG (産総研) を用いて、北極域で検出された CO₂ 濃度の季節変動振幅の増加を再現することを試みた。陸上生態系の活発化による交換量の増大を全球同率と仮定して大気輸送モデル (STAG) により評価した。大気輸送モデルは 1979–2013 年のヨーロッパ中期予報センターの再解析値で走らせた。1950 年に全球一様 320ppm と仮定し、1978 年以前は 2010–2013 年の気象場を用いて積分した。二酸化炭素解析情報センターの報告した化石燃料起源の月別排出強度分布と国際輸送モデル相互比較実験 (TransCom) のために Columbia 大の Prof. Taro Takahashi から提供された海洋起源の月別放出吸収値をそのまま用いた。陸上植生の月別放出吸収は、TransCom に提供された CASA の推定値をポイント・バローの 1971 年の振幅に調節した値を基準として変更した。放出と吸収は年平均濃度の増加率が観測と合う事を拘束条件として調節した。強くなった吸収の何割が放出されるかをゼロから 6 割まで指定した実験を行ったところ 5 割と指定した場合が最も観測に近かったが、この場合放出は年 0.31%で増大し吸収は 0.56%で増大する。他の地点に関しては現在解析中である。

メタンのモデル計算とインバージョンによるフラックス推定へ向けた大気中水酸基ラジカル分布の評価

水酸基ラジカル (OH) は大気中汚染物質やメタン等の温室効果気体の化学的除去過程において重要な酸化剤である。そこで、対流圏中ではほぼ OH との反応のみによって消滅する成分、メチルクロロホルム (CH_3CCl_3) とその ACTM による計算を用いて全球的な OH 濃度の分布を評価した (Patra et al., 2014)。 CH_3CCl_3 はオゾン層破壊物質であることからモントリオール議定書 (1988 発効) により生産・使用が規制されており、それ以降の排出量は大きく削減されてきている。それ故、大気中の OH との反応の影響が CH_3CCl_3 濃度の変動に表れやすく、OH の検証に優れた大気成分である。また、ACTM の南北輸送は SF_6 等を用いてよく検証されている。これらの事実に基づき、南北両半球の平均 OH 濃度の比を変えながら大気中 CH_3CCl_3 の濃度をモデル計算し、その地上および航空機観測結果と比較した。その結果、観測と整合する南北両半球の OH 濃度の比は 0.97 ± 0.12 であると見積もられた (図 3.5.25)。

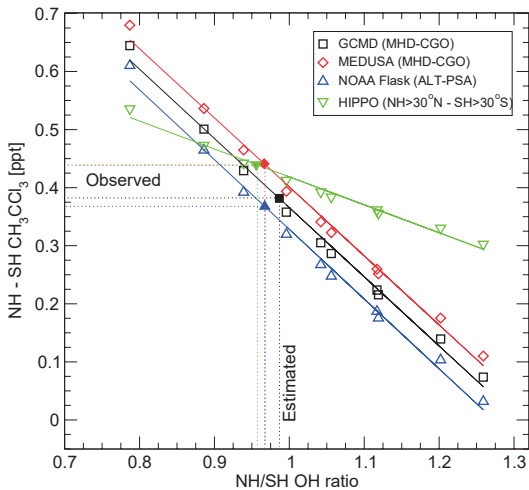


図 3.5.25 モデル中の両半球の平均 OH 濃度の比 ([北]/[南]、横軸) に対するモデル計算 (中抜き) された両半球の平均 CH_3CCl_3 濃度の差 ([北]-[南]、縦軸)。観測された南北 CH_3CCl_3 濃度差 (塗り潰し) は、モデル計算における OH 濃度比と得られた南北 CH_3CCl_3 濃度差の関係直線上 (各実線) にプロットされている。これにより観測に基づく最適な南北 OH 濃度比を得た (点線)。解析には 2004–2011 年の平均値を用いた。凡例は用いた 4 種の異なる観測を表し、括弧内は CH_3CCl_3 濃度の南北濃度差の計算に用いた南北両半球の対となるステーションを表す。GCMD は AGAGE、MEDUSA は NOAA/ESRL による観測で、HIPPO は航空機観測 (30 度より高緯度のデータを使用) である。

CH₄インバージョンシステムの開発

大気輸送と OH 化学が十分に評価された化学輸送モデル ACTM (JAMSTEC) を用いて、 CH_4 のインバージョンシステムを開発し、39 サイトの観測値を用いて、陸域 53 地域における 2002 年から 2012 年の CH_4 フラックスを推定した (Patra et al., 2016)。その結果、全球 CH_4 放出量は、2002–2004 年と 2010–2012 年の期間において、それぞれ $505\text{--}509 \text{ Tg yr}^{-1}$ 、 $524\text{--}531 \text{ Tg yr}^{-1}$ となった。12 の亜大陸毎の CH_4 放出量を図

3.5.26 に示す。本研究から近年の EDGAR インベントリ (v4.2FT2010) は、2010 年における全球 CH_4 放出量を少なくとも 25 Tg yr^{-1} 過大評価していることが示唆された。2004 年からの CH_4 放出の増加は、熱帯域と南半球に起因することが明らかとなった。これは、乳牛以外の牛の頭数が 2002 年 (10.56 億頭) から 2012 年にかけて約 10% 増加したことと一致する (CH_4 量にして 10 Tgyr^{-1} の増加に相当)。東アジア (主として中国) の CH_4 放出量増加は 2002–2006 年から 2008–2012 年にかけて $7\text{--}8 \text{ Tg yr}^{-1}$ という結果が得られ、先験値の 17 Tg yr^{-1} から大幅に減少した。

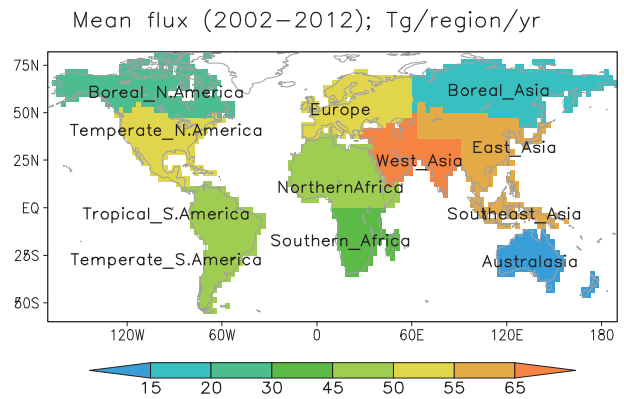


図 3.5.26 インバージョンによって得られた CH_4 放出量 ($\text{Tg}/\text{領域}/\text{年}$) (Patra et al., 2016)。

シベリア域におけるメタン変動の理解

ロシアのシベリアは地球温暖化による温室効果気体収支への影響を理解する上で最も重要な地域の一つである。そこで ACTM と NIES のモデルによるメタンの計算結果を環境研によるタワー連続観測 (JR-STATION) と比較した (図 3.5.27)。モデルは観測された 2006–2012 年の濃度増加をやや過大評価した (Igrim における濃度増加は、観測: 21 ppb 、ACTM: 28 ppb 、NIRSTM-FWR: 51 ppb)。モデルは、冬に極大で、夏にも湿地放出由来の小さなピークがあるなど、観測された季節変動の傾向をある程度は再現するものの、その変化量や年々の変動等はほとんど再現できていない。例えば、三つのステーションで 2009–2011 年に観測された冬のピークは全モデルが過小評価している。これはモデルに用いた地表メタン放出量が現実における年々変動を表現できていないことを示している。また、これらタワー観測ステーションはしばしば、市街地、ガスパイプライン、湿地等が混在するエリアに位置するため、低解像度の全球モデルでは、そのような細かなメタン放出の不均一性を解像できないという可能性も示している。

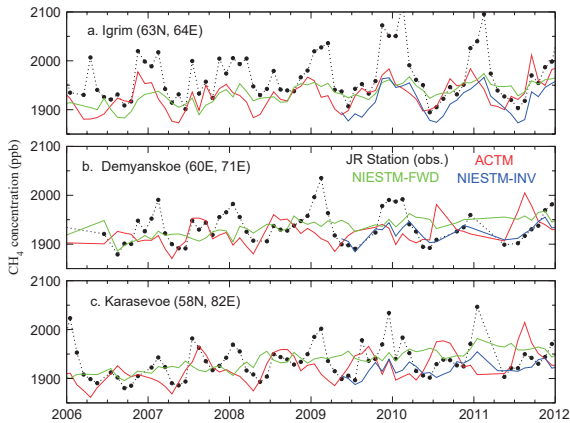


図 3.5.27 シベリアのタワー観測ステーションにおける、観測およびモデル計算により得られたメタン濃度の日中データの月平均値。

オイラー-ラグランジュ型結合モデルを用いたシベリア CO₂ シミュレーション

空間解像度の荒い全球モデルでは内陸の地上観測値の微細な構造を捉えることができないことから、オイラー・ラグランジュ型結合モデル (NIES) を用いてシベリアの CO₂ 観測値の解析を行った。図 3.5.28 に示すように、Karasevoe における観測値との比較では、高解像度 (水平解像度 0.1×0.1 度) の結合モデルを用いた方が、観測値の再現性が向上することがわかった。本高分解能モデルを用いた CO₂ フラックス推定を現在実行中である。

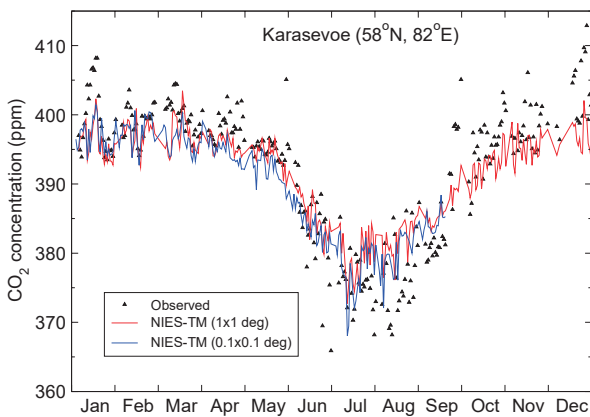


図 3.5.28 JR-STATION サイトの一つシベリア Karasevoe における CO₂ 濃度観測値と二つの空間解像度で実行した結合モデルの計算結果の比較。

衛星観測データ (GOSAT) を用いた二酸化炭素データ同化システムの開発

衛星観測データ (GOSAT TIR L2 Ver.1.0) から得られた二酸化炭素濃度データが二酸化炭素収支解析に与える影響について 4次元データ同化手法 (LETKF) を用いて評価した。実観

測データを用いたデータ同化には水平解像度 2.8° のオンライン輸送モデル (MJ98-CDTM) を使い、6 日間平均の二酸化炭素フラックスを評価した。衛星観測データのバイアスは独立解析値 (気象庁二酸化炭素分布情報) を用いて評価し、数種類のバイアス補正法を試験した。GOSAT TIR L2 Ver.1.0 観測データを用いることにより、ほぼ地表面全ての二酸化炭素フラックス先験情報を修正することが可能になる一方、二酸化炭素フラックス解析値はバイアス補正法に大きな影響を受けることが分かった。

図 3.5.29 に GOSAT TIR L2 Ver.1.0 観測データをバイアス補正後にデータ同化した 2012 年 12 月における二酸化炭素濃度月平均値を示す。北半球の冬季において、化石燃料燃焼に伴う二酸化炭素高濃度領域 (ホットスポット) がアジア、北米、欧州の主要工業地帯においてみられている。熱帯および南半球においては海洋起源の大気や植生による吸収の影響を受けて相対的に二酸化炭素濃度が低くなっていることが分かる。

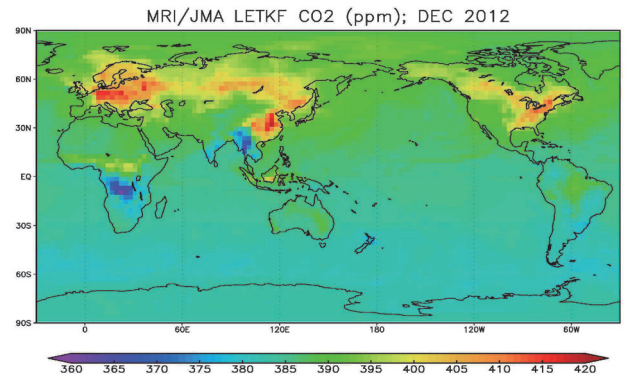


図 3.5.29 GOSAT 観測データをアンサンブルカルマンフィルタ (LETKF) で同化後の 2012 年 12 月における月平均地表面二酸化炭素濃度分布図。

引用文献

- 1) Manning A., Keeling, R. F., 2006. Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network. *Tellus* 58B, 95-119.
- 2) Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T., Yamanouchi, T., 2006. Temporal variations of the carbon isotopic ratio of atmospheric methane observed at Ny Ålesund, Svalbard from 1996 to 2004. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01807.
- 3) Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Yusupov, V., Kosmach, D., Gustafsson, O., 2010. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science* 327: 1246–1250. doi: 10.1126/science.1182221.
- 4) Patra, P. K., et al., 2009. Growth rate, seasonal, synoptic, diurnal variations and budget of methane in lower atmosphere. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 87, 635–663.
- 5) Van Aardenne, et al., 2001. A High Resolution Dataset of Historical Anthropogenic Trace Gas Emissions for the Period 1890-1990. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 909-928.
- 6) Mitchell et al., 2013. Constraints on the Late Holocene Anthropogenic Contribution to the Atmospheric Methane Budget. *Science*, 342(6161), 964–966.
- 7) Chappellaz et al., 2013. High-resolution glacial and deglacial record of atmospheric methane by continuous-flow and laser spectrometer analysis along the NEEM ice core. *Clim. Past*, 9(6), 2579–2593.
- 8) Rhodes et al., 2013. Continuous methane measurements from a late Holocene Greenland ice core: Atmospheric and in-situ signals. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 368, 9–19.

VI. 北極海環境変動研究: 海水減少と海洋生態系の変化

研究課題6 研究代表者: 菊地隆

1. 研究実施概要 (観測実施・国際連携など)

執筆: 菊地 隆

全体概要

北極海で急速に進行している海水の減少は地球温暖化の影響が最も顕著に現れている現象の一つである。その海水減少は、北極海の海洋環境を変化させ、そして海洋生態系や水産資源に影響を与えることが懸念されている。本研究課題では、海水減少による海洋生態系への影響を明らかにするために、国内の海洋物理・化学・生物の研究者が集まって、学際的な研究を進めた。特に既に海水減少の影響が顕著に現れていると言われているベーリング海北部からチャクチ海・ボーフォート海・カナダ海盆などの太平洋側北極海とその周辺海域を主たる研究対象とした。海水減少や温暖化によって起きる北極海の温暖化・淡水化・酸性化・貧栄養化(富栄養化)などの物理化学環境の変化が微生物や動物プランクトンなどの低次生態系に影響を与える。特に北極海は世界で最も海洋酸性化が進行している海域として知られており、その実態を明らかにすることは喫緊の課題である。また我々が対象とする海域では、食物網の底辺を支える植物プランクトンの基礎生産力が高いことが大きな特徴の一つである。これが海水減少や温暖化に伴ってどのように変化し、動物プランクトンや更に高次の生態系にどのように影響するかを知ることは、とても重要である。さらに、北極海的环境変化に伴って生物の群集組成が変化することが考えられる。北極海で海水と共に生きてきた生物に危機が訪れている反面、これまで北極海で住むことができなかった種が入り込んでくる事例が観測され始めている。このような北極海の海洋生態系に係る緊急かつ重要な課題を明らかにすることを主たる目的とし、北極海の海洋生態系の将来予測に資する研究活動を進めてきた。

上記の研究目的を達成する方策として、海洋地球研究船「みらい」北極航海による学際的観測、北海道大学練習船「おしよる丸」北極航海による海洋生態系調査、カナダ砕氷船航海による太平洋側北極海の海水域・氷縁域での観測及び係留系設置・回収作業、パイオロギングによる高次生態系(海鳥など)の調査、などを行い、本事業期間における観測データを取得した。この期間は、2012年に北極海全体として海水面積最小値を記録したものの、太平洋側北極海の海水状況は2000年以降の平均もしくはそれ以上の状況であった(図3.6.1)。これらの得られた観測データと共に、IPY期間(2007-2008)に取得されたデータなどと比較検討することで、近年の海水の増減に伴う変化を調べた。併せて地球シミュレーターによるモデル計算により、現状の詳細分析及び将来に起こり得るシナリ

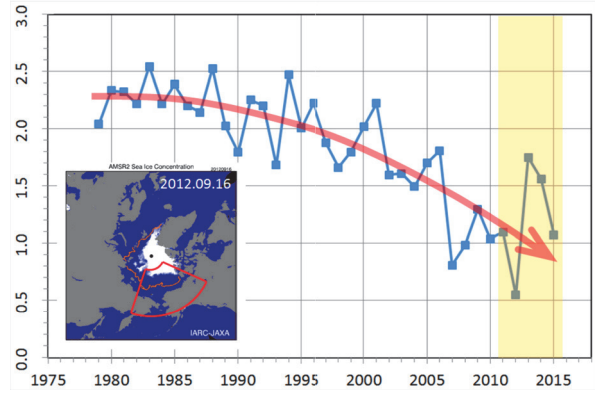


図 3.6.1 太平洋側北極海の夏季海水面積最小時の面積の経年変動。表中の地図は、2012年9月16日の海水密度分布を示す。地図中の赤線で囲まれた領域(北緯83度以南、東経165度～西経120度)を、当該領域として海水面積の変化を計算した。

オの推定を行った。

海洋地球研究船「みらい」による北極航海

2012年9月から10月に本事業による海洋地球研究船「みらい」北極航海(MR12-E03)を行った。9月4日に八戸を出航し北太平洋・ベーリング海を北上、9月13日にベーリング海峡で行った観測から10月3日まで約3週間の北極海観測を行った。その後、10月4日にノームに寄港し一部研究者らが下船、その後ベーリング海・北太平洋を回航し10月16日八戸、10月17日関根浜に帰港した。図3.6.2に航跡図を示す。

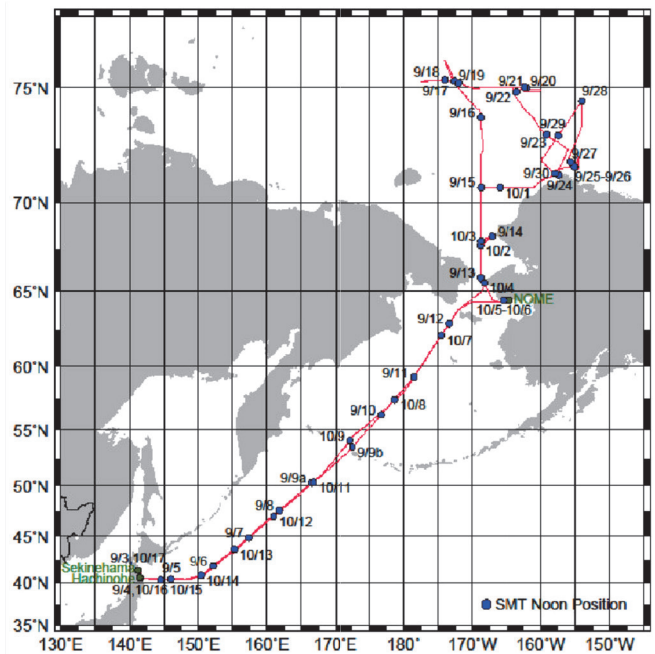


図 3.6.2 本事業による海洋地球研究船「みらい」2012年北極航海(MR12-E03)の航跡図。

2012年は海氷面積最小となった年であったことから本航海では海氷の影響を受けることがほとんどなかった。一方で、波が高くなり予定を変更せざるを得ないことがあった。しかしながら航海全体としては、95点でのCTD/採水観測を始め、係留系回収・設置作業、海洋光学観測、プランクトンネットによる試料採取、マルチ・コアによる海底堆積物採取、海鳥・海生哺乳類の目視観測などをほぼ当初計画通りに行うことができた。

海洋地球研究船「みらい」による北極海観測は、2013～2015年にも毎年行われ、本事業の研究者が参加して現場観測データの取得、係留系回収・設置作業や試料採取などを行った。

北大練習船「おしよろ丸」による北極航海

本課題において、2013年に海氷が後退していく6月から7月において北海道大学水産学部練習船「おしよろ丸」による北極航海を行った。図3.6.3は観測地点図及び2013年7月12日の海氷分布を示す。北部ベーリング海及びチャクチ海において、75点のCTD/採水観測をして各種の分析を行うとともに、海底堆積物・プランクトン・稚魚などの採取、底引き網調査、ROV調査、海鳥や海生哺乳類の目視観測など、海洋生態系を広くカバーする観測・試料採取を行うことができた。

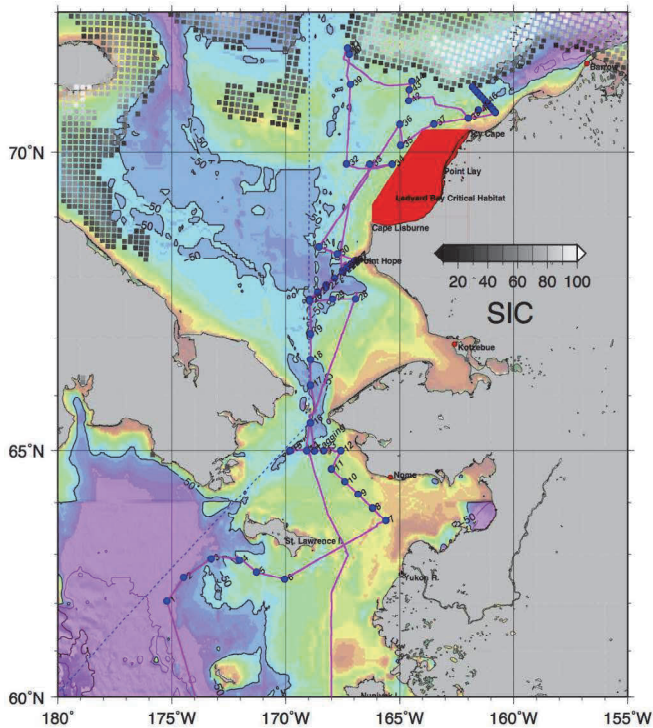


図3.6.3 本事業による北海道大学水産学部練習船「おしよろ丸」2013年北極航海の Leg.2における観測地点図。青丸がCTD/採水観測地点を、ピンク色の線が航跡を示す。カラーの背景は海底地形、白黒のハッチは2013年7月12日の海氷密度分布図を示す。

カナダ砕氷船航海への参加

本課題では、太平洋側北極海の生物学的ホットスポットであるチャクチ海南部ホープ海底谷及びチャクチ海北東部パロー沖において通年観測データを取得するために係留系観測を行った。この係留系の設置・回収作業を行うために、毎年7月に行われるカナダ沿岸警備隊所属砕氷船ローリエ号によるベーリング海・チャクチ海航海に2012～2014年の間、参加した。本航海は国際共同観測プロジェクトである Distributed Biological Observatory (DBO) の一環として行われており、我々も DBO と連携して観測・解析を進めた。

またこの他、カナダ沿岸警備隊所属砕氷船ルイ・サン＝ローラン号や同所属砕氷船アムゼン号などによるカナダ海盆での観測航海を、カナダやアメリカの研究機関と共同で実施した。これらの観測から海洋環境変動の解析を行った。

バイオロギング調査

海洋生態系における高次捕食者の一つである海鳥の行動を明らかにするために、ベーリング海・セントジョージ島に生息する複数の種の高次捕食者の行動を動物装着型の小型記録計 (GPS、深度水温記録計、加速度計等) を用いて計測した (バイオロギング調査)。このバイオロギング調査は本事業の期間において複数年にわたって続けることができ、海氷変動をはじめとする海洋環境の変化がこの地域の海洋生態系の高次捕食者に与える影響を明らかにするための貴重なデータを取得することができた。

成果発表、国際連携、国際貢献

本課題の研究成果や進捗状況の発表と関連して、国内外の学会などにおいて特別セッションやシンポジウムを開催した。特別セッションやシンポジウムのリストについては、本報告書参考資料5.学会セッション及び6.アウトリーチ(2)主催講演会に記載した。特に、本課題としての一般向けシンポジウムを2015年11月9日に東京・品川にあるココヨホール小ホールにおいて GRENE 北極研究事業海洋生態系シンポジウム「ここまで分かった海洋生態系の変化」として開催した。研究者や学生その他、水産、漁業、貿易といった水産資源でビジネス展開している民間企業、海難防止や自然環境団体などから100名以上多くの参加があった中で、第I部として本事業で得られた研究成果の紹介を、第II部でこれからの北極海海洋生態系研究をどのように進めていくべきかに関するパネルディスカッションを行った。また合わせてポスター発表や本事業で使用した観測機器の展示、ADSによる観測データのデモンストレーションを行い、多くの参加者と活発な議論が行われた。

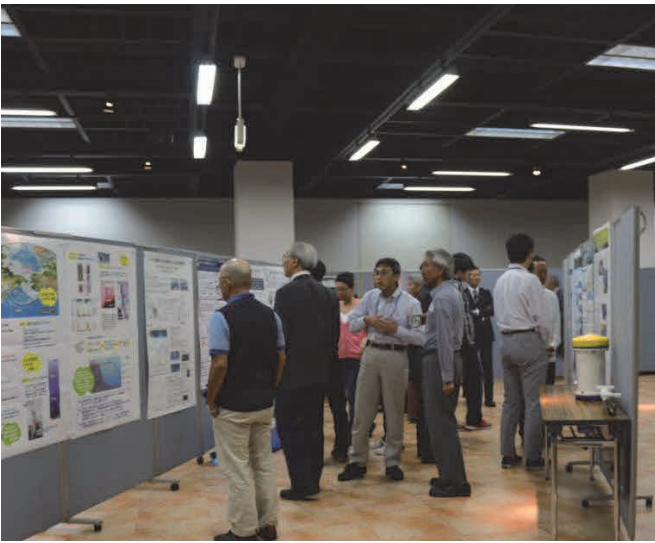


図 3.6.4 2015 年 11 月 9 日に行った GRENE 北極研究事業 海洋生態系シンポジウム「ここまで分かった海洋生態系の変化」での講演の様子（上写真）と、ポスター発表・機器展示の様子（下）。

2013 年 5 月に日本が北極評議会のオブザーバー国として認められて以降、これまで以上に北極に関する貢献が求められるようになった。例えば、北極評議会の元にある作業部会の一つである AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme: 北極圏監視評価プログラム作業部会) では、北極域で進行する環境変化とその影響に関する評価報告書を取りまとめて、発表している。これらの評価報告書の作成に対して、本課題の研究者も貢献するようになってきた。具体的には、Snow, Water, Ice, and Permafrost in the Arctic (SWIPA) や Arctic Ocean Acidification (AOA)、Adaptation Action for Changing Arctic (AACA) Beaufort/Chukchi/Bering regional report などの作成に、貢献している。これらの報告書は、2016 年中に公表され、2017 年の北極評議会閣僚級会合などでの議論の元となる。

2. 物理・化学環境の変化

執筆者：西野茂人

北極域は地球温暖化の影響が最も顕著に現れる場所の一つである。地球温暖化は北極海の海氷減少を引き起こし、その結果、海の温暖化や淡水化、貧栄養化/富栄養化、酸性化などを進行させている。このような北極域の変化は、そこに生きる生物たちにも影響を及ぼしているはずである。ここでは、これまでの我々の観測研究から明らかになってきた北極域の環境変化について、主に海洋循環や水温・塩分・栄養塩・微量元素・有機物分布などの物理・化学環境の変化を中心に報告する。

北極域の温暖化と海氷減少

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 5 次評価報告書¹⁾によると、将来 (2100 年) の世界平均気温は最大で 4.8℃も上昇する可能性があり、特に北極域は世界平均より早く温暖化し温度上昇も著しいとされている。その原因は氷や雪の反射率 (アルベド) にある。アルベドの高い氷や雪が溶けてなくなれば、アルベドの低い海や地面が日射を吸収して暖まり、その結果、氷や雪が溶け、さらに海や地面の面積が増え温まる (この過程をアイス・アルベドフィードバックと言う)。このため極域での温暖化が急速に進行するのである。さらに、本事業において、北極域の海氷・海洋の現場観測、及びモデルによる解析により、一年氷域 (氷厚約 0.7m) では多年氷域 (氷厚約 1.1m) の 3 倍以上のスピードで海氷減少が起こっていることが示唆された (Itoh et al., 2011)。北極域では、夏季の海氷面積の減少に加え、厚い多年氷の割合が減り、薄い一年氷の割合が増えている。このことが近年の海氷減少をさらに加速させている一因であると考えられる。

北極域の温暖化・淡水化

北極域が温暖化すると、その影響で北極域も暖められ温暖化したり、海氷が融解し淡水化したりといった物理環境の変化が起こることが考えられる。我々は、1990 年代終わりから本事業 (2011 年～2015 年) に至るまで、夏季に太平洋から北極域に流入してくる海水 (太平洋夏季水) を、その主要な通過点であるバロー海底谷で、係留系 (水温・塩分センサーや流速計など) を取り付け付けた海水中の観測システムによりモニタリングしてきた。その結果、2000 年代前半から後半にかけて海洋表層の顕著な温暖化 (約 4℃から 8℃に水温上昇) がみられた (図 3.6.5; Itoh et al., 2013, Williams et al., 2014)。この太平洋夏季水はチャクチ海で日射によって加熱され (太田修士論文, 2014)、北極域での熱輸送や海氷融解に大きく寄与している (Itoh et al., 2013, 2015a)。また、近年の夏季の水温上昇によって、冬季にまで暖かい夏季水の影響が残る、海氷形成が妨げられている (Itoh et al., 2012)。

一方で、北極海の至る所で温暖化が起こっているわけではないことも、本事業の解析で明らかになってきた。例えば、シベリア側北極海の亜表層(50–100m)ではむしろ寒冷化が起こっている(Nishino et al., 2013)。この海域では近年、結氷期前の海氷減少が著しく、開放水面では海洋が直接大気から冷却を受け鉛直的に混合する。その結果、冷たく厚い水が形成されシベリア側北極海の亜表層に広がっていくと考えられる。

また、淡水化については、2000年代前半から後半にかけてアラスカ側北極海で淡水量が増えていたことが米国・カナダを中心とした観測研究により明らかになった²⁾。これは、ただ単に海水融解水が増加しただけではなく、海氷減少に伴い風により駆動される海洋循環が強化され、アラスカ側北極海のポーフォート循環内に淡水を含んだ太平洋水や河川水が蓄積されたためである。このような淡水化は、後述するように、生態系にも影響を及ぼすことが本事業からも分かってきた(e.g., Nishino et al., 2011a, 2013)。

北極海の酸性化・貧栄養化／富栄養化～生態系への影響～

北極海の水氷減少や海洋循環の変化、温暖化や淡水化といった物理環境の変化は、海水中の化学環境や生態系の変化とも密接に関係している。例えば、北極海は、二酸化炭素(CO₂)の吸収を妨げていた海水の蓋が溶けて無くなったことで、酸性化が急速に進行している³⁾。酸性化や淡水化は海水中の炭酸カルシウムの飽和度(Ω)を低下させ、炭酸カルシウムの殻を持つ生物の成長を阻害する可能性がある(北極海の酸性化やΩの低下については次の第3項で詳しく述べられている)。

さらに、本事業では、海氷減少に伴う海洋循環の強化や渦の活発化が、栄養塩分布の変化を通じて、植物プランクトンの分布や生産(基礎生産)にも影響を及ぼすことを明らかにした。Nishino et al. (2011a)は、近年の海氷減少に伴いアラスカ側北極海ではポーフォート循環内に淡水が蓄積することにより表層栄養塩濃度が低下(貧栄養化)し、その結果、大型植物プランクトン量が減少していることを示した(図 3.6.6)。このような貧栄養化が著しい海域では、渦が陸棚域から栄養塩や鉄、有機物を運ぶのに重要な役割を果たし、植物プランクトン量や沈降粒子量の増加に寄与している(Nishino et al., 2011b, Aguilar-Islas et al., 2013, Watanabe et al., 2014)。一方、シベリア側北極海では、結氷初期の開放水面拡大に伴い、海洋の冷却と混合により低温で高栄養塩の陸棚冬季水が形成され、この冬季水が海盆に広がり、そこでの栄養塩濃度を高めている(富栄養化; Nishino et al., 2013)。この海域では海氷減少により海水中の光環境も改善されるため、基礎生産が増加している可能性がある⁴⁾。北極海のアラスカ側とシベリア側の化学環境の違いは、栄養塩だけでなく、化学トレーサーとしても有用な溶存有機物の分布にもみられる(Gueguen et al., 2012, 2015)。シベリア側(アラスカ側)の溶存有機物は高分子量(低分子量)で陸起源の割

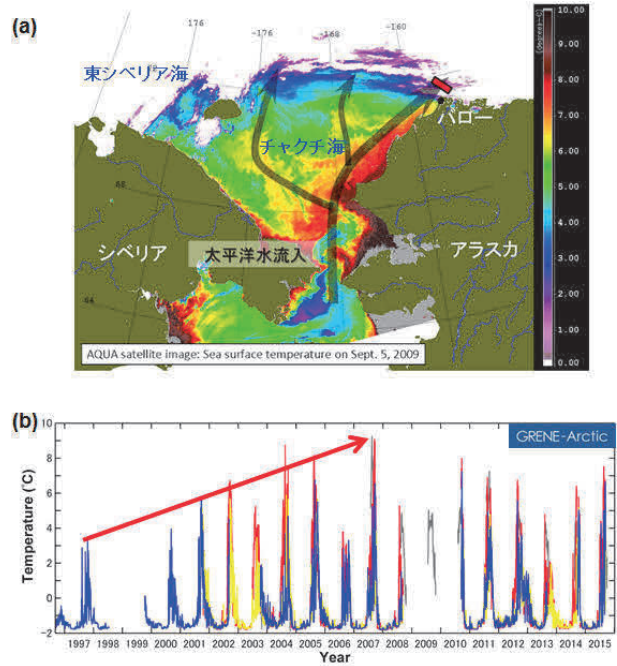


図 3.6.5 (a) 人工衛星より得られた 2009 年 9 月 5 日の表面水温分布 (アラスカ大学フェアバンクス校提供) と太平洋水の流れの模式図、及び(b) バロー海底谷における海洋表層(40m)の水温の時系列 (Itoh et al., 2013 を更新)。赤、青、及び黄色のグラフは、それぞれバロー海底谷の東側、中央、及び西側に設置した係留系より取得したデータを表す。灰色のグラフは、人工衛星より取得した表面水温のデータを表す。

合が高い(低い)。また、海氷減少に伴い秋季に植物プランクトンの大増殖(秋季ブルーム)が起こる海域が広がっていることが最近の衛星観測より確認されている⁵⁾。本事業でも、チャクチ海で初めて現場観測により秋季ブルームが起こるメカニズムを捉えた(Nishino et al., 2015)。高時間分解能の定点観測から、秋季の強風による乱流混合と慣性周期でみられる栄養塩躍層の上昇が同期したときに、表層に栄養塩が供給されブルームが起きることが明らかになった。植物プランクトンのブルームは、低温環境下であっても、微生物の活性や現存量を増加させることも分かってきた(Uchimiya et al., in prep.)。植物プランクトンは生態系の底辺を支える生物であり、その生産や分布の変化は食物連鎖網を通じて、より高次の生態系にも影響する(e.g., Yokoi et al., 2016, Matsuno et al., 2015c)。詳細は後述の第 4～6 項を参照されたい。

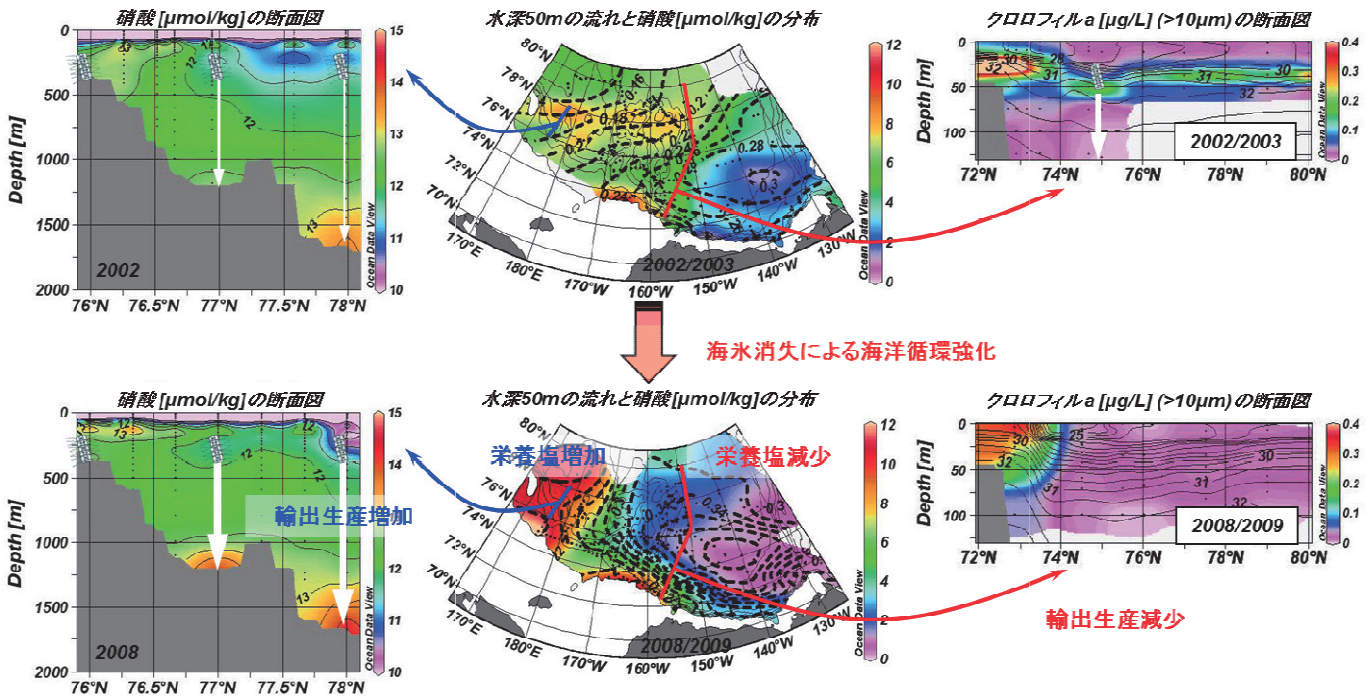


図 3.6.6 近年の北極海の家氷減少に伴う海洋循環の強化と栄養塩分布、及び生物生産の変化についての模式図 (Nishino et al., 2011a, 2013)。(上側中央) 2002 年/2003 年と (下側中央) 2008 年/2009 年における水深 50m での力学高度 (dyn. m; 破線) と硝酸 ($\mu\text{mol}/\text{kg}$; カラー) の分布、(上側右) 2002 年/2003 年と (下側右) 2008 年/2009 年における大型 ($10\mu\text{m}$ より大きい) 植物プランクトンのアラスカ沖の (赤いラインに沿った) 鉛直断面、及び (上側左) 2002 年と (下側左) 2008 年における硝酸 ($\mu\text{mol}/\text{kg}$) のシベリア沖の (青いラインに沿った) 鉛直断面。データは「みらい」及び米国・カナダ砕氷船により取得。

北極海の生物学的ホットスポットの海洋環境

北極海の玄関口であるチャクチ海南部は、世界の海の中でも最も生物生産が高い海域の一つである。この海域は、太平洋からの高栄養塩水が流入してくるため基礎生産が高く⁶⁾、大量の有機物が海底に沈積し底生生物の餌になっている⁷⁾。その底生生物を求めて、多くの海生哺乳類が集まる⁸⁾。このため、この海域は生物学的ホットスポットと呼ばれる。生物学的ホットスポットの形成・維持機構についてはまだ不明な点が多く、また生物生産が高いチャクチ海南部の生態系の変動は社会的にも大きなインパクトを与えるため、本事業ではこの海域を一つのターゲットエリアとして観測研究を行った。

我々は、チャクチ海南部の生物学的ホットスポットにおいて、2012 年 7 月から 2014 年 7 月までの期間、初めて係留系観測を行うとともに、2012 年及び 2013 年の秋季に「みらい」による詳細な船舶観測を実施した。その結果、この海域では春季と秋季に植物プランクトンのブルームが起こっていることが明らかになり、特に秋季ブルーム前には底層水の濁度が上昇し、酸素濃度が低下することから、海底への粒状有機物の沈積と分解(栄養塩の再生)により秋季ブルームが引き起こされることが示唆された (Nishino et al., 2016)。ここでの粒状有機物の主要な構成成分は透明細胞外ポリマー粒子 (TEP) であることも分かった (Yamada et al., 2015)。また、底層水がドーム状構造を形成することにより、栄養塩が表層に供給されやすくなり、この海域が周りより基礎生産が高くなることが示唆された

(Nishino et al., 2016)。一方で、基礎生産は海洋表層の成層の強さに左右され、2012 年の秋は海氷融解水が表層を占め成層が強くなり、下層からの栄養塩供給が低下したことにより通常年より基礎生産が低下したと考えられる (Nishino et al., 2016、大額修士論文, 2016)。

チャクチ海(陸棚域)はまた、北極海中央部(海盆域)への物質供給においても重要な海域である。我々は、「おしよろ丸」や「みらい」を用いて、ベーリング海北部及びチャクチ海からカナダ海盆にかけての広域観測を実施し、基礎生産や動植物プランクトンの分布と密接に関係する栄養塩・微量元素・溶存有機物等の分布を詳しく調

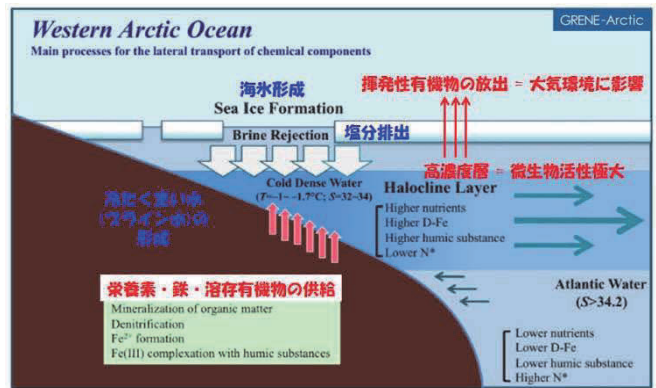


図 3.6.7 北極海沿岸から沖合への化学物質輸送の模式図。Hioki et al., 2014 の模式図に本事業の様々な研究成果を加筆。

査した。その結果、チャクチ海陸棚底層と、陸棚斜面からカナダ海盆の垂表層(100~200m)でみられる冷水塊に、高濃度の栄養塩・鉄・溶存有機物が観測された(図 3.6.7; Hioki et al., 2014)。水塊分析から起源と広がりやを推定した結果、チャクチ海陸棚底層から栄養塩・鉄・溶存有機物が供給されることで、それらは高濃度となり、冬季の陸棚上で海氷形成に伴って生成される水塊(ブライン水)によって陸棚底層から陸棚斜面、そして海盆地に運ばれていることが示唆された。鉄の供給源には他にも河川や海氷(Takesue and Nishioka, in prep.)、エアロゾル(Kanna et al., 2014)が挙げられる。溶存有機物は、高濃度になるほど陸起源のものが多くなる(田中修士論文, 2014, Tanaka et al., 2015)。また、有機ヨウ素ガスや微量元素であるマンガン、ニッケル、亜鉛、カドミウムも、鉄と同様に多くは海底から供給され、ブライン水による輸送で海盆地に運ばれていると考えられる(Ooki et al., 2015, Kondo et al., in prep.)。有機ヨウ素ガスはバロー海底谷など水塊の湧昇が起こる海域で大気に放出され、北極域の対流圏オゾンに触媒的に破壊する可能性がある(Ooki et al., 2016)。一方、カナダ海盆の垂表層にはチャクチ海から有機物が供給されているため、微生物活性のプロファイルは垂表層で極大となる特徴的な構造を示す(Uchimiya et al., 2013)。また、チャクチ海陸棚域からカナダ海盆の密度躍層の直上に、TEP を多量に含む粒子が蓄積する薄層が存在することが明らかになった(Yamada et al., 2015)。TEP はチャクチ海陸棚域において生成され、その一部がカナダ海盆へ水平的に輸送されることで、海盆地の物質循環に影響を及ぼしている可能性がある。上述した陸棚域から海盆地への物質輸送とは逆に、カナダ海盆の高栄養塩水が栄養塩の枯渇したチャクチ海北部に貫入してくることで、垂表層にケイ酸塩極大が形成され、秋季の珪藻ブルームを維持していることも観測されている(Nishino et al., 2016)。

まとめ

北極海の水氷減少に伴う物理・化学環境の変化、及びそれらに対する生態系の応答は場所や季節により異なり、今後さらなる観測研究の拡充が求められている。中でも、シベリア側北極海は、地球温暖化に伴う海底永久凍土の融解⁹⁾や海岸浸食¹⁰⁾、そして海水激減が引き金となり生物地球化学的な変化(メタンやCO₂の大気への放出、炭素・栄養塩・微量元素・粒状及び溶存有機物等の北極海への供給、及びそれらと関係した炭素循環や生態系の変化)が最もダイナミックに起きている海域であるが、未だデータの空白域となっている。また、北極海に隣接するベーリング海も温暖化と海水変動に伴う劇的な環境変化が生じており、ベーリング海峡を通過する海水の流入を通じて、北極海に大きなインパクトを与えられとされる(例えば、海洋生物の北側へのシフト)、ベーリング海と北極海の相互作用についてはまだ十分には理解されていない。ベーリング

海の水氷変動は太平洋西部亜熱帯域の対流活動とも関係していることが本事業の解析から分かっており(Nakanowatari et al., 2015)、北極海の環境変動を論ずる際は、熱帯・中緯度・高緯度における大気海洋相互作用をも視野に入れる必要がある。

一方、季節的には、海水が最も後退する夏から秋にかけての時期を中心に観測が行われてきた。今後は、冬季の氷上キャンプでの観測や係留系による通年観測を通じて、夏から秋の船舶観測だけでは得られないデータを取得し、北極海の物理・化学環境、及び生態系の季節変化を把握する必要がある。さらには、観測データに加えて、時空間的により広い範囲をカバーする衛星データや数値モデルを駆使して、激変する北極海の海洋環境を把握するとともに、それが環北極海域、そして全球の生態系・気候システムに与える影響について評価することが期待される。

3. 海洋酸性化への影響

執筆者：川合美千代

北極海は、海洋酸性化の影響が他の海域に先駆けて現れる海として知られている。しかし酸性化の状況や生物への影響は北極海の海域ごとに大きく異なる。本事業では、カナダ海盆とチャクチ海における海洋酸性化の状況を調査した。特に、石灰化生物が豊富なチャクチ海に注目し、これまで不明であった季節変動に着目した解析を行った。

北極海で進行している海洋酸性化のこれまでの知見

産業革命以降、人為起源のCO₂が大気から海水に溶け込むことにより、海水のpHは徐々に減少しつつある。これが海洋酸性化であり、現在、全球規模で進行しつつある¹⁾。酸性化が進行すると海水の炭酸カルシウム飽和度(Ω)が低下するため、炭酸カルシウムの殻や骨格をもつ石灰化生物にとってその形成・維持が困難になる。また、多くの石灰化生物には、発育、成長、繁殖などにも負の影響があらわれることが室内実験などにより指摘されている¹¹⁾。

北極海では、水温が低いこと、河川水が大量に流入するためCO₂に対する緩衝能力が低いことにより、もともと海水のΩが低い。したがって、酸性化が進行した際、他の海より先にΩ<1(未飽和:炭酸カルシウムが海水に溶け出すような状況)に達すると予想されている^{12), 13)}。しかし、酸性化の進行状況は、北極海の中でも海域によって大きく異なっている¹⁴⁾。これまですでに、ベーリング海¹⁵⁾、東シベリア海¹⁶⁾、カナダ多島海^{17), 18)}(Yamamoto-Kawai et al., 2013)など沿岸域とカナダ海盆^{3), 19), 20)}の低塩分な表層水について、アラゴナイト(炭酸カルシウムの結

晶形の一つで、比較的溶けやすい)に対して未飽和に達していることが観測されている。また、有機物分解に由来するCO₂が多いベーリング海²¹⁾、東シベリア海¹⁶⁾、チャクチ海²²⁾の大陸棚底層水と、これらの大陸棚起源水が流入するカナダ海盆中層²³⁾、多島海下層¹⁸⁾(Yamamoto-Kawai et al., 2013)、バフィン湾¹⁸⁾などでもアラゴナイト未飽和が観測されている。一部の大陸棚底層では、溶けにくいカルサイトタイプの炭酸カルシウム未飽和についても観測されている^{15), 23)}。

表層におけるΩの分布

2008年、カナダ海盆表層における大規模なアラゴナイト未飽和が観測され、その原因が人為起源CO₂だけでなく、海水の融解によるCO₂吸収量の増加と、融解水による希釈という温暖化の影響によるものであることが指摘された^{3), 18)}。2012年、カナダ海盆からチャクチ海にかけての広範囲の表層水について調査を行った。その結果、アラゴナイト未飽和の状態が2008年以降継続的に起きていることを確認した(図3.6.8)。また、淡水の多いカナダ海盆では一様に低かったが、一次生産の高い測点ではΩが高い傾向が見られた。このことから、近年の温暖化による一次生産量の増減が、酸性化の状況にも影響を与えることが示唆される。また、2015年にも広範囲の調査を行った結果、現在も広範囲にアラゴナイト未飽和海域が広がっていることが明らかになった。

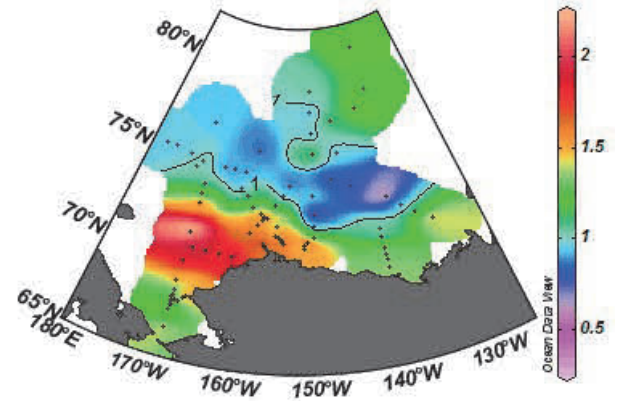


図 3.6.8 2012 年における表層海水のアラゴナイト飽和度の分布。

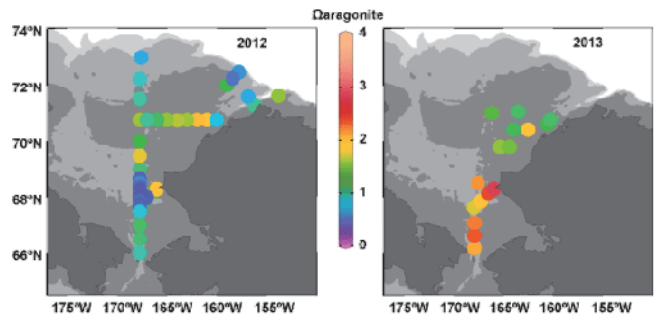


図 3.6.9 チャクチ海底層水のアラゴナイト飽和度。左) 2012 年秋の「みらい」航海、右) 2013 年初夏のおしよる丸航海の結果。

底層におけるΩの分布

大陸棚底層でも、炭酸カルシウム未飽和が観測されている。しかし、これまでの観測は5月から10月にかけての時期(多くは夏季)に実施されたものあり、Ωの一年間の季節変動は不明であった。そこで本事業では、石灰化生物の豊富なチャクチ海底層を対象とし、船舶観測で可能な範囲の季節変化をとらえるため、2012年9~10月の「みらい」航海ならびに2013年7月のおしよる丸航海においてΩの観測を実施した。図3.6.9に示したように、2度の観測におけるΩの値は大きく異なっていた。2012年秋にはアラゴナイト未飽和海域が広く分布しており、生物学的ホットスポット(第2章戦略研究目標3b参照)においては、カルサイト未飽和も観測された。これは、表層で生産された多量の有機物が下層に沈降し、CO₂に分解されたためと考えられる。一方、2013年7月には、アラゴナイト未飽和な底層水は全く観測されなかった。この時期は、有機物の分解よりも光合成が盛んで、海水中のCO₂が消費されていたためと考えられる。これらの船舶観測の結果、一次生産が活発な海域の底層水は秋季に炭酸カルシウム未飽和に達していることが明らかとなった(三船修士論文, 2013)。

チャクチ海におけるΩの季節変動の推定(係留観測から)

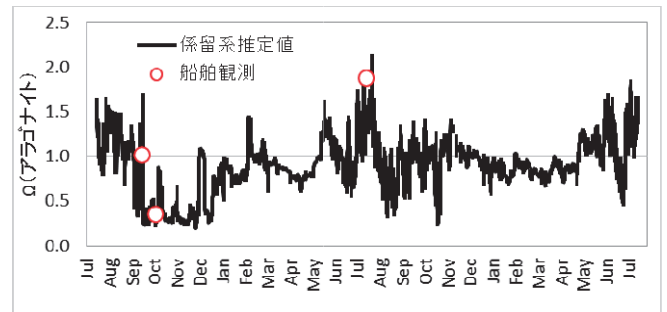


図 3.6.10 チャクチ海南部生物ホットスポット底層におけるアラゴナイト飽和度の季節変動。水温・塩分・溶存酸素の係留観測結果から推定したもの。期間は2012年7月から2014年7月。

次に、これらの船舶観測の結果を係留系データと合わせることで、観測例のない冬季を含むΩの季節変動の復元を試みた。まず、船舶観測の結果を元に、水温・塩分・溶存酸素からΩを推測する経験式を算出した。このような方法は、北極海以外の海域ですでに使用されている方法であるが²⁴⁾、北極海に適用したのは今回が初めてである。得られた経験式を、チャクチ海の生物ホットスポットに設置した係留系(Nishino et al., 2016; 第2章参照)による水温・塩分・溶存酸素のデータに適用することで、2012年から2014年の2年間にわたるΩの季節変動を復元した(図3.6.10)。

その結果、春の光合成により一旦Ωが上昇するが、夏から秋にか

けて沈降した有機物の分解によって Ω が大きく低下してアラゴナイト・カルサイト未飽和に達した後、冬の間もほとんどアラゴナイト未飽和のままであるという結果が得られた。このことは、冬季も溶存酸素が未飽和であるという係留系のデータによるもので、冬季の底層水における有機物分解・呼吸の維持が低い Ω の原因であると推察される。カルサイトについては、冬季は過飽和と見積もられた。底層水がアラゴナイト未飽和であった時間は年間の 66%、カルサイトについては 16%であった。これまで、チャクチ海における夏季底層の未飽和については知られていたが^{22),25)}、未飽和の時期がこれほど長いこと、冬季もアラゴナイト未飽和であることは本事業により初めて示された(Yamamoto-Kawai et al., 2016)。

大気中二酸化炭素の増加に伴う影響評価

得られた Ω の季節変動について、大気中 CO_2 濃度増加の影響を見積もった。まず、人為起源 CO_2 が無かった産業革命以前の大気中 CO_2 濃度(280 ppm)の場合、チャクチ海底層のアラゴナイト飽和度は現在に比べて高く、未飽和な時期は現在の約 1/3(年間 24%)であったと見積もられた。ただし、海域の生物生産量ならびに有機物分解量が温暖化などにより変化した場合、春から秋にかけての Ω の値も変化するものと考えられる。しかし、例えば産業革命以前の生物生産量・有機物分解量が現在の半分だったと仮定しても、年間の 12%がアラゴナイト未飽和であったと見積もられた。これらの結果から、生物生産と有機物分解の盛んな生物学的ホットスポットにおいては、産業革命以前からアラゴナイト未飽和を経験していた可能性があることを示唆している。人為起源 CO_2 の増加は、未飽和な時期を大きく延長したと同時に、未飽和な海域の面積も拡大したものと考えられる。

同様に、今後も CO_2 濃度が増加した場合についても見積もりを行った。現在から 50 年後に大気中 CO_2 濃度が 650 ppm に達したときには、アラゴナイト未飽和の時期は年間の 82%にも達し、光合成の盛んな一部の時期を除いて、年中未飽和であると予想される。カルサイトについても年間の 57%が未飽和になると見積もられた。このことは、人為起源 CO_2 により、石灰化に適した時期が大幅に減少しつつあることを示している。二枚貝はチャクチ海における主要な底生生物かつ海鳥やセイウチなどの高次生物の餌であるため^{7), 26)}、チャクチ海の生態系において重要な位置を占めている。このため、長期にわたる炭酸カルシウム未飽和が、石灰化生物に与える影響を調べる必要がある。

一方で、2013 年のおしよ丸航海において、生物ホットスポットでの底生生物の採取を行ったところ、多くの二枚貝が採取された(図 3.6.11)。これらの貝類は季節的未飽和に耐えうる何らかの保護機構、例えば有機層による殻の保護、移動、豊富なえさによるエネルギー補填^{27), 28)}などを持ち合わせていることが示唆される。また、



図 3.6.11 チャクチ海南部生物ホットスポットにおいて、ドレッジ観測で採取された貝類。

大きな成貝だけでなく、小さな稚貝の生息も確認されたことから、特に脆弱な幼生期・着底期が、炭酸カルシウム過飽和の時期に一致しているのかもしれない。この場合、今後 CO_2 濃度の上昇により過飽和時期が縮小した際には、石灰化生物の繁殖や成長を阻害する可能性が考えられる。

いずれにしても、季節的未飽和に対する生物の応答を定量的に調査することが急務である。本事業により、チャクチ海の生物学的ホットスポットはすでに長期にわたって炭酸カルシウム未飽和であることが示された。このことは、この海域が海洋酸性化に対する生物の脆弱性や耐久性、あるいは酸性化による物質循環の変化などを明らかにする上で重要な情報を与える貴重な場であり、今後も注視すべき海域であることを意味している。

4. 基礎生産の変化

執筆者：平譚 享 藤原 周 鈴木光次 平田貴文
齊藤誠一 飯田高大 渡邊英嗣

北極海の海水縁では、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水縁ブルームを起こす。また、継続的に栄養塩供給がある海域では海水後退後の夏季にもブルームを起こす場合がある(open water bloom)。北部ベーリングおよびチャクチ海陸棚域は海底深度が浅く、植物プランクトンの増殖速度が動物プランクトンによる捕食速度よりも一般に高いため、ブルームによって生産された有機物の多くは海底に沈降し、底生生物に大量の餌が供給されている。また、その底生生物を利用する大型の海生哺乳類も多く存在する、生産性が極めて高い海域である。

地球温暖化に伴って、近年では海水の減少、海水後退時期の早期化が進んでいる。このような現象が、生物生産の原点となる基礎生産のタイミングを変化させ、それを利用するより高次の生物生産に影響することが懸念されている。しかしながら、北極海域における基礎生産や植物プランクトンの群集構造、動態、生理機能に関する

研究は時空間的に断片的なものも多く、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。また、新生産、CO₂の吸収との関係、アイスアルジーについても不明な点が多い。そこで、本事業では現場観測と衛星観測、およびモデル実験を活用し、主に北部ベーリング・チャクチ海陸棚において、海水変動(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調べ、海水-基礎生産-植物プランクトンサイズの関係については広範囲かつ長期的にその傾向を明らかにした。

基礎生産および植物プランクトンのサイズを時空間的に広く観測するためには、現場データに加えて衛星データを利用することが望ましい。しかしながら、北極海域においては有色溶存物質(CDOM)や懸濁物質の影響のため、一般に使われている推定方法(アルゴリズム)が利用できない。そこで、本事業では初めに北極海専用の基礎生産および植物プランクトンサイズ推定アルゴリズムを開発した。データは本事業で行われた「みらい」、「おしよる丸」による航海のほか、2007-2008年の国際極年(IPY)で実施した「おしよる丸」の航海で取得したものをを用いた。

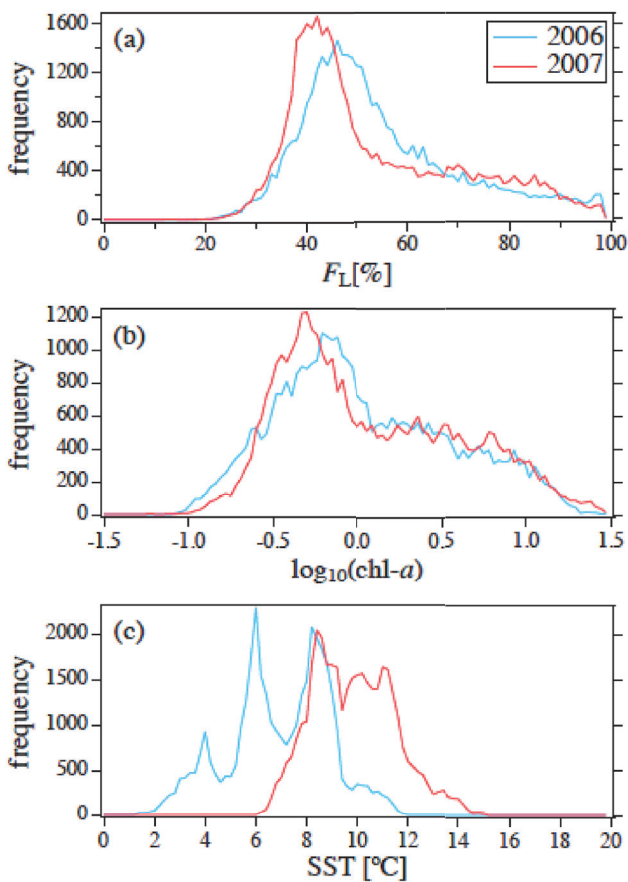


図 3.6.12 2006年8月および2007年8月のチャクチ海およびベーリング海陸棚域における、(a) 植物プランクトンサイズ組成、(b) chl-a濃度、および (c) 海表面水温(SST)の頻度分布。縦軸はピクセル数。

植物プランクトンサイズは、細胞粒径 5 μm 以上の植物プランクトン群集が持つクロロフィル a (chl-a)が全てのサイズの chl-a に占める割合をサイズ組成の指標とし、衛星リモートセンシングで得られる光吸収係数と後方散乱係数を用いて推定するアルゴリズムを構築した。本アルゴリズムの応用研究として、近年では比較的寒冷であった2006年8月と、温暖であった2007年8月のチャクチ海およびベーリング海陸棚域における植物プランクトンサイズ組成、chl-a濃度および海表面水温(SST)の空間分布の傾向を統計的に比較した。その結果、植物プランクトンサイズは chl-a に比べ、SSTの変化に対してより鋭敏に応答することが示唆された(図 3.6.12)。本研究は、植物プランクトンサイズ組成の時空間的に連続したモニタリングと、北極域における海洋環境変動に対する海洋生態系の応答の評価を可能とした(Fujiwara et al., 2011)。

基礎生産については、北極海の高い CDOM の影響を避けるために、誤差を生じやすい chl-a 濃度を使用せず、植物プランクトンの光吸収を用いて 1日あたりの純基礎生産力を衛星から推定するアルゴリズムを開発した。chl-aを使用した場合、2002年から2012年にかけてベーリング海北部からチャクチ海陸棚域の基礎生産力に有意な増加・減少傾向は見られなかったが(図 3.6.12 c、d)、本アルゴリズムを使用することにより、同期間および同海域の基礎生産力に有意な増加傾向があることが明らかとなった(図 3.6.13a、b)(Hirawake et al., 2012)。

その後、本基礎生産アルゴリズムの特性は、他の研究者によって開発された31種類の衛星純基礎生産力推定アルゴリズムとともに、北極海域のデータセットを用いて比較された。多くのモデルは北極海域の純基礎生産力を完全には再現できず、幾つかのモデルはバイアスが非常に大きかった。また、低い純基礎生産力は概ね比較

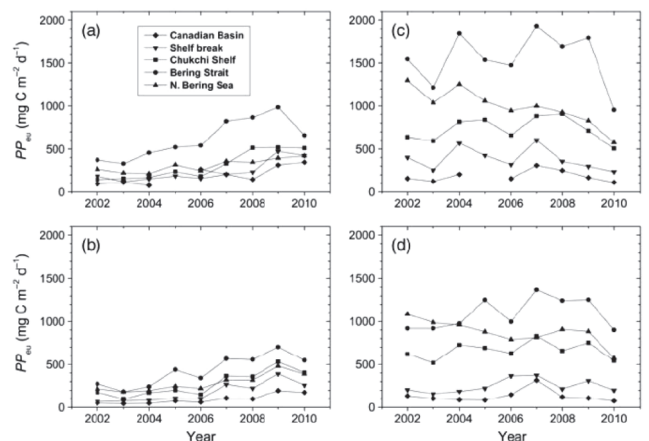


図 3.6.13 北部ベーリングおよびチャクチ海における1日あたりの基礎生産量の 変動。(a)、(b)本研究で開発したアルゴリズムによって推定。(c)、(d) chl-a を 使用したアルゴリズムで推定。上段は8月、下段は9月の平均値。

的良い精度で推定できていた。光吸収モデル(本研究のアルゴリズムを含む)はバイアスが低いが、現場データとの相関が低くなる場合があった (Lee et al., 2015)。

本事業で開発したこれらのアルゴリズム(一部改良)を利用し、年間の生物生産の基盤となる春季ブルーム期の植物プランクトンサイズ組成が、海氷融解タイミングの経年変化と共にどのように変わることなのか、16年間の衛星データを用いて空間統計的に評価した。海氷融解タイミングが早い年ほど、春季ブルーム期の大型の植物プランクトンがより栄養を獲得しやすい海洋構造が形成され、全植物プランクトン中に占める大型植物プランクトン(細胞粒径 $5\mu\text{m}$ 以上)の割合が増加することを示した。さらに、当海域の年間基礎生産量は大型植物プランクトンの比率が主要なコントロール要因となっていた(図 3.6.14)。これらの結果は、北極海の昇温による海氷融解の早期化に伴って、大規模な春季ブルームに必要な栄養塩が供給されることを示唆するものであり、更にそれに対する基礎生産者の応答の一端を示すものであり、今後、食物網を介した高次生物の種組成や分布変化の要因解明への貢献が期待される (Fujiwara et al., 2016)。

一方、チャクチ海の北部(海盆域)においても、海氷減少に対する植物プランクトンの群集構造の応答を、2008年-2010年の観測で得られた植物プランクトン色素のクラスター解析により評価した。2008年は2009年および2010年よりも海氷後退の時期が1-2ヶ月早く、2008年はハプト藻が優占していたのに対し、2009年および2010年は冷水域を好むプランクトン藻類が優占していた。2008年

におけるハプト藻類の優占は、海氷後退が早く、それに伴って海面水温が上昇していたことが原因と考えられる。本結果は、今後、夏季の海氷後退期間が長くなれば、植物プランクトンの群集構造が変化し、食物連鎖や生物地球化学過程に影響を与えることを示唆するものである (Fujiwara et al. 2014)。

海氷、水温の変動とそれに伴う基礎生産の変動が、西部北極圏海域において生物過程が $p\text{CO}_2$ にどの程度寄与しているかについても調査した。データは本事業で実施された「みらい」MR12-E03航海で取得した。生物過程のパラメータとして基礎生産力を使用した。より正確に推定するために前述の基礎生産力推定アルゴリズムを最適化した。その結果、最適化したアルゴリズムの推定精度は、他のアルゴリズムによりも高く、従来のアルゴリズムの問題点であった過大評価傾向も小さくなった。また、観測を実施した9-10月において、海氷融解水や強風などの物理過程が顕著な海域では生物過程の寄与が小さく、 CO_2 の吸収能力が低かった。一方、海氷融解水や強風など CO_2 を放出するような物理過程の影響が小さい海域では CO_2 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 CO_2 の吸収が顕著であることが示された。したがって、海氷の減少に伴って基礎生産が増加する海域では CO_2 を吸収する能力が高くなるが、逆に融解水によって成層化が進むと CO_2 の吸収能力が妨げられる可能性もある (夫津木修士論文, 2014)。

海洋表層に吸収された CO_2 が植物プランクトンの光合成によって有機物として固定され、深層へ輸送される(バイオロジカルポンプ)速度を推定する上で、新生産は非常に重要なパラメータである。主

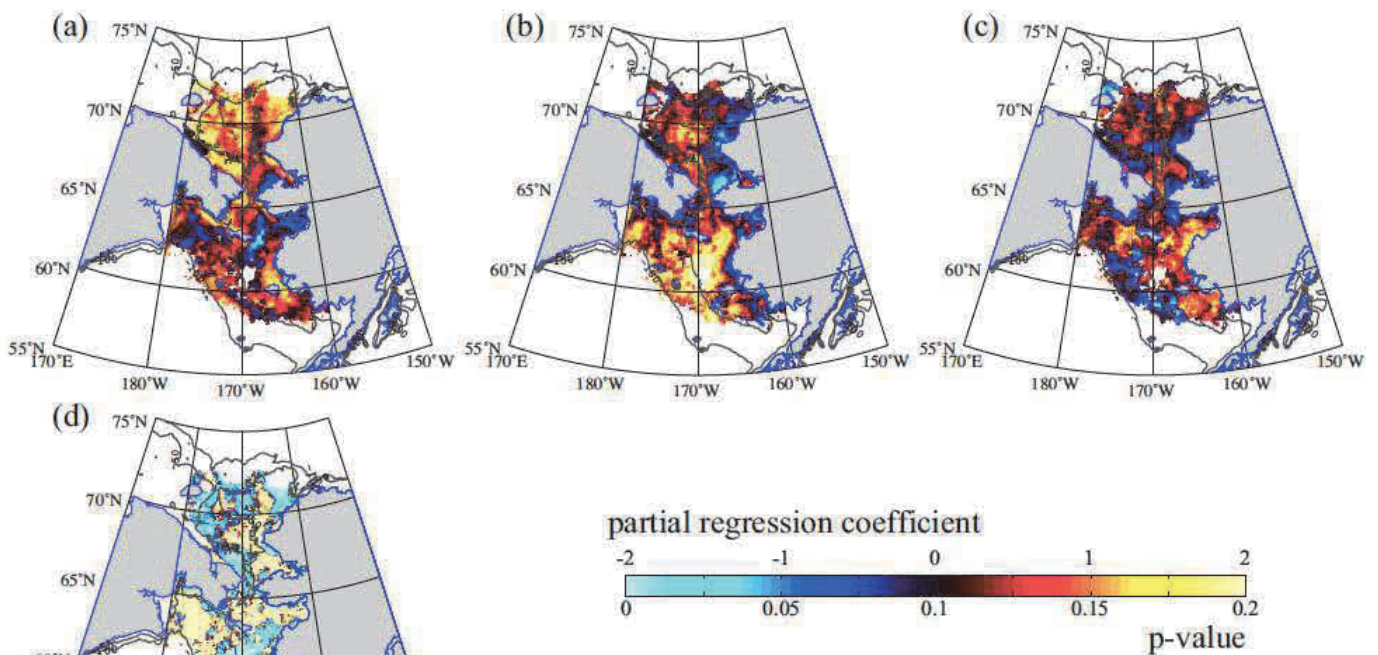


図 3.6.14 年間基礎生産量を a) $5\mu\text{m}$ 以上の植物プランクトンの割合 (F)、b) SST、および c) 海氷に覆われていない期間(日数)の重回帰式として表した際の各従属変数の偏回帰係数。d) は F -test の p 値。

珪藻類がその役割を担っており、植物プランクトンサイズや海水融解後の経過時間と f 比（全一次生産に占める新生産の割合）の関係も報告されているが、新生産に寄与する主要珪藻種に関する知見は無い。そこで、本事業による「おしよろ丸」航海で調査を行ったところ、新生産は、海水中の硝酸塩濃度と有意な正相関 ($p < 0.05$) があり、硝酸塩を供給する物理過程に支配されていたことが示唆された。また、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた有殻藻類の属同定および炭素生物量の算出結果より、細胞濃度で *Chaetoceros* 属（特に、*Ch. socialis*）が優占 (>50 %) したが、全植物プランクトンの炭素生物量では *Thalassiosira* 属が珪藻生物量に最も寄与していた ($p < 0.01$)。さらに、 f 比と *Thalassiosira* 属の炭素生物量との間に有意な正相関 ($p < 0.05$) が見られたことから、新生産に寄与していた珪藻は *Thalassiosira* 属であったと考えられた (図 3.6.14)。また、硝酸塩濃度と *Thalassiosira* 属および *Ch. socialis* の相対存在量との間にそれぞれ負および正相関 ($p < 0.05$) があつたことから、水柱の成層化が強化されることで、*Thalassiosira* 属（細胞サイズ $26.3 \pm 8.3 \mu\text{m}$ ）の存在比が低下し、*Ch. socialis* ($9.4 \pm 4.3 \mu\text{m}$) の存在比が高くなった可能性が考えられた (吉野修士論文, 2014)。

現場観測や衛星観測により、海水の減少や関連した海洋環境の変化に対する植物プランクトンの応答が部分的に明らかになったが、観測方法に大きな制限を受ける海水直下の付着藻類 (アイスアルジー) に関する知見は非常に少ない。これまで、北極海全域を対象にした海水海洋物理モデル COCO に低次海洋生態系モデル NEMURO を結合させた上で、チャクチ海の低次生物とその輸送プロセスについての再現実験を行ってきたが (Watanabe et al., 2014)、海水生態系の基礎生産者であるアイスアルジーは組み込まれていなかった。そこで本事業では、低次海洋生態系モデルに新たにアイスアルジーを含む海水生態系を組み込み (Arctic NEMURO と命名)、海洋循環変動とそれに対する生態系応答に

ついて解析を行った (Watanabe et al., 2015、図 3.6.15)。複数年を対象とした季節変動実験の結果から、2012 年は冬季の北風偏差によって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、ノースウインド海嶺周辺域においてアイスアルジーの基礎生産とそれに伴う粒子沈降が抑制されたことが明らかとなった (図 3.6.16)。またアイスアルジーに関する光特性・栄養塩取込過程・捕

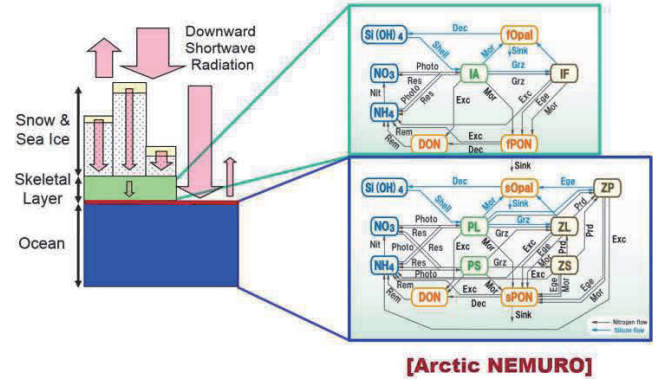


図 3.6.15 海水海洋生態系結合モデル (Arctic NEMURO) の概念図。

食圧・沈降速度などを変化させる感度実験を行い、海水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。また海水融解後に一気に沈降することで、大気中の二酸化炭素を海洋深層に隔離する「生物ポンプ」としての働きが無視できない。今後、海水過程を考慮した 3 次元生態系モデリングとセジメントトラップ観測などが融合しながらお互いに進展していくことで、高次捕食者を含めた北極海洋生態系の全体的な理解につながる事が期待される。

以上のように、本グループでは、海水や水温といった北極海における環境変動に対する、基礎生産者および生物地球化学的な応答

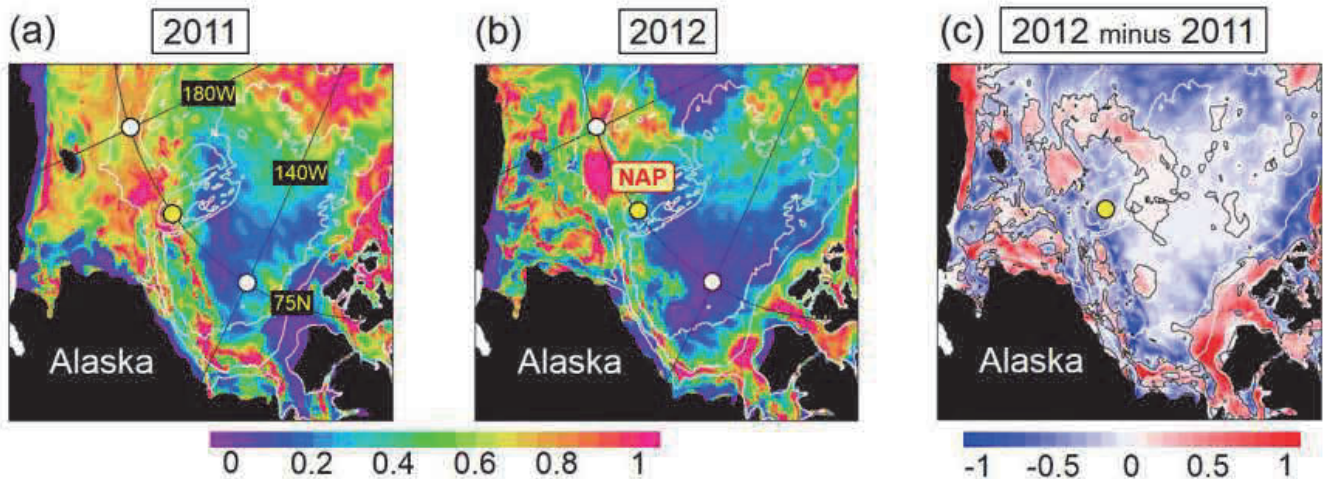


図 3.6.16 海水海洋生態系結合モデルから計算されたアイスアルジーの年間基礎生産量。(a) 2011 年、(b) 2012 年、(c) 2012 年と 2011 年の差。

について調べてきた。対象海域におけるこれらの結果は、海水後退の早期化が春季の表層水温の低下と栄養塩供給を促進し、大型の植物プランクトンが増え、基礎生産が増加する可能性を示している。しかしながら、本研究は主に陸棚域での変動を調査したものであり、暖水の流入や海盆域で見られる海氷融解水による強い成層化など、基礎生産にとって負の方向へ働く要因も考慮しながらその将来を予測する必要がある。また、中-高緯度においては、水温変化の地理的移動方向がそのまま植物プランクトンのサイズ等の移動方向とならない可能性も、衛星を使った研究で明らかとなった(和賀修士論文, 2014)。したがって、北極海生態系全体の将来像は、生物に影響を与える環境の変動をモニタリングするだけでは予測が困難であり、現場観測、衛星観測およびモデル実験を効果的に活用し、各生物の環境への応答を注意深く調べる必要がある。

5. 動物プランクトンへの影響

執筆者：山口 篤 松野孝平

動物プランクトンは、海洋生態系において基礎生産を高次生物に受け渡す、エネルギー転送者としての役割を持つ。北極海に優占する動物プランクトンの世代時間は、小型種では約 1-3 ヶ月で、バイオマスに優占する大型カイアシ類 *Calanus glacialis* (カラヌス・グラシアリス) は 1 年である(Matsuno, 2014a)。動物プランクトンは大半の種が 1 年以内の世代時間を持ち、かつホルマリン固定にて、半永久的な試料保存が可能のため、該当海域における生物生産の経年変動を評価するのに適した分類群である。海氷減少が動物プランクトンに与える影響を評価することを目的とした本分野での研究成果は以下のようにまとめられる。

マイクロプランクトンの動態解明

まず、動物プランクトンの餌である、マイクロプランクトンの水平分布を明らかにした(Matsuno et al., 2014a)。2010 年 9-10 月の「みらい」航海にて、採水した試料をグルタルアルデヒドにて固定し、静沈検鏡することにより、西部北極海における 10 μm 以上のマイクロプランクトン群集の水平分布を評価した。マイクロプランクトン群集は水平的に明確に分離しており、陸棚域には珪藻類が卓越する群集が分布し、これは栄養塩濃度の高い太平洋水の流入に起因していると考えられた。一方、斜面域には渦鞭毛藻類や繊毛虫類が優占する群集が分布しており、これは高気圧性渦などの複雑な物理環境に起因していると考えられた。

マイクロプランクトンはその大半が珪藻類や渦鞭毛藻類といった植物プランクトンであるため、その増殖には光が必要不可欠である。しかし、北極海では冬至前後に、日中でも薄明か、太陽が沈んだ状態が続く極夜が起こる。この不適な環境を生き抜くために、マイクロ

プランクトンはシストや休眠期細胞などを形成し、水中から底泥中に生活環境を移す。しかし、北極海における底泥中のマイクロプランクトン休眠期細胞に関する知見は乏しかった。そのため、底泥中のマイクロプランクトン休眠期細胞の動態として、珪藻類の休眠期細胞(Tsukazaki et al., 2013)および貝毒原因藻である渦鞭毛藻類 *Alexandrium tamarense* (アレキサンドリウム・タマレンセ) のシスト(Natsuike et al., 2013)の底泥中現存量を明らかにした。

ベーリング海陸棚域の底泥中の珪藻類休眠期細胞は、その大半が春季ブルーム構成種やアイスアルジーであった。このことは、珪藻類は冬季の不適な環境を休眠期細胞として底泥中で生き延び、海氷融解後の鉛直混合により水柱に回帰し、春季植物プランクトンブルームに寄与していると考えられた(Tsukazaki et al., 2013)。ベーリング海およびチャクチ海における海底堆積物中の貝毒原因有毒渦鞭毛藻類 *A. tamarense* のシスト密度調査は本事業が最初であったが、チャクチ海において既報の世界最高密度でシストが分布していることが明らかとなった(Natsuike et al., 2013、図 3.6.17)。これは、本種が低水温海域に適応していることを意味し、当該海域において貝毒被害を引き起こしている可能性が示された。

マイクロプランクトンの珪藻類や渦鞭毛藻類は単細胞生物である。分裂により増殖するため、環境の好転に応じて、速やかに細胞数を

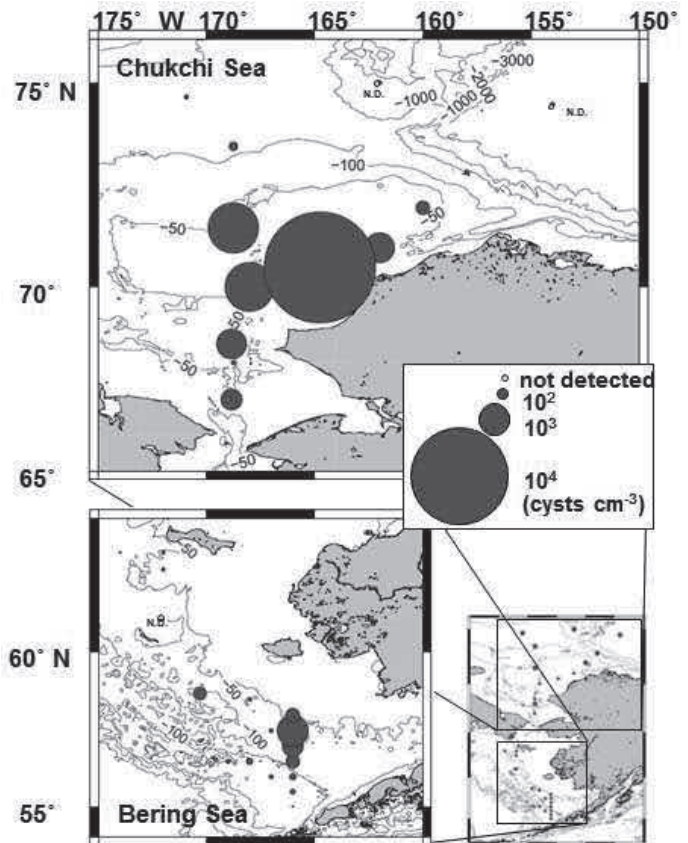


図 3.6.17 ベーリング海とチャクチ海海底堆積物中に存在する有毒渦鞭毛藻類 *Alexandrium tamarense* の水平分布。

増加させることが出来ることは、室内実験にて確かめられている。しかし、野外における環境変動に応じた、短期間の増殖や群集構造の変化に関する観察例は少ないのが現状であった。そこで、秋季のチャクチ海における低気圧通過に伴う強風イベントが、マイクロプランクトン群集に与える影響を評価した(Yokoi et al., 2016)。

2013年9月10日～25日にかけてチャクチ海1定点において16日間にわたる短期時系列観測を行い、マイクロプランクトン群集構造の短期変動を明らかにした。マイクロプランクトン群集には珪藻類が優占していた。観測9日目に強風イベントがあり、Chl. aが2倍程度多くなり、一部の種には有意な増加が見られた。大気冷却により躍層構造が徐々に弱まりつつある秋季のチャクチ海では、強風イベントは表層への栄養塩供給をもたらし、小規模なブルームを形成し得ることが明らかになった。またこの小規模ブルーム後は優占珪藻類群集が中心目から羽状目へと変わっており、夏から冬にかけての群集の季節遷移を促進する機能的役割があると考えられた。

動物プランクトンの機能的役割

この短期時系列観測では、同時に動物プランクトンのネット採集も行い、主要動物プランクトンであるカイアシ類 *C. glacialis* の消化管内色素量を測定することにより、カイアシ類による植物プランクトン群集の摂餌量推定も行った(Matsuno et al., 2015a)。16日間の観測期間の間に、動物プランクトン群集に明確な変動はなく、秋季に優占カイアシ類 *C. glacialis* は体内に大量の油分を蓄えた後期発育段階が優占し、越冬に備えていた。一方、強風イベントによる小規模な植物プランクトンブルームに伴い、カイアシ類の消化管色素量は1.8倍と、摂餌強度が増加していた。越冬のためのエネルギー蓄積として、強風イベントに伴う小規模な植物プランクトンブルームは、動物プランクトンの越冬のためのエネルギーとしてプラスの効果があることが示唆された。しかし、16日間ではカイアシ類の油球蓄積や生殖腺発達までの影響は見られなかった。

この動物プランクトンによる植物プランクトン摂餌過程には、摂餌量だけでなく、食べた餌がどれだけ動物プランクトンに消化吸收(同化: Assimilation)されるかの割合、同化効率(Assimilation efficiency)も重要である。動物プランクトンの主要分類群である、カイアシ類の物質循環に関わる諸パラメータのうち、同化効率は海洋生態系内における高次栄養段階へのエネルギー転送を推定する際に必要不可欠なパラメータである。しかし、カイアシ類の同化効率を実験的に求めた研究は乏しいのが現状である。そのため、北太平洋亜寒帯域の動物プランクトン相に優占する、大型外洋性カイアシ類(*Neocalanus* 属と *Eucalanus* 属)を対象に、同所的に分布する植物プランクトンを餌として与え、その同化効率の変動パターンを飼育実験により明らかにした(Abe et al., 2013)。得られた同化

効率の平均は *N. cristatus* で 45%–66%、*N. flemingeri* で 44%–66%、*E. bungii* で 34%–65%の範囲にあり、植物プランクトンの種によって大きく変動していた。これらカイアシ類3種の同化効率は、実験に使用した植物プランクトンの無機物含有量との間にいずれも有意な負の関係があった($r^2 = 0.79 - 0.87$, $p < 0.01$)。植物プランクトンのうち、高い無機物含有量を示すのは主に珪藻類で、カイアシ類は珪藻殻無機物の構成要因である Si をほとんど同化できないため、植物プランクトン無機物含有量の割合と同化効率には負の関係があると考えられた。

現在、海洋生態系モデルの NEMURO のような NPZD モデル(生物量を計算するモデル)や、PDM (Population Dynamics Model) および LEM (Lagrangian Ensemble Model) のように数を計算するモデルにおいても、動物プランクトン(主にカイアシ類を想定)の同化効率は 70% という固定した値が用いられているが、本研究によってカイアシ類の同化効率は可変性が大きく、やや低いこと(34–66%)が明らかになった。*N. cristatus* における LEM において同化効率を 66% に変化させた場合、本種は生活史を継続することができたが、44% に変化させた場合には生活史を継続できず、死亡することが明らかとなった。また 70% に比べて 66% の時にはコペポダイト期の発育も遅れることがわかった。このように、同化効率の変化は個体群維持や、その発育にも大きな影響を及ぼすため、今後海洋生態系モデルにおいてカイアシ類の同化効率も変動させることが望ましいと考えられる。特にカイアシ類の同化効率は植物プランクトンの無機物含有量と極めてよい相関を持つため、これらのパラメータとの関係を持つ式を用いることが重要と考えられる。

このように植物プランクトン基礎生産を受け継いだ動物プランクトンは、海洋漂流区において、高次生物への餌といった水産学上の重要性和、鉛直的な物質輸送(Biological pump)の主要な駆動源としての海洋学上の重要性の二つの側面を合わせ持っている。そのため、動物プランクトン群集が低次生産からより影響を受けているか(ボトムアップコントロール)、もしくは高次生物による捕食からより影響を受けているか(トップダウンコントロール)を明らかにすることは、生態系を介した物質循環を理解する上で大変重要である。海洋プランクトン群集のトップダウン・ボトムアップを定量的に比較するには、動物プランクトンサイズに基づく Normalized Biomass Size Spectra (NBSS) を求め、その NBSS 式の傾きを比較する方法が取られるが、西部北極海での研究例は乏しいのが現状であった。そこで 1991、1992、2007、2008 年の夏季にチャクチ海でおしよる丸にて採集された動物プランクトンホルマリン固定試料について、光学式プランクトンカウンター(Optical Plankton Counter: OPC)による計測を行い、その NBSS の経年及び水平分布を明らかにした(Matsuno et al., 2012b)。クラスター解析の結果、全定点は大きく4つの群集に分けられた。リズバーン半島以南では調査を行っ

た4年ともNBSSの傾きが急なボトムアップ的な群集が存在した。これは太平洋水による栄養塩供給により基礎生産が常に高いことの反映と考えられた。一方、リズバーン半島以北では、1991/92年は一般的な群集であったが、2007年はバイオマスの低い群集、2008年にはフジツボ幼生が卓越するNBSSの傾きが急なボトムアップ的な群集が見られ、経年変動が確認された(図3.6.18)。このリズバーン半島以北の経年変動は、海水融解タイミングの経年変動に関係していると考えられた。

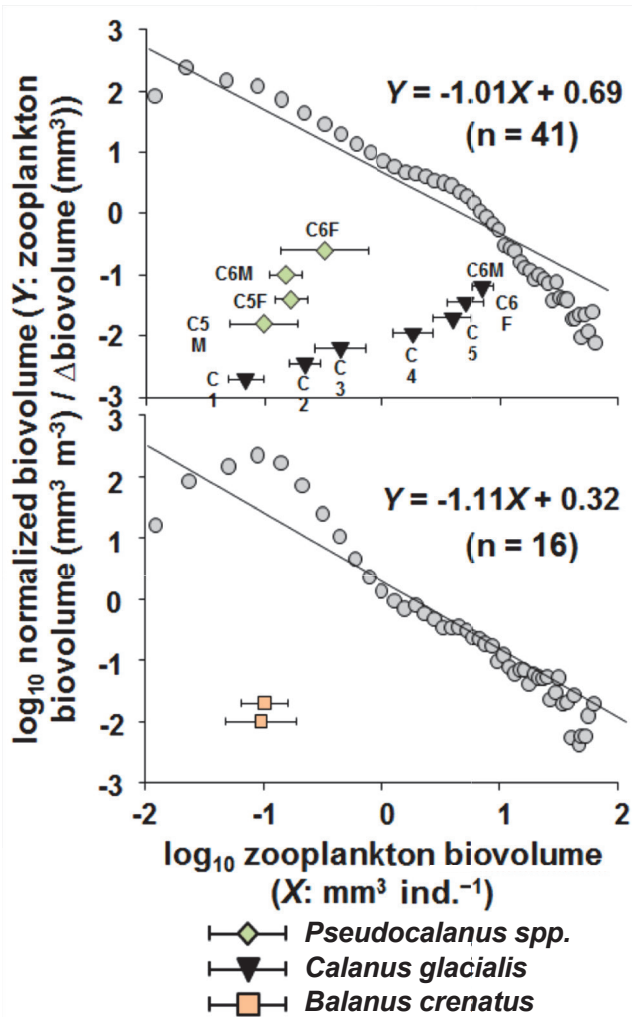


図3.6.18 チャクチ海における動物プランクトン群集毎のサイズ組成(NBSS)。上がカイアシ類C。下はフジツボ類幼生が優占した群集。回帰式の傾きが急なほど、生産性が高いことを示す。

動物プランクトンの水平・経年分布

このように、西部北極海の一部であるチャクチ海において動物プランクトン群集は、水平的に大きく変動することが示されたため、西部北極海の広範囲に及ぶ動物プランクトンの水平分布を明らかにした(Matsuno et al., 2012a)。2008年と2010年の9月から10月にかけて西部北極海にて、NORPAC ネットの鉛直曳きを行い得た。動物プランクトン出現個体数とバイオマスは陸棚域で高かった。カイアシ類は出現個体数の8-95%を占め、優占分類群であった。

両年の出現個体数に基づくクラスター解析の結果、動物プランクトン群集は4群に分けられた。各グループの水平分布は水深とよく対応しており、それぞれ陸棚域、陸棚斜面域、斜面域および海盆地群集と呼称した。各群集の特徴種は、陸棚域では沿岸性カイアシ類の *Pseudocalanus* 属とベントス幼生で、陸棚斜面域では北極海産カイアシ類の *C. glacialis* と *Metridia longa* の若い発育段階が多く、個体数も多かった。斜面域と海盆地域では深海性種が多かった。2008年と2010年で動物プランクトン群集の水平分布を比較すると、2010年は陸棚域から海盆地へと水深に対応して群集が明瞭に区分されていたが、2008年は陸棚斜面域群集が高緯度まで見られ、斜面域群集と混在していた。これは2008年の海水面積減少が2010年よりも著しかったことによる、ポーフォート循環の強化または流路変化の影響と考えられた。

このように、当海域における動物プランクトン群集には経年変動の影響が大きいことが示されたため、より長期間(1994年-2009年の夏季)におよぶ動物プランクトン試料セットが揃っているベーリング海南東部陸棚域における動物プランクトン群集の経年変動(Ohashi et al., 2013)²⁹と、1991/92年および2007/08年夏季のチャクチ海における動物プランクトン群集の経年変動(Matsuno et al., 2011)を明らかにした。1994-2009年の16年間におよぶベーリング海南東部陸棚域において、水温は寒冷期(1994-2000年)、温暖期(2001-2005年)そして寒冷期(2006-2009年)へと変動しており、この水温のレジームシフトに対応して、カイアシ類の出現個体数およびバイオマスは、寒冷年に多く、温暖年には少なかった。カイアシ類群集は6グループに分けられ、水平分布と経年変動は明確に分離しており、群集を分ける主な要因は緯度と水深であった。カイアシ類群集に寒冷年と温暖年に対応した経年変動がみられたことは、寒冷年と温暖年の春季植物プランクトンブルームの規模と期間の差によると考えられた。一方、1991/92年と2007/08年のチャクチ海における動物プランクトン群集では、出現個体数とバイオマスは1991/92年よりも2007/08年の方が多く、これは海水面積の減少が動物プランクトン現存量や生産量という観点では正の効果があることを示唆している。動物プランクトン群集は大きく4群に分けられた。各グループの分布は経年的・水平的に明確に分離しており、1991/92年は同様の水平分布であったが、2007/08年は各グループの水平分布が北にシフトしていた(図3.6.19)。特に2007年は南部に太平洋水により輸送された、太平洋産種が優占する群集が見られた。このように、海水域の減少は元来存在する北極海産種を駆逐するために、生物相の改変という負の効果があることを示している。

このチャクチ海でのデータセットは後にアメリカとロシアの共同研究であるRUSALCAのデータセットとも合わせて、1945-2012年の長期変動を解析する論文でも、重要な役割を果たした(Ershova

et al., 2015)。このように、動物プランクトン試料は長期間の保存が可能で、かつ1年以内の生活史を持つため、経年的な生物生産や生物相の比較をする際に大変有用で、本事業により得られたデータセットは国際的にも高い評価を得ている。

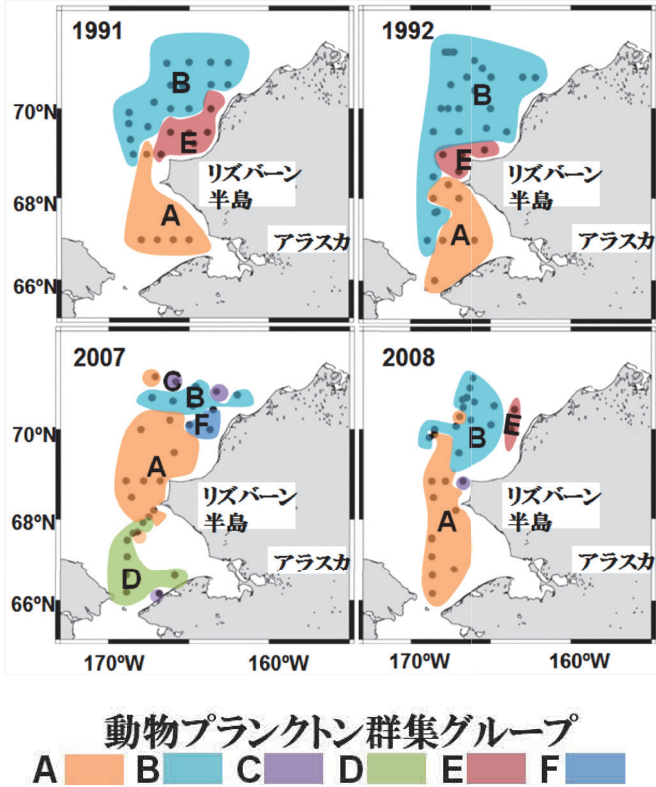


図 3.6.19 1991、1992、2007、及び2008年のチャクチ海における動物プランクトン群集のクラスター解析の結果。2007年のみ観測された群集Dは太平洋産種が卓越していた。

動物プランクトンの季節変化

これら一連の動物プランクトン・マイクロプランクトンの研究成果は、水平分布や経年変動、また短期時系列変動において、北極海海洋生態系の重要な側面を明らかにしてきた。しかし、これらの研究はいずれも、船舶によるアクセスが容易な季節(夏季)のスナップショットによるものであった。それ以外の季節における北極海の動物プランクトン生態に関する理解は、これら方法論的な問題から、未だ乏しいのが現状であった。この状況を打開すべく、周年にわたり西部北極海ノースウインド海底平原の水深180mに、2010-2011年の1年にわたり設置されたセグメントトラップ試料中に出現した動物プランクトンスイマー(>1mm以上)について解析を行い、その群集構造の季節変化(Matsumo et al., 2014b)と、優占カイアシ類の生活史解析を行った(Matsumo et al., 2015c)。

約2週間間隔で得られた試料解析から、動物プランクトン輸送量は7月~10月に多く、カイアシ類が18-94%を占め優占していたことが明らかになった。クラスター解析の結果、全26試料は3群に分けられた。各グループの出現には明確な季節性があり、結氷下

でも群集が変化することが明らかとなった。優占カイアシ類の個体群構造は種毎に異なり、*Calanus hyperboreus* はほとんどが成体雌(C6F)で、2月~4月には成熟個体が優占していた。*Metridia longa* と *Paraeuchaeta glacialis* は1月~5月にC6Fが優占し、6月~10月に初期発育段階の割合が高かった。*Heterorhabdus norvegicus* は11月~2月にC5が優占し、3月~5月にC6F/Mの割合が増加していた。太平洋産種の *N. cristatus* は周年を通して出現し、海水が衰退する6月~9月に多かった。このように、西部北極海における動物プランクトン群集構造および主要カイアシ類の個体群構造には明確な季節変動があり、その季節性は海水の季節変動や各々の生活史に起因すると考えられた。

太平洋産種の北極海での再生産成功

前述の経年変動の解析から、近年の海水衰退により、太平洋水により北極海に輸送される、太平洋産種の動物プランクトンが明らかになった(Matsumo et al., 2011)。またセグメントトラップ試料解析により、この太平洋産種は周年を通して北極海に輸送されていることも明らかとなった(Matsumo et al., 2015c)。動物プランクトン群集は、北極海と太平洋で出現種が異なるため、もし今後海水衰退が進み、輸送される太平洋産種が更に増えれば、北極海にて太平洋産種が移入種として定着して、生態系の改変をもたらす可能性がある。この太平洋産種の北極海での定着の可能性の評価については、船上飼育実験が必要である。

本事業では、実際に北極海で採集された太平洋産種 *Neocalanus flemingeri* のC6Fを船上にて飼育し、産卵速度と卵ふ化率を観察した(Matsumo et al., 2015b)。北極海で採集されたC6Fの19個体は、全ての個体が産卵を行い、そのうち約半数(9個体)は4回以上の産卵を行った。1回の平均産卵数(382±82 eggs clutch⁻¹)、産卵間隔(11.9±3.7日)、卵のふ化時間(0℃で5.1±1.2日)等は、本種について太平洋で報告されている値と整合的であった(図 3.6.20)。唯一異なっていたのは卵のふ化率で、7.5±8.7%と極めて低かった(太平洋では93%と報告されている)。北極海における本種の低い卵ふ化率は、未受精卵の割合が高かったことによると考えられた。これは、元来の生息域である北太平洋にて、本種の成熟、受精および産卵は水深1000m前後の深海で行われるが、チャクチ海のように浅い(水深50m前後)環境に輸送されて、正常な受精が行えなかったことを示唆している。同じ試料中に、本種の雄成体は1個体も出現しなかったことも、この考えを支持している。海水衰退により北極海へ輸送される太平洋産カイアシ類は増加すると考えられるが、雌成体の低い出現個体数と、低い卵ふ化率から判断して、現時点で太平洋産種が北極海に定着することは困難であると考えられるが、今後の環境変動が太平洋産種にどのような影響を及ぼすか、注意深く継続観測することが大切である。

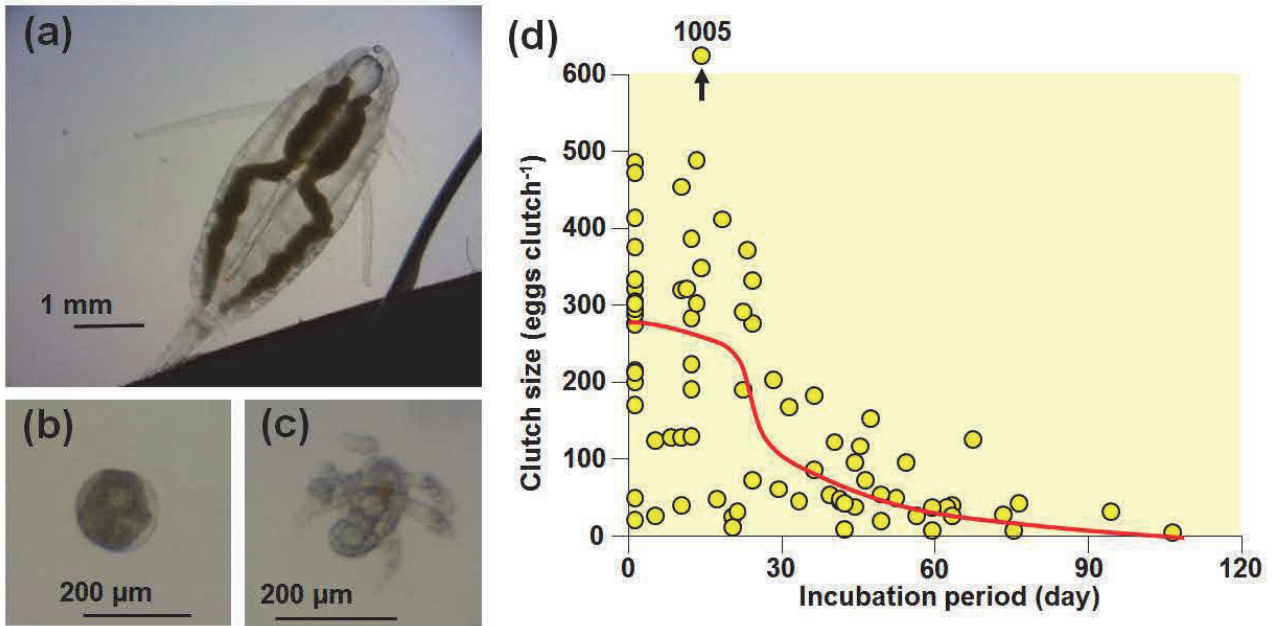


図 3.6.20 チャクチ海で採集された太平洋産カイアシ類 *Neocalanus flemingeri* の産卵。写真は、雌成体、卵および孵化したノープリウス幼生。

6. 高次生態系への影響

執筆者：綿貫 豊

海氷面積及び結氷期間の縮小は、さまざまな海洋生物の分布に影響するだろう。その仕組みは複数考えられる。クジラや海鳥などの肺呼吸生物は、開氷面がないとその海域を利用できない。魚類、動物プランクトンなどは、それぞれ生活に適した水温や塩分濃度があるので、海氷はこれらに影響することで海洋生物の分布を制限するだろう。もっとも興味深いのは、海氷が低次生産から高次捕食者まで、食物連鎖を通じて生態系全体に影響する仕組みである。南東および北部ベーリング海における研究では、寒冷期に海氷が多いと表層での生産が底層の食物連鎖に流れ、温暖期に海氷が減少すると表層での生産が表層の食物連鎖に流れるだろうと考えられている⁷⁾。

海氷減少と生物の分布

まず第一に、種により好適な水温な塩分濃度が決まっているので、海氷減少をもたらすこれらの変化は海洋生物の分布や生態に影響する。本研究では、まず北極海生態系のカギ種と言われるホッキョクダラ仔魚の分布と海氷との関係を調べた。北部ベーリング海とチャクチ海において、おしよ丸をつかって2008年と2013年に仔魚を採取した。種構成のクラスター解析をしたところ、採取地点は4つのグループに分けられた。これらの違いは、海洋環境と海氷融解からの日数に関係すると考えられた。ホッキョクダラでは特に、採取地点により仔魚密度は大きくばらつき(Kono et al., 2016)。海氷の融解からの日数が短い地点で仔魚の密度が高く、そのサイズは小さ

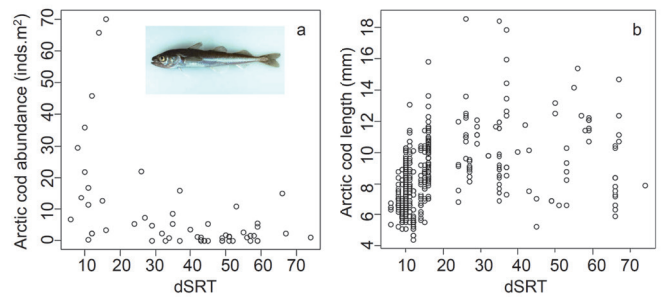


図 3.6.21 ホッキョクダラ仔魚採取地点の海氷融解からの日数と仔魚の (a)密度、及び(b)サイズ。

かった(図 3.6.21)。これはホッキョクダラが海氷縁で産卵することを示していると考えられた。

第2に、クジラや海鳥など肺呼吸動物にとっては、海氷のない期間のみその海域を利用できる。本研究では、海氷域の減少とともに、コクジラの分布域が拡大している可能性が示された(Iwahara et al., in preparation)。これまでポーフォート海東部では、コクジラは1980年代に航空期調査によって発見されたのが1例だけだったが、近年本種がポーフォート海東部にもよく来遊することが報告され始めている。本研究でも、2014年9月にアムンゼン号による目視観測で、ポーフォート海東部で2群3頭のコクジラを発見した。この海域において海氷がない滞在可能期間の長期化していることが原因と考えられる。

分布に影響する環境要因

本研究ではこうした動物プランクトン、海鳥、クジラ類の分布に影響する環境要因を探るため衛星データをつかったハビタットモデリング手法がもちいられた。

まず第一に、北部ベーリング海およびチャクチ海において、3種のカイアシ類(北極海産大型・小型種、太平洋産種)のハビタットモデルを構築し、それぞれの生物量に影響を与える海洋環境要因(海氷融解日偏差、水塊、表層・底層クロロフィル a 濃度、水深)を調べた。水塊の組み合わせは全ての種に対して影響を与えており、その効果は種によって異なっていた(図 3.6.22)。また、海氷融解日偏差が小さい場所や年でカイアシ類密度が大きかった。これは、海氷融解日が早まる事でカイアシ類が増殖可能な環境となる事を示唆するものである(Sasaki et al., Submitted)。この結果は、カイアシ類の生物量に影響を与える海洋環境を定量的に示したものであり、今後の環境変動に伴うカイアシ類の生物量の変化を予測する上で役立つと考えられる。

バイオリギング手法による海鳥の分布調査も実施された。2番目に、タスマニアで繁殖し北太平洋で5月～9月の非繁殖期を過ごすハシボソミズナギドリにジオロケーター(光記録により毎日の日の出日の入り時刻を計算し、そこから緯度経度を推定する)を装着、1年後に回収し、2年間の移動追跡を調べた(Yamamoto et al., 2014)。夏(5～8月)はオホーツク海およびベーリング海南東部で過ごし、秋(9月)には多くの個体がベーリング海峡からチャクチ海

南部を利用した(図 3.6.23)。また、水温が高かった2011年のほうが2010年に比べチャクチ海の利用度が高かった。これは、本種の主たる餌であるオキアミがその適水温に合わせてより北に分布を移したためと推察された。カイアシ類をもっぱら食べていると思われたホッキョククジラがオキアミを主食とする例があることが近年報告されている。北極海においてはカイアシ類-ホッキョクダラがカギ種と考えられていたが、後述するように、この研究は北極海においてオキアミもカギ種となる可能性を示唆している。

3番目に、チャクチ海とベーリング海北部において、ヒゲクジラ類の分布を目視によって調べ、分布環境の把握と分布のモデル化をおこなった(岩原修士論文,2013, Iwahara, in preparation)。2007～2012年の夏あるいは秋に「みらい」とおしよ丸において目視調査するとともに、オキアミをNORPAC ネットと音響調査で、底生生物を採泥で調査した。ヒゲクジラ類(主にコククジラ)は夏にはベーリング海峡南部で、秋にはベーリング海峡北部で多数みられた。コククジラの集中分布域は、2012年秋にはオキアミの生物量の高い場所と、2013年夏には底生ヨコエビ類が多い場所と一致しており、季節的に食性を変えたことが示唆された。これは底性ヨコエビ類を食べていると通常考えられていたコククジラが秋にはオキアミを食べる可能性があることを示唆する。ハビタットモデルの結果からは餌生物との統計的な関連は見いだせなかったが、海氷縁からの距離が影響要因として選択され、コククジラの北上途中である夏は、氷縁付近でも分布確率が高かった。

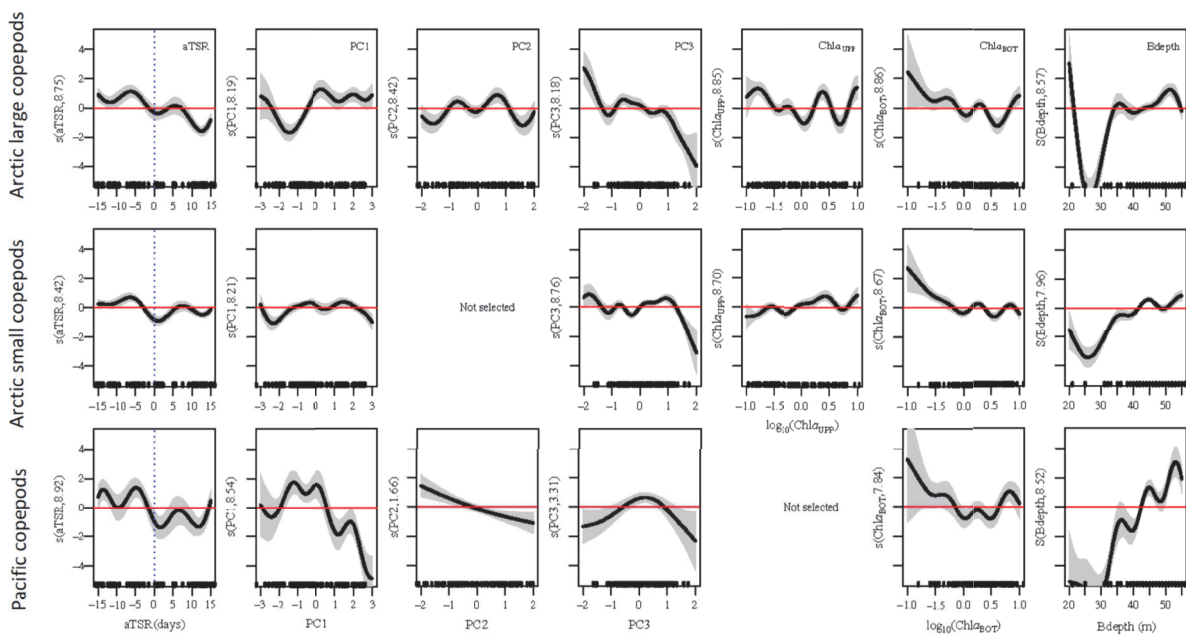


図 3.6.22 ハビタットモデルから計算された(上段)北極海産大型カイアシ類、(中段)北極海産小型カイアシ類、(下段)太平洋産カイアシ類の分布密度に対する各海洋環境要因の影響。左から順に、海氷融解日からの日数(aTSR)、水塊分布を示すインデックス(PC1、PC2、PC3)、表層クロロフィル a 濃度(ChlaUpp)、底層クロロフィル a 濃度(ChlaBot)、海底深度(Bdepth)。

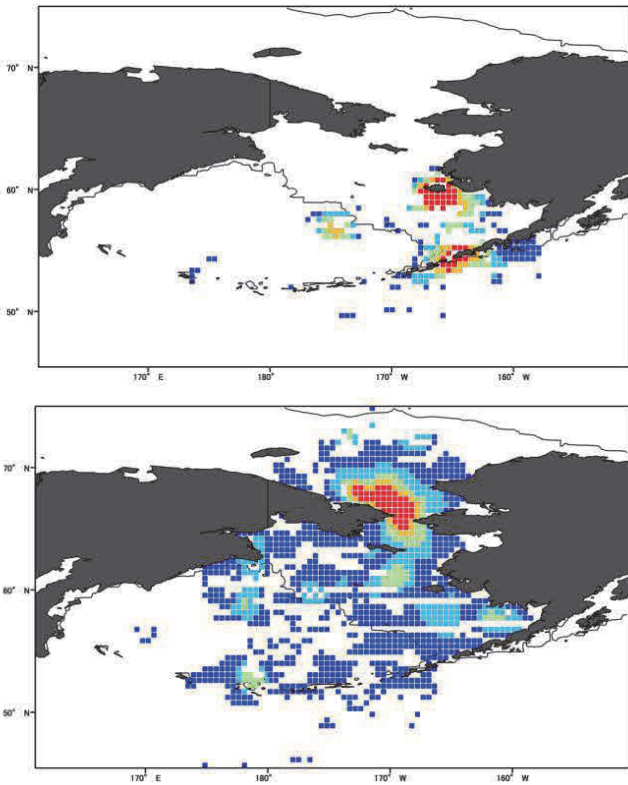


図 3.6.23 ジオロケータを用いた調査からわかったハンボソミズナギドリの分布。(上) 7月、(下) 9月。

こうした海洋におけるハビタットモデルの利用には問題点がいくつかある。本研究では、北極における大型動物研究でも使用されているハビタットモデル(空間統計モデル)の利点と、使用の際に気をつけなくてはならない点についても検討した(Watanuki et al., under review)。生物学的制約(性・年齢)、時・空間スケールの制約についてレビューし、特に船からの目視では、観測海域や時期が制限されること、性・年齢が不明であることが多いこと、繁殖集団が特定できないことが欠点として挙げられた。また、分布を決める重要な要因は、年や海域あるいはコロニーによって変わる可能性があることが指摘された。特に、捕食者の分布を決めるもっとも直接的な要因である餌生物の分布情報が欠けていることは問題であり、餌生物の分布を小スケール大地域での生態系モデルで得る手法の開発もこれを解決する一つの手段であろう。

また、この海洋におけるハビタットモデリング手法のレビュー論文においては、性・年齢および出自コロニーの情報が欠けていることが船からの目視の欠点としてあげられた。本研究ではこれを改善する手法の開発をおこなった。オオミズナギドリ材料として、ジオロケータによるコロニーや性・年齢を組み込んだハビタットモデルの結果と船からの目視観測によるデータの統合を行うことで、性・繁殖ステータスを組み込んだモデルの有効性が確かめられた(Yamamoto et al., 2016)。

ここまですと、海氷分布、それに関連した水温や塩分濃度の変化、および水塊の変化は好適物理化学環境の変化や利用可能海域の制限を通じて動物プランクトン、魚類、海鳥、クジラの分布に影響するだろう。ただし、捕食者の分布に影響する最も重要であると思われる餌生物の分布に関する情報は多くの場合欠けている。複数の栄養段階を含む分布調査、あるいは餌生物情報を組み込んだハビタットモデルの構築が必要である。

餌生物と魚類・海鳥・クジラ類の餌や分布

ハビタットモデルでは表面海水温など衛星データで得られる環境要因を対象生物の分布を説明する要因とした。しかしながら、高次捕食者の生態や分布に直接影響するのはかれらの餌生物の量と分布である。本研究では、調査船によって餌生物のサンプリングも行いこの点を明らかにしようとした。大型捕食者の主たる餌であるカギ種が変化しつつある証拠が得られた。

その第一は、ホッキョクダラがゼラチン質動物プランクトンを主食とする海域があった点である(Nakano et al., 2015)。底引きトロールで夏期間に採取されたホッキョクダラの食性を調べたところ、北部ベーリング海・南部チャクチ海ではゼラチン質プランクトン(尾虫類)を主に食べ、中部チャクチ海ではカイアシ類を始めさまざまな動物プランクトンを食べていた(図 3.6.24)。ゼラチン質プランクトンは目につきやすいため、これをある程度利用できる海域では、ホッキョクダラはこれを食べるが、栄養価が低いので、胃充満度は高くとも肥満度は高くなかった。海氷減少によってゼラチン質プランクトンがもし増えるとすれば、ホッキョクダラ資源は影響を受ける可能性があることをこの研究は示している。

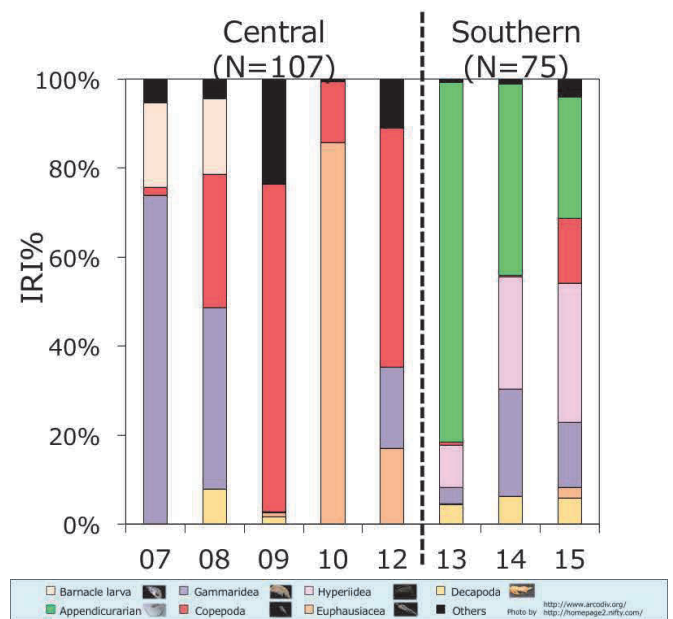


図 3.6.24 2013 年おしよる丸航海において、チャクチ海中央と南部で採取されたホッキョクダラの食性(胃内容物の割合)。数字は観測地点。緑が尾虫類を示す。

第2には、クラゲと海鳥の採食行動の新しい関係の発見である。ベーリング海のプリビロフ諸島で繁殖する潜水性の海鳥ハシブトウミガラスに小型のビデオカメラを装着し潜水中の映像を記録したところ、アカクラゲの一種との遭遇が全潜水回数の85%で観察された(Sato et al., 2015)。ハシブトウミガラスはクラゲの触手周辺に集まっているスケトウダラの稚魚を捕食していた。ゼラチン質のクラゲが増えると、高次捕食者の行動が変化する可能性がある。

第3に、北極海においてオキアミの分布が海鳥の分布に関係しているようなことを示唆する証拠がみつかった(Nishizawa et al., BiogeoScience submitted)。先に示したジオロケーターによるトラッキングの結果(図3.6.23)と同様、船による目視調査でもハシボソミズナギドリは、夏には南東ベーリング海に分布するが秋にはベーリング海峡から南部チャクチ海を利用することが確かめられた。ノルパックネットで本種の主たる餌であるオキアミを採取したところ、チャクチ海では、夏より秋の方が大型個体のオキアミが多く、秋のチャクチ海では大型個体が多い場所ほどハシボソミズナギドリも多かった。このことから、ハシボソミズナギドリの分布の季節変化にオキアミが大きく関わっていることが示唆された。

以上をまとめると、これまで表層北極海生態系においては寒冷性カイアシ類-ホッキョクダラを軸とする食物連鎖の重要性が指摘されてきた³⁰⁾が、本研究では、ゼラチン質動物プランクトンやオキアミ、また太平洋産カイアシ類の増殖やベーリング海峡を通じたの流入によるカギ種の変化^{31), 32)}(Matsuno et al., 2011)が、より上位の食物連鎖の構造を大きく変える可能性があることが示された(図3.6.25)。

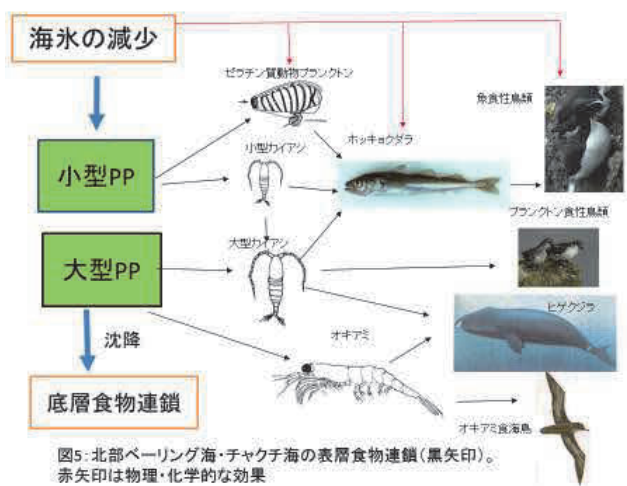


図3.6.25 北部ベーリング海及びチャクチ海の表層における食物連鎖(黒矢印)と、物理・化学的な効果(赤矢印)。

高次捕食者の密度や生態の年・季節変化の記載的研究

本研究では過去の記録も利用し、北極海生態系の構成員の密度や生態の長期・短期変化を知ろうという試みもなされた。それによって、海水変化の生態系影響を解明するために役立てようという目的である。まず第一に、1990年代から断片的におこなわれたおしよ丸での底引き網による底生生物および魚類採取の資料をまとめたところ(中野修士論文, 2014)、まず生物組成を海域間で比べると、ベーリング海では魚類が多くチャクチ海では魚類に比べ、ベントスが多かった。また北部ベーリングおよび南部チャクチ海において過去の同海域のデータと比較したところ、トロール網目サイズが不統一であるという問題はあるものの、ベントス、特にホヤ類は1990年代に比べ2000年代は増加したが、魚類の量は増加しておらず、特にカジカ科魚類の数は減少していた。これはベーリング海陸棚域でのベントス生物量の減少傾向とは異なる。

次に、ベーリング海に繁殖する表面採食性の海鳥(アカアシミツユビカモメ)と潜水性海鳥(ハシブトウミガラス)の採食行動の年変化の調査も行われた。表面採食するアカアシミツユビカモメは主に海盆域で採食し、2013年と2014年で採食海域は変化せず、血中ストレスホルモンレベルにも差がなかったが、主に陸棚域で潜水採食するハシブトウミガラスでは、採食場所までの距離は2013年の方が2014年に比べ遠く、陸棚斜面を含んだ海域で採食し、血中ストレスホルモンレベルが高かった。これは、気候変化への生態系応答は海盆域と陸棚域で違っており、ひいては高次捕食者の反応の違いにも現れることを示唆するだろう(Yamamoto et al., 2016)

3番目として、チャクチ海南部定点での動物プランクトン量の季節変化と動物プランクトン食のナガスクジラの来遊時期との関係を、前者は係留式多周波音響プロファイラーでの音響反応で、後者は同時に設置した多周波音響プロファイラーで調べた。水温・塩分も測定すると同時に、同地点の海水氷密度を衛星データから取得した。鳴音は夏から秋(2012年: 8月4日~10月20日、2013年: 7月25日~11月1日)に検出され、2013年の方が長期間であった。海水氷密度との関係から、本種の回遊時期は海水氷の融解日・結氷日に影響されると考えられた。さらに、鳴音を応答変数、動物プランクトンの音響反応、水温、塩分、および年を説明変数としたGLMによるモデルをつかったモデル選択の結果から、本種は、夏の海水氷融解とその後の水温上昇、および動物プランクトンの増加と共にチャクチ海南部に来遊し、水温・塩分の低下と共に撤退しているというパターンが示唆された(Tsujii et al., 2016)。

ベーリング海・北極海における高次動物の生態記載

こうした海水との関係に着目した研究以外にも、ベーリング海・北極海における高次捕食者の餌および採食行動に関する研究が実施された。一つ目は、ベーリング海で2002年の夏と初秋にサンプリ

ングされた、シロザケ *Oncorhynchus keta* (尾叉長 300–755 mm に該当する 1398 個体)の胃内容物を分析し、本種の餌生物に関して、季節的、個体発生的、日周期的な変動を調べた研究である。夏期は、オキアミ、クラゲノミ、腹足類が胃内容物の大部分を占めていたのに対して、初秋はコヒレハダカ *Stenobranchius leucopsarus*、キタノホッケ *Pleurogrammus monopterygius* が重要な餌生物である事が明らかになった。餌消費量の顕著な日周差が見られ、午前中に漁獲されたシロザケはコヒレハダカを捕食していたが、午後には漁獲されたものは主にオキアミを捕食していた。餌生物の生活史や日周鉛直移動によって、シロザケの食物は時間とともに変化することがわかった (Sakai et al., 2012)。

二つ目に、海氷減少に対する反応は同属種でも異なるだろうと思われるので、プリピロフ島で繁殖するウミガラスとハシブトウミガラスの採食行動を比較した (Kokubun et al., 2016)。採食トリップ時間や採食行動の日修正には差がなかったが、ウミガラスの方が潜水深度のバリエーションが大きく、また魚を雛に持ち帰る傾向が強くこれは血液の窒素安定同位体比が高いことも一致した。ウミガラスの方が翼面荷重が小さく、水中での機動力の高さに関連していると思われた。これが、亜寒帯・極域における個体数の長期変動はウミガラスの方がハシブトウミガラスよりも大きいことの一部を説明するかもしれない。

ベーリング海のプリピロフ諸島で繁殖する飛翔性の海鳥アカアシミツユビカモメはもっぱらハダカイワシを食べるが、いつどうやって食べているかわからなかった。小型の GPS ロガー、加速度計を装着して、5 個体の行動軌跡と 4 個体の加速度記録を得て、かれらの採餌行動の特徴を調べた。アカアシミツユビカモメはおもに水深 1000m 以上の海盆域に出かけており、そこで中深層性の魚、ハダ

カイワシを潜ることなく捕食していた。アカアシミツユビカモメの捕食行動は夜間に活発になっており、飛翔や休息に挟まれた捕食行動の平均継続時間は約 2.5 分だった。ハダカイワシは夜間に表層近くに鉛直移動してくることが知られている。アカアシミツユビカモメは、ハダカイワシの日周鉛直分布パターンに合わせて、夜間に採餌努力を高くし、かつ採餌中には飛び回ったり水面で休んだりしながら、短い時間でしか表層で利用することのできない中深層性のハダカイワシを食べていると考えられた。

海鳥の羽根をつかった汚染モニタリングの試み

本研究では人間による生態系へのインパクトを調べるための手始めとして、周年移動を追跡した海鳥個体の羽根の水銀濃度を調べ、外洋における水銀汚染の空間パターンを推察する試みも行われた (Watanuki et al., 2015)。ハシボソミズナギドリをジオロケーターで追跡した結果 (図 3.6.26 左)、非繁殖期 (5–8 月) にはオホーツク海南部から北海道周辺を利用する個体とベーリング海南東部を利用する個体がいることがわかった。非繁殖期に生え変わる最外側風切り羽根の水銀濃度を調べたところ、オホーツク海・北海道個体の方がベーリング海南東個体の 3 倍近かった (図 3.6.26 右)。これは北太平洋の北西部はベーリング海に比べ水銀汚染が進んでいることを示唆するかもしれない。

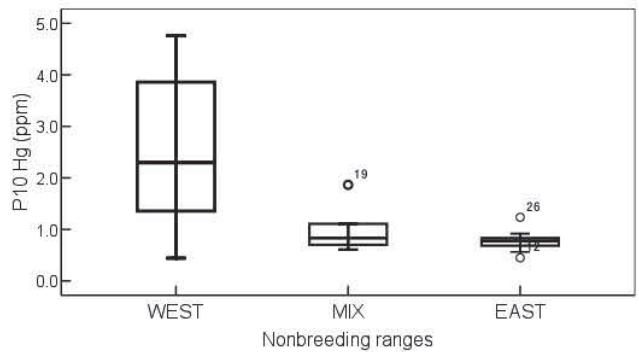
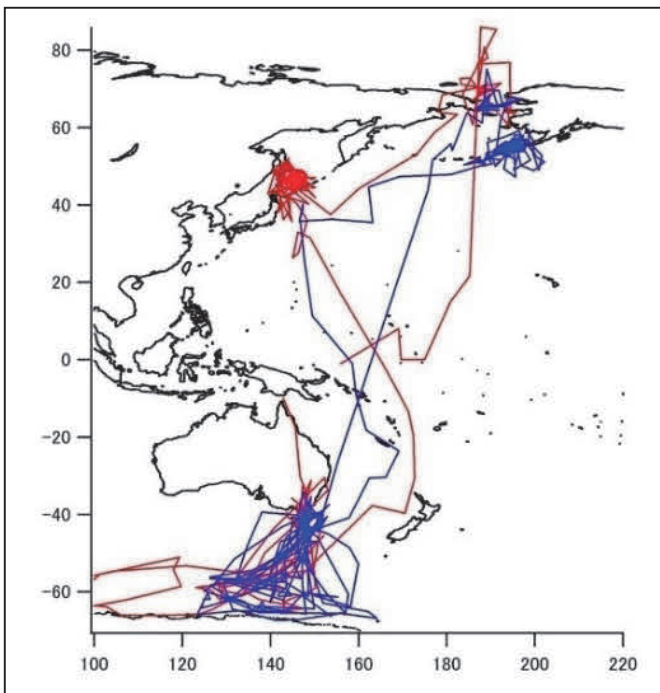


図 3.6.26 (左) 2 個体のハシボソミズナギドリの越冬海域 (右) オホーツク海南部型北海道で越冬する個体(WEST)と、ベーリング海 南東海域で越冬する個体(EAST)、及び西から東に移動する個体(MIX) の風切り羽の水銀濃度。

引用文献

- 1) IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 2) Proshutinsky, A., Krishfield, R., Timmermans, M.-L., Toole, J., Carmack, E., McLaughlin, F., Williams, W. J., Zimmermann, S., Itoh, M., Shimada, K., 2009. Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations. *J. Geophys. Res.*, 114, C00A10. doi:10.1029/2008JC005104.
- 3) Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F., Carmack, E., Nishino, S., Shimada, K., 2009. Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: Effects of ocean acidification and sea ice melt. *Science*, 326, 1098-1100. doi:10.1126/science.1174190.
- 4) Nishino, S., Shimada, K., Itoh, M., Chiba, S., 2009. Vertical double silicate maxima in the sea-ice reduction region of the western Arctic Ocean: Implications for an enhanced biological pump due to sea-ice reduction. *J. Oceanogr.*, 65, 871-883. doi:10.1007/s10872-009-0072-2.
- 5) Ardyna, M., Babin, M., Gosselin, M., Devred, E., Rainville, L., Tremblay, J.-É., 2014. Recent Arctic Ocean sea ice loss triggers novel fall phytoplankton blooms. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 6207-6212. doi:10.1002/2014GL061047.
- 6) Springer, A. M., McRoy, C. P., 1993. The paradox of pelagic food webs in the northern Bering Sea-III. Patterns of primary productivity. *Cont. Shelf Res.*, 13, 575-599.
- 7) Grebmeier, J. M., Bluhm, B. A., Cooper, L. W., Danielson, S. L., Arrigo, K. R., Blanchard, A. L., Clarke, J. T., Day, R. H., Frey, K. E., Gradinger, R. R., Kedra, M., Konar, B., Kuletz, K. J., Lee, S. H., Lovvorn, J. R., Norcross, B. L., Okkonen, S. R., 2015. Ecosystem characteristics and processes facilitating persistent macrobenthic biomass hotspots and associated benthivory in the Pacific Arctic. *Prog. Oceanogr.*, 136, 92-114. doi:10.1016/j.pcean.2015.05.006.
- 8) Feder, H., Jewett, S., Blanchard, A., 2005. Southeastern Chukchi Sea (Alaska) epibenthos. *Polar Biol.*, 28, 402-421.
- 9) Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Joussupov, V., Kosmach, D., Gustafsson, Ö., 2010. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 327, 1246-1250. doi:10.1126/science.1182221.
- 10) Semiletov, I. P., Shakhova, N. E., Pipko, I. I., Pugach, S. P., Charkin, A. N., Dudarev, O. V., Kosmach, D. A., Nishino, S., 2013. Space-time dynamics of carbon stocks and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay of the Laptev Sea. *Biogeosciences Discuss.*, 10, 2159-2204. doi:10.5194/bgd-10-2159-2013.
- 11) Kroeker, K. J., Kordas, R., Crim, R., Hendriks, I. E., Ramajo, L., Singh, G. S., Duarte, C. M., Gattuso, J.-P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global change biology* 19(6):1884-1896
- 12) Steinacher, M., Joos, F., Frölicher, T.L., Plattner, G.-K., Doney, S.C., 2009. Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosci.*, 6, 515-533.
- 13) Steiner, N. S., Christian, J. R., Six, K. D., Yamamoto, A., and Yamamoto-Kawai, M., 2014. Future ocean acidification in the Canada Basin and surrounding Arctic Ocean from CMIP5 earth system models. *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 332-347, doi:10.1002/2013JC009069.
- 14) Popova, E.E., Yool, A., Aksenov, Y., Coward, A.C., Anderson, T.R., 2014. Regional variability of acidification in the Arctic: a sea of contrasts. *Biogeosci.*, 11, 293-308.
- 15) Mathis, J.T., Cross, J.N., Bates, N.R., 2011. Coupling primary production and terrestrial runoff to ocean acidification and carbonate mineral suppression in the eastern Bering Sea. *J. Geophys. Res.*, 116, C02030, doi:10.1029/2010JC006453.
- 16) Anderson, L.G., Tanhua, T., Björk, G., Hjalmarsson, S., Jones, E.P., Jutterström, S., Rudels, B., Swift, J.H., Wåhlström, L., 2010. Arctic ocean shelf-basin interaction: an active continental shelf CO₂ pump and its impact on the degree of calcium carbonate solubility. *Deep Sea Res.*, 57(7), 869-879.
- 17) Chierici, M., Fransson, A., 2009. Calcium carbonate saturation in the surface water of the Arctic Ocean: Undersaturation in freshwater influenced shelves, *Biogeosciences*, 6(11), 2421-2431.
- 18) Azetsu-Scott, K., Clarke, A., Falkner, K., Hamilton, J., Jones, E.P., Lee, C., Petrie, B., Prinsenberg, S., Starr, M., Yeats, P., 2010. Calcium carbonate saturation states in the waters of the Canadian Arctic Archipelago and the Labrador Sea. *J. Geophys. Res.*, 115(C11).
- 19) Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., 2011. Effects of ocean acidification, warming and melting of sea ice on aragonite saturation of the Canada Basin surface water. *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2010GL045501.
- 20) Miller, L. A., Macdonald, R. W., McLaughlin, F., Mucci, A., Yamamoto-Kawai, M., Giesbrecht, K.E., Williams, W. J., 2014. Changes in the marine carbonate system of the western Arctic: patterns in a rescued data set, *Polar Research*, 33, 20577.
- 21) Mathis, J.T., Cross, J.N., Bates, N.R., 2011. Coupling primary production and terrestrial runoff to ocean acidification and carbonate mineral suppression in the eastern Bering Sea. *J. Geophys. Res.*, 116, C02030, doi:10.1029/2010JC006453.
- 22) Mathis, J. T., Cooley, S. R., Lucey, N., Colt, S., Ekstrom, J., Hurst, T., Hauri, C., Evans, W., Cross, J. N., Feely, R. A., 2015. Ocean acidification risk assessment for Alaska's fishery sector,
- 23) Jutterström, S. and Anderson, L. G., 2005. The saturation of calcite and aragonite in the Arctic Ocean. *Mar. Chem.*, 94, 101-110, doi:10.1016/j.marchem.2004.08.010.
- 24) Juranek, L. W., Feely, R. A., Peterson, W. T., Alin, S. R., Hales, B., Lee, K., Sabine, C. L., and Peterson, J., 2009. A novel method for determination of aragonite saturation state on the continental shelf of central Oregon using multi - parameter relationships with hydrographic data. *Geophysical Research Letters*, 36(24).
- 25) Bates, N.R., Orchowska, M.I., Garley, R., Mathis, J.T., 2013. Summertime calcium carbonate undersaturation in shelf waters of the western Arctic Ocean—how biological processes exacerbate the impact of ocean acidification. *Biogeosciences*, 10(8), 5281-5309.
- 26) Blanchard, A. L., Parris, C. L., Knowlton, A. L., and Wade, N. R., 2013. Benthic ecology of the northeastern Chukchi Sea. Part I. Environmental characteristics and macrofaunal community structure, 2008-2010. *Continental Shelf Research*, 67, 52-66.
- 27) Ries, J. B., Cohen, A. L., and McCorkle, D. C., 2009. Marine calcifiers exhibit mixed responses to CO₂-induced ocean acidification. *Geology*, 37(12), 1131-1134.
- 28) Wood, H. L., Spicer, J. I., Widdicombe, S., 2008. Ocean acidification may increase calcification rates, but at a cost. *Proc R Soc B* 275:1767-1773
- 29) Ohashi, R., A. Yamaguchi, K. Matsuno, R. Saito, N. Yamada, A. Iijima, N. Shiga, and I. Imai, 2013. Interannual changes in the zooplankton community structure on the southeastern Bering Sea shelf during summers of 1994-2009. *Deep-Sea Res.*, 94, 44-56. doi:10.1016/j.dsr2.2013.03.018.
- 30) Hop H, Gjosæter, H., 2013. Polar cod (*Boreogadus saida*) and capelin (*Mallotus villosus*) as key species in marine food webs of the Arctic and the Barents Sea. *Mar Biol Res* 9:878-894.
- 31) Kattner G, Hagen W, Lee RF, Campbell R, Deibel D et al., 2007. Perspectives on marine zooplankton lipids. *Can J Fish Aquat Sci* 64:1628-1639.

- 32) Deibel D, Saunders PA, Acuna J-L, Bochdansky, Shiga, N., Rivkin R.B., 2005. The role of appendicularian tunicates in the biogenic carbon cycle of three Arctic polynyas. In: Gorsky G, Youngbluth MJ, Deibel D (ed) *Response of Marine Ecosystems to Global Change: Ecological Impact of Appendicularians*. Contemporary Publishing International, Paris, 327–356.

VII. 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

研究課題7 研究代表者：島田浩二

1. 海水変動をもたらす基礎メカニズム

執筆者：島田浩二 工藤めぐみ 吉澤枝里

(1) アイス・アルベドフィードバック、メルトポンドの再考

オホーツク海や南極海など、氷盤サイズの小さな海水群からなる氷海では古典的なアイス・アルベドフィードバックを中心に夏の海水減少プロセスを論ずることは有効であろう。しかし、北極海の海水は、氷盤サイズが大きく、氷盤間の開水域での短波放射吸収により氷盤の縁が側面融解するというよりも、海水上に存在するメルトポンドの面積拡大によるフィードバックが海水の融解速度（減少速度）を支配していると考えられる。図3.7.1に1980年代（黒）、1990年代（青）、2000–2006年（緑）、2007–2014年（赤）の4つの期間に対し、総海水面積に対する海水面積変化率（%/day）を示す。2007–2014年の期間については、北極海内部での融解域である6月初旬から9月上旬の海水面積減少率が他期間の2倍近くにもなっていることがわかる。2007年の海水激減以降、北極海の主たる海水は一年氷（薄い氷）に置き換わり、多年氷（厚い氷）より融けやすいためであると定性的に説明されてきた。注目すべきは、8月まで続く大きな減少率の持続性にある。一般に8月第2週に入ると、海水域の日平均気温は氷点下になり、海水上に存在するメルトポンドの表面は凍結する。2007–2014年の他期間との質的な違いは、日平均気温が氷点下になっても、海水面積が減少するプロセスが始動したことにあると考えられる。

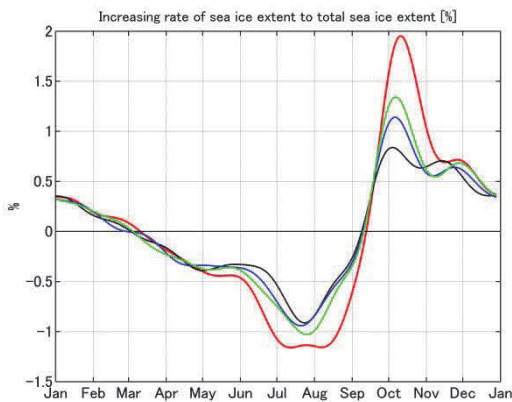


図3.7.1 総海水面積に対する海水面積の変化率(%/day)。

SHEBA（1997–1998年）以降、太平洋側北極海の水盆域において長期に渡る氷上観測は行われてこなかった。2014年の韓国砕氷船アラオン航海では、5日間ではあるが、複数日、同じ場所に留まる機会に恵まれた。そこで、複数の水温ロガー（SBE56）を用い、ポンド内の水温プロファイル（鉛直分解能は約2cm）を、上層と下層には水温電気伝導度計（SBE37）を配置し、2レベルで塩分を観測した。水温・塩分成層の結果を図3.7.2に示す。「塩ポンド（図3.7.2左）」は、一年氷が重なっていない領域に存在するポンドであり、大きな塩分成層を呈している。これは、ブライン・チャンネルが残存している一年氷では、海水下の海とポンドの間で僅かではあるが、水交換がなされていることによる。塩分成層が密度成層を支配しているため、メルトポンド表面の氷を透過する日射により、ポンド内の水は温められるが、最終的に水温極大はポンド上層に形成される。この水温極大層は、ポンド表面近くの側面融解を促進し、ポンド面積の拡大をもたらす。一方、「淡水ポンド（図3.7.2右）」は、海水が重なったリッジ周辺に存在し、ポンドは周囲の海面レベルよりも高い位置に存在するため、塩水の浸み込みは起こっておらず、ポンド内の水の塩分は、一年氷の塩分値（ほぼ淡水に近い）を示していた。この場合、日射によりポンド内の水は温められるが、4℃以下の水温であるがゆえに、温かい水ほど密度が大きく、水温極大は、ポンド下層に形成される。その結果、淡水ポンドでは、側面海水融解よりもメルトポンドの底での融解が卓越し、海水が融解するとしても、面積拡大はあまり起こらない。実計測はしていないが、夏を越す際にブライン・チャンネルが塞がれ再凍結した多年氷の場合も、リッジ上に分布する「淡水ポンド」と同じ性質があると考えられる。つまり、フラットでブラインチャンネルの痕跡が残る一年氷が支配的になった現在の北極海では、メルトポンド表面が凍結する8月以降でも、大きな海水面積減少率は持続できるようになったため、9月の海水面積最小時の面積は著しく小さくなったと考えられる。

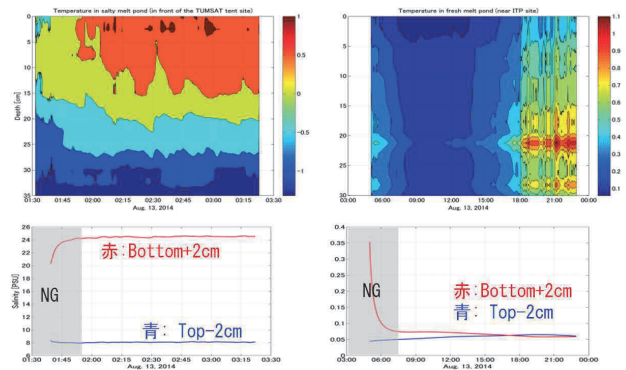


図3.7.2 メルトポンド（左「塩ポンド」、右「淡水ポンド」）の水温成層（上）と塩分（下）。

(2) 外洋域における海水厚係留観測およびデータの再考

執筆者：島田浩二、工藤めぐみ、吉澤枝里

北極海において氷厚計（IPS 等）を用いた氷厚観測が行われているが、開放水面が頻繁に捉えられる沿岸ポリニア域を除き、その観測データは、真の氷厚値を示していないとの印象があった（例えば、Krishfield et al., 2014）。長期間に渡って開放水面が捉えられない氷海域では、開放水面からの偏差としてキール深度を求めることができず、センサーと海水下面間の音波の伝播時間で求めなければならない。通常、氷厚との係留系センサーの接触、センサーの亡失を回避するため、最上部の係留センサーは 50m 以深の深度に設置されることが多い。しかし、50m 深付近は、太平洋夏季水の中心的存在深度であり、その間欠的な移流により水温の季節変動がある。また、表層混合層 0-20m は水温および塩分の季節変動が大きい。それらの影響により、上層 50m の平均音速の季節変動は約 1% となる（音速変動は約 15m/s 程度）となる。固定音速値を用いて、キール深度を求める場合、その誤差は、センサー（氷厚計）の設置深度の約 1% になる。50m にセンサーが設置されている場合、その後差は 50cm にも達する。本事業の実施期間、太平洋側北極海域に係留系を設置し、水温塩分や海水速度等に加えて、音響式ドップラー流速プロファイラー（ADCP）による海水厚観測を実施した。その際に、ADCP と表層混合層間に水温ロガー、電気伝導度水温計を取り付け、音速の直接観測を行い、音速変動を反映させた正確な氷厚変動を求めた。

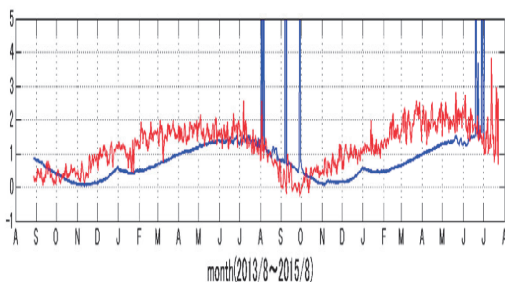


図 3.7.3 係留系 CP13 地点における海水厚。赤：ADCP による実測値。音速補正あり。青：AMSR-2 輝度温度データより、Krishfield et al., 2014 のアルゴリズムにより計算した海水厚。

図 3.7.3 に、係留系 CP13（チャクチ海台北部）の補正後の海水厚時系列データを示す。赤線が実測値で、青線は Krishfield et al. (2014) による衛星観測データを利用したアルゴリズムにて係留系地点の海水厚を算出したものである。まず、実測値とこの衛星アルゴリズムを用いた氷厚厚値では、変動の位相がずれていることが分かる。これは、海域により太平洋夏季水の到達

タイミングがずれること、表層混合層の水温・塩分の時間変動が異なることによる音速変動が反映されていないことに起因している。この位相ずれによる、衛星観測値の誤差は 12 月から 4 月には約 1m にも達している。ノースウインド海嶺より東のカナダ海盆東部海域では上述の衛星観測による氷厚データはある程度は利用できるものの、ノースウインド海嶺近傍のチャクチ海台では、真値との間に大きな差があることを認識しなければならない。

本事業の係留系観測で得られた正確な氷厚データを用い、

①海水集積の無い状況

②衛星輝度温度データから一年氷と同定できる場合

に対して、衛星データを用いた氷厚アルゴリズムを開発すれば、（具体的には、近似曲線を求めるのみ）、時間や空間に依存しない一年氷の氷厚マッピングデータが得られる。ただし、この方法でも、氷が積み重なっている場合には、氷表面の放射特性と厚さの関係は失われるため、氷厚を同定できない。つまり、積み重なった氷に対しては、第 2 章 IV. 戦略研究目標 4 の 1 で述べた、氷集積効果推定のアルゴリズムを併用することにより、積み重なった一年氷であっても、氷厚の推定は可能になるはずである。尚、氷集積効果推定のアルゴリズムは、氷収束による厚さの増加率を求めるものとした。従って、このアルゴリズムに具体的な氷厚を代入することにより、速やかに氷厚モニタに向けた併用が行える準備を整えている。

その他、日毎の衛星氷厚データと対話のできる日平均氷厚のみならず、ラフティングに伴う凹凸等が反映される氷厚の標準偏差等の統計量が、融解期における氷の寿命に大きく関係していることなどが分かった。また、本事業では、これまで、定点係留観測では初となる 20m 以浅の表層混合層まで係留索を立ち上げる試みを行った。但し、氷接触時には、接触深度以浅の浮力体をリリースし、浮力体リリースまでのデータは確保できる工夫を凝らしたものである。実際、CP13 係留系については、2013 年の設置後、2015 年 4 月下旬に氷と接触したが、浮力体のリリースがされ、全てのセンサーの回収に成功した。

2. 海水生産量マッピングと沿岸現場観測

執筆者：大島慶一郎 深町 康 田村岳史 平野大輔 柏瀬陽彦

(1) チャクチ海沿岸ポリニア域の係留観測

執筆者：深町康

本事業の実施期間、冬季にポリニアが形成されるチャクチ海沿岸域の 2 地点に超音波氷厚計や超音波ドップラー流速プロフ

アイラーなどからなる係留系を設置し、海氷厚・海氷漂流速度、海洋流速・水温・塩分を連続的に観測した。

この係留観測の主な目的は、連続的な観測データが存在しなかったこの海域における海氷厚の実態を明らかにすることであり、2009–13年の陸岸から約25 kmの地点でのデータからは、各年の最大 draft（喫水下の海氷厚）は~23–27 mに達すること、この海域における一冬の期間の熱力学的な海氷厚の成長は1.5–2 m程度であることが明らかになった。また、ポリニヤの形成やそれに伴う過冷却水生成の実態についても明らかになった (Ito et al., 2015b)。

この係留観測のもう一つの目的は、下記の (2) にある人工衛星データによる薄氷厚の推定アルゴリズムの検証をすることであった。図 3.7.4 は超音波氷厚計によって1秒毎に得られた海氷厚の値とマイクロ波放射計 AMSR によるデータから推定される薄氷厚の推定値を用いて熱収支計算で求められる日平均の海氷生産量を比較したものである。両者は良く一致しており、AMSR による薄氷厚の推定およびそれに基づく海氷生産量の見積もりの妥当性を示している。

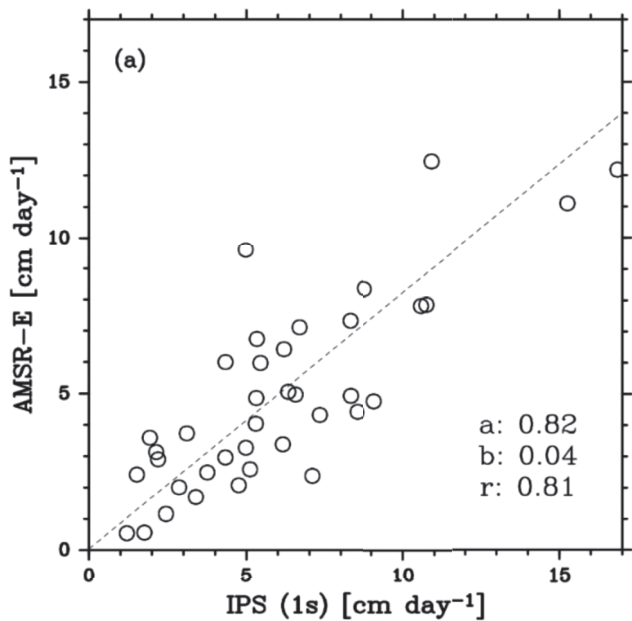


図 3.7.4 AMSR データから推定された薄氷厚から算出した海氷生産量と、超音波氷厚計による1秒毎の海氷厚から算出した海氷生産量の日平均での比較。点線は主成分分析による近似直線であり、a は傾き、b は切片、r は相関係数である。

(2) 人工衛星データのアルゴリズムの開発と海氷データセットの作成

執筆者：大島慶一郎

本研究ではまず、人工衛星マイクロ波放射計 AMSR で観測される偏波比から薄氷厚を推定するアルゴリズムを開発した (Iwamoto et al., 2013)。これに基づいて、北極海全域で 2002

~2011年までの約9年間で一日毎6.25×6.25kmの分解能の海氷厚データセットを作成した。さらに、大気再解析データセットと組み合わせた熱収支解析により海氷生産量のデータセットを作成した。図 3.7.5 は、9年間平均の年間積算の海氷生産量をマッピングしたものである。海氷生産は、ほとんど沿岸ポリニヤで行われていることがわかる。多量の海氷生産があると多量のブライン（高塩分水）の排出により高密度水が作られるため、北極海の海洋構造を決める重要な要素となる。本研究では、チャクチ海沿岸ポリニヤを検証サイトとして、係留観測（前述 2–(1)項参照）による高時間分解能の氷厚データを用いた現場との比較・検証も行っている。係留データと AMSR を用いて見積もった海氷生産量（熱フラックス）はよく一致しており、AMSR からの海氷生産量の見積もりの妥当性を示している。このような検証を行った研究は他に例がない。海氷生産量は海洋への塩フラックスにも換算でき、作成したデータは数値モデル研究の比較・検証・境界条件データとしても有用なデータセットとなっている。例えば、後述 2–(4)、や 3–(2)、3–(3)項のモデル研究などにも利用されている。これら薄氷厚及び海氷生産量のデータセットは、北極域データアーカイブへ提出され、一般公開されている。

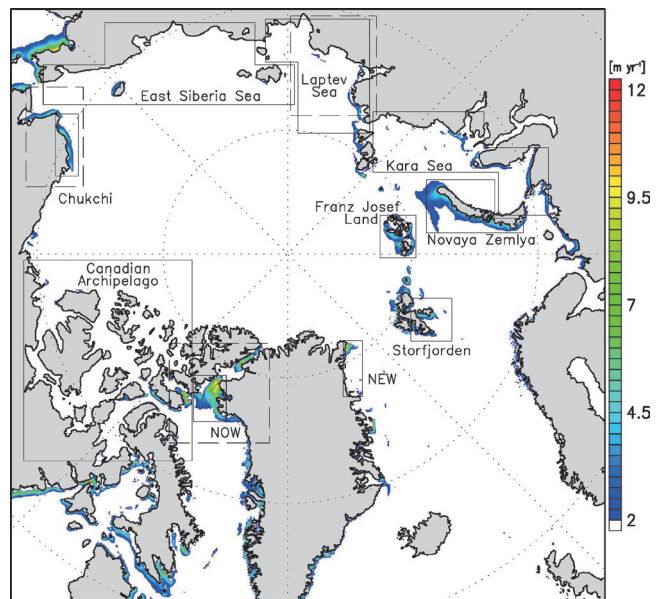


図 3.7.5 AMSR と熱収支計算から見積もった年間積算海氷生産量（海氷の厚さに換算。Iwamoto et al., 2014）。

(3) 北極海氷変動の熱収支解析

執筆者：柏瀬陽彦

近年北極海が季節海氷域化を伴う急激な変化を示しており、その変動メカニズムとして海氷と海面でのアルベドの差によって生じるフィードバック（海氷–海洋アルベドフィードバック）

の影響が注目されている。衛星を用いた海氷観測からは、特に太平洋セクターにおいて海氷密度の減少がみられ、それに伴って海洋表層に吸収される日射が増加傾向にあることが示されているものの、詳細な物理プロセスは明らかになっていない。そこで本研究では衛星観測による海氷データ（密度、氷厚、漂流速度、メルトポンド分布など）を組み合わせ、北極海太平洋セクター（図3.7.6、扇型領域）でのフィードバックの海氷後退の変動や近年の激減への影響について評価をおこなった。図3.7.6 赤線は海氷域（密度30%以上）において開水面から海洋表層に吸収される熱量であるが、その経年変動が氷厚を1mとして計算した融解量（黒線）の変動と良好一致を示している。この海域での海氷後退は流出（灰線）の影響が小さく大部分が融解によるものであり、それはフィードバックの前提条件が満たされていることを意味する。さらに、融解が始まる5月頃の海氷発散（青線）はその後の融解量と1-2ヶ月のラグで有意な相関を持つことから、初夏の海氷発散による密度低下をきっかけとしたフィードバックの効果により、海氷融解が促進されていることが示唆される。また、これらの変動はすべて2000年以降に有意な増加トレンドが見られており、フィードバックの強化が近年の激減に寄与していることも示唆される。以上の結果は漂流速度による海氷後退の予測可能性も示唆しており、実際に2000年以降の海氷後退をごく簡略なモデルで再現することにも成功した。

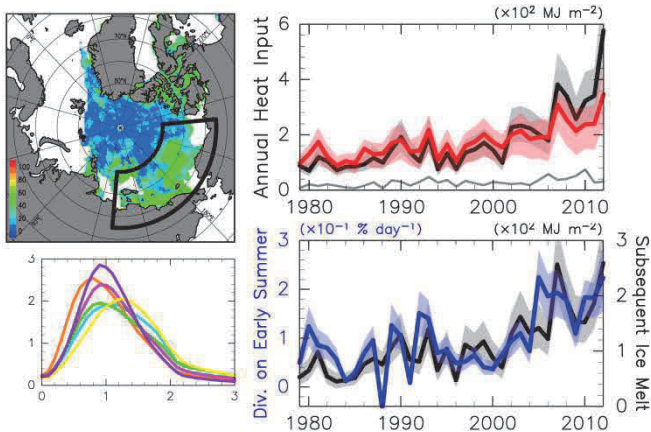


図3.7.6 (左) 2012年7月のメルトポンド分布。(左下) ICESat 観測による解析領域内での氷厚分布。(右) 海氷域における熱収支(赤線)、海氷融解量(黒線)、流出量(灰線)、および初夏の海氷発散(青線)の経年変動。比較のため海氷体積はそれを融解するのに必要となる熱量の形で示す。

(4) アラスカ沖バロー沿岸ポリニヤの生成・維持プロセス

執筆：平野大輔

冬季、アラスカ沖に形成されるバロー沿岸ポリニヤ (Barrow Coastal Polynya : BCP) は、風や海流による海氷発散によって形成される潜熱ポリニヤとして考えられてきたが、近年の研

究 (Ito et al., 2012, 2015b) ではポリニヤ形成時に高温水塊が流入することによって海氷生産が抑制される可能性も示唆されていた。そこで、BCP イベント時における海洋内部の状況について着目し、係留観測 (水温・塩分・流向流速)・衛星観測 (AMSR-E データに基づく海氷密度・海氷生産量)・大気再解析データ (ERA-Interim, 10m 風速・海面気圧)、および数値モデル実験 (トレーサー実験) の異なる複数の手法を融合して BCP の特徴を調べた。BCP が潜熱ポリニヤから顕熱ポリニヤへ移行する一連の素過程 (図3.7.7) は (1) 冬季、アリューシャン低気圧とポーフォート高気圧の気圧配置により、北東風 (バロー峡谷に平行、バロー付近では沖向き) が連吹すると、海氷発散による潜熱ポリニヤが形成され、その後 BCP 域に高温水 (主に大西洋起源水 ; AW) の湧昇がもたらされる、(2) 湧昇に伴い形成された傾圧的な up-canyon flow が次第に強化される、(3) 鉛直混合が促進 (鉛直シアが強化) され、下層の高温水層から表層へと海洋熱が輸送される、(4) 表層への海洋熱輸送により効果的に海氷成長がなされない顕熱ポリニヤへと移行し、海氷生産の抑制および停止が生じる。この一連のプロセスは数値モデルでもよく再現された。また、高温水湧昇による熱力学的な影響として、2009/10 シーズンでは海氷生産が10-30%抑制されたと推定された。これには海氷底面融解への影響は含まれていないので、実際にはさらなる熱力学的影響が見込まれる。

本研究では、この海域で強い北東風が吹くと海氷発散による潜熱ポリニヤ形成 (海氷生産) と共に、高温水湧昇によって顕熱ポリニヤが形成 (海氷生産抑制) されるプロセスを伴い、一つのポリニヤイベントにおいて (強い北東風という同一の原因によって) 潜熱・顕熱ポリニヤの双方の特徴を併せ持つ“ハイブリッド”ポリニヤであることを明らかにした。

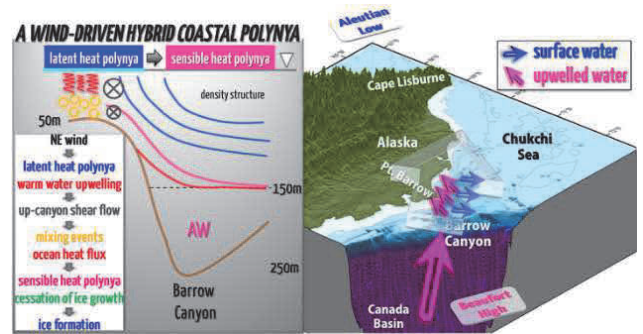


図3.7.7 バロー沖に形成される“wind-driven hybrid latent and sensible heat polynya”の模式図 (Hirano et al., 2016)。

3.北極海の循環と物理過程のモデリング

執筆：小室芳樹 川崎高雄 松村義正

(1) 低解像度モデルを用いたパラメタリゼーション開発

執筆：小室芳樹

気候変動研究等に用いられる低解像度全球海洋モデルにおいて、北極海の海水・海洋成層構造の再現性は改善すべき点の一つである。北極海領域モデルを用いた過去の研究¹⁾では、モデルが陽に表現できない混合過程を表す背景鉛直拡散を全層に渡って極めて弱くすることで再現性が向上することが示されている。しかしこの方法は全球深層循環を非現実的に弱めてしまうため、全球モデルには適用できない。本研究では、海洋大循環モデル (COCO) を用いた全球標準実験をベースに、表層のみ背景鉛直拡散を極めて弱くし、かつ海水が存在する場合に風波の砕波に伴う混合の効果を抑制する、混合抑制パラメタリゼーションを導入した。その結果、これまで非現実的に弱かった北極海表層の鉛直成層が改善された (図 3.7.8a)。この成層改善の主要な原因は、標準実験で亜表層に最大を持つような分布であった河川起源水が、観測結果²⁾と同様表層にとどまって分布したことにある (図 3.7.8b)。河川起源水分布の改善は従来の気候モデルの北極海における共通した課題であり、この混合抑制パラメタリゼーションが COCO だけでなく一般の低解像度海洋モデルでも有用であることを示唆している。また、この混合抑制パラメタリゼーションは北極域以外の海域にほとんど影響を与えず (図省略)、したがって全球モデルへの導入に適したパラメタリゼーションであることを確認した。

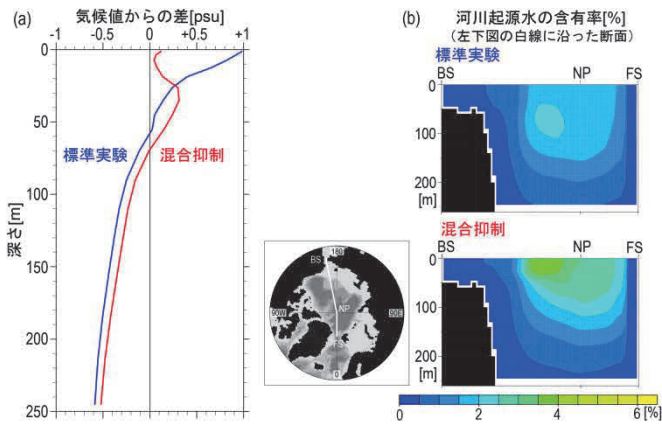


図 3.7.8 (a) 北極海上層の深さ別平均塩分の気候値からの差。(b) ベーリング海峡 (BS) から北極点 (NP) を通りフラム海峡 (FS) へ抜ける断面 (地図上の白線) での河川起源水含有率。

(2) 北極海から流出する低塩分水がラブラドル海深層水形成に及ぼす影響

執筆者：川崎高雄

ラブラドル海での深層対流を伴う深層水形成は全球海洋熱塩循環の起点の一つであり、気候をコントロールする重要な要素である。ラブラドル海へは、メキシコ湾流を起源とする高温水と北極海起源の低塩分水の2種類の低密度水が流入しており、それらのもつ浮力が渦によってラブラドル海中央部での冬季海

面冷却に伴う深層対流の規模を制御している。高温なメキシコ湾流起源水の浮力による深層対流抑制について評価した先行モデリング研究は存在するが、低塩分の北極海起源水はモデルでの再現が困難であり、その深層対流抑制に対する寄与の見積もりはされていなかった。そこで、本研究ではラブラドル海での渦活動を陽に表現できる高解像度海洋大循環モデルを用いて、メキシコ湾流起源水と北極海起源水のそれぞれの寄与を定量的に評価することを目的とした。

高解像度モデルによって衛星観測にみられるラブラドル海での渦活動が再現された。メキシコ湾流起源の高温水に加え、これまでの先行モデリング研究では表現できなかった北極海起源の低塩分水がよく再現された (図 3.7.9)。これら低密度水のラブラドル海中央部への渦による輸送 (図 3.7.9) が冬季深層対流に影響を与え、その水平規模と深度ともに従来のモデルよりも現実的に再現された。浮力収支解析によって、ラブラドル海中央部に対する、北極海起源水とメキシコ湾流起源水の浮力寄与について定量的に調べた。その結果、渦が輸送する北極海・グリーンランド氷床起源の低塩分水が、ラブラドル海での深層対流の抑制に十分有意な寄与を持つことが示された。この結果は、北大西洋における深層水形成が、大西洋-北極海間の水交換に強く影響を受けることを示唆する。

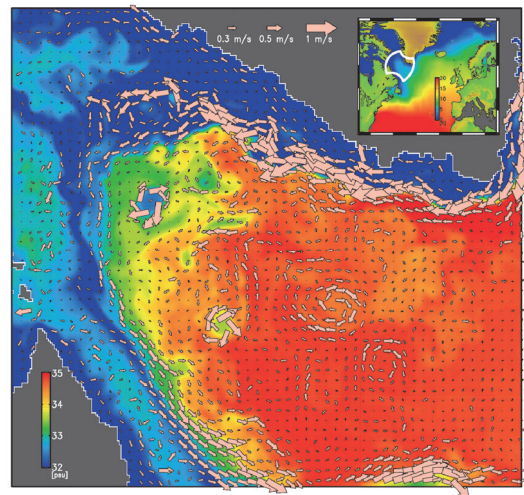


図 3.7.9 ラブラドル海での海面塩分(カラー)と水平流速(矢印)のスナップショット。北極海起源の低塩分水がラブラドル海中央部へと渦によって輸送されている。

(3) 大西洋水の流入と循環に関する高解像度モデリング

執筆者：川崎高雄

北極海の海洋内部において大西洋水は最も高温の水塊であり、その北極海海水に対する影響は大きい。北極海への大西洋水の流入口としてフラム海峡とバレンツ海が挙げられる。フラム海峡では幅の小さい西スピッツベルゲン海流が大西洋水を北

極海内部へと輸送する一方、渦によってその海流の水温が低下するなど、小スケールの物理現象がその熱輸送量に影響を与えている。また、バレンツ海を通じた大西洋水の流入とその変質過程も気候モデルなどの低解像度モデルでは再現できない。そこで本研究では、大西洋水の流入量・深さ・経路や渦活動などを適切に再現できる高解像度モデルを構築し、北極海への熱輸送量とその経年変動要因について調べた。

フラム海峡では西スピッツベルゲン海流を通じた大西洋水の流入がモデルによって適切に再現された(図 3.7.10)。フラム海峡周辺に見られる海洋中規模渦は衛星観測結果と整合的であった。熱輸送に対する渦の寄与は平均流に比べて無視できるほど小さかった。バレンツ海においても Barents Sea Opening (BSO) を通じた大西洋水の流入が再現され(図 3.7.10)、熱フラックスも船舶観測やインバース法を用いたモデルの結果と定量的に一致した。モデルで計算されたバレンツ海内での大西洋水の流路は地形に捕捉され、下流に向かって海面冷却と海氷融解による低温・低塩分化が見られた(図 3.7.10)。

フラム海峡を通して北極海に流入する熱量の経年変動が North Atlantic Oscillation (NAO) やシベリア高気圧といった総観規模大気場の経年変動によってもたらされることを示した。また、BSO を通じてバレンツ海に流入する大西洋水についても、総観規模大気変動が熱流入量の経年変動を支配することを示した。さらに、バレンツ海への大西洋水の流入量の変動はバレンツ海の高氷面積変動に重要であることを示した。

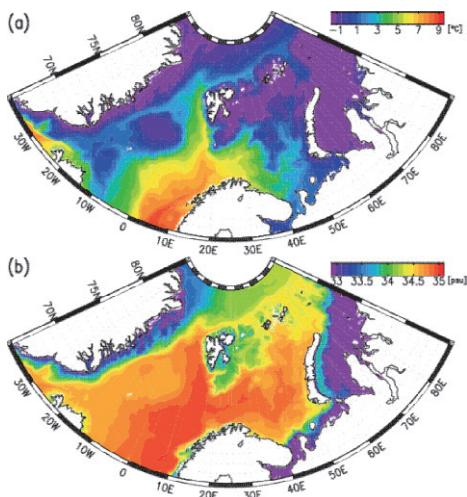


図 3.7.10 モデルで計算された表層(0-300m)での 20 年平均(a)ポテンシャル水温と(b)塩分分布。フラム海峡とバレンツ海を通じた北極海への大西洋水流入を再現。

(4) 結氷に伴う微小物理過程のモデリング

執筆者：松村義正

結氷初期の海氷形態は海況により大きく異なる。海面が穏や

かな場合は一様な薄氷が徐々に成長するのに対し、強い海上風の影響で海面が荒れた状態にある場合は、過冷却となった海水中でフラジルアイスと呼ばれる微小な結晶がまず形成され、それが徐々に集積してグリース状の海水・海水混合物をなす。前者に比べ後者は海水が大気に直接晒される状態が長く保たれるため、大気海洋熱交換を妨げる効果が低いと考えられるが、既存の海水海洋結合モデルや熱収支解析においてこのような海氷形態の差異は十分に考慮されていなかった。そこで新たに非静力学海洋モデルに粒子追跡法を組み込んだ Euler-Lagrange 型混相流モデルを開発し、これを用いてフラジル結晶を粒子として扱う新奇的な海洋海氷結合モデルを構築した。このモデルはフラジル結晶の生成・成長および融解・消滅過程とこれに伴う淡水・潜熱の収支と、フラジル結晶が持つ浮力が海水の運動に与える影響を陽に扱うことができる。厳冬期の沿岸ポリニヤを想定した理想化数値実験により、強い海上風存在下におけるフラジルアスを伴う対流(図 3.7.11)が、海氷生成初期段階での大気海洋間熱交換および正味の海水生産量に与える影響を定量的に示した。また沿岸ポリニヤでの係留観測でしばしば検出される亜表層でのポテンシャル過冷却水の形成に、海面付近で析出したフラジルが対流により下方に輸送され融解することによる潜熱輸送が重要であるとする新たなメカニズムを提示した(Matsumura and Ohshima, 2015)。本研究で開発した粒子追跡による混相流モデルは汎用的であり、海水中の堆積物粒子のモデル化にも応用できる。海面での冷却によるフラジル粒子の生成・輸送・消滅過程と海底からの堆積物粒子の浮上・輸送過程を同時に扱う数値実験を実施し、沿岸ポリニヤでの海氷生成時に、巻き上げられた海底堆積物が対流により表層まで輸送され、海氷に取り込まれる現象の再現に成功した。

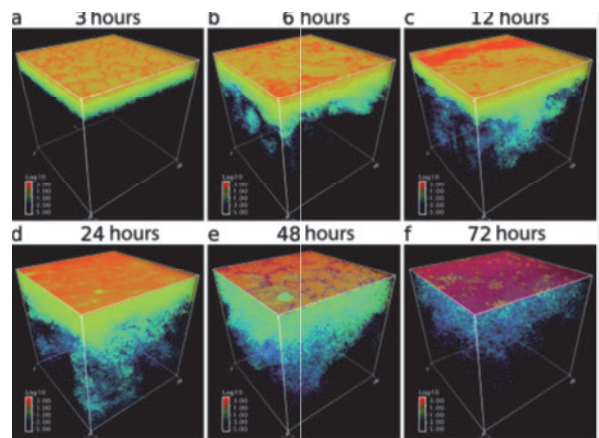


図 3.7.11 数値モデルによるフラジル粒子の生成・輸送過程の様子。色はフラジル粒子集積率、領域は一辺 64 m の立方体様、水平周期境界。

4. 長期海氷予測システムの開発

執筆者：石井正好

気候モデルを用いた中高緯度における気候の中長期予測を成功させるためには、北極周辺の気候ならびに海洋・海氷変動のメカニズムの理解と、予測のための高精度な初期値化が重要であると考えられる。本課題では、地球温暖化予測に適用された気候モデルに、海洋ならびに大気の大観測データを同化して、過去の事例について各種の海氷予測実験を実施した。また、気候予測に用いられる気候モデルを高精度に初期値化するために、アンサンブルカルマンフィルタにより大気、海洋、海氷の多様な観測データを同時に扱うことのできる同化スキームを開発した。

実際の観測データに基づく海氷再現・予測実験をいくつかの初期値化手法を試みながら実施した。大気データを同化することで海氷の年々変動が良く再現され、このことによる海氷予測精度の向上も確認された。また、海氷の予測可能性には季節依存性があることが指摘されており、本課題の実験では、夏季から開始した予測は2季節ほど予測可能で、冬季の海氷の状態は、初期値の季節によらず予測しやすいという結果が得られた(図3.7.12)。近年の海氷減少トレンドは、気候モデルの温暖化気体等の外力を適切に与えることで長期的に予測可能性であることも分かった。

開発したアンサンブルカルマンフィルタに基づくデータ同化システムは、気候モデルによる長期の気候再解析を効率的に実施できるものである。様々な種類の観測データを容易に気候モデルに同化できる点は、多くの課題が残る北極域研究では有用なものと考えられる。本課題では、気圧と水温の地表面での観測データを主に使用した気候モデルの初期値化を先ず試みて、海氷変動の再現性に注目した。図3.7.13に示したとおり、地表面気圧のみの大気データを同化したにもかかわらず、北極域周辺の気候循環がアンサンブルカルマンフィルタにより適切に再現され、海氷変動の再現性も向上したことが分かる。このシステムに海氷データ同化を行うスキームを取り込む高度化の作業も進めた。

当該研究期間中実施された、北極域における季節から年々変動の予測可能性に関わる国際プロジェクト (APPOSITE) に参加した。共通の実験プロトコルによる理想的条件下における予測結果を相互比較するものであったが、その中で2000年相当の温暖化条件下で長期間気候モデルを積分し、モデル気候値を理解するための実験も実施された。後者の実験出力から得られた海氷の長期変動を解析して、気候の内部変動のみによっても、2007年に観測されたような急激な海氷減少が現れることが分かった(図3.7.14)。この出力の解析をさらに進めることで、海氷変動メカニズムの理解に貢献できると考え、研究を進めた。

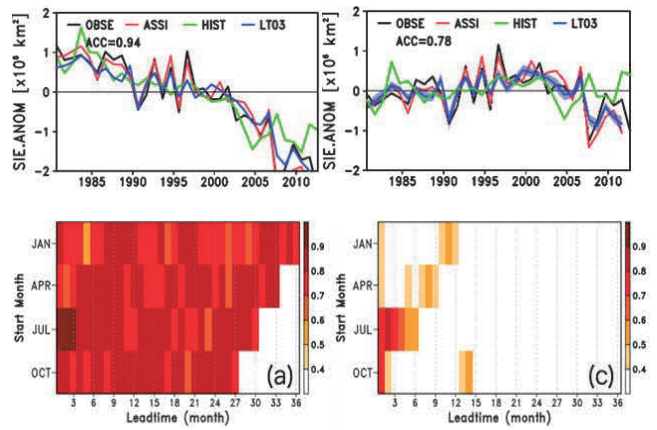


図3.7.12 上)7月初期値の3ヶ月先の予測。黒は観測、赤と緑はそれぞれ同化あり無しモデル実験、青は予測。下)1月、4月、7月、10月のそれぞれの初期時刻毎に計算した、海氷面積偏差のアノマリー相関(1ならば予測は完全)。横軸はリードタイム(月)。海氷減少トレンドを含む場合(左)と含まない場合(右)を示す。

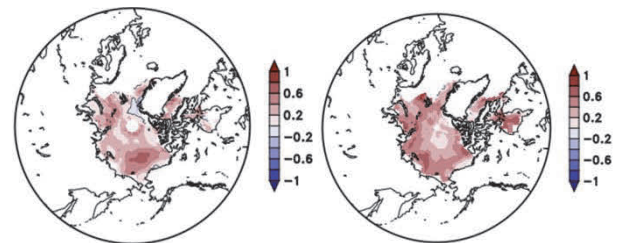


図3.7.13 再現された海氷変動の相関係数の地理的分布。海洋の水温と塩分データのみを同化した場合(左)と海面気圧データも併せて同化した場合(右)。海氷データは同化していない。

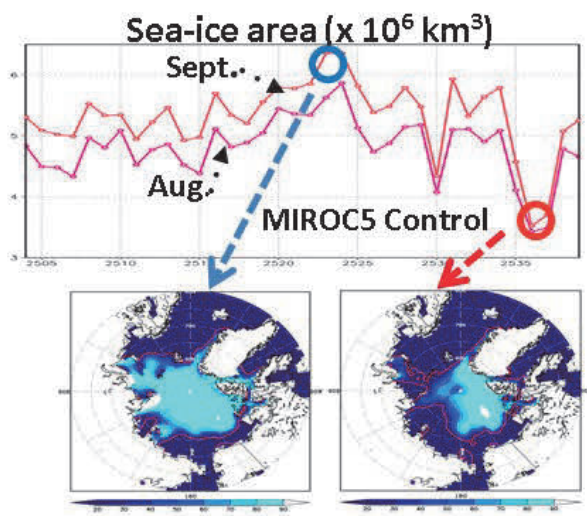


図3.7.14 2000年の温暖化条件下で長期積分したときの8月および9月の北極海氷域の時間変化(上: 横軸の単位は年だが、気候強制力固定で行う実験のため、現実の特定年とは対応しない)と海氷最大年と最小年における海氷密度分布(下)。

5. 短期・中期海水分布予測

執筆：木村詞明 小野 純

(1) 短期予測

執筆：小野純

本課題では、数日から1週間先の海水分布を予測するために、プリントン大学で開発された海洋モデル POM に、海水の力学・熱力学過程を計算するコードを組み込んだ海水海洋結合モデルを開発・改良し、それを用いた一連の数値実験を実施した。海水力学モデルには、一般的に使われる弾粘塑性体モデルに、氷縁付近で重要になる氷盤衝突レオロジーを独自に組み込んだものになっている。また、海水移動表現には Semi-Lagrange 法を導入し、氷縁位置の精度を高めている。船舶の航行を考えた場合、氷縁付近の精度を上げることは、極めて重要なことである。

使用したモデルは水平解像度が 25km の中解像度北極海全域モデルと 2.5km の高解像度領域モデルである。両モデルの境界条件（表面駆動力）には、ヨーロッパ中期予報センターで提供している大気再解析データ（ERA-Interim）を使用した。まず、水平方向境界条件の不確かさの少ない、北極海全域モデルを 1979～2013 年まで駆動して、モデルの性能を評価・確認した。その結果、海水域面積の季節および経年変化を高精度で再現したが、その空間的特徴および氷縁位置の精度は十分なものではなかった。

そこで、北極海全域モデルの計算結果を水平方向境界条件として、北極航路域に特化した高解像度領域モデルを複数の領域で作成し、ロシア側およびカナダ側の航路域に適用した。高解像度モデルでは、スケールの細かい海水および氷縁付近に発生する渦に伴う海水-海洋相互作用が表現されたことにより、全域モデルの結果よりも海水域面積が後退する様子を高精度で再現できるようになった（図 3.7.15）。次に、各国の気象機関が提供している気象データ（TIGGE）を用いて、融解期における 5 日予測の可能性を調べた結果、氷縁誤差は気象データによって差があるものの 12km 程度であった（図 3.7.16）。これは、本研究の目的である氷縁誤差±10km に近い数値であり、ほぼ目標を達成できたとと言える。また、7 気象機関の中で日本の気象庁（JMA）の大気データでモデルを駆動した結果が最も良く海水分布を再現することもわかった。ただし、対象年や海域によって結果が異なる可能性があるため、複数の事例で調べ、より定量的な議論をする必要がある。

総じて言えば、この課題項目について当初設定した目標が計画通り達成され、次のステップへの確かな指針が得られたと言える。

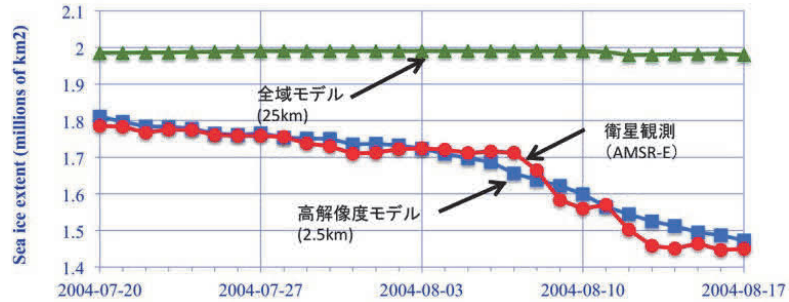


図 3.7.15 解像度の異なる数値モデルによる海水域後退の再現性の比較。

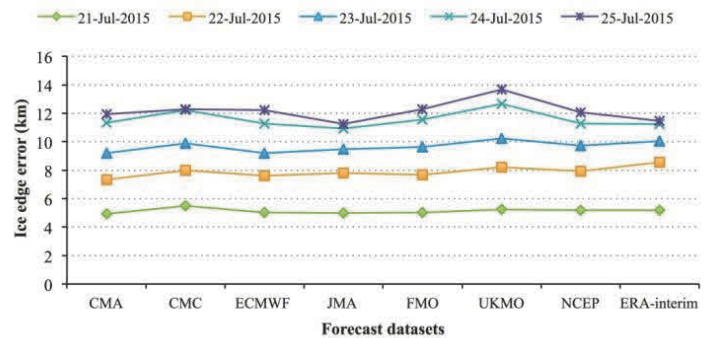


図 3.7.16 高解像度モデルによる 2015 年 7 月 20 日からの海水 5 日予測で得られた氷縁誤差。ここで、氷縁誤差とは、海水氷密度 15% の等値線の観測値と予測値の間の面積を予測値の長さで割ったものであり、観測と予測の氷縁位置の差の平均値になる。使用した各国の気象機関は CMA：カナダ、CMC：中国、ECMWF、JMA：日本、FMD：フランス、UKMO：英国、NCEP である。

(2) 中期予測

執筆：木村詞明

人工衛星による観測データをもとにした統計的手法により、春までのデータから夏季の海水分布を予測する手法の開発をすすめた。解析には主に人工衛星搭載のマイクロ波放射計 Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E) および AMSR2 のデータを ADS を通じて取得し利用した。解析に利用した海水の情報、毎日の海水氷密度、海水漂流速度、海水厚で空間分解能はそれぞれ、10 km、60 km、10 km である。海水氷密度は BootStrap アルゴリズムで計算されたものを、海水漂流速度は面関係法によって独自に計算したものを用いた。得られた漂流速度と海水上の漂流ブイの動きとを比較した結果、漂流速度データの平均誤差は 1.4 cm/s であった。この漂流速度の計算アルゴリズムは ADS に移植され、漂流速度データがリアルタイムで公開されている。また、海水厚は Krishfield et al. (2014) による計算式によって計算したものを用いた。

海水予測は春の海水厚分布と夏季の海水氷密度との関係をもとに行った。まず、冬季から春季にかけての海水の動きの解析を行い、この時期の海水の移流、収束、発散が夏季の海水分布

と密接な関係にあることを明らかにした (Kimura et al., 2013)。これは海水の動きによって春季の海氷厚分布が決定されているためだと考えられる。ただし、この手法ではベーリング海側のカナダ海盆域での夏季海氷面積の減少を再現することはできなかった。そこで、12月の海氷厚を考慮に加えた上で、12月から4月までの海水の動き (図 3.7.17) から4月末の海氷厚分布を推定した。この手法により、4月の海氷厚の推定値を直接用いるよりも高精度で4月の海氷厚分布が推定可能であることがわかった。これは、海氷厚アルゴリズムが、海氷融解期では冬季より精度が悪くなるためと考えられる。

こうして得られた2003年以降の4月末の海氷厚推定値と7月から9月までの海氷密度との関係式を導出し、それをもとにその年の4月までのデータを用いて予測を行った。予測結果は日本語版と英語版を5月末にウェブサイトで公開した。また、5月以降の最新の海氷密度を計算に加え、6月末と7月末にも予測の更新を行った。予測手法の改良の結果、2015年の予測では9月の最少面積を誤差2%で予測することに成功し、航路の開通時期*1も誤差10日以内、最少時の海氷分布についてもほぼ正確に予測できた (図 3.7.18)。すなわち、当初計画で設定した目標を達成できた。また、厚さを考慮した新しい手法を適用することにより過去の予測を再計算したところ、とくに極方向からの厚い海水の流入の影響を受けやすいカナダアラスカ側の海域で予測精度が改善した。

冬季から春季にかけての海水の動きを決定するのはこの時期の気象条件である。ロシア沿岸域のカラ海、ラプテフ海、東シベリア海の夏季の海氷分布の年による違いは、それぞれの海域の冬季の海面気圧場の違いで説明できることも分かった。海氷はその厚さ変化を通じて冬季の気象条件を夏季まで記憶するメモリーの役割を果たしていると言え、海氷の中期予測は大気モデルに対してより正確な海面境界条件を与えることになり、気象の中期予測の精度向上にも貢献できると期待される。

ただし、現在のところ、この手法では、夏季の氷厚分布の予測値が得られず、後述の最適航路探索による航行シミュレーションに使えない。それは、信頼できる夏季の海氷厚データが非常に乏しいからであり、今後、そのデータの蓄積が必要不可欠である。

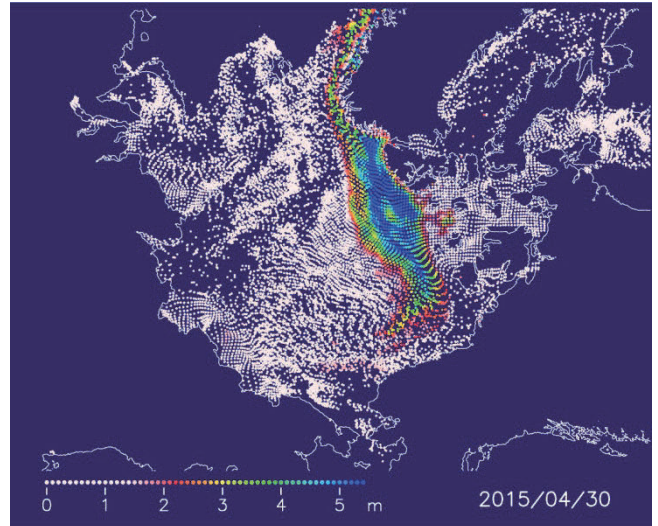


図 3.7.17 2014年12月1日に等間隔に配置した粒子の2015年4月30日の分布。カラーバーは海氷厚を表す。

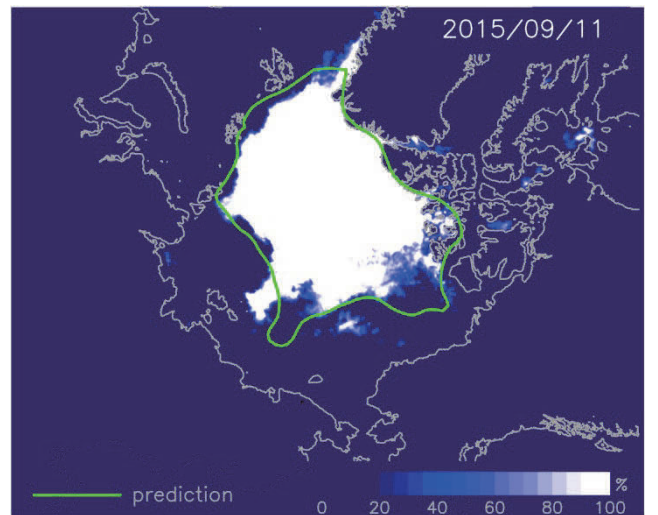


図 3.7.18 2015年9月11日の予測氷縁 (緑線) と実際の海氷分布 (白い領域)。

6. 海氷厚モニタリング

執筆者：館山一孝

人工衛星搭載のマイクロ波放射計データから海氷厚を推定するためのアルゴリズム開発をすすめた。そのために、北西航路 (2012–2013年)、カナダ海盆 (2011–2014年)、オホーツク海 (2011–2015年) において砕氷船を用い、電磁誘導式氷厚計やマイクロ波放射計 (図 3.7.19)、前方カメラや目視観測から現場の海水の種類や厚さ、状態およびそのマイクロ波特性を観測した。

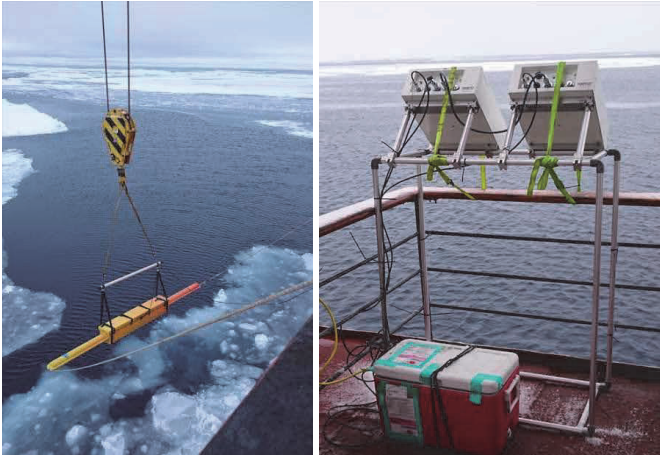


図 3.7.19 現場氷況観測装置の写真。左：電磁誘導式氷厚計、右：マイクロ波放射計。

現場観測結果から海氷の種類や厚さ、融解に敏感なパラメータを開発し、それらのパラメータを用いてカナダ海盆に 2002 年から 2014 年にかけて設置された係留ブイの Upward Looking Sonar (ULS) による実測氷厚と比較した。その結果、衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR-E および AMSR2 で取得された輝度温度データから一年氷と多年氷それぞれの海氷厚を推定するアルゴリズムが得られ、一年を通して毎日の海氷厚をモニタリング可能になった (図 3.7.20)。

海氷厚推定は、海水密度度が 80%以上、かつ表面融解が少ない海氷域において実施した。これは融解期に海氷表面が融け水溜り (メルトポンド) が生じるとマイクロ波は水の層を透過できず、メルトポンドの下からの情報が得られないためである。

ULS 実測氷厚と AMSR-E および AMSR2 の推定氷厚を比較した結果 (図 3.7.21)、AMSR-E では平均二乗誤差 (RMSE) は 0.66–0.72 m, AMSR2 では 0.67–0.71 m を示した。厚さ 1 m 以下、9 月から 12 月の時期に限定すると、RMSE は 0.23–0.32 m を示した。

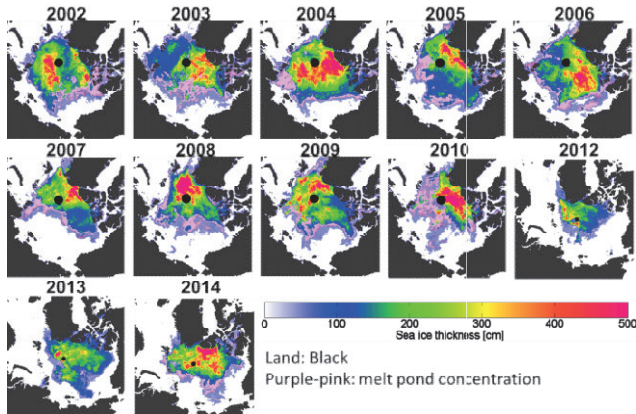


図 3.7.20 毎年 9 月 10 日の海氷厚分布の年変化 (2002 年–2014 年)

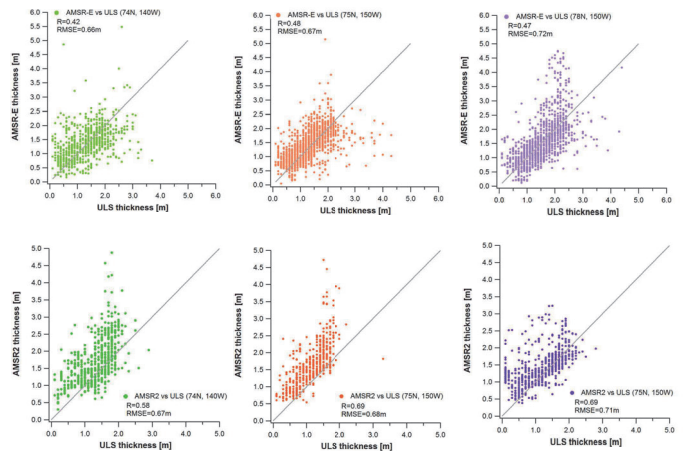


図 3.7.21 AMSR-E/AMSR2 推定氷厚と ULS 実測氷厚の比較。上段：AMSR-E (2002–2011 年)、下段：AMSR2 (2012–2014 年)。

本テーマでは当初数値目標を「氷厚 1 m 以下の海氷で推定精度 0.1 m」と設定したが、結果は約 0.3 m となり、目標達成に至らなかった。推定精度の改善を目指し、実測データとしてこれまで使用してきた 3 系の係留ブイデータの他、13 機の漂流ブイの氷厚・積雪・氷温データ、CryoSat-2 の海氷厚分布データと比較する。また、海氷成長にともなうマイクロ波特性の変化について水槽実験を行っており、これらの結果をもとに積雪や融解などの季節変動の影響を見積もり、より精度の高いアルゴリズムへの改良を行う。

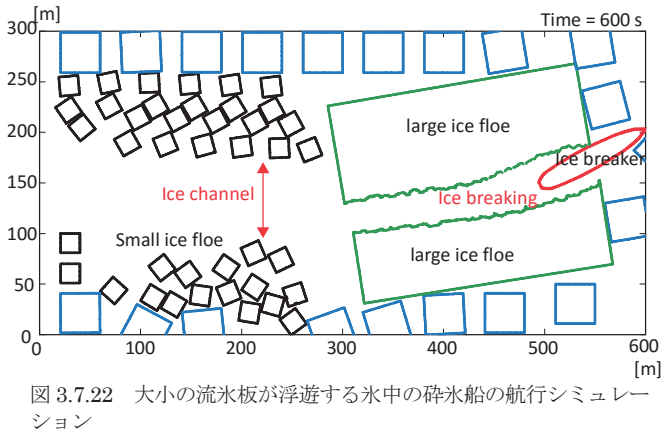
7. 航行支援モデル

執筆者：山口 一 金野祥久 澤村淳司 尾関俊浩 高木敏幸

(1) 海氷が船体に及ぼす衝撃

執筆者：金野祥久、澤村淳司

氷海中を航行する船舶の水中性能および安全性評価には、大小様々な海氷から受ける氷荷重の推定と、推定した氷荷重下での船舶の運動と構造応答を知る必要がある。氷海中を航行する船舶は、浮遊する氷板の大きさにより、氷を排除又は砕氷しながら航行する。このような様々な氷況中を船舶が航行する時の氷荷重が計算できる数値計算法を開発した (図 3.7.22)。さらに、数値計算から得られた氷荷重分布を用いた、氷荷重下での船体構造部材の構造応答計算法を確立した。これらにより、氷海中での船舶の氷荷重と船体運動、さらには、氷荷重下での船体構造の応力状態を知る事ができ、氷荷重下での船体の損傷度の判定が可能になった。このように、本研究成果を用いる事で、氷海中での船舶の水中性能および構造安全性評価ができる。



北極航路の夏季の航海では氷がほとんどない海域を船舶が航行するが、レーダーでは観測しにくい小氷片が航路に浮かんでいる可能性があり衝突リスクを考慮する必要がある。過去には大きな氷盤と衝突した船舶が受ける最大荷重を推定する方法が提案されており、これに基づいて小氷片との衝突に際して船舶が受ける最大荷重を求める方法を提案した。衝突前後の運動量保存および力学エネルギー保存の考え方に基づき、衝突に費やされたエネルギーを求め、ここから最大荷重を導く。このとき氷片の質量および衝突前の運動量を求める必要があるが、船舶レーダーで発見しづらい大きさである直径 20 m 程度までの氷片を想定すれば良いと判断した。また衝突前の氷片速度は衝突直前の船舶と氷片との流体（海水）を介した干渉によって決まると考え、数値流体解析により衝突直前の氷片の運動量を算出した（図 3.7.23）。この算出方法の妥当性は模型実験により確認している（図 3.7.24）。

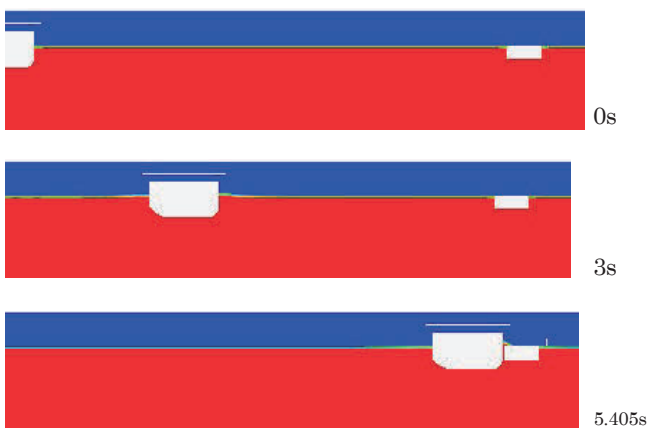


図 3.7.23 氷片挙動の数値解析例

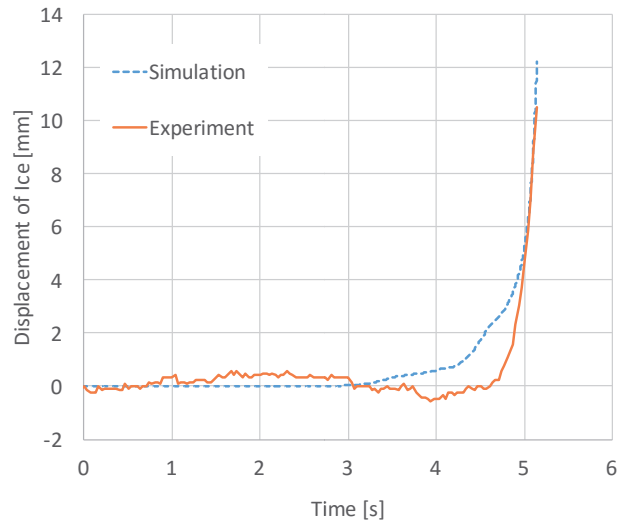


図 3.7.24 模型実験と数値解析の氷片移動距離の比較例。

(2) 船体着氷

執筆者：尾関俊浩

北極海など寒冷海域では、しばしば船舶や構造物に着氷が大きく発達し、除氷の問題が発生する。そこで、寒冷海域を航行する際の船体着氷のメカニズムを明らかにするための研究を行った。船舶に設置した飛沫計で海水飛沫の観測と実験室での実験を行ったほか、着氷被害を低減させるための方法について検討を行った。

まず、飛雪粒子カウンターを改良した「SPC 型しぶき計」と、船舶用雨量計を改良した「雨量計型しぶき計」を開発した（図 3.7.25）。両しぶき計とも海水飛沫の連続観測が可能である。



図 3.7.25 船舶に取り付けた飛沫計。(左)SPC 型、(右)雨量計型。

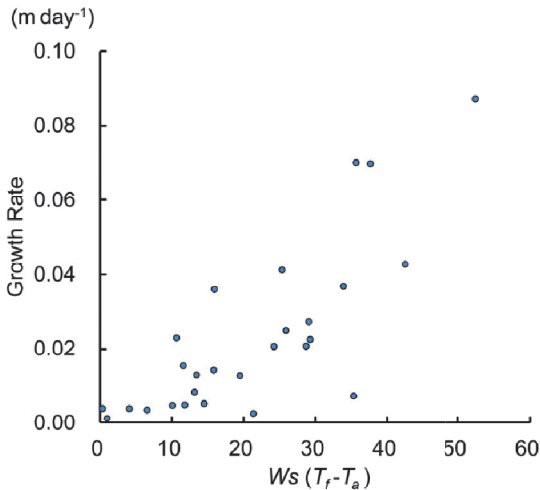


図 3.7.26 着氷指標 $W_s(T_f - T_a)$ と着氷断面積増加量との関係。

観測は大型砕氷船である「しらせ」と巡視船「そうや」で実施した。「しらせ」の観測結果では、最上層甲板中央に設置した SPC 型しぶき計は、1 時間当りのしぶき量と相対風速の間に最も強い相関が見られ、相関係数は 0.82 であった。左右両舷に設置した雨量計型しぶき計と相対風速の相関係数は左舷が 0.84、右舷が 0.88 でありいずれも強い相関があった。したがって、各船種におけるしぶき量観測データを蓄積することにより、1 時間当りの大型船舶への海水飛沫のしぶき量を風向、風速と、船速、船首方向（針路）から推定できる可能性が示された。

世界的には着氷の度合いを示す着氷指標 PR を次式から求めることが多い³⁾。

$$PR = \frac{W_s(T_f - T_a)}{1 - 0.3(T_w - T_f)} \quad (1)$$

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。結氷温度に近い海水では、分母を 1 として扱っても差し支えないので、ここでは $W_s(T_f - T_a)$ の有効性を検討した。船体着氷と防波堤灯台に成長する海水飛沫着氷は同様の現象であるので、本研究では防波堤（石狩市浜益区）に設置した約 4 m の灯塔をインターバル撮影した画像を用い、着氷の成長と気象の関係について調べた。着氷断面積の増加量は $W_s(T_f - T_a)$ の増加とともに単調に増加する結果となった（図 3.7.26）。 $W_s(T_f - T_a)$ は飛沫着氷の着氷率（熱収支）を決める一つの要素である顕熱フラックスに関連するので、着氷には顕熱フラックスの影響が大きいことが推測された。

寒冷海域を航行する船舶にとって、海水飛沫着氷の実践的な課題は難着氷や除氷対策である。本研究では広範囲の着氷には難着氷シート、窓などの透過性の必要な場所には面ヒータ付きポリカーボネイトを提案した。難着氷シート（例えば Ozeki et al., 2012）はコーティングによる難着氷性に加えてシートの変

形を用いることで効果的な除氷対策を行うことができる。一方、透明発熱シートを積層したポリカーボネイトは透過性が良いことに加え、高強度であり形状への対応も可能で、発熱量の調整も容易なことから、窓などの重要な箇所だけに選択的に使うのは有効であろう。

(3) 最適航路探索

執筆者：高木敏幸 山口一

氷海中での最適航路探索の研究結果について述べる。航行中の船舶への通信環境はまだまだ貧弱で、実質上、大量のデータを送れる状況にない。そこで、海運会社の陸上支援部が使用するような全体航路の最適化手法と、船員が船上で使用するようなコンパクトな装置（PC）で氷況データとしては船舶レーダを用いる近傍航路最適化手法の、二つの手法を開発した。まず、後者を述べる。

船の近傍スケールの航行支援のため、船舶のレーダ画像をもとに砕氷船の能力に応じて氷盤を避けながら最短で目的地に向かうルートの探索手法を開発した。本手法は、まず、レーダ画像上にロードマップの分岐点になるマイルストーンを格子状に配置する。次にマイルストーン間の距離とマイルストーンの海水氷密接度に対する砕氷船の氷中航行能力を評価関数に加え、ダイクストラ法を用いて現在地点から目的地までの航路を求める。

図 3.7.27 は 2012 年 8 月の北極海におけるカナダの砕氷船 *レイ・サン＝ローラン* 号の船舶レーダ画像である。砕氷船の氷中航行能力は、図 3.7.27 左の様に、開放水面での船速に対して船速が 1/2 になる海水氷密接度を航行可能な領域として区分線形関数で近似して表現している。ここでは、砕氷船が航行可能な海水氷密接度を 10% から 30% まで変化させ、開放水面上に設置した 8 つの目的地に対して航路を探索した。氷中航行能力によって選択される航路は異なり、また、氷中航行能力の増加に伴い、海水迂回の航路曲率が減少する。図 3.7.28 に、図 3.7.27 右に示す 8 つの目的地に対する氷中航行能力と航路の距離の関係を示す。航行が可能な海水氷密接度が高くなるにつれて、すべての目的地に対する航路の距離が短くなっている。特に、目的地③の場合においては目的地の間に海水が多く分布しているため、砕氷船の航行可能な海水氷密接度が 10% と 30% とでは、探索された航路も異なり、2791 m 航路の距離が短くなっている。本手法は船舶レーダ画像から容易に結果を得られるため、実時間による海水氷密接度に応じた航路探索が可能である。

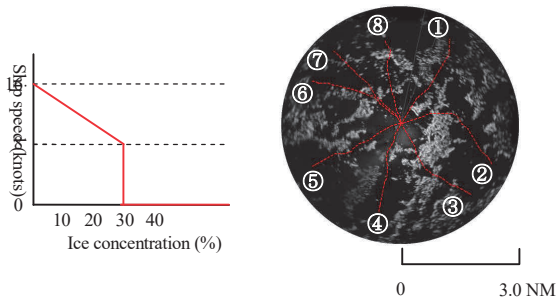


図 3.7.27 水中航行能力と航路。水中航行能力を海氷密度 30%とした場合。

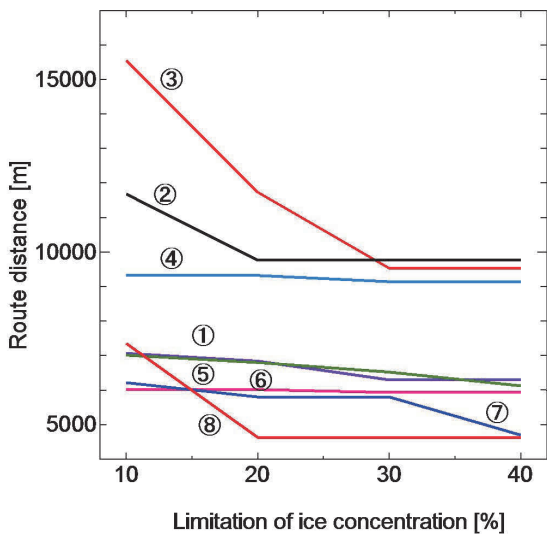


図 3.7.28 水中航行能力と航路距離の関係。

また、北極海全体スケールの航行支援のため、A*アルゴリズムによる最適航路探索手法を開発した。まず、Choi et al. (2014) が、アンサンブル数値予測計算による氷況データをもとに、平均値とバラツキの両方を考慮する探索手法を開発した。バラツキの大きい所は不確実性の高い所であるから、安全のためなるべく避けるという考え方である。次に、中野修士論文 (2015) が、船速の推定に Ice Index (氷況と船の耐氷クラスを考慮した経験的指標) による式を考案した。式は、2014 年の航行実績から決定した。これにより、船速がより現実的なものとなった。それをもとに、アンサンブル予測計算の氷況データの他に、衛星観測による氷密度・氷厚分布を使った航路探索結果と現実の航路の比較を行った。その例を図 3.7.29 に示すが、どの例においても、本手法の適用により、航行距離・時間ともに有意に短縮できることが解った。本研究中に調べた例では、概ね航行距離で約 5–15%、航行時間で約 10–30%短縮が実現されている。また、これらは、最小化すべきコスト関数の係数設定により、コントロール可能である。本手法は ADS に移植されており、ADS の氷況データを用いて、ユーザは任意の条件で計算できる様になっている。

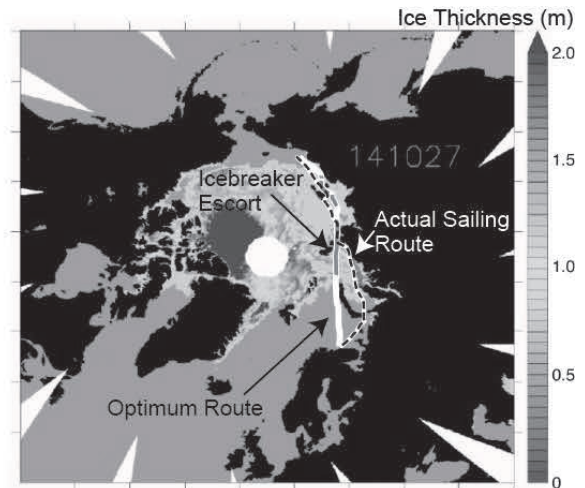


図 3.7.29 2014 年 10-11 月の耐氷船の実際の航路と最適航路の比較

次に、気候モデル MIROC5 の予測シナリオ RCP4.5 と RCP8.5 による 2100 年までの予測氷況に対し、本手法を適用した。RCP8.5 の氷況に対し、各月 1 日に出航した場合の北極海航路通過航行日数*2 の変化を、図 3.7.30 に示す。無氷になり極点航路を通れる時の、この船の航行日数が約 9.3 日であるから、2080 年頃以降から、少なくとも 7 月初から 11 月末までの期間、極点航路を通れることになる。また、秋以降の航行日数増加が緩やかであることから、今後、秋に向かって航行期間を広げていくのが現実的と考えられる。なお、他の気候モデルと同様、MIROC5 の予測海水域面積は、図 3.7.31 に示すように観測の海水域面積の減少より数 10 年遅れており、図 3.7.30 の状況が 40 年ほど早く訪れるという可能性は、否定できない。課題 7-2 で開発された高精度北極海モデルの成果が、早期に全球気候モデルに反映されることを期待する。

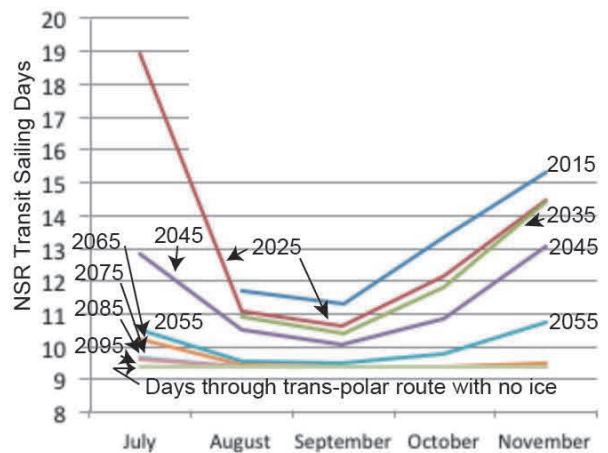


図 3.7.30 MIROC5-RCP8.5 による予測氷況を用いた、北極海航路通過航行の日数変化。

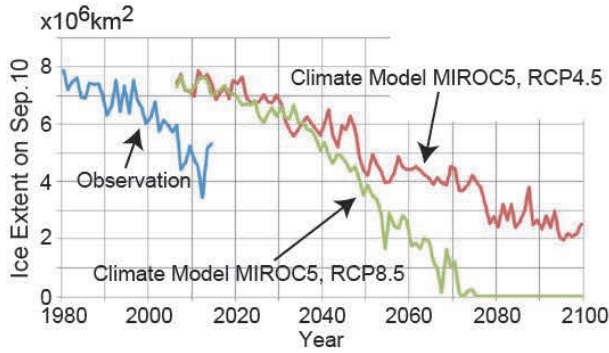


図 3.7.31 最小海氷域面積の年変化の計算と観測の比較。

8. 経済性評価および輸送シナリオ

執筆者：大塚夏彦

東アジア～欧州間の海上輸送路としての北極海航路について、海運市場動向を踏まえた運航シナリオ並びにその経済性について検討し、北極海航路の成立要件を示した。輸送シナリオでは、欧州及び北極圏と東アジアの間で実際に輸送され得る貨物として、鉄鉱石、液体バルク、完成自動車、LNG、コンテナを取り上げ、実際の国際輸送動向及び我が国における調達動向を考慮したうえで、北極海航路輸送並びに既往輸送ルートによる輸送シナリオを定めた。北極海航路輸送に関しては、氷況による航行速度や燃料消費への影響を考慮して、具体的な運航オペレーションを算出した。これをもとに、実際の国際市場（燃料価格、海運市場ほか）を考慮して、北極海航路輸送および既往シナリオに関する経済性分析を行った。

北極海航路の運航速度は、氷況にもとづく船の航行難易性を示すパラメータである Ice Index⁴⁾ を取り上げ、これと船速の関係性を仮定して、航路上の氷況変化に応じて算出した(表 3.7.1)。航路上の氷況は、JAXA による 10km 格子の日平均海氷密度より 2013～2014 年間の 15 日平均を、その他のパラメータは Kitagawa et al. (2001)⁴⁾ による氷況データを補正して用いた。これより、15 日ごとの北極海航路の航行速度、航行時間、燃料消費量などを算出し、経済性分析に用いた。

6 月～11 月の北極海航路横断に要する時間は、砕氷船支援を伴うアイスクラス PC7 の船では 7 日～11 日、アイスクラス PC4 の砕氷船級による単独航行では 7 日～8 日となった。これは実際の運航事例がおおよそ 10 日間要していることと合致している。

この結果をもとに海上輸送コストの比較分析を行った。鉄鋼石及び液体バルク輸送は、同じ産地と消費地であれば、距離の短い北極海航路輸送において燃油費の削減効果が大きく発現し、同時に輸送日数短縮による船の減価償却費（以後、船体償却費

表 3.7.1：アイスインデックスと船速の関係式

Ice-Index	Ice strengthened ship of PC7(1A)	Icebreaking LNG carrier (PC4,Arc7)
ID > 20	Independent navigation in 15knots.	
18 < ID ≤ 20	Independent navigation, V=2.5*IceIndex-35	V=0.25*IceIndex+10
0 < ID ≤ 18	Icebreaker escorting under constant speed of 10knots.	
ID ≤ 0	Icebreaker escorting. V=0.2*IceIndex+10	

と記す) や操船経費の削減により、スエズ運河を使う既往航路よりも輸送コストは有利となる。ただし、ロシアの砕氷船支援料がスエズ運河通航料程度であることが求められる。また、既往航路が大型船にてコスト減を図っても、それと同等程度の輸送コストが実現できる。完成自動車の場合、輸送コスト中の船体償却費の割合が大きくなり、燃料費だけでなく輸送日数削減によってコスト削減が実現できる (Otsuka et al., 2016a)。LNG 輸送費は中東産 LNG の場合よりも高くなった。ただし輸送コスト差は、最近の日本における LNG スポット輸入価格の 3%程度で、需要者側にとっては許容可能な程度にあると考えられる。また船体償却費の比重がさらに大きくなるため、より短い期間で輸送できるようになると、コスト競争力は向上する(図 3.7.32)。

一方コンテナ輸送では、北極海を航行可能な規模の船型として 4,000TEU*³⁾ 積み耐氷船を想定し、夏は北極海、冬はスエズ運河を通る通年運航モデル、既往スエズ航路については現行規模の船型 (8,000～19,000TEU) を取り上げて検討した。この結果、4,000TEU 耐氷コンテナ船による NSR*⁴⁾ スエズ運河併用による通年運航は、8,000TEU 級船による既往航路と同等の輸送コストとなった(図 3.7.33)。このように北極海航路によるコンテナ輸送は、今後の海運市場の動向によって、経済合理性を持ちうるか流動的となっている。また、海氷勢力緩和による運航環境の向上が進めば、適切な運航モデル、ビジネスモデルを構築することによって、競争力を持ちうる可能性はある。

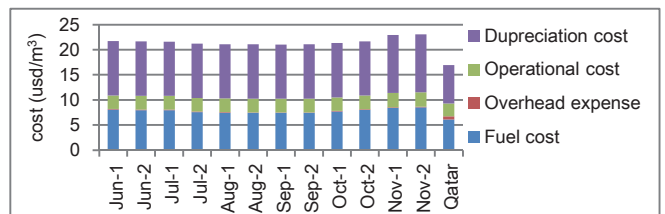


図 3.7.32 砕氷 LNG 船によるヤマル LNG 輸送。各月の-1, -2 は、それぞれ上半期、下半期を表す。

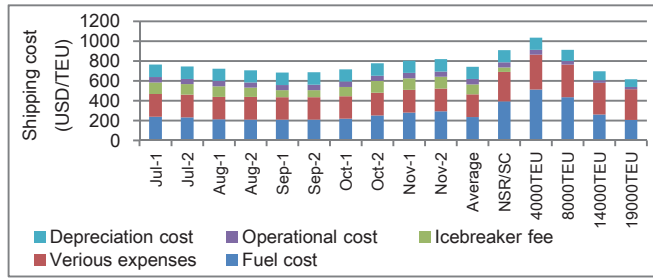


図 3.7.33 コンテナ通年輸送モデル (図中の NSR/SC)。

注

- *1 本研究では、全航路において海水密度度 15%以上の海域に入ることなく航行できることを「航路の開通」と定義した。
- *2 ベーリング海峡からスカンジナビア半島北端までの航行日数。
- *3 Twenty-foot Equivalent Unit。コンテナ船の積載能力を、標準的な 20 フィートコンテナの個数で表したもの。
- *4 Northern Sea Route。ロシア側を通る北極海航路。

引用文献

- 1) Zhang, J., Steele, M., 2007. Effect of vertical mixing on the Atlantic Water layer circulation in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 112, C04S04. doi:10.1029/2006JC003732.
- 2) Roeske, T., Bauch, D., Rutgers, M., Loeff, V. D., Rabe, B. 2012. Utility of dissolved barium in distinguishing North American from Eurasian runoff in the Arctic Ocean. *Mar. Chem.*, 132-133, 1-14. doi:10.1016/j.marchem.2012.01.007.
- 3) Overland, J. E., 1990. Prediction of vessel icing for near-freezing sea temperatures. *Wea. Forecasting*, 5, 62-77.
- 4) Kitagawa, H., Ono, N., Yamaguchi, H., Izumiyana, K., Kamesaki, K., 2001. The Northern Sea Route – The shortest route linking East Asia and Europe. SHIP & OCEAN FOUNDATION, The Nippon Foundation, ISBN 4-88404-027-9, <http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2000/00967/mokuji.htm>, 93-110.

第 4 章

研究基盤、他

第 四 章

研究基盤・JCAR 事務局・国際連携推進について

1. 全体概要

実施体制

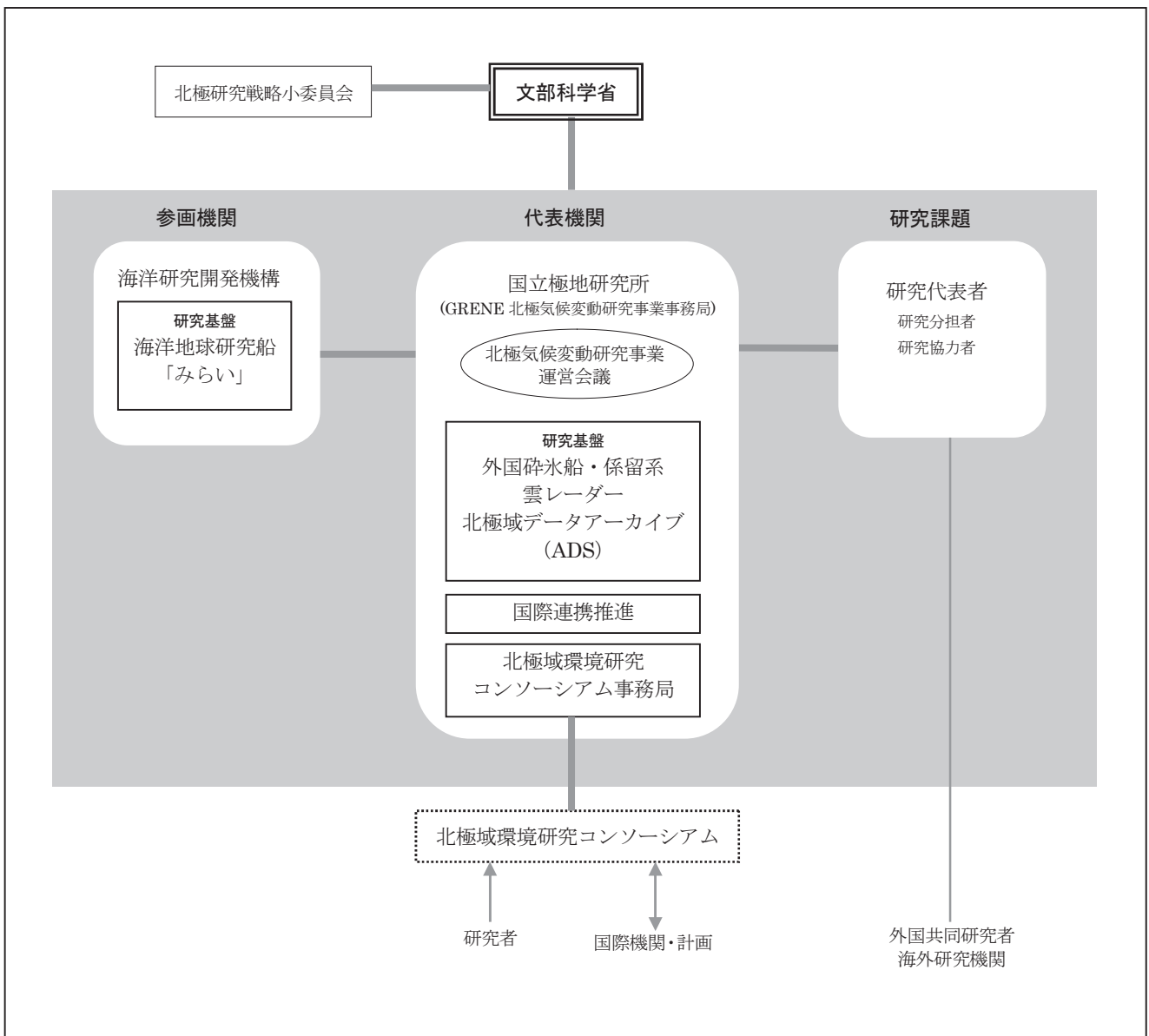
平成23年4月19日の北極研究戦略小委員会で定めた運用基本方針に基づいて、北極研究を強力に牽引するための研究設備として次の①から④の基盤について代表機関の国立極地研究所と参画機関の海洋研究開発機構は整備を行った。

- ①耐氷性能を有する海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」

- ②海氷域の変化を捉える観測を機動的に行う砕氷船と係留系
- ③雲の三次元構造を観測する雲レーダー
- ④北極域データアーカイブ

そして、代表機関の国立極地研究所は「北極環境研究コンソーシアム」の運営を効率的かつ効果的な活動が行えるよう支援をすることが決定された。

また、平成26年度には上記運用基本方針が求める戦略研究目標達成に向けて必要不可欠な国際連携の強化とこれを支える人材の育成を図るべく、アメリカ合衆国とカナダの研究機関を拠点として、若手研究者が主体的に実施する北極環境に係る国際共同研究等を支援する仕組みを整えた。



事業実施体制図

2.海洋地球研究船「みらい」

基盤整備機関：海洋研究開発機構
執筆者：事務局



関根浜を出航する「みらい」(写真：山内恭)

(1) 目的

急激な海水減少が進む北極海。海水減少は水温や塩分・海の流れなどの海水の物理的性質を変え、栄養分などの化学的性質を変え、そこに棲むプランクトンや魚や動物などの生物にも影響を及ぼす。年間を通して海水最小期にあたる時期の季節海水域の北極海で、大気から海洋まで観測を行うことで北極域における環境変動を明らかにし、その影響がどのように生態系や気候システムに及んでいるのか調査することが求められた。

このような北極の海水域で調査・観測するには、各種大型観測装置や観測室・実験室を完備する海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」が欠かせないため、参画機関の海洋研究開発機構が基盤として整備した。

GRENE 北極事業「みらい」北極航海 (MR12-E03) 採択課題

- ・課題 3：北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響：大気プロセスの包括的研究 (非乗船)
- ・課題 5：北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明
- ・課題 6：北極海環境変動研究：海水減少と海洋生態系の変化

(2) 実施体制

- ・乗船課題の公募・選定と首席研究者の決定：国立極地研究所
- ・航海準備・運航：海洋研究開発機構
- ・データ管理：海洋研究開発機構

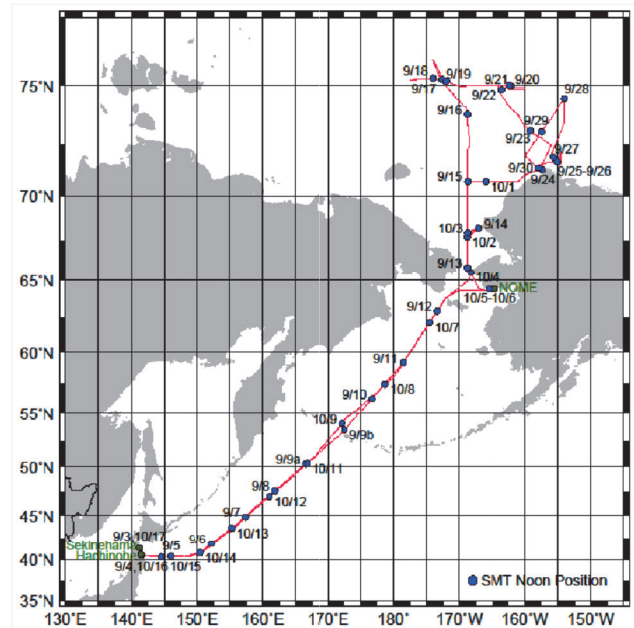
2012年8月1日、本航海で取得したデータの取り扱いに関する取り決めについて、国立極地研究所と海洋研究開発機構の間で協定締結。

(3) 実施状況

- ・実施期間：2012年9月3日～10月17日
- 9月3日：青森県関根浜港

- 9月4日：八戸港
- 9月13日、10月4日：ベーリング海峡通過
- 10月5～6日：アラスカ州ノーム
- 10月16日：八戸港
- 10月17日：関根浜港

- ・航海名：
 - 2012年度 GRENE 北極気候変動研究事業
 - 海洋地球研究船「みらい」北極航海 (MR12-E03)
- ・首席研究者：
 - 海洋研究開発機構北半球寒冷圏プログラム
 - 菊地隆チームリーダー (当時)
- ・乗船研究者 (首席を除く)：研究分担者、特任研究員及び研究協力者として次の機関から計 29 名の乗船があった。
 - 海洋研究開発機構 1名 気象研究所 1名 北海道大学 10名 東京大学大気海洋研究所 1名 ラバル大学 1名 東京海洋大学 2名 富山大学 1名 国立極地研究所 (北大) 1名 国立極地研究所 (東大大気海洋研) 1名
- ・「みらい」搭載型係留系の回収と設置
 - 第4章3項係留系のページ参照。なお、本航海とあわせ、事業期間中にカナダ砕氷船「ローリエ号」や海洋研究開発機構による他の「みらい」航海時に回収・再設置を実施。
- ・主な観測項目：詳細は次ページ参照。CTD/採水観測、XCTD観測、光学観測、プランクトンネット観測、係留系回収・設置、マルチプルコアラー採泥、ADCP・SeaBeam等連続観測、目視観測、大気観測、衛星観測等
- ・調査地点：北極海、ベーリング海、太平洋



「みらい」北極海航海の航跡図

(4) 利用課題と研究内容

1) 北極海環境変動研究：海水減少と海洋生態系の変化

(課題6：担当－海洋研究開発機構)

- ①CTD/採水観測により、水温、塩分、溶存酸素、栄養塩、炭酸系物質、及びクロロフィル a 調査。
- ②航路上で、船舶搭載 ADCP 観測、表層海水連続観測（水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル a、pCO₂、全炭酸の測定）、XCTD 観測、測深（シービーム）、一般気象観測。
- ③インマルサット、イリジウム通信回線を用いて気象データ、予報データ、海水データを取得し、現場観測に利用。
- ④バロー海底谷で3系の係留系の回収（BCW-10, BCC-10, BCE-10）と再設置（BCW-12, BCC-12, BCE-12）。また、砕氷船「ローリエ号」を使って7月にチャクチ海ホープ岬沖で設置した2系の係留系（SCH-12, SCH-12W）の再設置（SCH-12-2, SCH-12W-2）、同じくチャクチ海バロー岬沖で2系の係留系回収（BCH-12, BCH-12W）、再設置（BCH-12-2, BCH-12W-2）を実施。さらに、ノースウインド深海平原では1系の係留系の設置（NAP-12）と1系のセジメントトラップの回収（NAP-11t）、再設置（NAP-12t）を、チャクチ深海平原では1系のセジメントトラップの設置（CAP-12t）を行った。

※太字は本事業で整備した「みらい」搭載型係留系である。

2) チャクチ海における植物プランクトン・基礎生産力の環境への応答（課題6：担当－北海道大学）

- ①観測海域全体に渡って、日中に1日あたり2～3回分光放射（分光放射計 PRR-800）、及び後方散乱係数（後方散乱計 HydrosCat-6）の測定を実施。
- ②ニスキン採水器を用いて、粒子、及び CDOM の吸収係数、植物プランクトン色素組成（UHPLC）、サイズ分画クロロフィル a、基礎生産力等を測定するための海水サンプルを採取する。また、船上で培養水槽を用いた基礎生産力測定のための培養実験を実施。
- ③ベーリング海峡北部、陸棚域中央部、及び陸棚斜面域において、水温を2～3段階に調節した光合成－光曲線（P-Eカーブ）の実験を実施。

3) 西部北極海における動・植物プランクトン群集構造の水平分布（課題6：担当者－北海道大学）

- ①ニスキン採水器を用いて、マイクロプランクトン群集解析用セルカウント採水。
- ②Twin NORPAC ネット、及び Closing NORPAC ネットを用いて、動物プランクトン採集。
- ③80cm リングネットを用いて、飼育実験用の動物プランク

トン採集を行い、船上で生鮮個体を用いた飼育実験（摂餌実験）。

- ④マルチプルコアラーを用いて、堆積物より珪藻類の休眠期細胞を採取。
- 4) 北極海の基礎生産を支える微量金属・化学成分の挙動とその起源（課題6：担当－北海道大学）

- ①クリーンニスキン採水器を用いて、鉄、微量金属、CDOM 測定用の海水サンプルを採水。
- ②ニスキン採水器を用いて、ハロカーボン測定用の海水サンプルを採水。
- ③研究用海水から約3時間毎にハロカーボン濃度を測定。
- ④約6時間毎に大気サンプリング（キャニスター及び冷却トラップ）を行い、船上及び陸上実験室でハロカーボン濃度を測定。

5) 海鳥・クジラ類目視調査（課題6：担当－北海道大学）

- ①北極海の調査海域、および日本から調査海域までの行き帰りにおいて、航行中、双眼鏡で、日の出1時間後から日没1時間前まで、ブリッジから海鳥・クジラ類目視調査を実施。

6) 北極海における微生物群集と有機物の空間分布と動態およびその支配要因に関する研究

(課題6：担当－東京大学大気海洋研究所)

- ①粒子測定装置 LISST-100X を用いて、0-300m までの懸濁粒子のサイズスペクトルの測定。
- ②ニスキン採水器を用いて、原核生物数、ピコ植物プランクトン数、ウイルス数、ロイシン取り込み速度、ウイルス生産速度、及び細菌呼吸速度の測定用の海水サンプルを採取する。また、コールターカウンターによる粒子計測用の試料を採取し、船上分析。
- ③3H-ロイシンおよび 3H-チミジンの取り込み測定のために RI コンテナ（アイソバン）を利用。
- ④ニスキン採水器を用いた大量採水により、微生物群集構造の解析用試料、及び懸濁態炭素・窒素の濃度と安定同位体比の測定用の海水サンプルを採取。また、サンプル水約2リットルをポリカーボネート容器に入れ、異なる温度と有機物添加条件下で培養し、微生物群集の生物量、群集組成、活性の応答を調査。培養は暗条件で実施。

7) チャクチ海における炭酸系・窒素循環の研究

(課題6：担当－東京海洋大学)

- ①ニスキン採水器を用いて海水を採取し、全炭酸、アルカリ度濃度を測定。また、富山大メンバーと連携して酸素同位体比測定試料を採取。

- ②チャクチ海大陸棚および斜面にて、マルチプルコアラーを用いた採泥。観測点6点で5.5本のコア採取。3本で脱窒・アナモックス速度測定用の培養実験、2本で直上水へのフラックスを見積もる培養実験、0.5本（富山大と分割して使用）で間隙水中の栄養塩測定。
- 8) 複合型化学指標による北極海淡水寄与の解析および陸起源物質輸送の実態解明（課題6：担当－富山大学）
- ①ニスキン採水器を用いて、希土類元素、ネオジウム同位体比、ストロンチウム及び酸素同位体比測定用の試料採取。
- ②マルチプルコアラーを用いて、計8点で堆積物試料の採取を希望。採取した堆積物から間隙水を絞り、希土類元素、及び栄養塩濃度の分析。
- 9) 北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明（課題5：担当－東北大学、気象研究所）
- ①大気中 CO₂、CH₄、CO 濃度の連続観測を行う。測定にはキャビティリングダウン分光分析計（CRDS）を用い、CRDS と大気吸引用のポンプユニット、除湿ユニット、標準ガス導入ユニットからなる連続観測システムを「みらい」の汎用観測室に設置し、右舷船首側の操舵室上に設置されたインレットより大気試料を引き込むことで連続観測を実施。航海海域全域。
- ②汎用観測室に大気採取装置を設置して50本の大気採取容器に大気の採取を航海海域の全緯度帯で実施。
- ③八戸出港から帰港までの全航程で、表層海水分析室において、大気・海洋表層のCO₂分圧、全炭酸濃度、溶存酸素濃度、クロロフィル蛍光、水温、塩分の航走観測を実施。
- 10) 船舶型スカイラジオメーター観測から得られる北極海のエアロゾルの光学的特性（課題3：担当－富山大学）
- ※非乗船
- ①スカイラジオメーターを用いてエアロゾルの光学特性の連続測定を行った。



セジメントトラップの引き揚げ。（写真：菊地隆）

(5) 成果

2012年度は北極海の海氷面積が観測史上最少記録を更新した年であった。本航海において海水を見ることもホッキョクグマを見ることもなかったが、海氷がなくなったあとの北極海における様々な観測データが取得

できた。またいくつかの観測点では、活発な生物活動とそれに関連した特徴的な物理・化学環境の様子が観測されており、これらの観測データから、海水減少が物理・化学環境の変化を通して生物活動に至るまでの包括的な解釈が進められ、過去の北海道大学「おしよる丸」や「みらい」の観測結果などと比較することで、進捗しつつある北極海の経年環境変化が明らかになってきた。

本航海で設置した本事業研究基盤の係留系4系、これら係留系による観測データから、2012–2013年の冬季を含む通年でのチャクチ海のホットスポットでの水温・塩分・溶存酸素・クロロフィル・プランクトン動態及び海生哺乳類の活動などに関する時系列データを取得し、これまでは知ることができなかった海水の消長に伴う環境要素の変動に関する知見を得ることができた。

(6) みらい航海本事業関係記録

本事業では研究基盤以外に研究課題単位で海洋研究開発機構実施の「みらい」航海へ公募で乗船した。事業期間中の乗船に係する全航海については次の通りである。

MR12-E03 GRENE 北極航海

2012年9月4日–2012年10月17日

チャクチ海、ベーリング海、北太平洋

MR12-02 航海 2012年6月3日–2012年7月12日

北太平洋

MR13-06 北極航海 2013年8月28日–2013年10月21日

太平洋側北極海、ベーリング海、北太平洋みらい

MR13-04 航海 2013年7月10日–2012年7月29日

北太平洋

MR14-05 北極航海 2014年8月27日–2014年10月10日

太平洋側北極海、ベーリング海、北太平洋

MR15-03 北極航海 2015年8月24日–2015年10月22日

太平洋側北極海、ベーリング海、北太平洋



2012年9月10日、低気圧とそこからのうねりに遭遇 MR12-E03 GRENE 北極航海（写真：菊地隆）

3. 外国砕氷船・係留系

基盤整備機関：国立極地研究所
執筆：事務局



2014年 LSSL号乗船 (写真：田中康弘・星野聖太)

(1) 目的

北極海航路の利用可能性を評価するうえで、海水分布の動態を把握することが欠かせない。また、海洋生態系の変化を知るためには海氷下及び海氷の消長に伴う海洋物理・化学環境や生態系の動態などの通年変化を明らかにする必要がある。

このような北極海域の調査のためには、観測のプラットフォームとして海氷域に入っていける砕氷船が必要であり、海氷減少が激しい海の中でどのような変化が起きているのかを知るためには、係留系を使った通年データの取得が必須である。このような背景から外国砕氷船の庸船と係留系による通年観測が行える体制を整備した。

(2) 実施体制

外国砕氷船

- ・整備機関：国立極地研究所
- ・契約：カナダ海洋漁業省 (Department of Fisheries and Oceans Canada : DFO)
2011年、DFOと2012年の庸船に関するMOU締結の準備を開始以後、毎年契約を更新。
- ・庸船：カナダ沿岸警備隊
(Canadian Coast Guard : CCG) 所属
「ルイ・サン＝ローラン号」
(Louis S. St-Laurent : LSSL号)
「ローリエ号」
(Sir Wilfrid Laurier : S.W.L号)

・庸船区間と航海日数

カナダ海盆 (LSSL号) とチャクチ海 (S.W.L号)

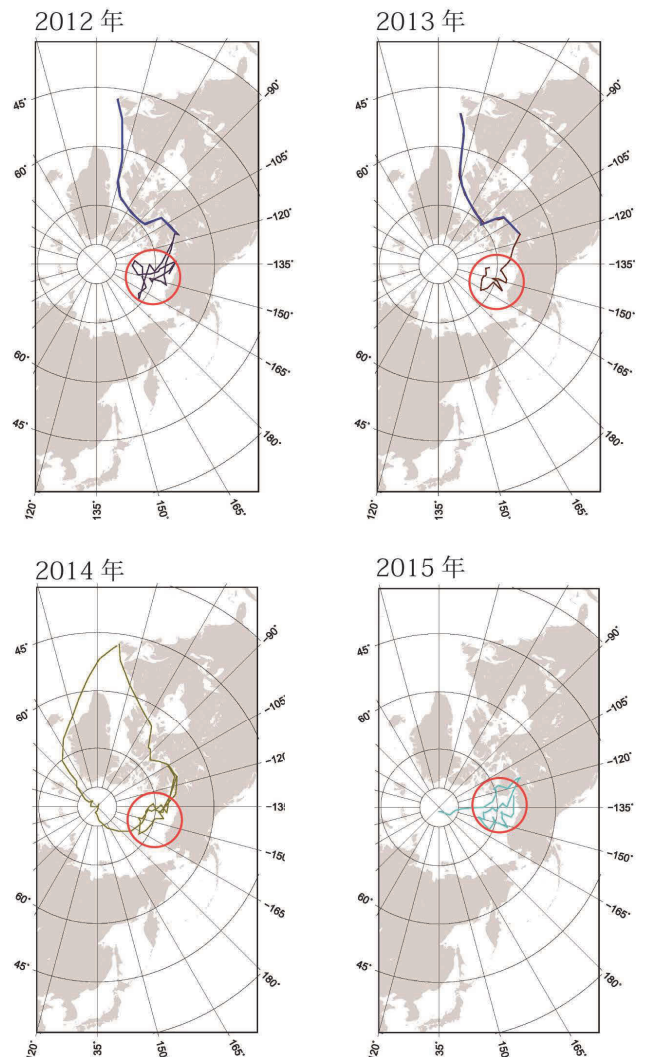
2012年 LSSL号：3日 S.W.L号：0.5日

2013年 LSSL号：4日 S.W.L号：1日

2014年 LSSL号：4日 S.W.L号：1日

2015年 LSSL号：2日

※北西航路部分についても課題乗船枠確保を基盤契約とともに進めた。



図：2012年から2015年のLSSL号の航跡図
2012年航海は紫線。2013年航海は赤線。2014年航海は黄緑線。2015年航海は水色線。本事業では、各年度の赤丸海域内で一部庸船経費を負担、係留系設置・回収作業を実施。また、課題7-1は課題経費で青線の北西航路部分に乗船。

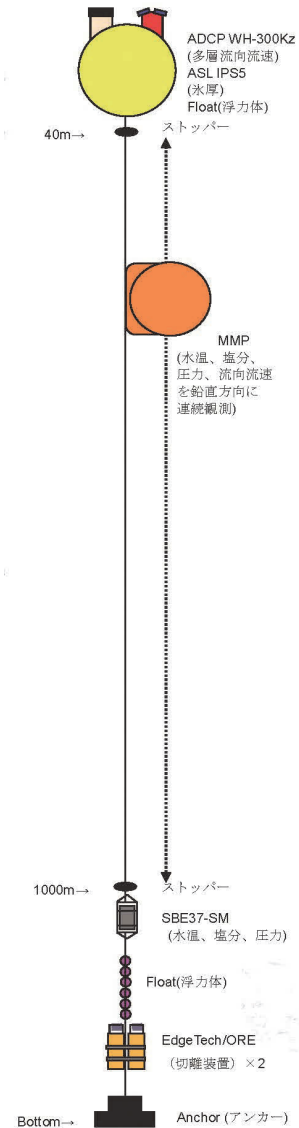
- ・利用課題：課題6、課題7

係留系

海氷下のデータ取得のため、3種類の係留系を整備し、関係課題での利用に提供した。

1)カナダ海盆横断観測用係留系 (LSSL 号用)

- ・整備機関：国立極地研究所
 ウッズホール海洋研究所 (Woods Hole
 Oceanographic Institution : WHOI)
- ・製作内容：鉛直連続観測係留系 2 系 (右図)
 (自動昇降式水温円分流速計を搭載)
- ・実施状況：
 2012 年度に WHOI と製作、設置回収作業に関する MOU
 を締結し、利用開始。以後、毎年航海時の作業について契
 約更新。2013 年度～2015 年度は 4) 係留系実施一覧参照。
- ・利用課題：課題 7
- ・観測項目
 ①水温・塩分の鉛直プロファイルの時系列データ
 ②海氷漂流速度、海氷厚の時系列データ
 (ADCP、IPS計測)
 ③上層流速の時系列データ (ADCP計測)
- ・設置場所：カナダ海盆西部からノースウィンド深海平原
 2012年設置 (LSSL:2013年回収)
 GAM-1 75°59.9965'N, 160°10.0083'W
 GAM-2 77° 0.0166'N, 170°0.0132'W
 2014年設置 (LSSL:2015年に回収)
 GAM-1 76°00.145'N, 160°08.749'W
 GAM-2 77°00.031'N, 170°03.051'W

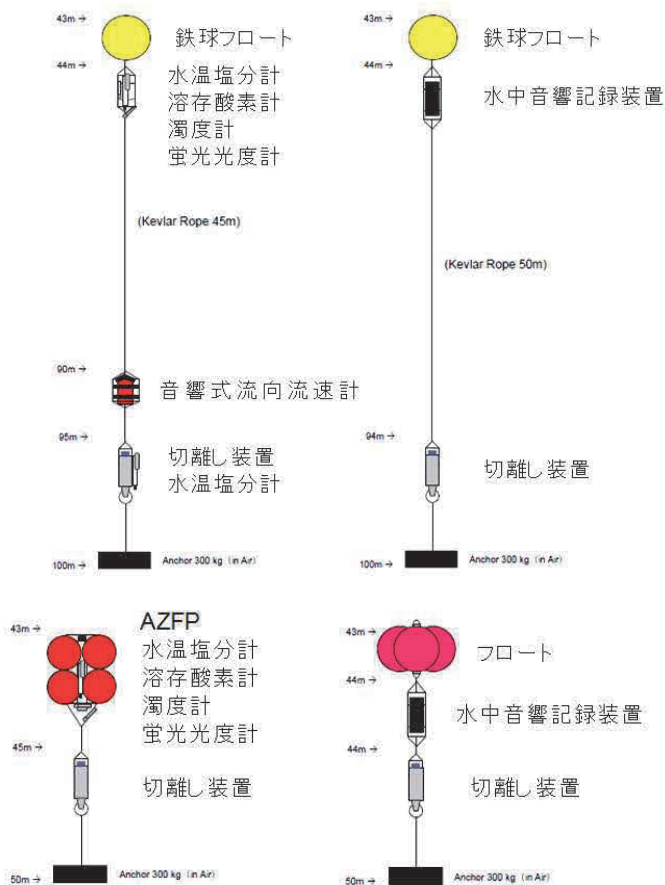


WHOI 型係留系構成図

2) 「みらい」搭載型係留系

- ・整備機関：国立極地研究所
- ・実施体制：海洋研究開発機構所属
 海洋地球研究船「みらい」とカナダ
 沿岸警備隊所属砕氷船 S.W.L.号で
 設置、回収を実施。
- ・製作内容：次頁構成図を参照。





「みらい」搭載型係留系構成図

上左) BCH-12-2 上右) BCH-12w-2
 下左) SCH-12-2 下右) SCH-12w-2

・実施状況：

2011年度：観測機器の購入及び整備
 2012年度～2015年 設置、回収。(詳細は4)を参照)

・利用課題：課題6

・観測項目

- ① 水温・塩分・溶存酸素時系列データ
(係留式水温塩分計・溶存酸素計)
- ② 流向流速時系列データ
(音響式流向流速計)
- ③ プランクトンの鉛直分布時系列データ
(多周波数音響式プロファイラー)
- ④ クロロフィルa及び濁度時系列データ
(蛍光光度計・濁度計)
- ⑤ 魚類から海獣(鰭脚類・鯨類)に至る海中生物の動態観

測(水中音響モニタリング装置)

- ・設置場所：チャクチ海ホープ岬沖(SCH)、
 パロー海底谷(BCH)

2012年：SCH-12	67° 42.35' N, 168°49.52' W
SCH-12W	67° 43.09' N, 168°50.01' W
BCH-12	71° 19.64' N, 157°39.69' W
BCH-12W	71° 20.46' N, 157°36.45' W
SCH-12-2	68° 02.00' N, 168°50.03' W
SCH-12W-2	68° 03.01' N, 168°50.00' W
BCH-12-2	71° 19.63' N, 157°39.67' W
BCH-12W-2	71° 20.49' N, 157°36.36' W

2013年：SCH-13	68° 02.00' N, 168°50.03' W
SCH-13W	68° 03.01' N, 168°50.00' W
BCH-13	71° 18.92' N, 157°08.80' W

2014年：SCH-14	68° 02.00' N, 168°50.04' W
SCH-14W	68° 02.98' N, 168°50.01' W
BCH-14	71° 19.76' N, 157°36.01' W

3) 共通基盤係留系

- ・整備機関：国立極地研究所
- ・実施状況：課題間で共通して利用することを目的に整備
 2011年度：観測機器の購入及び整備
 2012年度～2015年 設置、回収。(詳細は4)を参照)

・利用課題：課題6、7

・観測項目

- ①水温、塩分データ(課題6、7)
- ②流向流速データ(課題6、7)
- ③溶存酸素量(課題6)
- ④クロロフィル濃度、濁度(課題6)
- ⑤AZFPによるプランクトン動態(課題6)
- ⑥海棲哺乳類(クジラ等)の音響モニタリング(課題6)

- ・設置場所：カナダ海盆西部からマカロフ海盆(課題7)

韓国砕氷船アラオン号(課題負担)を利用して2012年設置、2013年回収。

74°59.534'N, 175°51.659'E

チャクチ海ホープ岬沖、パロー海底谷(課題6)

2014年、「みらい」搭載型に統合して設置

4) 係留系実施一覧

WHOI 型

2011年 購入・整備

2012年 設置 (LSSL号) : GAM1、2

2013年 回収 (LSSL号) : WHOI で整備

2014年 再設置 (LSSL号) : GAM1、2

2015年 回収 (1系 Araon 号、1系 LSSL 号秋季航海で
WHOI が回収)

共通基盤

2011年 購入・整備

2012年 課題7 設置 (アラオン号)

2013年 課題7 回収 (アラオン号)

2014年 課題6 設置・回収 (みらい)

「みらい」搭載型係留系

2011年 購入・整備

2012年 設置 (S.W.L号)・回収 (みらい) : SCH-12、
12w/BCH-12、12w

再設置 : (みらい) : SCH-12-2、12-2w/BCH-12-2、
12-2w

2013年 回収 (S.W.L号) : SCH-12-2、12-2w

再設置 (S.W.L号) : BCH-13 (13w を結合)

回収 (みらい) : BCH-12-2、12-2w

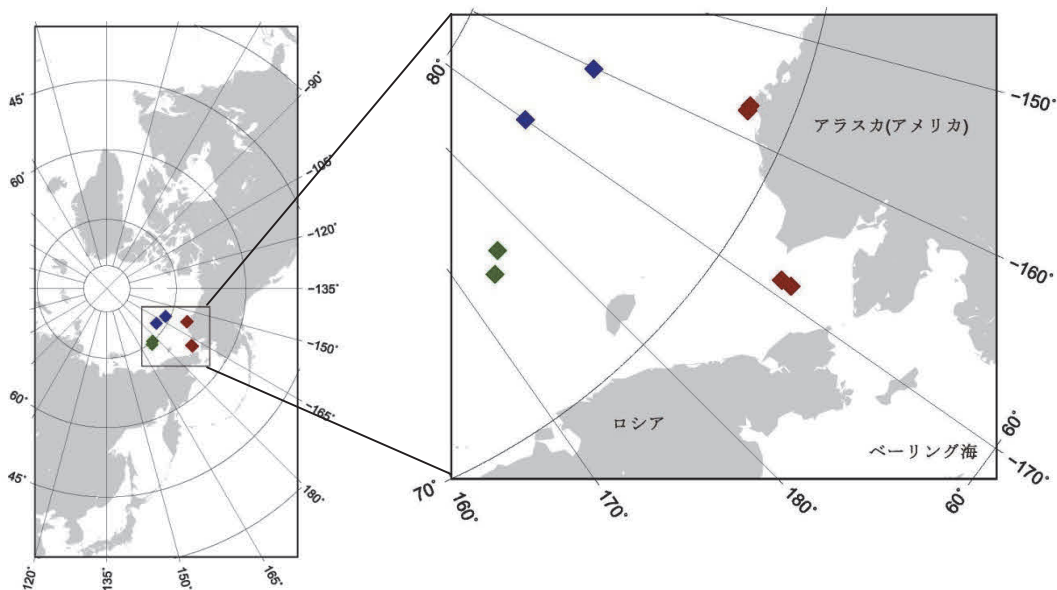
2014年 回収 (S.W.L号) : SCH-13、13w/BCH-13
(13w 統合)

再設置 (S.W.L号) : SCH-14、14w/BCH-14、14w

2015年 回収 (みらい) : SCH14(亡失)、14w/BCH-14、14w

図：係留系設置場所

- WHOI 型
- みらい搭載型
- 共通基盤 (アラオン号)



(3) 利用課題と研究内容

1) 研究課題 6: 北極海環境変動研究: 海氷減少と海洋生態系の変化

S.W.L 号利用

ダッチハーバー (乗船) ~ ベーリング海峡 ~ チャクチ海南部ホープ岬沖 ~ バロー沖 ~ バロー (下船)

2012年7月、2013年7月、2014年7月

LSSL 号利用

2015年9月~10月: カナダ海盆

(実施項目)

- ①チャクチ海ホープ岬沖「みらい」搭載型係留系設置・回収
物理係留系1系、音響モニタリング係留系1系、
- ②バロー海底谷「みらい」搭載型係留系設置・回収
物理係留系1系、音響モニタリング係留系1系
- ③チャクチ海共通基盤係留系設置・回収

2) 研究サブ課題 7-1: 北極航路利用のための海氷予測および航行支援システムの構築

LSSL 号利用

- 2012年7月~8月: 北西航路区間海氷観測
(セントジョンズ~クグルクツク)
8月~9月: カナダ海盆、(課題 7-3 参照)
- 2013年7月~8月: 北西航路区間海氷観測
(セントジョンズ~クグルクツク)
8月~9月: カナダ海盆、(課題 7-3 参照)
- 2014年9月~10月: カナダ海盆 (課題 7-3 参照)

(実施項目)

- ①目視、電磁誘導式氷厚計及びマイクロ放射計の氷厚観測
- ②加速度センサーによる船体挙動観測
- ③SPC、超音波風向風速計による着氷観測
- ④氷況観測: 目視観測、前方カメラ、EM 氷厚観測、マイクロ波放射計観測
- ⑤気象・海象観測: 船上気象計

(主な観測項目)

航走観測

- ・電磁誘導式氷厚計 (EM-31/ICE) + レーザー距離計を左舷に設置し、10Hz の頻度で氷厚を測定。
- ・可搬型マイクロ波放射計 (三台: 6GHz、18GHz、36GHz) を左舷に設置し、放射輝度温度を測定して氷厚を推定。
- ・艦橋上に飛沫計 (SPC) と超音波風向風速計を設置し、海水飛沫と船体着氷量を測定。

- ・3軸加速度計+GPS+カメラ (マリンステーション) を3箇所に設置し、船体の動揺を測定。
- ・艦橋にて目視による氷況観測と航行記録を実施。

3) 研究サブ課題 7-3: 北極海における海洋変動と急激な海氷減少メカニズムの解明

LSSL 号利用

- 2012年7月~9月: カナダ海盆
- 2013年8月~9月: カナダ海盆
- 2014年9月~10月: カナダ海盆
- 2015年8月~10月: カナダ海盆

(実施項目)

- ①カナダ海盆横断観測用基盤係留系 2 系設置・回収
- ②太平洋側北極海カナダ海盆における海洋観測
・CTD、CTD による海洋観測
・メルトポンドのサイズや深さとアルベド・マイクロ波放射特性、熱収支の関係を見る

(主な観測項目)

氷上からの連続海洋観測

- ・ADCP、メモリー式 CTD、水温ロガー、UCTD を用いた氷上からの連続海洋観測
- ・Work Horse ADCP (600kHz)、Sea Bird SBE19 CTD、Sea Bird SBE56 水温ロガー
- ・UCTD を用いた連続海洋観測

航走観測

- ・電磁誘導式氷厚計 (EM-31/ICE) + レーザー距離計を左舷に設置し、10Hz の頻度で氷厚を測定。
- ・可搬型マイクロ波放射計 (三台: 6GHz、19GHz、36GHz) を左舷に設置し、放射輝度温度を測定して氷厚を推定。
- ・短波・長波放射収支計を船首に設置し、開放水面・海水のアルベドを測定。
- ・艦橋上にインターバルカメラ (KADEC-EYEII) を設置し、前方の海氷被覆率を 10 分間隔で撮影。

氷上観測

- ・携行型電磁誘導式氷厚計 (EM31-SH) を用いて、氷上観測点上の測線に沿って氷厚を測定。
- ・携行型分光放射計 (FieldSpec3) を用いて、氷上観測点上の測線に沿って海氷、再凍結メルトポンドのアルベドを測定。海氷コアサンプリングやメルトポンドのサイズや深さとアルベド・マイクロ波放射特性、熱収支の関係に焦点を当て、データを総合的に解析し、衛星観測のメルトポンド推定アルゴリズムの開発・改良、予測モデル検証を進め

た。

韓国砕氷船アラオン号利用による共通基盤係留系設置・回収

2012年～2013年：カナダ海盆、マカロフ海盆観測

(実施項目)

海洋ボーフォート循環流量をモニタし、海盆スケールの海運動変動と海洋循環変動の関連を理解する。

(主な観測項目)

ADCP、係留式CTD・CT、水温ロガー

(4) 成果

海氷面積最小の記録を更新した2012年のデータや前後過去6年間で最も厚い氷況を捉えることができるなど、衛星観測ではわからない海氷自体の物理・化学的解析を進めることができた。ボーフォート海洋循環と貯熱量の変動を捉えるCTD観測網および係留系配置が実現し、太平洋側北極海の変動を調べる国際的基盤データになった。基盤としての目的である、「海洋循環の変動」、「海洋貯熱量変動(=海洋熱の開放)」、「貯淡水量分布の変動」を直接観測で捉えることができ、海氷面積最小となった2012年の海氷減少の解明に資するデータを得たことは大きな成果である。

また、日本で初めて北西航路区間におけるEM観測等を行い、航路上の氷厚分布、船体の挙動、海水飛沫等のデータを取得できた。

一方、海洋生態系研究に関する部分(研究課題6)では、チャクチ海南部ホープ沖の生物学的ホットスポットでの係留系観測から、海氷融解期の春季に加えて秋季にもブルームが起きていることが明らかになった(Nishino et al., 2016)。また音響記録装置によるナガスクジラの鳴音観測データを各種データと比較した結果から、ナガスクジラの回遊と海氷の融解・結氷やその他の条件(水温・塩分・動物プランクトン量の変化)との関係を調べた(Tsujii et al., 2016)。またバロー沖の係留観測データからも、海氷の消長に伴う物理・化学・生物に関する変化が見られることが分かった。研究成果の詳細については、第3章・研究課題6の項に記載する。

我が国の研究活動においては、自国の砕氷船が無いため、北極海での観測や調査にもどかしい思いが募ったことは拭えないが、北極海太平洋側一帯で総合的な観測・調査が行えた経験とデータ取得は大変意義のあるものであり、航行予測や海洋生態系の解明にとって大きな成果をもたらしたと言える。

(5) その他

外国砕氷船を基盤として提供するにあたり、順風満帆に進んだわけではない。外国砕氷船への相乗りとなるため不自由さがあった。なかでも大きな課題となったのがシップタイムの交渉だった。船側からは余裕を持った航海を要求されたが、1日違うだけでも燃料負担額が膨らむ。為替相場の変動の影響を受けて契約時と精算時での為替差損が大きくなり、結果として、予備費から差損分の補填を強いられた。また、船員の体調不良や機器トラブル(本基盤係留機器に関するトラブルではない)が発生し、航海変更の煽りをうけてシップタイムが失われ、観測規模の縮小を強いられたことがあった。

北西航路部分に関しても乗船枠を基盤の契約の中で確保し、課題での利用に使われた。2012年に日本初となる観測も行ったが、年によってはカナダ当局の都合により航路が変わる、外国人の乗船が制限されるなど、乗船ぎりぎりまで見通しが立たなかったりした。



2012年8月LSSL号でのWHOI型係留系設置作業(写真: 館山一孝)



2012年8月カナダ海盆での氷上観測作業(写真: 小野純)

4. 雲レーダー

基盤整備機関：千葉大学・国立極地研究所
執筆者：鷹野敏明

(1) 目的

気候に大きな影響を与える雲の役割を正確に把握するため、雲物理量の3次元内部構造（雲粒の大きさ、密度、水と氷の割合など）や雲中の鉛直運動構造（雲内の風の流れ・雲粒の動き）を明らかにできる「95 GHz ミリ波雲観測用ドップラレーダー」を開発して、ニーオルスンに設置し定常観測を実施した（図4.4.1）。



図4.4.1 ノルウェー ス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。

(2) 実施体制

本事業の基盤整備・雲レーダーFALCON-A の開発・運用は、千葉大学と国立極地研究所との間で共同研究に係る協定書を締結し、千葉大学・鷹野敏明と国立極地研究所・塩原匡貴が担当した。雲レーダーの設計・製作および運用は千葉大学が担当し、必要に応じてユーザーである他の研究課題の関係者等とも打合せを持ちつつ、試験観測や解析、校正・評価作業を進めた。

(3) 実施状況（スペック含む）

本事業の雲レーダー（通称：FALCON-A：FM-CW（Frequency Modulated Continuous Wave） Radar for Cloud Observations - Arctic）は、千葉大学で設計開発され運用されている雲レーダーFALCON-Iを改良発展させた装置で、高い感度と空間分解能を備えているのが特徴である。FALCON-A は直径1mのパラボラアンテナ2台で構成され、一方から95GHzの電波を放射し、雲で反射した電波をもう一方のアンテナで受信する。このFALCON-Aは、十数か国が基地を置くニーオルスンにおいて唯一のWバンド（95GHz帯）雲レーダーであり、最も高い周波数の気象レーダーであることから、他のレーダーでは捉えることができない高い高

層の雲を観測することが可能である。

本基盤整備の期間中の実施概要は、以下であった。

- 2011年度：仕様検討と確定・設計および物品等調達
- 2012年度：製作・開発、FALCON-Aの完成、テスト観測
- 2013年度：テスト観測・校正、梱包、現地への運搬・設置、テスト観測・校正、定常観測開始、調整、データ解析
- 2014年度：定常観測、機器調整、データ解析、集中観測
- 2015年度：集中観測、定常観測、データ解析

FALCON-Aの諸元を図4.4.2にまとめた。FM-CW型のレーダーであるため、通常のパルス型レーダーに較べて3桁程度低い送信出力にもかかわらず高い感度をしめしていること、高度分解能など空間分解能が極めて高いこと、などが特長である。

レーダー諸元	
中心周波数	94.84GHz
送信出力	約1W
観測高度	15km（通常時）
高度分解能	48m（最小9m）
ビーム幅	0.2度（15m at 5km）
ドップラ速度幅	±3.16m/s（通常時）
時間間隔	10秒毎に1データ（最小1秒）

図4.4.2 FALCON-Aの装置諸元。FM-CW型のレーダーであるため、通常のパルス型レーダーに較べて3桁程度低い送信出力にもかかわらず高い感度をしめしていること、高度分解能など空間分解能が極めて高いこと、などが特長である。

(4) 利用課題と研究内容

本基盤整備 雲レーダー FALCON-A を用いた研究として、以下を行ってきた。

課題3：北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響：大気プロセスの包括的研究

- ① FALCON-Aの高空間分解能強度およびドップラ計測による北極雲の詳細観測
- ② Fog Monitor（FM120；東大・小池）、Meteorological Particle Spectrometer（MPS；東大・小池）、Cloud Particle Microscope（CPM；山梨大・小林）などのin situ観測による雲粒子データとFALCON-Aデータの比較研究による雲微物理解析
- ③ CloudSAT/CPRによる衛星観測データとFALCON-Aデータの比較解析による北極雲の内部構造解析と広域観測解析

④ Micro Pulse Lidar (MPL)、Polarization MPL (PMPL) (極地研・塩原) と FALCON-A のデータ比較による雲微物理解析

(5) 成果

1) 北極雲の詳細観測

FALCON-A によって 2013年9月16日に観測されたうろこ雲の様子を 図 4.4.3 に示す。FALCON-A のデータを見ると、高度 4-6 km にある雲は、4-5 km の下層と 5-6 km の上層の雲が異なった構造を示していることがわかる。上層の雲は、厚さ 1 km 程度で、時間軸で数分の持続時間で見え、雲の水平速度を 数 m/s 程度と仮定すると水平方向

のサイズが約 1 km となり、図の右上に掲げたカメラ画像で見えるうろこを見ていることがわかる。このうろこは、上下方向の動きはほとんどなく、安定した塊で存在していることが FALCON-A の画像でわかる。一方、下層の雲は、拡散した構造をしており、下方に落ちてきていることが FALCON-A の画像でわかる。この下層の雲は、上層のうろこ雲の中で粒径が大きく成長した粒子が降ってきている様子をしめしていると考えられる。また、これらの層はいずれも MPL でよく見えており、薄い雲であることから、FALCON-A の高感度性能が十分に発揮されているとってよい。

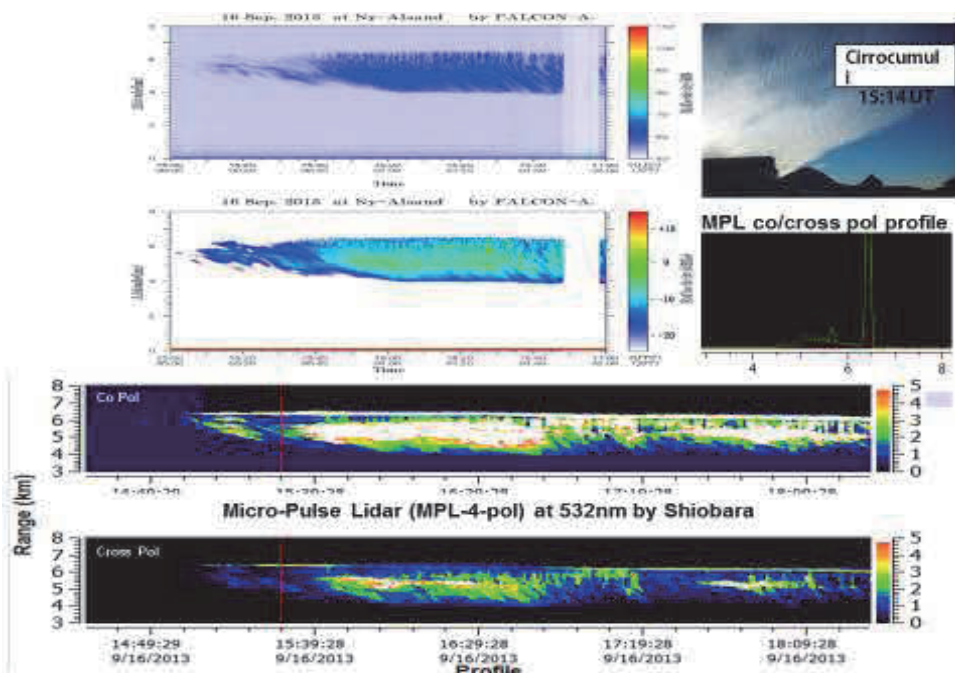


図 4.4.3 2013年9月16日に ニーオルスンで観測されたうろこ雲の FALCON-A による強度の高度-時間図 (左最上。その下は dBZ スケールの強度図)。下の2段は、Micro-Pulse Lidar の観測結果。薄い雲の詳細が一致しているが、両者の見え方が異なる部分もある。

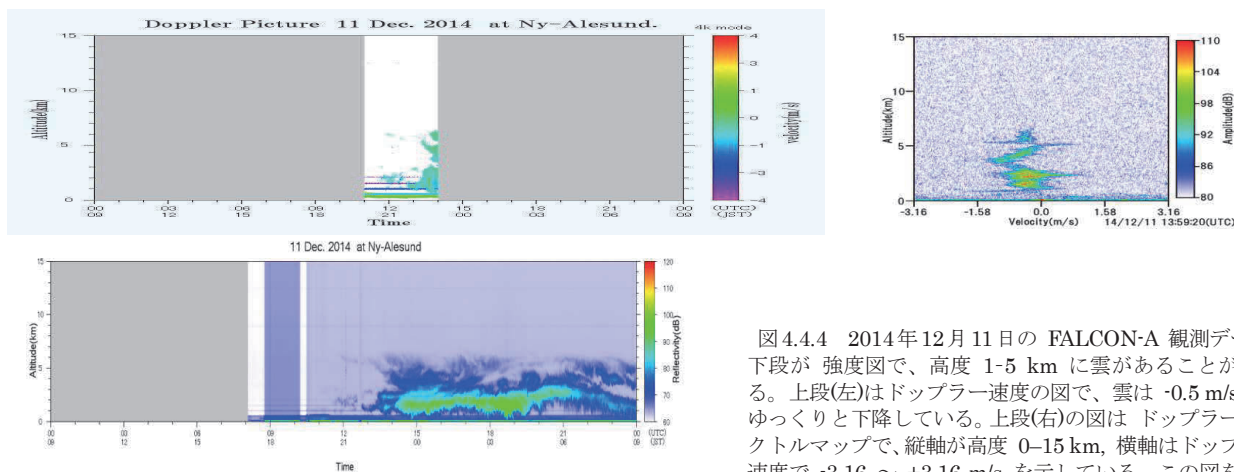


図 4.4.4 2014年12月11日の FALCON-A 観測データ。下段が 強度図で、高度 1-5 km に雲があることがわかる。上段(左)はドップラー速度の図で、雲は -0.5 m/s で、ゆっくりと下降している。上段(右)の図は ドップラースペクトルマップで、縦軸が高度 0-15 km、横軸はドップラー速度で -3.16 ~ +3.16 m/s を示している。この図を見ると、雲内部の 100m 程度の薄い層で、上昇・下降の運動を示す場所が存在することがよくわかる。

図 4.4.4 は、FALCON-A での雲のドップラー観測の例である。下段が強度図で、高度 1–5 km に雲があることがわかる。上段(左)の図はドップラー速度の図で、雲は -0.5 m/s で、ゆっくりと下降している。上段(右)の図はドップラースペクトルマップで、縦軸が高度 0–15 km、横軸はドップラー速度で -3.16 m/s – $+3.16 \text{ m/s}$ を示している。この図を見ると、雲内部の 100m 程度の薄い層で、上昇・下降の運動を示す局所的場所が存在することがよくわかる。これらの結果は、北極雲の内部構造を解明するために役立つ。

2) FM120, MPS と FALCON-A の比較観測結果

大気課題グループ(研究課題3)の小池真(東大)らが設置した、粒径カウンター FM120 とのデータ比較を行った。FM120 は雲粒子直径 2–50 μm の粒径分布を測定できる装置で、FALCON-A が設置されているニーオルスンの日本基地から 2.5 km 離れた、ツェッペリン山の頂上に設置され、2013 年 11 月より定常観測を行っている(図 4.4.5)。2014 年 6 月の雲内温度が 0°C を超えていて、降雨(降雪)のない日時のデータについて、FM120 で得られた雲粒子の粒径分布を用いて、レーダー反射因子 dBZ を算出し、これを FALCON-A の観測データと比較した(図 4.4.6)。この図を見ると、FM120 で得られている粒径分布の有効粒子半径が安定して 10 μm 程度以下である水雲の場合(図で黒枠で囲った部分)には、両者は 0–5 dB 程度以内で一致していることがわかる。これより大きい雲粒子を含む雲などの場合は、FALCON-A で観測された dBZ は、FM120 のデータから算出した dBZ より 10–20 dB も大きくなる。このことは、FM120 が直径 50 μm までの雲粒しか測定できないが、それを超える雲粒子が存在していることを示唆していると解釈できる。

レーダー反射因子 dBZ は粒径の 6 乗の積算であり、大きい雲粒子の寄与が大きい。従って 50 μm 以上の粒径の測定が不可欠である。小池らは、2014 年 10 月より粒子直径 25–1500 μm



図 4.4.5 粒径カウンター FM120 は、FALCON-A から 2.5km 離れたツェッペリン山頂(高度約 450m)に設置された。

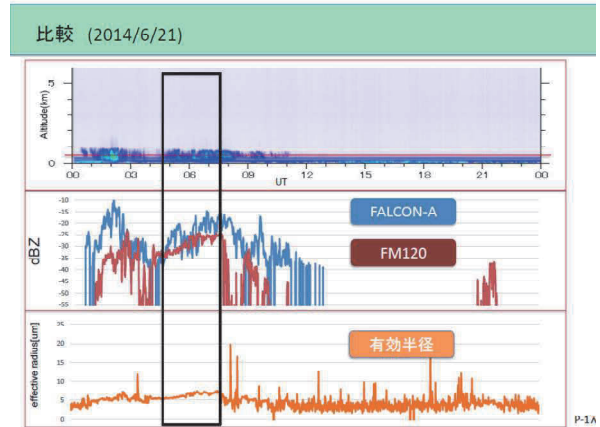


図 4.4.6 2014 年 6 月 21 日の FALCON-A で得られたレーダー反射強度図(上段)と、FM120 で得られた雲粒子の有効粒径半径(下段)。中段は、FALCON-A で得た高度 450m でのレーダー反射因子 dBZ と、FM120 で得た粒径分布から算出した dBZ の比較。有効半径が 10 μm 程度以下で穏やかな水雲の場合(図中の黒枠)には、両者は 0–5 dB 程度で一致しているが、それ以外では FALCON-A の dBZ が 10 dB 以上大きくなる場合が多い。

の測定が行える装置(MPS)をツェッペリン山に設置し観測を開始した。このデータを用いて dBZ を算出したところ、粒径 300 μm 程度までの雲粒子を考慮して算出した dBZ は FALCON-A の観測データに近づく結果となった。

3) FALCON-A と CloudSAT の同時観測データ比較

W バンド 94 GHz 雲レーダーを搭載している観測衛星 CloudSAT は、ニーオルスンから数 km 以内を 16 日に一度、北行および南行の軌道で通過する。図 4.4.7 は 2013 年 9 月の FALCON-A の定常観測以降で、CloudSAT が FALCON-A から 2 km 程度以内を通過した際の CloudSAT のデータポイント中心を示している。CloudSAT のフットプリントは 1.3

FALCON-A 周辺の CloudSat 観測点

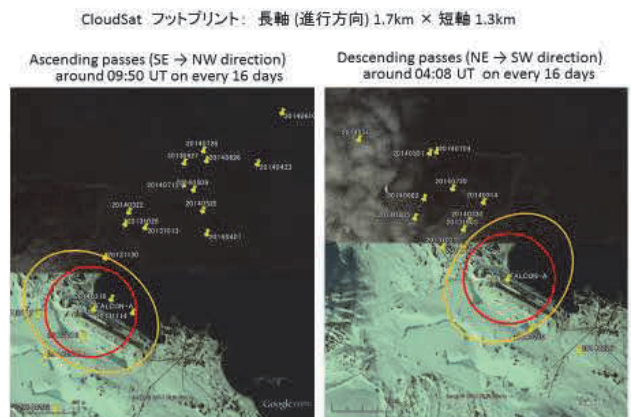


図 4.4.7 2013 年 9 月の FALCON-A 定常観測開始以降で、地球観測衛星 CloudSAT が FALCON-A から 2km 程度以内を通過した際の、フットプリント中央の点を黄色いピンで示してある。左図は北行(Ascending passes)、右図は南行(Descending passes)である。赤丸の中心に FALCON-A が位置していて、赤丸の半径は 500 m である。また、オレンジの楕円は、CloudSAT フットプリントの大きさである 1.3 km x 1.7 km の楕円を FALCON-A を中心として描いたものである。

× 1.7 km であり広い範囲の雲を観測するのに対して、FALCON-A の観測ビームは 0.18°であり高度 5 km では 15 m と極めて細いビームであり、平面域で 1 万分の 1 の高分解能であることになる。

図 4.4.8 は CloudSAT のデータ中心が FALCON-A から 544 m であった 2013 年 11 月 14 日の両者のデータを比較したものである。dBZ のプロファイル比較を見ると、CloudSAT では高度 1-2 km に一層で見えている雲が、FALCON-A では内部構造が分解されて 3 層に見えている。また CloudSAT では空間分解能が低いので周囲の雲も含めた広い範囲を観測しており、これが FALCON-A の強度との違いの原因と推測できる。

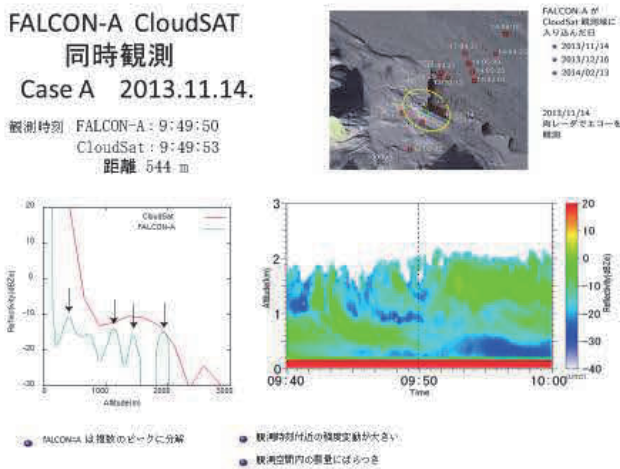


図 4.4.8 2013 年 11 月 14 日の CloudSAT 通過時の FALCON-A とのデータ比較。この時のデータ点間の距離は 544m であり、CloudSAT のフットプリントに FALCON-A が入っている。左下図の強度の高度プロファイルを見ると、CloudSAT で見える高度 1-2 km の 1 層の雲は、FALCON-A では 200m 程度の厚さの 3 層の雲に分解されて見えていて、雲の内部構造詳細が観測できていることがわかる。また、右下図の FALCON-I の強度の高度-時間図を見ると、雲の構造が時間的あるいは空間的に激しく変化していることがわかる。

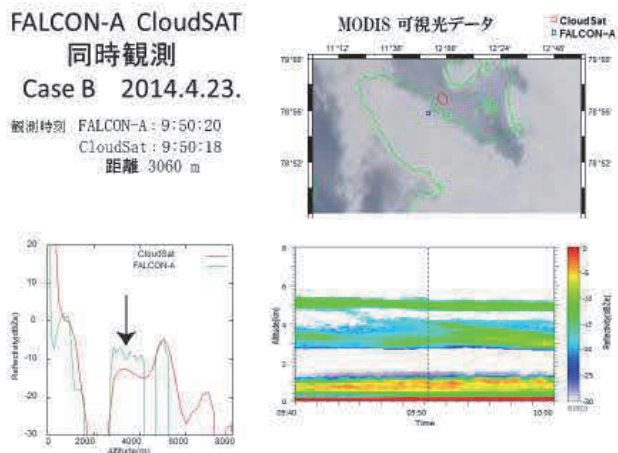


図 4.4.9 2014 年 4 月 23 日の CloudSAT 通過時の FALCON-A とのデータ比較。この時のデータ点間の距離は 約 3 km であり、CloudSAT のフットプリントは FALCON-A から大きく離れている。FALCON-A のレーダー反射因子強度 dBZ の高度-時間図 (右下図) を見ると、3 層の雲があることがわかる。

図 4.4.9 は 2014 年 4 月 23 日の FALCON-A と CloudSAT のデータ比較である。この通過では CloudSAT は FALCON-A から 3 km 余り離れた位置を通過したので、両者は別の体積範囲を観測しているが、5 分前に通過した MODIS の可視画像を見ると薄い均一な雲が両者にかかっていることがわかる (右上図)。両者のレーダー反射因子強度 dBZ プロファイルと比較すると、高度 1 km および 5 km の雲は、それぞれの強度がよく一致しているが、高度 3-4 km の雲は FALCON-A の強度の方が 5 dB 程度強い。また、FALCON-A の強度 dBZ の高度-時間図 (右下図) を見ると、3 層の雲が見えて、そのうち上下 (1 km および 5 km) の層は空間・時間的变化が少ない均一な雲であるのに対して、高度 3-4 km の雲は変化が激しいことが見て取れる。また、この層の内部の微細な構造も、FALCON-A でよく捉えられている。

4) MPL、PMPL と FALCON-A の同時観測データ比較

図 4.4.10 は 2014 年 12 月 12 日の FALCON-A と MPL のデータ比較である。MPL、PMPL と FALCON-A は、ともに感度のよいアクティブセンサーであり、また後方散乱に寄与する物理量が異なるため、両者の同時観測データの比較により、雲粒径や水・氷粒子の混合相解析など、雲微物理量の解明が可能である。

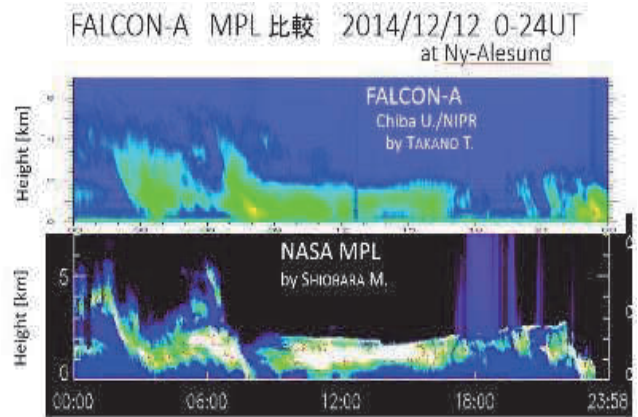


図 4.4.10 2014 年 12 月 12 日の FALCON-A (上段) と MPL (下段) のデータ比較。

以上、1)~4) の成果は、本事業基盤整備として新たに開発・設置した雲レーダー FALCON-A が、2013 年 9 月の定常運用開始以来、一部期間の不調はあったものの、冬期も含めて安定して質の良いデータを出し続けてきたことによるところが大きい。本事業期間に得られたデータは、引き続いての詳細な解析により、北極雲についてさらに重要な知見をもたらすことが期待できる。また、本事業終了後についても、継続して観測することにより、その長期変動など研究対象が広がることを期待できる。

5. 北極域データアーカイブ (ADS)

基盤整備機関：国立極地研究所
執筆者：矢吹裕伯

(1) 目的

北極域データアーカイブ (Arctic Data archive System : ADS) は、本事業で得られる観測データやモデルシミュレーション等のプロダクトを保全・管理し、地球科学コミュニティ内でそれらが円滑に利用できるための仕組みを提供する。また同時に、多くの人々が多種多様な目的に応じて科学データを利用することが可能となる供用システムとしての運用することを目的とした。

受入れ対象のデータとしては、本事業の成果に加え、過去に日本の公的資金で行われた北極地域の研究や、山岳・高所の寒冷圏の研究の成果も視野に入れている。ADS は、データリポジトリ機能、データ可視化システムおよび様々な形態のデータ公開サービスの開発を推進し、規模としては、ICSU が提唱する、“System of data systems”のなかの Regional や、Interdisciplinary といったデータセンターとなることを目指した。

ADS の構築及びその運用は、各分野間でのデータの相互利用を図り、現場観測、収集データ、衛星データ、数値実験データ等の分野融合データセットの構築を通して北極域の大気-海洋-陸域システムの変動の実態とプロセスを解明、地球温暖化における北極域の環境変動の影響を評価、将来予測精度の向上に貢献することを目的とした。

(2) 実施体制

ADS は国立極地研究所の国際北極環境研究センター内で整備しており、センターの特任メンバーが担当した。構想・推進・構築・運用に関する役割分担は下記のとおりである。

構想・推進：特任准教授 矢吹裕伯 (2011年8月～)

構築・運営：特任技術専門員 川本温子 (2011年11月～2013年1月)

構築・運営：特任研究員 杉村剛 (2013年4月～)

構築・運営：特任研究員 照井健志 (2014年4月～)

(3) 実施状況

データ取扱規定およびデータポリシーの策定

本事業では取得した観測データの相互利活用を目的としている。その目的を遵守するために、観測データの提出や公開に関する規則として、『「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス」(GRENE) 事業北極気候変動分野により得られた調査観測データの取扱要項』を制定した。特に重要な取決め事項とし

て、データの提出時期、公開猶予期間、提出すべきデータの品質レベルについて、GRENE データワーキンググループや国立極地研究所国際北極環境研究センターの教員の意見を取りまとめた。なおこの文書は、本事業の代表機関である国立極地研究所の研究所会議を経ることにより、所が認定する要項として運用した。

また、ADS では、様々なデータを取得しかつ、そのデータを一般に公開することから、北極域データアーカイブの Web サービスを利用するすべての利用者が守るべき規則『北極域データアーカイブデータポリシー』を策定した。データポリシーでは、メタデータおよびデータの提出方法、それらのダウンロードに関する合意事項、データ提供者の権利、引用などのルールを明文化した。

衛星データ利用推進

ADS では極域の衛星データの利用推進を目的として JAXA と「地球観測衛星データ利用実証及びデータ処理技術開発に関する基本協定」を締結し、JAXA-EORC より ALOS や ALOS2、AMSR2 等のデータの利用を可能にした。また AMSR2 の極域プロダクトは準リアルタイムでの配信を受けることで北極研究のための利用推進を行った。

(4) システムの概要

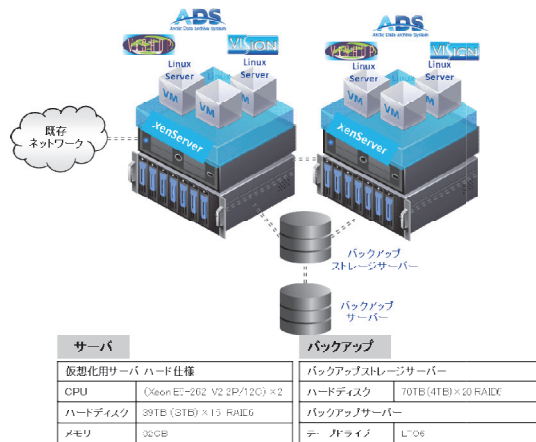
ADS では、本事業で収集・公開するデータアーカイブを構築するために、本事業の研究分担者を対象として ADS に取得する既存データおよび観測データのアンケート調査を実施し、ADS に実装必要なデータ容量かつデータの種類等 ADS の設計のための情報を収集した。また、データを公開するために必要となる、メタデータの構造を国内外の機関との連携が行いやすい形へ再定義を行い、ADS メタデータスタンダードの設計をした。また受け入れるデータの種類を①In-situ (AWS, 定点ブイなど)、②Photo (写真・ビデオ)、③Image (マップ、ラスタ・ベクタ・シェープ)、④Sample (分析データ)、⑤Radar (地上レーダー観測)、⑥移動体 (移動ブイ)、⑦船舶 (XCTD, スポット観測)、⑧航空機、⑨model (モデルシミュレーション)、⑩grid (観測値をグリッド化) の計 10 種類とした。これらのアンケートの集計をもとに、ADS のハードウェア及びアプリケーションの設計を行った。

また、ADS では『「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス」(GRENE) 事業北極気候変動分野により得られた調査観測データの取扱要項』に則り、一般公開前のデータへ内部アクセス権を設定するため、データダウンロード時のアクセス制限を個人認証する機能を実装した。また JAXA データ等のデー

タセットをダウンロードしたユーザー情報の入手を希望するデータ提供者には、それらの情報をフィードバックする仕組みを実装した。

ハードウェア

ADS の全てのハードウェアは国立極地研究所内のサーバ一室に設置した。北極域データアーカイブのシステム本体は、本事業で得られる観測データ、大容量の衛星・モデルシミュレーション等のプロダクトを保全・管理し、地球科学コミュニティ内でそれらが円滑に利用できるための基本的かつ最重要サーバである。ADS のサービス公開及びデータの保管管理するために、システムは、複数のデータサーバを仮想化ソフト (Xen Server) を用いて 1 台のデータサーバとして扱い、常時複数のデータサーバ上のデータを安定的に保管する仮想化システムを構築した。またそれらの大規模かつ常時収集するデータをデータサーバを停止することなく、大容量のデータを安定的にバックアップする機能を持たせるためにシステムの冗長化を行っている。また、それらシステムやデータの安定的な保管・管理を行うためにバックアップストレージを持たせ定期的なシステム全体のバックアップを行うシステムを構築した。



ADS のハードウェア構成

研究データ登録システム

AMS (ADS Metadata registration System)

AMSはメタデータとデータセットをADSに登録するためのWeb インターフェースである。全ての研究データ登録はAMSから行うことができる。AMS からメタデータテンプレートと登録マニュアルの入手が可能である。メタデータ記入済みのテンプレートと実データを AMS にアップロードすることでAMS に登録される。登録されたメタデータとデータセットは自動的にKIWAへ反映されWeb上に公開される仕組みである。

AMS のメタデータの入力、マクロソフトエクセルファイ

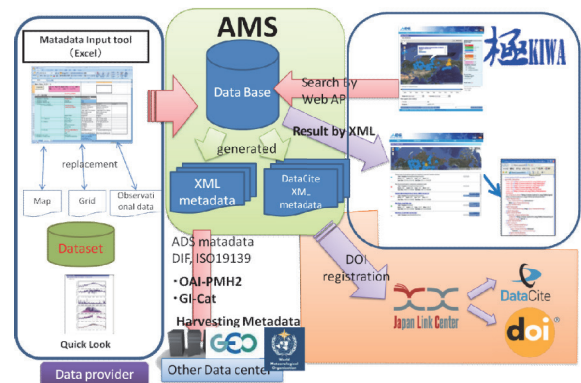
ル上で作成することができ、現地観測したその場でメタデータの作成が行うことを想定しネットワーク接続のないオフライン環境上でもメタデータの作成が行うことができる。

ADS メタデータは、ISO19139 を基本としつつ独自の拡張を加えた約 500 要素からなる内部スキーマを定義した。このスキーマを用いることで地上観測網からモデル出力まで、多様なデータセットを表現することを可能とした。登録対象のデータセットがもつ情報の細かさによって、粒度の小さいものから大きい、かつモデル出力等のグリッドデータまでそれぞれにあう形でのメタデータの登録を行うことが可能である。

ADS のメタデータは国内外のデータ機関との連携が可能であり、国際的な標準メタデータスキーマ①ISO19139:2007 や地球科学メタデータの標準になりつつある NASA-GCMD (Global Change Master Directory) のメタデータである②DIF 形式の format を持つ。これらのメタデータは国際的なメタデータ交換ツール OAI-PMH2 や、GEOSS の標準メタデータ交換ツールである GI-CAT を通じてアクセスが可能である。

ADS では、国際的には WMO のプロジェクトである GCW (Global Cryosphere Watch) とのメタデータの連携をはじめとして GEO-Potal や SAON とのメタデータの連携の協議を始めている。また国内的には DIAS プロジェクトとの連携を開始している。

また、データプロバイダーへのデータ提供するためのインセンティブを確保するために、ADS では 2015 年 10 月より研究データへの DOI 付与を開始した。ADS で付与する DOI は、国際 DOI 財団の 9 番目の登録機関 JaLC (Japan Link Center) を通して行い、データ DOI 付与を行う機関である DataCite にも登録され国際的に流通することになる。ただし、ADS で DOI を付与するデータセットは、品質管理済みのデータセットに限定することとした。



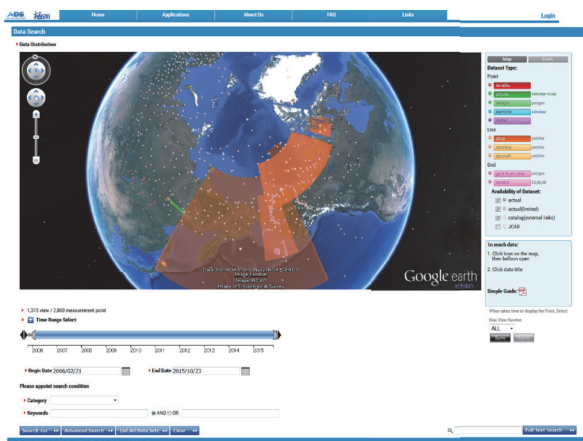
研究データ登録システム (AMS) のシステム構成

メタデータ検索システム「極」

KIWA (Key service for InterWorking Arctic data)

「極 (KIWA)」は、ADS に登録されている多種多様なデータの検索・閲覧・ダウンロード機能を担う Web サービスである。InterWorking とは Interoperability と同義語で、日本語では相互運用性のあるという意味をもち、ADS では、ADS が保有する様々なデータを研究者だけでなく、国内外のデータセンターとも InterWorking できるようなしくみを整えることを目標に開発を進めた。

「極」は、ADS に登録されている、多種多様なデータを地図空間にデータの種別ごとに表示する機能を持つ。また ADS ではデータの取得期間ごとにデータを検索する機能を持っており、時空間毎にデータの検索が可能なシステムである。ADS では、GoogleEarth を用いてポラステレオ表示することにより、環北極域のデータの所在をユーザーの直観的に時空間検索することが可能な仕組みを持っている。



「極 (KIWA)」による登録データの検索画面

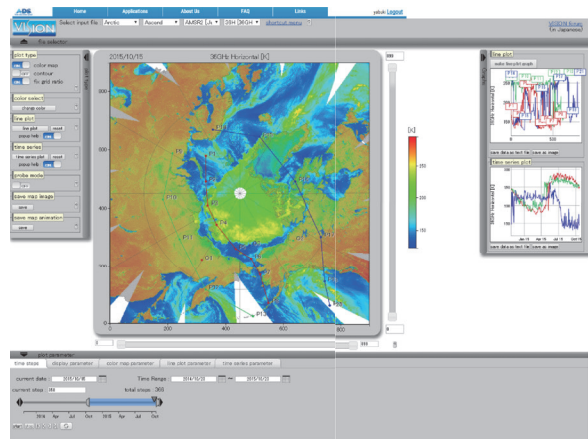
オンライン可視化アプリケーション VISION

観測とシミュレーションといった分野間でのデータ相互利用が進展しづらい一因として、データの内容が作成者本人以外には理解しづらいという理由が挙げられる。ADS では、ウェブ上においてデータセットを容易に可視化するためのアプリケーションを下記の要件を満たすことで構築した。

- 容易に操作可能な GUI インターフェースを備えている。
- ユーザーの直感的な操作に対応して、インタラクティブに可視化結果を変更できる。
- 1~3 次元データを多様な可視化アルゴリズムを用いて可視化する。またこれらを動的、かつシームレスに表示する。
- 可視化結果を画像・動画・数値データなどといった形式で抽出できる。

1) グリッドデータ

VISION では、既存アプリケーションでは、解析するまでに非常に手間がかかった衛星データやモデル出力等のグリッドデータに関して、オンラインで解析が可能になった。VISION は 2 次元のグリッドデータに対して、横断データを取得できると共に、時系列データの抽出が可能である。またそれらの抽出データをテキストデータでダウンロード可能である。また空間データのプロットを時系列処理することでアニメーションの作成等、プレゼンテーション作成ツールとしても有効である。本 VISION は観測研究者にとって有益な解析ツールとなっている。



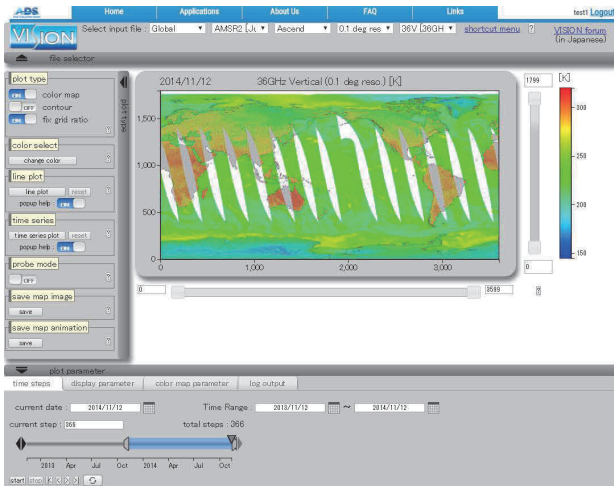
VISION による衛星データの可視化及び解析画面

2) 衛星データ

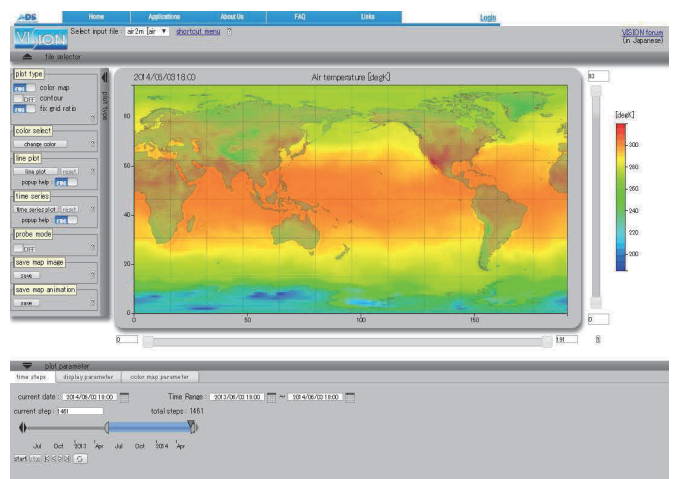
本事業では衛星観測データの利用推進が重要事項であるために、JAXA 提供及び他の衛星データの実装を行った。

- JAXA 提供 AMSR-2 Polar Product
 - センサー輝度温度 (06GHz、7GHz、10GHz、18Hz、23GHz、23GHz、36Ghz、89GHz) データ、及び衛星プロダクト (積算雲水量、可降水量、海氷密度度、降水量、土壌水分量、積雪深、海水面温度、海面風速)
- NSIDC SSM/I Polar Product
 - センサー輝度温度 (19Hz、37Ghz、91GHz) データ、及び衛星プロダクト (海氷密度度)

JAXA-NIPR 連携協定において公開される AMSR2 の極域プロダクトの他に、全球プロダクトの VISION による公開を行った。これまで極域プロダクトを利用することを念頭に開発されてきたが、全球プロダクトの実装により、データ利用の一層の推進が図られる。特に極域プロダクトだけではカバーしきれなかった、山岳・高所の寒冷圏や、海洋・気象において連続している領域についてのデータ利用が期待される。



VISION による AMSR2 全球プロダクトの実装画面



VISION により再解析データ (NCEP1) の可視化解析画面

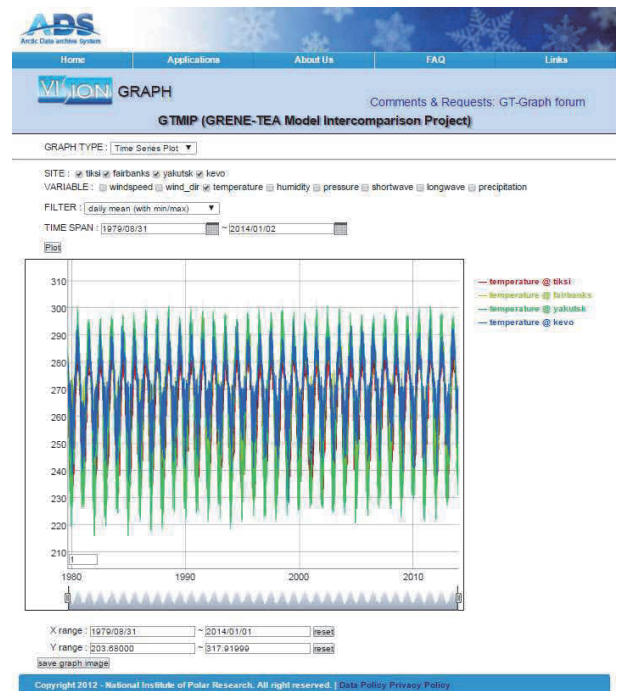
3) モデル出力グリッドデータ

観測及びモデル研究者の連携を進めるために、連携コーディネーターを通して研究課題1及び研究課題2とモデル及び観測データの共有方法及び連携方法に関して協議を行った。その結果、観測研究者の要望が多かった、観測を行っている地点での過去における地上気象観測データ等の再解析データやモデルの切り出しについて検討を行い、再解析データ (NCEP1) 及びオフライン実験結果を実装し、研究者自身がオンラインで格子点データを切り出し、解析可能な環境を公開した。

- NCEP reanalysis data (NCEP1)
- 地表面気温、長波放射量、短波放射量、降水量、海面気圧、相対湿度、水蒸気量、風速
- Climate research Unit (CRU3.2.1)
- 月平均気温、月平均降水量、雲量、水蒸気圧
- ELSE (Ensemble Land State Estimator) : Offline forcing data (Kim et al., 2009) ¹⁾
- 2m 気温、降水量、積雪量、水蒸気量、下向き短波放射、下向き長波放射、10m 高風速、海面気圧
- N14: MATSIRO land surface model output (Nitta et al., 2014)
- 積雪水量、積雪被覆度、地温、土壌水分量、土壌含水量

4) 時系列データ

VISION ではグリッドデータだけではなく、時系列データについても解析ツールをサポートしている。ADS では陸域課題で実施された GTMIP (GRENE-TEA Model Inter comparison Project) のモデル強制力データの可視化公開を行った。本データセットは、約 35 年間の 30 分インターバルの複数要素を含む膨大なデータセットであり、デスクトップの PC 上での解析、可視化は困難である。システムではこれらのデータセットの可視化や平均値処理等が可能な Web アプリを開発し公開した。



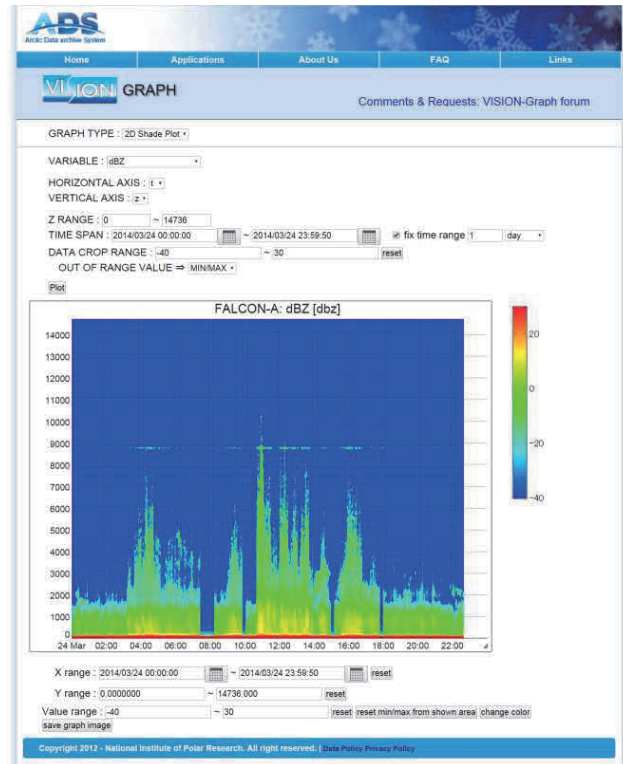
VISION による GTMIP 強制力データの可視化画面

5) リアルタイムモニター

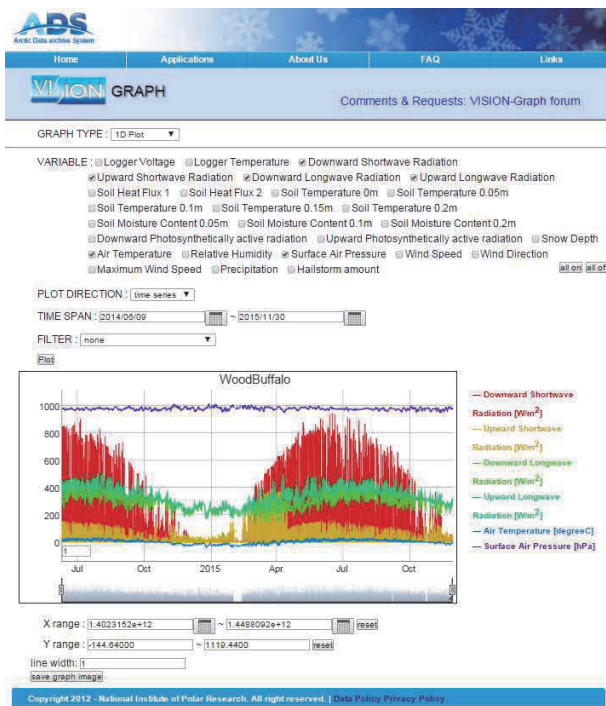
本事業では北極域での陸域・氷床変動のプロセス解明のため、データ空白域での気象データを取得している。これらは自動気象観測装置を用いて ARGOS システムを用いて、日本でモニターが可能になっている。ADS ではこれらの気象データをネットワークを介して自動取得データの可視化を行うシステムを作成した。

現在、下記の4サイトのデータで気象観測データのリアルタイムモニターを開始した。

- * ウッドバファロー : Wood Buffalo National Park on Canada (60°09'03" N, 113°38'17" W, 270m a.s.l.)
- * SIGMA-A : northwest Greenland ice sheet (78°03'N, 67°38'W, 1,490 m a.s.l.)
- * SIGMA-B : northwest Greenland (77°31'N, 69°04'W, 950 m a.s.l.)
- * SIGMA-D : northwest Greenland ice sheet (77°38'N, 59°07'W, 2,100 m a.s.l.)



FALCON-A の可視化画面



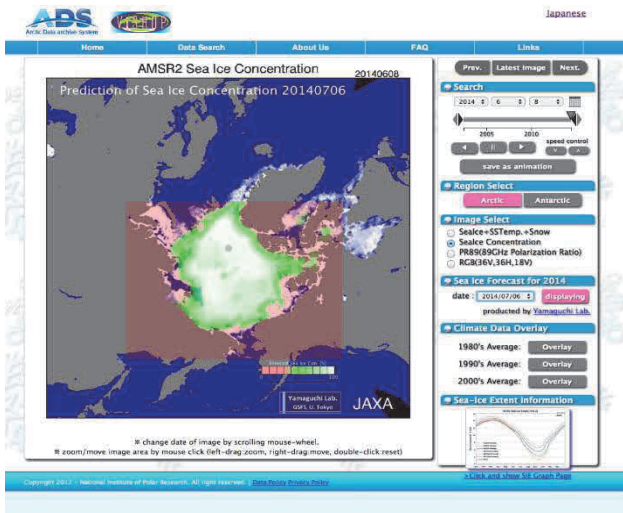
北極域気象観測リアルタイムモニターの実装 (カナダ Wood Buffalo の場合)

6) 雲レーダー

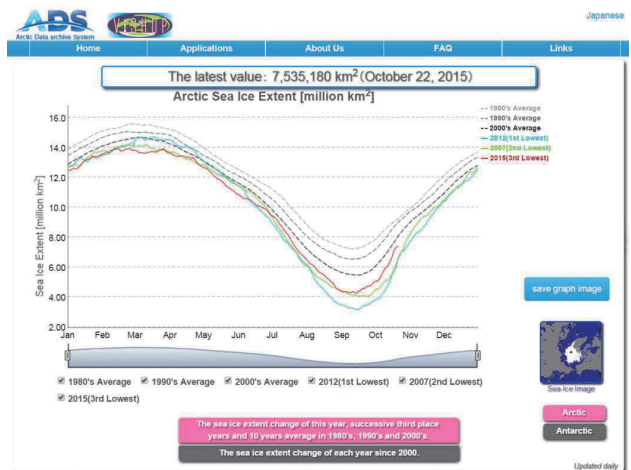
本事業の研究基盤としてスバルバルのニーオルスンに雲レーダー (FALCON-A) を設置した。ADS ではレベル1のデータのオフラインでの可視化サービスを開始した。

準リアルタイム極域環境監視モニター VISHOP

ADS では、極域の状態を素早く配信できることを目的に VISHOP を開発した。VISHOP は、準リアルタイムで JAXA より配信を受けている極域の衛星の数値データをブラウザ上で表示する可視化サービスを開発した。海水や海水面温度、積雪深、雲の動きのように、多くの分野で参照される情報を自動的に可視化し、アニメーションによるダイナミックな動きを、Web サイトにアクセスするだけで参照可能である。また、研究者や一般利用者による作図工程を削減させることも機能も充実している。現在 VISHOP では海水密接度、積雪深、海水面温度、海水厚、海水流動量、マイクロ波イメージの実装を行っている。海水流動量は海水変動予測課題 (課題 7-1) が作成したアルゴリズムを用いて ADS で準リアルタイムに計算を行い可視化している。また同時に極域の海水面積の数値及びそのグラフも公開を行っている。またこのサイトでは、プロジェクト期間中、海水変動予測課題 (課題 7-1) で実施された夏季海水分布予測の結果も公開した。



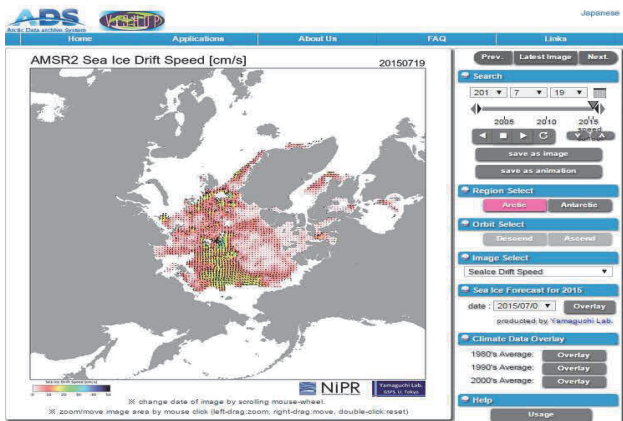
VISHOP による海氷密度と海氷分布予報値表示



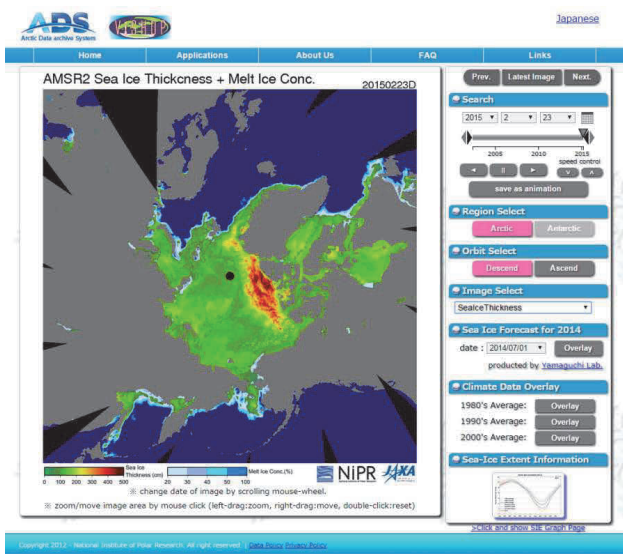
海氷面積のグラフ表示

船舶用衛星データ配信システム VENUS

衛星プロダクトの実利用を推進するために、極域で航海する船舶に対して、衛星データの自動配信と可視化を行う、プッシュ型サービスである船舶航行支援システム (VENUS) の開発を行った。このシステムは、安価な通信量・システムで簡易に様々な船舶上に搭載可能であることを念頭に置いて開発した。このサービスは JAMSTEC の研究船舶である「みらい」の北極公開や南極観測隊の「しらせ」及び海鷹丸において導入とデータ配信を行い、良好な結果を得ることができた。今後、北極海航路における船舶や国内の観測船への導入拡大が期待できる。



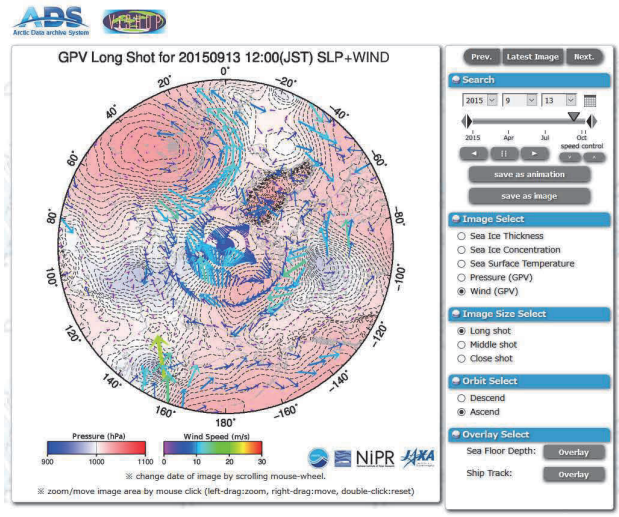
VISHOP による海水流動量表示



VISHOP による海氷厚表示



船舶航行支援サービス (VENUS) のシステム本体



船舶航行支援サービス (VENUS) のサービス Web 画面

(6) データ利用

登録データ

北極域データアーカイブの現在のデータセット登録数は、下記の通りである。(2016年2月25日)

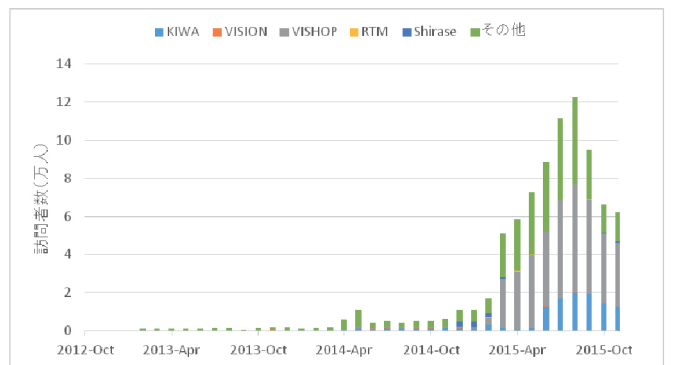
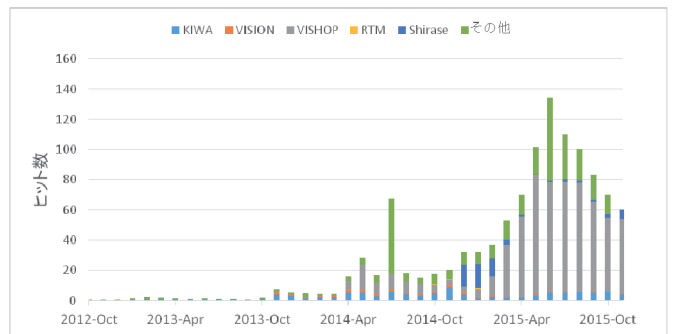
課題	PI名	H27年度(1月28日時点)		H28年度		H29年度		H30年度		H31年度		課題別合計(6年)	
		全データ登録数	公開データ登録数	全データ登録数	公開データ登録数	全データ登録数	公開データ登録数	全データ登録数	公開データ登録数	全データ登録数	公開データ登録数	全データ登録数	公開データ登録数
1	野沢(モデル)	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	2	2
2	杉本(観測)	18	4	29	5	1	0	1	1	0	0	47	10
3	浮田(大観)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
4	榎本(観測)	8	8	15	15	41	16	0	0	0	0	64	39
5	青木(観測衛星)	0	0	7	6	4	0	0	0	0	0	11	6
6	菊地(観測衛星)	6	6	2	0	15	1	0	0	0	0	23	7
7-1	山口(観測・観測)	1	1	17	9	0	0	2	0	0	0	20	10
7-2	羽角(観測・観測)	1	1	5	4	3	3	0	0	0	0	9	8
7-3	島田(観測・観測)	0	0	3	3	3	3	0	0	0	0	6	6
観測レーザー		2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	3	3
年度別合計		34	22	72	36	69	25	3	1	0	0	178	84

ADS へのデータ登録状況

ADS サービスのアクセス状況

ADS のサービス開始時からの月集計のアクセス状況を図に示す。様々な新サービスの立ち上げと知名度の向上により、ADS 全体の 2014 年 5 月以降の月間訪問者数は 1000 を超え始めた。VISION の訪問者は、サービス開始時より月間 70 名程度の安定的なユーザーを確保している。VISHOP は月間 400 名程度の訪問者を確保している。2014 年度以降は、SNS を通じたプロモーションや、学会等におけるデモンストレーション、及び YouTube を通じたチュートリアル動画の配信により、利用者の増加につながった。また VISION は訪問者に対してヒット数が大きいことから、固定ユーザーによる多大なデータ利用が

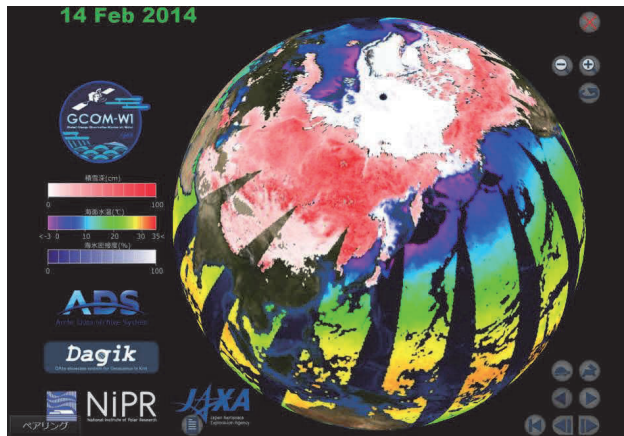
なされていることを示している。このことから実際に研究に利用する固定ユーザーの確保について確認できた。また 2015 年 3 月以降 VISHOP の訪問者が急激に増加した。これは IARC で公開していた北極海海氷モニターのサービスが終了したことによるもので、JAXA の北極海海氷プロダクト利用者の多くは ADS-VISHOP を利用していると考えられる。



ADS のサービス開始以降の a) 利用者数と b) ヒット数

(7) アウトリーチ

ADS では、研究者だけでなく一般へのデータ利用の推進を図るために京都大学大学院理学研究科の地球科学総合部可視化グループが中心になって進めているダジック (Dagik) プロジェクトが開発した、Dagik アースのアプリケーションを改良して ADS オリジナルのコンテンツ及びサービスを開発した。ADS の作成したコンテンツは ADS でデータ公開を行う、AMSR2 プロダクトを利用して全球の海氷密度、海面温度、積雪分布を時系列で描画するものである。Dagik コンテンツを表示する大型の 4 次元地球展示装置の自作も行い、国立極地研究所の南極・北極科学館で常設展示として利用されている。また小型の可搬型 4 次元地球展示装置の自作も行い、研究者向けイベントの他に様々な一般向けイベントでのアウトリーチ活動を行った。



ADS オリジナルの4次元地球儀コンテンツ
(海水密度、積雪深、海面温度)

ブース出展

- 2014年6月30日- 南極・北極科学館, 立川.
- 2014年9月20-22日. 雪氷研究大会, 八戸.
- 2014年10月17日. 情報・システム研究機構シンポジウム
2014, 一ツ橋.
- 2014年10月28-30日. 日露北極研究ワークショップ, 市ヶ谷.
- 2014年11月17日. 北極海航路の利用実現に向けて, 品川.
- 2014年12月2-5日. 極域科学シンポジウム, 立川.
- 2015年2月16-19日. 北極域データアーカイブシステム
(ADS) による極域プロダクトデータの公開: 「オホーツク海と流氷」に関する国際シンポジウム, 紋別.
- 2015年3月22-24日. 日本海洋学会2015年度春季大会, 品川.
- 2015年4月27-30日. ASSW2015, 富山.
- 2015年5月24-28日. JPGU2015, 幕張.
- 2015年9月13-16日. 雪氷研究大会, 松本.
- 2015年11月6日. 特別セミナー「北極海航路の持続的実現
に向けて」, 品川.
- 2015年11月9日. 海洋生態系シンポジウム「ここまで分か
った海洋生態系の変化」, 品川.
- 2015年11月18-19日. 極域科学シンポジウム, 立川.

本事業主催以外の講演

- 2014年8月22日. 北極域データアーカイブにおける可視化
アプリケーション VISION の開発, 第64回 CAVE 研究
会, 横浜.
- 2014年8月29-31日. 北極域データアーカイブの取組と海洋
学分野への応用, 海洋学会海洋若手会「夏の学校」, 静岡.
- 2014年10月15日. 北極域データアーカイブによるデータ解
析・可視化サービスの開発, 統計数理セミナー, 立川.

- 2014年11月28日. 北極域データアーカイブの取組と海洋学
分野への応用, 海洋学会若手武者修行セミナー, 愛媛.
- 2015年2月20日. 北極域データアーカイブによるデータ解
析・可視化サービスの開発, 北海道大学環境科学院セミ
ナー, 札幌.
- 2015年2月27日. 参加機関の取組み(2) 国立極地研究所・
北極域データアーカイブの紹介と今後の取組み, ジャパ
ンリンクセンター活用のための対話・共創の場(第2回)
～研究データへのDOI登録～, 市ヶ谷.
- 2015年3月25日. 北極域データアーカイブによるデータ解
析・可視化サービスの開発, (独)水産総合研究センタ
ー(札幌事業所), 札幌.
- 2015年7月3日. 参加機関の取組み・国立極地研究所中間
報告, ジャパンリンクセンター 研究データへの DOI 登録
実験プロジェクト中間報告会, 東京.
- 2015年7月9日. ADS VENUS の紹介, GODI 本社, 横浜.

引用文献

- 1) Kim, H., Yeh, P. J. F. Oki, T., Kanae, S., 2009. Role of rivers in
the seasonal variations of terrestrial water storage over
global basins. Geophys. Res. Lett., 36, 17402.

6. 計算機資源について

整備機関：国立極地研究所
執筆者：事務局

研究基盤として整備が求められた体制は前述までの通りだが、本事業の特徴として、モデルと観測の連携があった。特に研究課題1や研究課題7の研究サブ課題7-2などは、課題名がモデルを主体としたものとなっているように、事業開始当初から参加研究者からモデルの高度化・精緻化やメカニズム解明に向けた数値実験のため、また、観測データや数値実験結果の解析にとって充実した計算機資源の整備が求められていた。特に、大規模モデルの数値実験には、各研究課題のモデル担当者が高速の計算機資源を利用できるよう、参画機関である海洋研究開発機構が所有する地球シミュレーター（ES）の利用に向けた整備を行った。

研究基盤の位置づけとは異なるが、共通基盤としての計算機資源について本事業内での実施概要は下記の通りである。

ES 利用申請概要

研究課題名：急変する北極気候システム及びその全球的な影響の解明

代表者：小室芳樹（研究課題1・海洋研究開発機構所属）

研究概要：北極は温室効果気体の増加など気候変動に対するインパクトに対して高い気候感度を持ち、現在も急激な温暖化と海氷の減少が進行している。本課題では急変する北極気候システム及びその全球的な影響の統合的解明を進めることを目的として、全球気候モデル、大気大循環モデル、氷床モデル、海氷短期予測モデルを用いて、寒冷域プロセスの高度化と再現性検証、感度実験による北極気候変動のメカニズム解明や各地域への影響評価、氷床変動における氷床力学の効果解明、北極海航路の利用可能性評価に繋がる海氷分布予測のためのモデル構築と検証を実施する。

本課題は、国立極地研究所等との共同研究である北極気候変動事業において、モデルを用いた研究の中核部分を担うものである。

2013年度（第二世代 ES） 26,000 ノード時間積 21 名
2014年度（第二世代 ES） 23,830 ノード時間積 29 名
2015年度（第三世代 ES） 762,400 ノード時間積* 26 名

注

* 2015年度より ES のシステムが更新され、1 ノードあたりのピーク性能が約 30% になっており、システム全体のピーク性能は、ノード数の増加により 10 倍になっている。



海洋研究開発機構の地球シミュレーター（写真：渡邊英嗣）

7. 北極環境研究コンソーシアム（JCAR）事務局

執筆者：JCAR 事務局 長 児玉裕二

(1) 概要

北極環境研究コンソーシアム Japan Consortium for Arctic Environmental Research（以下 JCAR と呼ぶ）は、2008 年以降毎年開催してきた日本地球惑星科学連合大会での「北極域の科学」セッションや 2008 年と 2010 年に開催した国際北極研究シンポジウム（ISAR）を開催していた研究者グループが発起人となって、我が国における北極環境研究の強化をオールジャパン体制で取り組むために、各分野の北極研究者の参加により、2011 年 5 月の地球惑星科学連合大会の期間中に設立された。当初は 241 人が会員登録をした。本事業が始まると、代表機関である国立極地研究所に JCAR 事務局が設置された。本事業では JCAR 事務局の運用に対して支援をしたが、JCAR 事務局は JCAR 活動を補助する機能を果たしているため、この報告では JCAR 活動について記述する。

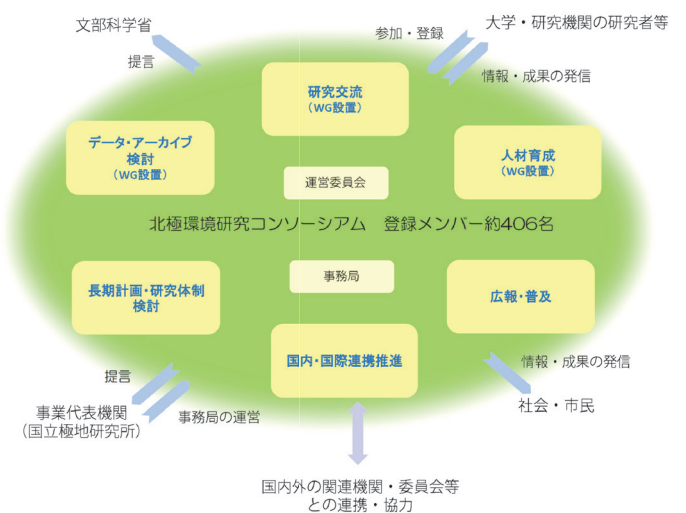
(2) 実施状況

設立時は、発起人を中心に、関連分野のバランスを考慮し選出された 23 名の運営委員から成る運営委員会が JCAR を運営することとなった。初代運営委員長は大畑哲夫（当時：海洋研究開発機構）。JCAR では北極環境研究に関する長期計画策定や研究・観測推進の基盤整備に関する検討、国際協力・連携の推進・検討、人材育成の方策の検討を行うとともに、それらを社会に対して提案していくことを目的として規約を整えた。運営委員の任期は 2 年（再任は妨げない）と規約に定め、2011-12 年を第 1 期とし、その後 2 年毎を期と呼ぶことになっている。2013 年春に新しい第 2 期の運営委員が決まり、秋には榎本浩之（国立極地研究所）が代表となった。2015 年度で本事業からの事務局サポートが終了することから、その後の運営体制について 2014 年春より議論を開始した。2014 年 11 月の極域科学シンポジウムの際に臨時全体集会を開催し、会員を主体とする「学会的」な運営の方針が了承された。その後、運営委員及び運営委員長の選出方法が体制検討 WG で議論され、2015 年春には、会員による選挙にて第 3 期の運営委員が 15 名選出され、分野のバランスを考慮して 4 名が第 3 期運営委員会によって追加された。その後、運営委員の選挙によって、青木輝夫（現岡山大学／当時気象研究所）が第 3 期運営委員長として選出され、現在に至っている。

JCAR では特定の活動についてはワーキンググループ（WG）を結成し、そこで議論、実施している。それらの目的は次の通り。

- ・長期構想作成 WG：北極環境研究の長期構想を作成し、出版することを調整・推進する。なお、2016 年度中に『北極環境研究の長期構想』の改訂を検討する WG を立ち上げる予定である。
- ・体制検討 WG：JCAR を持続的に運営していく体制を検討する。
- ・規約検討 WG：JCAR の体制の変化に対応して、規約が合理的となるよう、その改正案を作成する。
- ・研究交流 WG：北極環境変動にかかわる複数の専門分野の研究者が、北極という共通のキーワードの下に集結し、密な研究交流により相互理解を深めることで、国際的な枠組みの中での、総合的・学際的な北極環境研究の推進を支援する。
- ・人材育成 WG：北極環境研究に関する人材育成の実態を把握し、人材育成活動を推進していく方策の検討を行った上で、その方策を推進する。
- ・データ WG：国内および国際的な推進状況等に関する情報を共有し、国内および国際的な動静に働きかけることで日本の北極研究コミュニティにおけるオープンサイエンス推進を図る。
- ・情報・コミュニケーション WG：JCAR に関する様々な立場の人々に対して適切に情報を伝達・共有する方策を検討・実施する。

JCAR 体制図（2016 年 3 月 31 日現在）



(3) 実績・成果

1) 『北極環境研究の長期構想』の作成

これまでの JCAR の最大の実績は『北極環境研究の長期構想』を作成したことと言える。我が国で「北極環境研究」に特化した長期構想はこれまでなく、現状の分析及び将来取るべき方針を示すことは重要であった。

2013 年に検討から実施に向けて動き出し、これをまとめるために編成された WG が作業の進め方や編集作業を行なった。3 回の全体ワークショップの他、各分野の検討や、分野間共通の研究基盤についての討論会等も開かれた。当初は長期構想執筆に多大な時間を費やすこと、研究のアイデアを公開してしまうことの不都合が懸念されたこともあった。しかし、執筆には 140 名を超える会員が協力を表明した。WG をはじめとし、執筆者だけでなく、査読に関わった方、またこの活動の必要性やあるべき姿についての意見を出した方、それら北極に関わる研究者の多くの議論と JCAR 事務局の支援により作成活動が進められた。

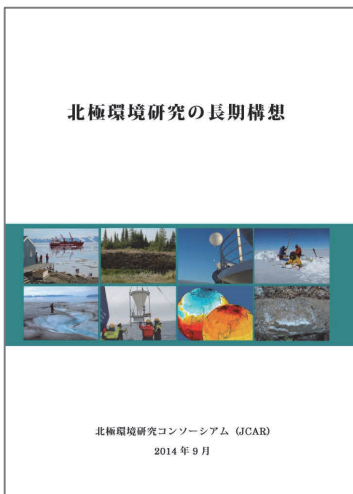
長期構想では今後 10 年～20 年で取り組むべき課題を考え、各分野の多くのテーマが盛り込まれた。執筆者は自らの興味と活動だけを主張するのではなく、広い視野から、重要な分野、日本の研究者が活動すべき対象についても盛り込んだ。そこで扱われた多くのテーマは国内にとどまらず、国際的にも提言していける完成度の高いものである。

日本の北極環境研究者が自らの分野の課題や方向性を示し、他の分野の動きを知り、それらと協働を模索することを可能にするのがこの『北極環境研究の長期構想』であり、JCAR が本長期構想を作成できた事実は、その存在意義を確たるものにしたと言っても過言ではない。

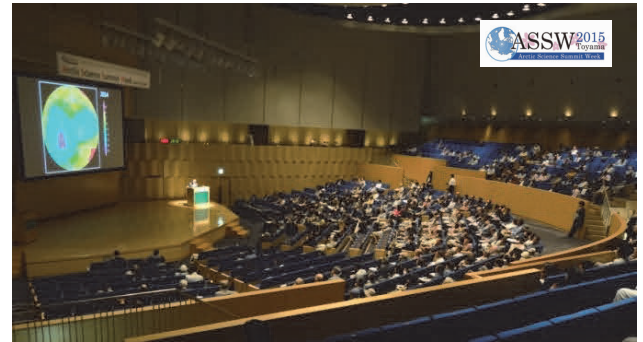
『北極環境研究の長期構想』は要約版と全体版から成り、そ

れぞれ日本語版と英訳版がある。それらは WEB からダウンロードできる。また、出版後、執筆者が集まって、作成手順や今後の活用、改訂などについて総括を行った。その報告も上記ウェブサイトに掲載されている。

<http://www.JCAR.org/longterm/>



2) ASSW 誘致と共催実施



世界の北極研究者や関連機関の代表者にとって最も重要な会合の一つとして位置づけられている北極科学サミット週間 (Arctic Science Summit Week : ASSW) 2015 の日本への招致は JCAR が推奨し、日本学術会議国際対応分科会国際北極科学委員会 (IASC : International Arctic Science Committee) 小委員会が招致の提案を IASC 評議員会へ行い、2012 年 4 月に開催された ASSW モントリオール大会において決定された。日本での開催は初めてであった。これを受け、JCAR は、2013 年に ASSW2015 組織委員会を設置し、開催の準備を進めた。また、2014 年秋に、国立極地研究所内にて ASSW2015 事務局の活動が始動するまで、JCAR 事務局が ASSW2015 事務局を担当し準備を進めた。

2013 年 7 月に開催された第 1 回組織委員会で開催都市を富山市とする事、開催期間は 2015 年 4 月 23 日～30 日とする事、及び会場を決定した。

ASSW2015 では、関連団体の business meeting のほか、IASC 設立 25 周年記念式典、北極科学研究の 10 年計画を策定する 10 年に 1 度の会議、第 3 回国際北極研究計画会議 (ICARPIII)、日本主導で実施してきた国際北極研究シンポジウム (ISAR) の第 4 回シンポジウムが併せて開催された。その準備に際し、計 5 回の ASSW2015 組織委員会、6 回の ISAR-4 関連会合および IASC 事務局とのミーティングが開催され、ASSW2015 事務局として活動した。また、富山県と富山市からの助成、日本学術会議との共同開催にも尽力し、ASSW2015 は JCAR を含めた 4 機関の共催、文部科学省、外務省を含めた 11 機関の後援を得て開催された。また、Peter Wadhams 氏からの提案と橋渡しで、高田宮妃殿下に ASSW2015 の名誉総裁にお成り頂いた。

大会には、世界 26 の国と地域から 708 名が参加し、参加者の数は過去最高となった。会期中には 13 件の IASC 関連会合、17 件のサイドミーティング、及び 27 件の ISAR-4/ICARPIII セッションが開催され、合計 511 件 (口頭発表が 340 件、ポスター発表が 177 件) の発表が行われた。ASSW2015 は大盛會

となり、我が国の研究成果を全世界の研究者に大きくアピールすると同時に、関係者に JCAR の存在を示すこととなった。会の最後には、ICARPIIIの Steering group が中心となって作成し、ISAR-4 の Science Steering Committee が了承した「Toyama Conference Statement」（共同声明）が発表された。この内容は、下記のサイトに掲載されている。

http://www.ASSW2015.org/program/pdf/ASSW_Conference_Statement_FINAL.pdf

3) ISAR-3、ISAR-4 の実施

ISAR-3 は、2013 年 1 月 14 日～17 日、日本科学未来館で開催された。主催は日本学術会議地球惑星科学委員会国際対応分科会 IASC 小委員会と JCAR、共催は国立極地研究所、海洋研究開発機構、北海道大学グローバル COE プログラム「総合フィールド環境科学の教育拠点形成」、アラスカ大学国際北極圏研究センターであった。16 の国から約 270 名が参加した。7 件の一般セッションと 6 件の特別セッションが設けられ、口頭 101 件、ポスター129 件の発表が行われた。また、優れた若手研究者にポスター賞を授与した。1 月 14 日には公開講演会を開催し、おりしも東京には珍しい大雪の中、65 名の参加があった。ISAR-3 の運営は組織委員会が差配し、実施委員会が作業を行った。また、国際助言委員会（International Advisory Committee）を設け、国際的な情報や助言を得た。

第 4 回国際北極研究シンポジウム（ISAR-4）については上記 2）を参照。

4) JpGU 開催中の活動（セッション、ブース出展、全体集会）

2007 年より毎年、日本地球惑星科学連合（JpGU）連合大会で、複数の専門分野や学界が北極域という共通のキーワードの下に集結し、密な情報交換により相互理解を深めることを目的として、「北極域の科学」のセッションが有志により開催されてきた。2011 年からは JCAR の研究交流 WG がその運営を担っている。毎年代表コンビーナを決めて申請を行い、数人のサブコンビーナが補助した。50-80 人の参加があり、約 20 件の口頭発表と 10 数件のポスター発表がある。

JCAR では JpGU の連合大会にて 2012 年より全体集會を、2013 年からは全体集會に合わせてブース出展を行ってきた。2012 年の全体集會では、約 40 名が参加し、事前に募集した質問への回答や質疑応答を実施した。2013 年は活動報告および活動計画について登録会員に説明を行った。2014 年は参加者 52 人を集め、活動報告に加え若手研究者派遣支援事業の説明やベルモント・フォーラム公募に関する説明を行った。特に若手研究者派遣支援事業に関しては、東京海洋大学の川合美千代

准教授より海外での研究についてお話しいただいた後、質疑応答を行った。2015 年度は今後の JCAR 体制の方向性についてなど説明し質疑応答を行った。また、若手研究者派遣支援事業にて平成 26 年度アメリカの IARC に派遣された Nuerasimuguli Alimasi 研究者から、活動について報告をいただいた。

ブース出展では、本事業や ADS グループと協力し、パンフレットの配布などを通じて周知活動を実施し、大きな成果を上げた。

5) 極域シンポジウムの共催

JCAR は 2015 年に開催された第 4 回極域科学シンポジウム以降、本事業のセッションを共催している。2015 年には極域科学シンポジウムに先立って開催された日米共同北極研究に関するワークショップも共催し、日・アラスカ大学フェアバンクス校の協力可能性を検討し、競争的資金への応募や政府への新規予算提案を見据えた提言の取りまとめに一役買った。

6) 若手研究者派遣事業の審査

平成 26 年度に、アメリカ合衆国のアラスカ大学、カナダの ArcticNet 参加大学等を派遣支援対象機関として実施された北極環境研究若手研究者派遣支援事業を国立極地研究所と共同し実施した。具体的には、研究交流 WG が審査員を選任し、審査を依頼。応募者の提出した研究計画の論理性、科学的意義・社会的意義などについて評価頂いた結果を WG で議論し、派遣にふさわしい候補者を国立極地研究所へ推薦した。また、事務局は、実施に必要な契約の締結に係る作業の補佐を行った。

7) 北極地図の作成

北極点を中心とした北極域を描き大判紙に印刷された地図は、海外製のものはあるが日本製のものは普及していなかった。そこで、北極研究に利用しやすい地図を提供するため、JCAR で発案し、国立極地研究所予算使用の元、独自に北極域の地図を作製した。

NOAA から公開されている ETOPO1 の陸上・海底の地形データを使用して描いた地図に、氷河情報等を追加し、記載する地名等は現在の日本の北極環境研究に重要と思われるものを優先した。また、日本と北極との位置関係がわかりやすいよう、地図下方に日本を入れて作図した。なお、作図作業は北海道地図株式会社が発注した。

初版は、140cm×140cm 大のプリント用として作成し、その pdf ファイルを JCAR と国際北極環境研究センターのウェブサ

イトより公開した。この地図は、2013 年度日本地図学会の「地図展優秀地図選定」において、この年の選定対象地図 37 点のうちから 4 点選ばれたうちのひとつとして、優秀賞を受賞した。

2015 年には紙媒体での販売を開始するために改訂版を作製し、ウェブサイトの pdf ファイルも更新した。2016 年 1 月現在、国立極地研究所の南極・北極科学館売店で購入できる。ファイルのダウンロード用ホームページの URL は以下である。

<http://www.nipr.ac.jp/aerc/map.html>

8) AMAP 報告書の和訳



北極評議会 (Arctic Council) の 6 つの作業委員会 (Working Group) の一つである、Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) は 4 つのプロジェクトにより活動している。そのうちの SWIPA (Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic) は、北極の雪氷寒冷圏のアセスメント

を行って報告書を多数発行している。そのうちのひとつ Climate Change in the Arctic - A Hot Topic. SWIPA 2011 には北極における雪氷の最近の変化とその影響、今後取り組むべき課題等が平易に記述されており、北極環境に関する教育や知識の普及において有益であると判断して、SWIPA レポート翻訳監修委員会を設置して和訳を行った。日本語版は、<http://www.amap.no/documents/doc/climate-change-in-the-arctic-a-hot-topic/101> からダウンロードできる。

9) ニュースレターの発行

第 2 期情報・コミュニケーション WG により、コミュニケーションの活性化を目的とし、ニュースレターの制作が決定され、2015 年 3 月に第 1 号を発行した。JCAR の活動報告や、北極に関連する会合の参加報告などを主に WG が構成と編集を担当している。2015 年 7 月には第 2 号が発行された。ニュースレターの発行は第 3 期情報・コミュニケーション WG に引き継がれ、2015 年 12 月には第 3 号が発行された。今後は、更なるコンテンツの充実を図りつつ継続していく予定である。

JCAR ニュースレターは登録会員へのメール配信とウェブサイトからの公開を行っている。

<http://www.JCAR.org/newsletter/>

10) 人材育成

第 3 期人材育成 WG において、若手研究者に向けた情報ページが作成された。

(<http://www.wice.lowtem.hokudai.ac.jp/~sugishin/JCAR/information/information.html>)。

国際的なサマースクールやフェロシッププログラム、就職に関する情報などがリストアップされており、人材育成に大きく貢献している。

国際的には、IPY2007/2008 時に IASC のバックアップにより、APECS: Association of Polar Early Career Scientists (極域若手研究者連合) が組織された。若手研究者が中心となって、研究や就職機会の情報の交換などを活発に行っており、ASSW といった国際会議開催時に独自のワークショップを開いたり、著名な研究者を招いてキャリアアップについてのパネルディスカッションを行ったりしている。しかしながら、日本ではこのような活動は活発には行われてこなかった。そこで、人材育成 WG 協力の元、APECS Japan 設立に向けての活動が開始され、2015 年にソフィア大学 (ブルガリア、ソフィア) において開かれた APECS World Summit 2015 へ代表 1 名を派遣した。日本独特の研究環境に起因する問題はまた山積しているが、学会イベントや、ASSW への派遣など、今後も人材育成検討 WG を通じ継続して APECS Japan の活動をサポートしていく。

(4) 事務局の機能について

JCAR 事務局は設立以降、JCAR の運営を支えてきた。JCAR 設立後、定期的に運営委員会が滞りなく開催されたことは、事務局なしにはあり得なかったであろう。また、登録会員に向け、会合情報や研究報告など、北極環境研究に関する様々な情報をメールにて配信している。これまで 500 件近くの情報を配信しており、情報の周知に一役買って来た。

上記でも述べた『北極環境研究の長期構想』の作成においては、20 回以上に及ぶ WG 会合をはじめ、3 回の全体ワークショップなど、数多くの会合の開催支援を行った。また、編集作業も事務局にて行った。その結果、様々な専門分野の研究者が協力と交流に大きく貢献した。

このように、様々な活動に携わり、JCAR も少しずつ周知され、JCAR 設立当初 241 人であった登録会員が、4 年を経過した現在、400 名を超えた。より大きな集団にするため、人文社会科学系の研究者や工学系の研究者の取り込み、南極関連の研究者への働きかけを検討している。

以上の実績を見ても、本事業のサポートをうけ、事務局が作られ、活動費を得られたことは北極環境研究コミュニティー

の活動に大きく影響を与えた。本事業なしには、短期のうちにこれだけの実績を成し遂げることは不可能であったと言っても過言ではない。

(5) 今後の取り組み

最近の北極を取り巻く情勢の変化や、これまでの成果が評価され 2015 年から北極域研究推進プロジェクト (ArCS) が始まるなど、研究者コミュニティが果たすべき役割は大きくなっている。これらの変化を踏まえ、北極環境研究に携わる様々な学問分野の研究者を結集し、ボトムアップでコミュニティの意見集約するシステムを有し、アカデミックな提言を積極的に行うことができる、会員及び関係機関にとって魅力的な組織となり、北極環境研究の発展に寄与することを継続して目指す。

第3期 (2015-16) 運営委員会や体制検討 WG においてその具体的な事項について検討している。以下にその検討項目を列記する。

- ・ 異分野間の交流のために独自の研究集会を開催する
- ・ JpGU 「北極域の科学」セッションと全体集会の継続開催
- ・ 北極関連会合の共催を積極的に行う
- ・ Researchmap を活用した会員相互の意見・情報交換と情報の発信
- ・ Journal (雑誌) の発行
- ・ 国内外の諸学術団体等との交流・協力と、国際集会の運営や国際協力・連携
- ・ APECS の国内活動サポートや ArCS、北極域研究共同推進拠点 (J-ARC Net) との連携

8. 国際連携推進

整備機関：国立極地研究所
執筆者：事務局

(1) 目的

北極研究体制に必要な不可欠な国際連携の強化とこれを支える人材の育成を図ることを目的として北極圏に位置する関係国の主要研究機関への優れた若手研究者の派遣を支援し、国際共同研究に参画する機会等を提供した。これにより我が国における北極環境研究の将来を担う国際的視野に富む有能な研究者を養成するとともに、新たな人的ネットワークを構築し、次代へ継続する北極研究体制の創出に貢献した。

(2) 実施体制

2013年7月に行われた北極研究戦略小委員会の事前評価を経て、2014年度に国際連携推進費が新たに認められ、北極環境研究若手研究者派遣支援事業、拠点整備、専門家派遣を実施した。

1) 北極環境研究若手研究者派遣支援事業

実施・募集：国立極地研究所国際北極環境研究センター
募集・審査：北極環境研究コンソーシアム（JCAR）人材育成ワーキンググループ
協力機関：アメリカ・アラスカ大学、カナダ・ArcticNet 参加機関

2) 拠点整備

①NIPR-Office in IARC（NIPR-Office）

実施機関：国立極地研究所国際北極環境研究センター
協力機関：アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター（IARC：International Arctic Research Center）
所在地：アメリカ・アラスカ州フェアバンクス市
整備内容：2014年7月からIARCとの契約によりIARC内に4つの執務ブースを借用。IRACに滞在する日本人研究者へオフィススペースとして提供した。

②Sophie Plaza Apartment（SPA-NIPR）

実施機関：国立極地研究所国際北極環境研究センター
協力機関：IARC
所在地：アメリカ・アラスカ州フェアバンクス市
整備内容：IARC管理下にあるフェアバンクス市内のソフィアアパートメント（2ベッドルーム・定員3名）1室を借り上げ、アラスカに滞在する日本人研究者に宿泊施設として居室を提供した。

3) 国際会議への専門家派遣

近年の北極を取り巻く状況の変化に対応すべく、諸会議へ専門家を派遣した。

実施機関：国立極地研究所国際北極環境研究センター

(3) 実施状況

1) 北極環境研究若手研究者派遣支援事業

2014年度に10名の若手研究者の派遣支援を実施した。対象機関はアラスカ大学フェアバンクス校、カナダのArcticNet参加大学等であった。整備時間は短かったが、本制度の継続を求める声が大きく、研究支援として実りの多い事業であった。

① 公募・審査

募集要項に基づき、3回の公募と審査を行った。

	申請期間	審査結果通知日
第1回公募	平成26年5月中旬	平成26年6月6日
第2回公募	7月上旬	8月8日
第3回公募	10月上旬	11月7日

② 申請と採択状況

各回別

	申請数	採択数	不採択数
第1回公募	3	2	1
第2回公募	9	6	3
第3回公募	4	4	0
合計	16	12	4

国別

	申請数	採択数	不採択数
アメリカ	12	8	4
カナダ	4	4	0
合計	16	12	4

③ 採択者一覧

次ページの表に掲載

④ サポート制度の整備

派遣支援者の現地（アラスカ）での活動支援のため、IARCに所属する日本人研究者の協力を得た。

2) 拠点整備

① NIPR-Office

北極環境研究若手研究者派遣支援事業による派遣支援者を含めた我が国の北極研究に携わる研究者にオフィススペースとして提供した。

利用実績：8件 504人日

(2014年8月11日～2015年5月26日)

② SPA-NIPR

フェアバンクスを訪れる北極環境研究若手研究者派遣支援事業による派遣支援者を含めた我が国の北極研究に携わる研究者に宿泊施設として提供した。

利用実績：15件 358人日

(2014年7月3日～2015年4月21日)

3) 国際会議への専門家派遣

①派遣内容

北極評議会 (AC : Arctic Circle) 等北極研究に関する国際会議等へ研究者等を機動的に派遣し、我が国の研究知見を持って国際的な貢献を行った。主な派遣会議は右記の通りである。

・ AC 北極圏植物相・動物相保存作業部会

(CAFF : Conservation of Arctic Flora and Fauna)

開催地：ケンブリッジベイ (カナダ)

2014年8月 1名

・ AC 北極圏監視評価プログラム作業部会 (AMAP : Arctic Monitoring and Assessment Programme)

開催地：ホワイトホース (カナダ)

2014年9月 3名

・ Arctic Circle

開催地：レイキャビック (アイスランド)

2014年10月 1名

・ Arctic Biodiversity Congress (CAFF 主催)

開催地：トロンハイム (ノルウェー)

2014年12月 1名

(派遣支援開始日順)

通し番号	氏名	所属機関	役職	派遣先	受入担当者	派遣支援期間	研究計画名	申請回
1	紺屋 恵子	海洋研究開発機構 地球表層循環分野	技術研究員	アメリカ アラスカ大学 フェアバンクス校 Geophysical Institute	Regine Hock	2014年7月5日～ 2014年8月9日	グリーンランド北東部水圏群の近年の質量収支	第1回
2	伊勢 武史	京都大学 フィールド科学教育研究センター	准教授	カナダ カルガリー大学 Ecosystem and Public Health	Alessandro Massolo	2014年9月21日～ 2014年10月6日	フィールド観測・リモートセンシング・シミュレーションの統合に向けて：高効率の光学観測を用いたデータ取得	第2回
3	藤野 匠	京都大学大学院情報学研究所	修士課程1年	アメリカ アラスカ大学 フェアバンクス校 Institute of Arctic Biology	Knut Kielland	2014年10月9日～ 2015年3月31日	北方林における植物の光合成の変化：冬季は完全な休眠期か？	第2回
4	星 一平	新潟大学大学院自然科学研究科	博士前期課程1年	カナダ マニトバ大学 Center for Earth Observation Science	Masayo Ogi	2014年11月1日～ 2015年1月31日	北半球高緯度の海水域変動による大気循環場への影響	第2回
5	箕輪 昌紘	北海道大学大学院環境科学院	博士後期課程1年	アメリカ アラスカ大学 フェアバンクス校 Geophysical Institute	Martin Truffer	2014年12月1日～ 2015年2月28日	北極圏におけるカービング氷河と海洋と湖との相互作用の解明	第2回
6	松野 孝平	国立極地研究所 国際北極環境研究センター (受入機関：北大水産科学研究院)	特任研究員	カナダ ラバール大学 Department of Biologie	Louis Fortier	2014年12月8日～ 2014年12月26日	西部北極海における動物プランクトンの経年変動およびその影響	第3回
7	Nuerasimuguli Almasi	国立極地研究所 国際北極環境研究センター (受入機関：北見工業大学)	特任研究員	アメリカ アラスカ大学 フェアバンクス校 IARC	Larry Hinzman	2015年1月15日～ 2015年4月15日	融雪及び春の凍結地表面変化過程に関するリモートセンシング研究	第3回
8	大東 忠保	名古屋大学 宇宙地球環境研究所	特任助教	カナダ マギル大学 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences	Pavlos Kollias	2015年2月24日～ 2015年8月24日	レーダーによって観測される北極域混層雲の特徴とその発生環境場	第2回
9	大野 浩	北見工業大学社会環境工学科	助教	アメリカ アラスカ大学 フェアバンクス校 IARC	Larry Hinzman	2015年2月26日～ 2015年3月19日	永久凍土地下水の物理化学的解析：エドマ(アイスコンプレックス)の構造および形成過程解明に向けて	第2回
10	北原 裕二郎	富山大学大学院理工学教育部	修士課程1年	アメリカ アラスカ大学 フェアバンクス校 IARC	Larry Hinzman	2015年3月1日～ 2015年5月30日	永久凍土域での地上集中観測に基づいた積雪過程のパラメタリゼーションの高精度化	第3回
11	相澤 拓郎	筑波大学生命環境科学研究科	博士後期課程3年	アメリカ アラスカ大学 フェアバンクス校 IARC	Larry Hinzman	辞退	北極低気圧と北極振動に関する研究	第1回
12	藤原 周	国立極地研究所 北極観測センター (受入機関：北大水産科学研究院)	特任研究員	アメリカ アラスカ大学 フェアバンクス校 Institute of Marine Science	Terry Whiteledge	辞退	チャクチャ海南部生物学的ホットスポットにおける底層溶存酸素濃度と基礎生産量の関係の詳細	第3回

北極環境研究若手研究者派遣支援事業 採択者一覧

第五章

第5章

結語

全体まとめと今後の展望

プロジェクトマネージャ：山内 恭

全体まとめ

GRENE 北極気候変動研究事業は、本年3月末をもって終了した。第2章から3章、4章がその成果のエッセンスである。第2章で見ていただいたように、掲げられた戦略研究目標に向け多くの科学的成果が得られたことで、目標が達成されたものと考えられる。特に、目標毎にバラバラな成果が並んだ訳ではなく、各々が有機的関係をもって関連していることも読み取っていただけかと思う(第2章図2.5.5)。北極温暖化増幅について、相当程度の知見をまとめることができた。さらに第3章では、目標達成の基礎固めとして貢献した多くの高度な研究成果を得ており、北極研究の広がりを見せている。そして第4章に記した研究基盤は本事業遂行にあたって重要なベースを与えたものであり、雲レーダーや北極域データアーカイブ(ADS)など、一部は今後も引き続き研究に役立たせるものとなっている。

研究業績一覧で見ていただけるように、本事業によって得られた成果は、出版された査読付き原著論文だけでも360編を越える数となっており、多くは一流の国際誌に掲載されており、大変優れた業績を得ることができたと評価している。そして、未だ論文として投稿されていない成果も多く散見し、今後数年間は、これらの成果発信が続くものと期待している。観測・解析データの多くはADS上に公開されているので、今後は本事業のメンバー以外によっても新しい視点での研究がなされることも十分に期待できる。一般向けの講演や新聞・ラジオ・テレビ等の記事、プレスリリースの数の多さも特徴的で、単に専門的な発信に止まらず、アウトリーチ活動も極めて活発であったことが証明される。期間中、多くの特任研究員が研究に従事することで事業の研究水準が高められたとともに、若手研究者への研究環境の提供の役割を果たした。そしてこれらの研究員が、新しい次の職に移っていくことで、人材育成の観点からも大いに貢献した。事業後半の1年間ではあるが、若手研究者の海外派遣を実施する枠組みが得られたことで、人材育成にも国際交流にも貢献することができた。

国際交流の面からは、さらに富山での北極科学サミット週間ASSW 2015/ 国際北極科学シンポジウムISAR-4/ ICARPIIIの開催があった。その成功は、本事業の進展に裏付けられていたと言えよう。GRENEのセッションがもたれたとともに、全体会議でのキーノート講演、その他多くのセッションでの本事業の成果が発表されたことは、わが国北極研究のプレゼンスを内外にしめすことになったと自負している。

観測活動も多岐にわたり、環北極に観測網を展開することができた。これなどは、北極圏の一国では成されない幅の広い広域の活動がなしとげられたもので、むしろ非北極圏国であるわが国ならではの特徴となった。国立極地研究所が古くから観測所を維持してきたスバルバル・ニーオルスン観測基地、フィンランドの観測網、北海道大学や名古屋大学、海洋研究開発機構が長く観測フィールドとしてきたシベリア、東シベリア域、多くの機関が観測・研究活動を続けてきていたアラスカ大学国際北極圏研究センターを含むアラスカ域、同様に分散・分散的ではあったが多くの機関がフィールドとしてきたカナダ北部、そして北海道大学や気象研究所などが足跡を残していたグリーンランド。いずれもが、密接な国際連携によって実現したものである。また、「みらい」や「おしよる丸」で航海した北極海開水域、カナダや韓国砕氷船に同乗しての海水域航海。さらには、商業航空機による温室効果気体の観測も行った。ということで、オールジャパンで統合して活動したために、その及ぶ範囲は北極全域と極めて広がった。全ての観測網をこのまま、今後も継続的に維持し続けることは不可能であろうが、代表的な場所、北極研究に要と成る場所はより効率的な共同研究拠点として維持・発展させていく必要がある。

わが国初の分野横断、観測-モデル連携の融合的ネットワーク型北極研究を、オールジャパンに近い形で実現できた。特に、トップダウンの目標設定に対し、ボトムアップの研究課題で答えるという、プロジェクト研究の理想的な形式をとるユニークなものとすることができたことは幸いであった。これらは、形にはなり難いが、ある意味、本事業で最も貴重な、誇れる成果ではないかと思っている。

展望

今後、これらの研究成果の上に、さらなる研究を積み上げて進展して行くことを期待したい。具体的な研究内容については、既に第2章V.「まとめと今後の課題」に記したので繰り返さないが、今後の方向性・可能性について記すこととする。モデリングにおいては、確度の高い観測から得られた様々な気候プロセスを組み入れ、新しい地球システムモデルを構築できることを期待する。観測に関しては、既に記した様に、限られた点で良いから代表性のある要となる観測拠点を維持し、モニタリング的な長期観測を継続したい。特に今後、北極海航路や資源探査など経済的活動が盛んになることに伴う脆弱な北極環境の監視という意味からも、環境汚染物質も含めたモニタリングが望まれる。北極圏に領土を持たない非北極圏国としてはなかなか難しい課題ではあるが、わが国の得意分野でもあり、地道な継続観測が最後は重要になってくる。

いまもって観測点の空白となっている北極海中央部の観測実現も課題である。過去、ソ連・ロシアは海氷上に漂流基地を作って観測を担った。1937年の第1号(NP-1)以来、最近のNP-41まで、欠測期間はあるものの、長年にわたって広い北極海から貴重な観測データを提供してきた。氷山を使った(アメリカによる氷島 T-3 など)例もあるが、今や温暖化の中、氷上基地は直に寿命になりあまり有効ではない。最近、船舶を氷漬けにして長期観測を行う例が多い。カナダ砕氷船を使った1997/98年のアメリカを中心としたSHEBA(北極海表面熱収支計画)に始まり、大型のヨット(Tara, 2007; Vagabond)を使ったヨーロッパ連合のプロジェクト DAMOCLES(長期環境研究のための北極モデリング・観測可能性開発)、2015年半年間のノルウェー耐氷船ランセを使った観測(N-ICE 2015)、そして今2018年後半に計画されているドイツ砕氷船Polarsternを1年間氷に閉じ込める計画(MOSAiC=北極気候研究のための分野横断漂流観測基地計画)などがある。わが国では、北極海観測用の砕氷船の導入について根強い希望があるが、一方、地味ではあるが、このような氷に閉じ込められる船舶の用意・提供も科学的には価値が高いのではないだろうか。一国だけでは無理が多いかもしれない。むしろ国際協力による、かような観測を主導することを考えるべきではないか。そういう目的では、南極観測の任務を終えた旧砕氷船を活用する可能性もあると考えられる(初代「しらせ」は手遅れであるが、各国更新は続いているので候補は少なくない)。さらには、海氷ブイと自立航行型潜水艇(AUV、ROV)を合体したような、ブイよりも大型の「自動観測漂流基地」(Automatic Drifting Station)を開発・展開することがあり得る方向ではないだろうか。海氷の上でも良いし、開水面でも使える海洋観測、気象観測装置を併設した、究極的には自動高層ゾンデ放球装置も備えたものが望ましい。わが国の進んだ技術の貢献する方向かと思う。しかし、旧船舶の利用にしろ、自動観測漂流基地にしろ、その設置、運用、補給には砕氷船が欠かせない。氷上基地を砕氷船自身で担うことも一方向であろう。いずれにしろ、自前の砕氷船が必須である。国際的にも、極めて高い要請がある。

わが国の貢献という点からは、もう一つ、GCOM-W衛星搭載マイクロ波放射計AMSR2に触れざるを得ない。古くは1980年代のわが国最初の地球観測衛星であるMOS-1に搭載されたマイクロ波放射計MSRに端を発する測器であるが、連続とわが国の技術が継承発展されてきたもので、いまや世界中で北極研究に欠かせない基本的な海水分布を導出する手段となっている。本事業でも、各課題の中でそのデータが使われてきた。この衛星・測器は2012年の打ち上げ以来活躍してきているものだが、その後継機の計画が決まっていない。設計寿命5年なら

ば直に、かつてのAMSR-Eは9.5年の長寿命を保ったことを考慮に入れても、なお、早急に開発を始め、衛星計画をかためなければ成らない時である。しかるに、わが国の予算状況の厳しさから、未だ計画が定まっていないことは由々しき事態である。わが国の北極への最大の貢献とも言えるこの衛星測器を今後も引き続き実現することが極めて緊急度の高い課題である。

本事業の後継としては、すでに北極域研究推進プロジェクト(ArCS)が始まっている。これは単に自然科学の成果を上げるだけではなく、人文・社会系の学問とも連携し、得られた科学的成果をより分かりやすく一般社会に還元し、北極域に生きる先住民をはじめ、産業界、政府にも役立つよう情報提供していくという役割を担う課題である。従って、科学の部分は、必ずしも本事業の分野全てを受け継ぐものではなく、一部を発展的に受け継いだものと言える。その意味から、ArCSにとどまらず、他にも本事業の科学を受け継ぐ研究が多く出現する事が待ち望まれる。

北極環境研究コンソーシアム(JCAR)について、本事業開始前は、北極研究計画の樹立などの役割を期待され、その役割は大変重く位置づけられていた(第1章参照)。本格的に発足後、本事業開始とともに本事業の一部としての支援を受け、わが国初の北極研究者を集めたコミュニティーの代表組織として活動し、数々の貴重な働きをなしてきた。今後も、貴重な役割に期待し、大規模プロジェクトからは支援が望まれる。今、本事業を終わるにあたり、改めてJCAR自身の今後の方向性も考えていかねばならない。学会的な組織を目指し、より独立性の高い組織としていこうという動きがある。これも貴重な方向性であるが、経済的な裏付けなどに確かな保証は得られにくい。ArCSが始まって、その指向もあり、多くの目が北極に向けられる必要が求められる中、JCARもさらなる役割が期待されよう。JCARを単なる研究者集団ではなく、もっと広い、北極に関心がありその影響を受ける人々に加わってもらうのはどうであろうか。即ち、北極海航路や資源利用に関心がある経済界、わが国北極政策の立場から密接に関係する政・官界、そして関心の強い一般社会の人々まで含む、より広い北極コミュニティーの集合体とする。そのことで、個人会員以外からは賛助会員として経済的支援を期待できることも経済的基盤を確立し独立の組織として生きていく上で大きい支えではないだろうか。情報発信・提供から意見集約など、働きは公汎に広がろう。市民参加の新しい学の創出にもつながろう。学会化とは幾分異なる方向ではあるが、このような側面を兼ね備えることも一つの方向ではないだろうか。事業報告としては趣旨にもとめるものかもしれないが、これからの北極研究の展望としての提案である。

最後にあたり、本事業で築いてきた、分野横断、観測モデル連携の北極研究グループを大切にしていきたい。わが国の中で、これだけ多くの分野が集まることができたのは前例のない、画期的なことであり、諸外国にも例を見ない。まさに、北極研究だから実現したのであり、北極研究にこそ、その意義が深い。これまで、わが国の行ってきたものは「国内プロジェクト」が中心で、国際プロジェクトであっても一員として参加するのにとどまっていた。今後は、GRENE 北極気候変動研究事業で築いた、横断的な貴重な繋がりを Legacy として大切にしつつ、わが国がリードする真の「国際プロジェクト」を樹立することも目指して、さらなる北極研究を進めていただきたい。

研究業績

研究業績

下線は本事業に参加した研究代表者、研究分担者、特任研究員等を示す。末尾の○数字は論文が特に関係する研究課題番号等を示す。

2016年8月現在

1. 原著論文 (査読有)

- Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kawamura, K., Raymo, M., Okuno, J., Takahashi, K., Blatter, H., 2013. Insolation driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice sheet volume. *Nature*, 500, 190–193. ①
- 阿部彩子, 斎藤冬樹, 吉森正和, 小室芳樹, 大石龍太, 渡部雅浩, 大垣内るみ, 高橋邦夫, 鈴木香寿恵, 川村賢二, 野沢徹, 2013. 気候変化における北極と南極の応答と役割: 過去と将来. *天気*, 60, 901-908. ①
- Abe, Y., Natsuike, M., Matsuno, K., Terui, T., Yamaguchi, A., Imai, I., 2013. Variation in assimilation efficiencies of dominant *Neocalanus* and *Eucalanus* copepods in the subarctic Pacific: consequences for population structure models. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 449C, 321-329, doi:10.1016/j.jembe.2013.10.023. ⑥
- Adachi, Y., Yukimoto, S., Deushi, M., Obata, A., Nakano, H., Tanaka, T.Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Shindo, E., Tsuji, H., Mizuta, R., Yabu, S., Koshiro, T., Ose, T., Kitoh, A., 2013. Basic performance of a new earth system model of the Meteorological Research Institute (MRI-ESM1). *Pap. Meteor. Geophys.*, 64, 1-18. ①
- Aguilar-Islas, A.M., Rember, R., Nishino, S., Kikuchi, T., Itoh, M., 2013. Partitioning and lateral transport of iron to the Canada Basin. *Polar Science*, 7, 2, 82-99, doi:10.1016/j.polar.2012.11.001. ⑥
- Aizawa, T., Tanaka, H.L., 2016. Axisymmetric structure of the long lasting summer Arctic cyclones. *Polar Science*, 10, 192-198, in press. ③
- Aizawa, T., Tanaka, H.L., Saitoh, M., 2013. Rapid arctic cyclogenesis simulated by the cloud resolving global model NICAM. *Meteor. Atmos. Phys.*, 126:105-117. doi:10.1007/s00703-013-0272-6. ③
- Akiyoshi, H., Nakamura, T., Miyasaka, T., Shiotani, M., Suzuki, M., 2016. A nudged chemistry-climate model simulation of chemical constituent distribution at northern high-latitude stratosphere observed by SMILES and MLS during the 2009/2010 stratospheric sudden warming. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 1361-1380. ①
- Alimasi Nuerasimuguli, 榎本浩之, Jessica Cherry, Larry Hinzman, 亀田貴雄, 杉浦幸之助, 堀 雅裕, 2016. 航空機搭載 6GHz マイクロ波放射計による冬季アラスカの地表面状態の観測. *雪氷*, 78 (4), 185-203. ④
- Amano-Sato C, Akiyama, S., Uchida, M., Shimada, K., Utsumi, M., 2013. Archaeal distribution and abundance in water masses of the Arctic Ocean, Pacific sector. *Aquat Microb Ecol*, 69, 101-112. ⑦
- Amamo-Sato, C., Akiyama, S., Uchida, M., Li, Q., Utsumi, M., 2013. Archaeal and bacterial abundance, cell volume, and biomass in the Pacific sector of the Arctic ocean. *J. Bioind. Sci.*, 2, 1-7. ②
- Ando, Y., Ogi, M., Tachibana, Y., 2015. Abnormal winter weather in Japan during 2012 was controlled by large-scale atmospheric and small-scale oceanic phenomena. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 54–63. doi:10.1175/MWR-D-14-00032.1. ③
- Anna K., Liljedahl, J., Boike, Daanen, Fedorov, A. N., Frost, Grosse, G. V., G., Hinzman, L. D., Iijima, Y., Jorgenson, J. C., Matveyeva, N., Necsoiu, M., Raynolds, M. K., Romanovsky, V. E., Schulla, J., Tape, K. D., Walker, D. A., Wilson, C. J., Yabuki, H., Zona, D., 2016. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience* 9, doi:10.1038/ngeo2674. ADS
- Aoki, T., Matoba, S., Yamaguchi, S., Tanikawa, T., Niwano, M., Kikuchi, K., Adachi, K., Uetake, J., Motoyama, H., Hori, M., 2014. Light-absorbing snow impurity concentrations measured on Northwest Greenland ice sheet in 2011 and 2012, *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 21-31. doi: 10.5331/bgr.32.21. ④
- Aoki, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Matoba, S., Uetake, J., Masuda, K., Ishimoto, H., 2013. Numerical Simulation of Spectral Albedos of Glacier Surfaces Covered with Glacial Microbes in Northwestern Greenland. *Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean (IRS2012)*, Robert Cahalan and Jürgen Fischer (Eds), AIP Conf. Proc. 1531, 176. doi: 10.1063/1.4804735. ④
- Applegate, P.J., Kirchner, N., Stone, E.J., Keller, K., Greve, R., 2012. An assessment of key model parametric uncertainties in projections of Greenland Ice Sheet behavior. *The Cryosphere*, 6 (3), 589-606. ④
- Arai, M., Tayasu, I., Komatsuzaki, M., Uchida, M., Kaneko, N., 2013. Changes in soil aggregate carbon dynamics under no-tillage with respect to earthworm biomass revealed by radiocarbon analysis. *Soil Tillage Res.*, 126, 42-49. doi: 10.1016/j.still.2012.07.003. ②
- Belikov, D.A., Bril, A., Maksyutov, S., Oshchepkov, S., Saeki, T., Takagi, H., Yoshida, Y., Aoki, S., Yokota, T., 2014. GOSAT retrievals and NIES transport model simulation of column-averaged CO₂ concentrations in the subarctic. *Polar Science*, 8, 129-145. doi:10.1016/j.polar.2014.02.002. ⑤
- Belikov, D.A., Maksyutov, S., Krol, M., Fraser, A., Rigby, M., Bian, H., Agusti-Panareda, A., et al., 2013. Off-line algorithm for calculation of vertical tracer transport in the troposphere due to deep convection. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1093-1114. doi:10.5194/acp-13-1093-2013. ⑤
- Belikov, D.A., Maksyutov, S., Sherlock, V., S., Aoki, S., Deutscher, N.M., Dohe, S., Griffith, D., Kyro, E., et al., 2013. Simulations of column-average CO₂ and CH₄ using the NIES TM with a hybrid sigma–isentropic (σ - θ) vertical coordinate. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1713-1732. doi:10.5194/acp-13-1713-2013. ⑤
- Bindschadler, R.A., Nowicki, S., Abe-Ouchi, A., Aschwanden, A., Choi, H., Fastook, J., Granzow, G., Greve, R., Gutowski, G., Herzfeld, U.C., Jackson, C., Johnson, J., Khroulev, C., Levermann, A., Lipscomb, W.H., Martin, M.A., Morlighem, M., Parizek, B.R., Pollard, D., Price, S.F., Ren, D., Saito, F., Sato, T., Seddik, H., Seroussi, H., Takahashi, K., Walker, R., Wang, W.L., 2013. Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea level (the SeaRISE project). *Journal of Glaciology*, 59 (214), 195-224. ①④
- Bohn, T.J., Melton, J.R., Ito, A., Kleinen, T., Spahni, R., Stocker, B.D., Zhang, B., Zhu, X., Schroeder, R., Glagolev, M.V., Maksyutov, S., Brovkin, V., Chen, G., Denisov, S.N., Eliseev, A.V., Gallego-Sala, A., McDonald, K.C., Rawlins, M.A., Riley, W.J., Subin, Z.M., Tian, H., Zhuang, Q., Kaplan, J.O., 2015. WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia. *Biogeosciences*, 12, 1907-1973. doi:10.5194/bgd-12-1907-2015. ⑤
- Buizert, C., Martinerie, P., Petrenko, V.V., Severinghaus, J.P., Trudinger, C.M., Witrant, E., Rosen, J.L., Orsi, A.J., Rubino, M., Etheridge, D.M., Steele, L.P., Hogan, C., Laube, J.C., Sturges, W.T., Levchenko, V.A., Smith, A.M., Levin, I., Conway, T.J., Dlugokencky, E.J., Lang, P.M., Kawamura, K., Jenk, T.M., White, J.W.C., Sowers, T., Schwander, J., Blunier, T., 2012. Gas transport in firn: multiple-tracer characterisation and model intercomparison for NEEM, Northern Greenland. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 4259-4277. ⑤
- Cho, J., Kim, W., Miyazaki, S., Komori, D., Kim, H., Han, K. S., Kanae, S., Oki, T., 2013. Difference in the Priestley–Taylor coefficients at two different heights of a tall micrometeorological tower. *Agric. For. Meteorol.*, 180, 97-101. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.05.007. ②
- Choi, M., Chung, H., Yamaguchi, H., Nagakawa, K., 2014. Arctic sea route path planning based on an uncertain ice prediction model. *Cold*

- Regions Science and Technology, 109, 61-69. ⑦
- Choi, M., Chung, H., Yamaguchi, H., De Silva, L.W.A., 2013. Application of Genetic Algorithm to ship route optimization in ice navigation. Proc. 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland. 15p. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756. ⑦
- Clinton, J.F., Nettles, M., Walter, F., Anderson, K., Dahl-Jensen, T., Giardini, D., Govoni, A., Hanka, W., Lasocki, S., Lee, W.S., McCormack, D., Mykkelleit, S., Stutzmann, E., Tsuboi, S., 2013. Real-time geophysical data enhance Earth system monitoring in Greenland, Eos Trans., AGU, 95 (2):13-14. doi:10.1002/2014EO020001.2014. ④
- Cook, J., Edwards, A., Takeuchi, N., Irvine-Fynn, T., 2015. Cryoconite The dark biological secret of the cryosphere. Progress in Physical Geography, 40,66-111. doi:10.1177/0309133315616574. ④
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2016. An assessment of short-term sea ice predictions in the Northern sea route, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31–June 3, 7. ⑦
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., Ono, J., 2015a. Ice-ocean coupled computations for the sea ice prediction to support ice navigation in the Arctic Ocean. Polar Research, 34, 25008. http://dx.doi.org/10.3402/polar.v34.25008, 1-18. ⑦
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2015b. Mechanisms of interaction between mesoscale ocean eddies and sea ice in high-resolution ice-ocean coupled model of the Laptev Sea in summer. Proc. 23rd Intern. Conf. Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC'15), June 14-18, Trondheim, Norway, ISSN 0376-6756, 10p. ⑦
- Ershova, E. A., Hopcroft, R. R., Kosobokova, K. N., Matsuno, K., Nelson, R. J., Yamaguchi, A., Eisner, L. B., 2015. Long-Term Changes in Summer Zooplankton Communities of the Western Chukchi Sea, 1945-2012, Oceanography, 28, 3, 100-115. doi: 10.5670/oceanog.2015.60. ⑥
- Fedorov, A.N., Gavriliyev, P.P., Konstantinov, P.Y., Hiyama, T., Iijima, Y., Iwahana, G., 2014. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. Ecohydrology, 7, 188-196. doi: 10.1002/eco.1378. ②
- Fedorov, A.N., Ivanova, R.N., Park, H., Hiyama, T., Iijima, Y., 2014. Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia. Polar Science, 8, 114-128. doi: 10.1016/j.polar.2014.02.001. ②
- Fransson, A., Chierici, M., Nomura, D., Granskog, M.A., Kristiansen, S., Martma, T., Nehrke, G., 2015. Effect of glacial drainage water on the CO₂ system and ocean acidification state in an Arctic tidewater-glacier fjord during two contrasting years. J. Geophys. Res., 120, 2413-2429. doi:10.1002/2014JC010320. ⑦
- Fujiwara, A., Hirawake, T., Suzuki, K., Eisner, L., Imai, I., Nishino, S., Kikuchi, T., Saitoh, S.-I., 2016. Influence of timing of sea ice retreat on phytoplankton size during marginal ice zone bloom period on the Chukchi and Bering shelves, Biogeosciences, 13, 115-131. doi:10.5194/bg-13-115-2016. ⑥
- Fujiwara, A., Hirawake, T., Suzuki, K., Imai, I., Saitoh, S.-I., 2014. Timing of sea ice retreat can alter phytoplankton community structure in the western Arctic Ocean. Biogeosciences, 11, 7, 1705-1716. ⑥
- Fujiwara, A., Hirawake, T., Suzuki, K., Saitoh, S.-I., 2011. Remote sensing of size structure of phytoplankton communities using optical properties of the Chukchi and Bering Sea shelf region. Biogeosciences, 8, 3567-3580. ⑥
- 古市正彦、大塚夏彦, 2016. コンテナ船の超大型化が北極海航路(NSR)コンテナ輸送の競争力に及ぼす影響, 運輸政策研究学術研究論文, 19 (1). ⑦
- Furuichi, M., Otsuka, N., 2014. Proposing a common platform of shipping cost analysis of the Northern Sea Route and the Suez Canal Route. Maritime Economics & Logistics, 17, 9-31, 10.1057/mel.2014.29. ⑦
- Galanin, A.A., Lytkin, V.M., Fedorov, A.N., Kadota, T., 2013. Glacier reduces in Suntar-Hayata Range and methodological aspects of their estimations. Ice and Snow, 4 (124), 30-42. ④
- Galanin, A.A., Lytkin, V.M., Fedorov, A.N., Kadota, T., 2014. Age and extent of the last glacial maximum in Suntar-Hayata Range based on lichenometry and Schmidt Hammer test. The Earth Cryosphere, XVIII, 2, 72-82. ④
- Ghosh, A., Patra, P.K., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Etheridge, D.M., Sugawara, S., Kawamura, K., Miller, J.B., Dlugokencky, E.J., Krummel, P.B., Fraser, P.J., Steele, L.P., Langenfelds, R.L., Trudinger, C.M., White, J.W.C., Vaughn, B., Saeki, T., Aoki, S., Nakazawa, T., 2015. Variations in global methane sources and sinks during 1910-2010. Atmos. Chem. Phys., 15, 2595-2612. ⑤
- Gillet-Chaulet, F., Gagliardini, O., Seddik, H., Nodet, M., Durand, G., Ritz, C., Zwinger, T., Greve, R., Vaughan, D.G., 2012. Greenland ice sheet contribution to sea-level rise from a new-generation ice-sheet model, The Cryosphere, 6(6), 1561-1576. ④
- Goto, D., Morimoto, S., Aoki, S., Nakazawa, T., 2013a. A high-precision continuous measurement system for the atmospheric O₂/N₂ ratio at Ny-Ålesund, Svalbard and its preliminary observational results. Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.) 57 (1), 17–27. ⑤
- Goto, D., Morimoto, S., Ishidoya, S., Ogi, A., Aoki, S., Nakazawa, T., 2013b. Development of a high precision continuous measurement system for the atmospheric O₂/N₂ ratio and its application at Aobayama, Sendai, Japan. J. Meteorol. Soc. Japan, 91, 179-192. ⑤
- Graven, H.D., Keeling, R.F., Piper, S.C., Patra, P.K., Stephens, B.B., Wofsy, S.C., Welp, L.R., Sweeney, C., Tans, P.P., Kelley, J.J., Daube, B.C., Kort, E.A., Santoni, G.W., Bent, J.D., 2013. Enhanced seasonal exchange of CO₂ by northern ecosystems since 1960. Science, 341, 1085-1089. ⑤
- Greve, R., Herzfeld, U.C., 2013. Resolution of ice streams and outlet glaciers in large-scale simulations of the Greenland ice sheet, Annals of Glaciology, 54 (63), 209-220. ④
- Gueguen, C., Itoh, M., Kikuchi, T., Eert, J., Williams, W.J., 2015. Variability in dissolved organic matter optical properties in surface waters in the Amerasian Basin. Front. Mar. Sci., doi:10.3389/fmars.2015.00078. ⑥
- Gueguen, C., McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., Itoh, M., Narita, H., Nishino, S., 2012. The nature of colored dissolved organic matter in the southern Canada Basin and East Siberian Sea. Deep-Sea Res. II, 81-84, 102-113, doi:10.1016/j.dsr2.2011.05.004. ⑥
- Hachikubo, A., Yamaguchi, S., Arakawa, H., Tanikawa, T., Hori, M., Sugiura, K., Matoba, S., Niwano, M., Kuchiki, K., Aoki, T., 2014. Effects of temperature and grain type on time variation of snow specific surface area. Bulletin of Glaciological Research, 32, 47–53. ④
- Hagihara, Y., Okamoto, H., Luo, Z., 2014. Joint analysis of cloud-top heights from CloudSat and CALIPSO: New insights into cloud-top microphysics. J. Geophys. Res., 119, 4087-4106. doi:10.1002/2013JD020919. ③
- Hagihara, Y., Okamoto, H., 2013. Global Cloud Distribution Revealed by Combined Use of CloudSat/CALIPSO: Comparison of Using CALIPSO Version 2 and 3 Data, Current problems in Atmospheric radiation (IRS 2012), Proc. International Radiation Symposium. AIP Conf. Proc., 1531, 456-459. doi:10.1063/1.4804805. ③
- Harada, N., Sato, M., Oguri, K., Hagino, K., Okazaki, Y., Katsuki, K., Tsuji, Y., Shin, K.-H., Tadai, O., Saitoh, S.-I., Narita, H., Konno, S., Jordan, R.W., Shiraiwa, Y., Grebmeier, J., 2012. Enhancement of Coccolithophorid blooms in the Bering Sea by recent environmental changes. Global Biogeochemical Cycles, doi:10.1029/2011GB004177. ⑥
- Haraguchi, T.F., Uchida, M., Shibata, Y., Tayasu, I., 2013. Contributions of detrital subsidies to aboveground spiders during secondary succession, revealed by radiocarbon and stable isotope signatures. Oecologia, 171, 935-944. doi: 10.1007/s00442-012-2446-1. ②

- Hashino, T., Satoh, M., Hagihara, Y., Kubota, T., Matsui, T., Nasuno, T., Okamoto, H., 2013. Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO. *J. Geophys. Res.*, 118, 7273-7292. doi:10.1002/jgrd.50564. ③
- Hayasaka, H., Tanaka, H. L., Bieniek, P. A., 2016. Synoptic-scale fire weather conditions in Alaska. *Polar Science*, 10, 217-226, in press. ②
- Hayashi, K., Shimomura, Y., Morimoto, S., Uchida, M., Nakatsubo, T., Hayatsu, M., 2016. Characteristics of ammonia oxidation potentials and ammonia oxidizers in mineral soil under *Salix polaris*-moss vegetation in Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Biol.*, 1-17. doi: 10.1007/s00300-015-1829-2, in press. ②
- Hayashi, K., Cooper, E.J., Loonen, M.J.J.E., Kishimoto-Mo, A.W., Motohka, T., Uchida, M., Nakatsubo, T., 2014. Potential of Svalbard reindeer winter droppings for emission/absorption of methane and nitrous oxide during summer. *Polar Science*, 8, 196-206. doi: 10.1016/j.polar.2013.11.002. ②
- Hinzman L.D., Ohata T., Polyakov I.V., Suzuki R., Walsh, J.E., 2013. JAMSTEC-IARC international collaboration enhancing understanding of the Arctic climate system. *Polar Science*, 7, 49-52. ②
- Hioki, N., Kuma, K., Morita, Y., Sasayama, R., Ooki, A., Kondo, Y., Obata, H., Nishioka, J., Yamashita, Y., Nishino, S., Kikuchi, T., Aoyama, M., 2014. Laterally spreading iron, humic-like dissolved organic matter and nutrients in cold, dense subsurface water of the Arctic Ocean. *Scientific Report*, 4, 6775. doi:10.1038/srep06775. ⑥
- Hirakata, M., Okamoto, H., Hagihara, Y., Hayasaka, T., 2014. Comparison of global and seasonal characteristics of cloud phase and horizontal ice plates derived from CALIPSO with MODIS and ECMWF. *J. Atmos. and Ocean. Tech.*, 31, 10, 2114-2130. doi:10.1175/JTECH-D-13-00245.1. ③
- Hirawake, T., Shinmyo, K., Fujiwara, A., Saitoh, S., 2012. Satellite remote sensing of primary productivity in the Bering and Chukchi Seas using an absorption-based approach. *ICES Journal of Marine Science*, 69, 1194-1204. ⑥
- Hirano, D., Fukamach, Y., Watanabe, E., Ohshima, K. I., Iwamoto, K., Mahoney, A. R., Eicken, H., Simizu, D., Tamura, T., 2016. A wind-driven, hybrid latent and sensible heat coastal polynya off Barrow, Alaska. *J. Geophys. Res.*, 121, 980-997. doi:10.1002/2015JC011318. ⑦
- Hirota, N., Takayabu, Y.N., Hamada, A., 2016. Reproducibility of summer precipitation over northern Eurasia in CMIP5 multi-climate models. *J. Climate*, 29, 3317-3337. ①
- Hori, M., Aoki, T., Tanikawa, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Yamaguchi, S., Matoba, S., 2014. Dependence of thermal infrared emissive behaviors of snow cover on the surface snow type. *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 33-45. ④
- Hu, A., Meehl, G.A., Han, W., Abe-Ouchi, A., Morrill, C., Okazaki, Y., Chikamoto, M.O., 2012. The Pacific-Atlantic Seesaw and the Bering Strait. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L03702. ①
- Iida, T., Mizobata, K., Saitoh, S.-I., 2012. Interannual variability of coccolithophore *Emiliana huxleyi* blooms in response to changes in water column stability in the eastern Bering Sea. *Continental Shelf Research*, 34, 7-17. ⑥
- Iijima, Y., Nakamura, T., Park, H., Tachibana, Y., Fedorov, A. N., 2016a. Enhancement of Arctic storm activity in relation to permafrost degradation in eastern Siberia. *Int. J. Climatol.* doi : 10.1002/joc.4629, published online. ②
- Iijima, Y., Park, H., Konstantinov, P.Ya., Pudov, G.G., Fedorov, A.N., 2016b. Active layer thickness measurements using a handheld penetrometer at boreal and tundra sites in eastern Siberia. *Permafrost Periglacial Process*, doi:10.1002/ppp.1908. ②
- Iijima, Y., Ohta, T., Kotani, A., Fedorov, A.N., Kodama, Y., Maximov, T.C., 2014. Sap flow changes in relation to permafrost degradation under increasing precipitation in an eastern Siberian larch forest. *Ecology*, 7, 177-187. doi : 10.1002/eco.1366. ②
- Ikawa, H., Nakai, T., Busey, R.C., Kim, Y., Kobayashi, H., Nagai, S., Ueyama, M., Saito, K., Nagano, H., Suzuki, R., Hinzman, L., 2015. Understory CO₂, sensible heat, and latent heat fluxes in a black spruce forest in interior Alaska. *Agric. For. Meteorol.*, 214-215, 80-90. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.08.247. ②
- Ilicak, M., Drange, H., Wang, Q., Gerdes, R., Aksenov, Y., Bailey, D., Bentsen, M., Biastoch, A., Bozec, A., Böning, C., Cassou, C., Chassignet, E., Coward, A., Curry, B., Danabasoglu, G., Danilov, S., Fernandez, E., Fogli, P., Fujii, Y., Griffies, S., Iovino, D., Jahn, A., Jung, T., Large, W., Lee, C., Lique, C., Lu, J., Masina, S., Nurser, B., Roth, C., Salas y Méla, D., Samuels, B., Spence, P., Tsujiino, H., Valcke, S., Voldoire, A., Wang, X., Yeager, S., 2016. An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part III: Hydrography and fluxes, *Ocean Modell.*, 100, 141-161. ①
- Inoue, J., Yamazaki, A., Ono, J., Dethloff, K., Maturilli, M., Neuber, R., Edwards, P., Yamaguchi, H., 2015. Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route. *Scientific Reports*, 5:16868, 1-8. DOI: 10.1038/srep16868. ⑦
- Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Miyamoto, Y., Yoshida, Y., Yokota, T., Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H., Sweeney, C., Tans, P.P., Andrews, A.E., Patra, P.K., 2013. Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 9771-9788. doi:10.5194/acp-13-9771-2013. ⑤
- Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Miyamoto, Y., Saeki, T., Yoshida, Y., Yokota, T., Sweeney, C., Tans, P.P., Biraud, S.C., Machida, T., Pittman, J.V., Kort, E.A., Tanaka, T., Kawakami, S., Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., 2014. Validation of XCH₄ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data. *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 2987-3005. doi:10.5194/amt-7-2987-2014. ⑤
- Inoue, T., Kudoh, S., Uchida, M., Tanabe, Y., Inoue, M., Kanda, H., 2014. Effects of substrate differences on water availability for Arctic lichens during the snow-free summers in the High Arctic glacier foreland. *Polar Science*, 8, 397-412. doi: 10.1016/j.polar.2014.09.003. ②
- Irwin, M., Kondo, Y., Moteki, N., 2015. An empirical correction factor for filter-based photo-absorption black carbon measurements. *J. Aerosol Sci.*, 80, 86-97. ③
- Irwin, M., Kondo, Y., Moteki, N., Miyakawa, T., 2013. Evaluation of a heated-inlet for calibration of the SP2. *Aerosol Sci. Technol.*, 47, 895-905. doi: 10.1080/02786826.2013.800187. ③
- Ishibashi, D., Shigihara, T., Konno, A., 2014. Experimental and numerical investigation of model-scale collision of ship with ice floe. *Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice*, Singapore, August 11-15, 495-502. doi:10.3850/978-981-09-0750-1_1180. ⑦
- 石橋大輔, 麻生 翔, 佐野翔太, 佐野元治, 金野祥久, 2013. 船舶と氷塊との衝突に関する模型実験および数値解析手法の検討. 寒地技術論文・報告集, 29, 104-108. ⑦
- Ishidoya, S., Murayama, S., 2014. Development of a new high precision continuous measuring system for atmospheric O₂/N₂ and Ar/N₂ and its application to the observation in Tsukuba, Japan. *Tellus B*, 66, 22574, http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v66.22574. ⑤
- Ishidoya, S., Morimoto, S., Aoki, S., Taguchi, S., Goto, D., Murayama, S., Nakazawa, T., 2012. Oceanic and terrestrial biospheric CO₂ uptake estimated from atmospheric potential oxygen observed at Ny-Ålesund, Svalbard, and Syowa, Antarctica. *Tellus B*, 64, 18924, http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.18924. ⑤
- Ishimoto, H., Okamoto, K., Okamoto, H., Sato, K., 2014. One-dimensional variational (1D-Var) retrieval of middle to upper tropospheric humidity using AIRS radiance data. *J. Geophys. Res.*, 119. doi: 10.1002/2014JD021706. ③
- Ito, A., Nishina, K., Noda, H.M., 2016. Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data. *Polar Science* 10, 346-355, in press. ⑤

- Ito, M., Pickart, R.S., Kikuchi, T., Fukamachi, Y., Ohshima, K.I., Simizu, D., Arrigo, K.R., Vagle, S., He, J., Ashjian, C., Mathis, J.T., Nishino, S., Nobre, C., 2015a. Water properties, heat and volume fluxes of Pacific water in Barrow Canyon during summer 2010. *Deep-Sea Res. I*, 102, 43-54. doi:10.1016/j.dsr.2015.04.004. ⑥⑦
- Ito, M., Ohshima, K.I., Fukamachi, Y., Simizu, D., Iwamoto, K., Matsumura, Y., Mahoney, A. R., Eicken, H., 2015b. Observations of supercooled water and frazil ice formation in an Arctic coastal polynya from mooring and satellite imagery. *Ann. Glaciol.*, 56, 307-314. doi:10.3189/2015AoG69A839. ⑦
- Itoh, M., Nishino, S., Kawaguchi, Y., Kikuchi, T., 2013. Barrow Canyon volume, heat, and freshwater fluxes revealed by long-term mooring observations between 2000 and 2008. *J. Geophys. Res.*, 118, (9), 4363-4379. doi:10.1002/jgrc.20290. ⑥
- Itoh, M., Shimada, K., Kamoshida, T., McLaughlin, F., Carmack, E., Nishino, S., 2012. Interannual variability of Pacific Winter Water inflow through Barrow Canyon from 2000 to 2006. *J. Oceanogr.*, 68 (4), 575-592. doi: 10.1007/s10872-012-0120-1. ⑥⑦
- Itoh, M., Inoue, J., Shimada, K., Zimmermann, S., Kikuchi, T., Hutchings, J., McLaughlin, F., Carmack, E., 2011. Acceleration of sea-ice melting due to transmission of solar radiation through ponded ice area in the Arctic Ocean: results of in situ observations from icebreakers in 2006 and 2007. *Annals Glaciology*, 52 (57), 249-260. ⑥
- Iwahana, G., Takano, S., Petrov, R.E., Tei, S., Shingubara, R., Maximov, T.C., Fedorov, A.N., Desyatkin, A.R., Nikolaev, A.N., Desyatkin, R.V., Sugimoto, A., 2014. Geocryological characteristics of the upper permafrost in a tundra-forest transition of the Indigirka River Valley, Russia. *Polar Science*, 8, 96-113. doi: 10.1016/j.polar.2014.01.005. ②
- Iwamoto, K., Ohshima, K.I., Tamura, T., 2014. Improved mapping of sea ice production in the Arctic Ocean using AMSR-E thin ice thickness algorithm. *J. Geophys. Res.*, 119, 3574-3594. doi:10.1002/2013JC009749. ⑦
- Iwamoto, K., Ohshima, K.I., Tamura, T., Nihashi, S., 2013. Estimation of thin ice thickness from AMSR-E data in the Chukchi Sea. *Int. J. Remote Sens.*, 34, 468-489. doi: 10.1080/01431161.2012.712229. ⑦
- Izumiyama, K., Otsuka, N., 2013. Ice thickness calculation from partial concentration values. *Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13)*, June 9-13, Espoo, Finland. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756, 10p. ⑦
- Jaiser, R., Nakamura, T., Handorf, D., Dethloff, K., Ukita, J., Yamazaki, K., 2016. Atmospheric winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations. *J. Geophys. Res.*, 121, 7564-7577. doi:10.1002/2015JD024679. ③
- Jin, M., Hutchings, J., Kawaguchi, Y., Kikuchi, T., 2012. Ocean mixing with lead-dependent subgrid scale brine rejection parameterization in a climate model. *J. Ocean Uni. China*, 11(4), 473-480. doi:10.1007/s11802-012-2094-4. ⑥
- Jin, Y., Kai, K., Okamoto, H., Hagihara, Y., 2014. Improvement of CALIOP cloud masking algorithms for better estimation of dust extinction profiles. *J. Meteor. Soc. Japan*, 92, 5, 433-455. doi:10.2151/jmsj.2014-502. ③
- Kanao, M., Tsuboi, S., Butler, R., Anderson, K., Dahl-Jensen, T., Larsen, T., Nettles, M., Voss, P., Childs, D., Clinton, J., Stutzmann, E., Himeno, T., Toyokuni, G., Tanaka, S., Tono, Y., 2012. Greenland Ice Sheet Dynamics and Glacial Earthquake Activities, In: Müller, J. and L. Koch (Eds.), "Ice Sheets: Dynamics, Formation and Environmental Concerns", ISBN 978-1-61942-367-1, Hauppauge, NY, Nova Science Publishers, Inc., Chap.4, 93-120. ④
- Kanna, N., Toyota, T., Nishioka, J., 2014. Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. *Prog. Oceanogr.*, 126, 44-57. ⑥
- Kashiwase, H., Ohshima, K.I., Nihashi, S., 2014. Long-term variation in sea ice production and its relation to the intermediate water in the Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.*, 126, 21-32. doi:10.1016/j.pocean.2014.05.004. ⑦
- Katsuki, K., Itaki, T., Uchida, M., Tada, R., 2014. Response of the Bering Sea to 11-year solar irradiance cycles during the Bølling-Allerød. *Geophys. Res. Lett.*, 41 (8), 2892-2898. doi: 10.1002/2014GL059509. ②
- Kasurinen, V., Alfredeisen, K., Kolari, P., Mammarella, I., Alekseychik, P., Rinne, J., Vesala, T., Bernier, P., Boike, J., Langer, M., Belemarchesini, L., van Hussteden, K., Dolman, H., Sachs, T., Ohta, T., Varlagin, A., Rocha, A., Arain, A., Oechel, W., Lund M., Grelle, A., Lindroth, A., Black, A., Aurele, M., Laurila, T., Lohila, A., Berninger, F., 2014. Latent heat exchange in the boreal and arctic biomes. *Glob. Chang. Biol.*, 20, 3439-3456. doi: 10.1111/gcb.12640. ②
- Kawamura, K., Severinghaus, J.P., Albert, M.R., Courville, Z.R., Fahnestock, M.A., Scambos, T., Shields, E., Shuman, C.A., 2013. Kinetic fractionation of gases by deep air convection in polar firn. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 11141-11155, doi:10.5194/acp-13-11141-2013. ⑤
- Kawasaki, T., Hasumi, H., 2016. The inflow of Atlantic water at the Fram Strait and its interannual variability. *J. Geophys. Res.*, 121, 502-519. doi:10.1002/2015JC011375. ⑦
- Kawasaki, T., Hasumi, H., 2014. Effect of freshwater from the West Greenland Current on the winter deep convection in the Labrador Sea. *Ocean Model.*, 75, 51-64. doi:10.1016/j.ocemod.2014.01.003. ⑦
- Kim, H-S., Maksyutov, S., Glagolev, M.V., Machida, T., Patra, P.K., Sudo, K., Inoue, G., 2011. Evaluation of methane emissions from west Siberian wetlands based on inverse modeling. *Environ. Res. Lett.*, 6, 035201. doi:10.1088/1748-9326/6/3/035201. ⑤
- Kim, Y., Kim, S.D., Enomoto, H., Kishida, K., Kondo, M., Uchida, M., 2013. Latitudinal distribution of soil CO₂ efflux and temperature along the Dalton Highway, Alaska. *Polar Science*, 7, 162-173. doi: 10.1016/j.polar.2012.11.002. ②
- Kimura, N., Nishimura, A., Tanaka, Y., Yamaguchi, H., 2013. Influence of winter sea ice motion on summer ice cover in the Arctic. *Polar Research*, 32, 20193. http://dx.doi.org/10.3402/polar.v32i0.20193, 1-8. ⑦
- Kinase, T., Kita, K., Ogawa-Tsukagawa, Y., Goto-Azuma, K., 2016. Influence of the melting temperature on the measurement of the mass concentration and size distribution of black carbon in snow. *Atmospheric Measurement Techniques*, in press. ④
- Kobashi, T., Goto-Azuma, K., Box, J.E., Gao, C.-C., Nakaegawa, T., 2013. Causes of Greenland temperature variability over the past 4000 years: Implications for Northern Hemispheric temperature change. *Climate of the Past*, 9, 2299-2317. ④
- Kobashi, T., Kawamura, K., Severinghaus, J.P., Barnola, J.M., Nakaegawa, T., Vinther, B.M., Johnsen, S.J., Box, J.E., 2011. High variability of Greenland surface temperature over the past 4000 years estimated from trapped air in an ice core. *Geophys. Res. Lett.*, 38. ⑤
- Kobayashi, H., Yunus, A., Nagai, S., Sugiura, K., Kim, Y., Dam, B.V., Nagano, H., Zona, D., Harazono, Y., Bret-Harte, S., Ichii, K., Ikawa, H., Iwata, H., Oechel, W., Ueyama, M., Suzuki, R., 2016. Latitudinal gradient of spruce forest understory and tundra phenology in Alaska as observed from satellite and ground-based data. *Remote Sensing of Environment*, 177, 160-170. ④
- Kobayashi, H., Suzuki, R., Nagai, S., Nakai, T., Kim, Y., 2014. Spatial scale and landscape heterogeneity effects on FAPAR in an open canopy black spruce forest in interior Alaska. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, 11, 564-568. doi: 10.1109/LGRS.2013.2278426. ②
- Kokubun, N., Yamamoto, T., Sato, N., Watanuki, Y., Will, A., Kitaysky, A.S., Takahashi, A., 2016. Foraging segregation of two congeneric diving seabird species (common and thick-billed murre) breeding on St. George Island, Bering Sea. *Biogeosciences*, 13, 2579-2591. doi:10.5194/bg-13-2579-2016. ⑥

- Komuro, Y., 2014. The Impact of Surface Mixing on the Arctic River Water Distribution and Stratification in a Global Ice-Ocean Model. *J. Climate*, 27, 4359-4370. ①, ⑦
- Komuro, Y., Suzuki, T., 2012. Impact of subgrid-scale ice thickness distribution on heat flux on and through sea ice. *Ocean Modelling*, doi:10.1016/j.ocemod.2012.08.004. ①, ⑦
- Komuro, Y., Suzuki, T., Sakamoto, T.T., Hasumi, H., Ishii, M., Watanabe, M., Nozawa, T., Yokohata, T., Nishimura, T., Ogochi, K., Emori, S., Kimoto, M., 2012. Sea-ice in twentieth-century simulations by new MIROC coupled models: a comparison between models with high resolution and with ice thickness distribution. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 90A, 213-232. doi: 10.2151/jmsj.2012-A11. ⑦
- Kondo, Y., 2015. Effects of black carbon on climate: Advances in measurement and modeling. *Monogr. Environ. Earth Planets*, 3, 1-85. doi:10.5047/meep.2015.00301.0001. ③
- Konno, A., Nakane, A., Kanamori, S., 2013. Validation of numerical estimate of brash ice channel resistance with model test. Proc. 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756, 8p. ⑦
- 金野祥久, 中根明裕, 2012. 船舶や海洋構造物と氷片の干渉解析を目的とした物理計算ライブラリの比較検討. 寒地技術論文・報告集, 28 1-6. ⑦
- Kono, Y., Sasaki, H., Kurihara, Y., Fujiwara, A., Yamamoto, J., Sakurai, Y., 2016. Distribution pattern of Polar cod (*Boreogadus saida*) larvae and larval fish assemblages in relation to oceanographic parameters in the northern Bering Sea and Chukchi Sea. *Polar Biology*, doi:10.1007/s00300-016-1961-7, accepted. ⑥
- Konya, K., Kadota, T., Yabuki, H., Ohata, T., 2013. Fifty years of meteor-glaciological change in Toll Glacier, Bennett Island, De Long Islands, Siberian Arctic. *Polar Science*, 8, 86-95. ④
- Kotani, A., Kononov, A.V., Ohta, T., Maximov, T.C., 2014. Temporal variations in the linkage between the net ecosystem exchange of water vapour and CO₂ over boreal forests in eastern Siberia. *Ecohydrology*, 7, 209-225. doi: 10.1002/eco.1449. ②
- Krishfield, R.A., Proshutinsky, A., Tateyama, K., Williams, W.J., Carmack, E.C., McLaughlin, F.A., Timmermans, M.-L., 2014. Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle. *J. Geophys. Res.*, 119. doi: 10.1002/2013JC008999. ⑦
- 久万健志, 高田兵衛, 北山紗織, 小俣 紋, 2013. 北太平洋・ベーリング海・北極海における鉄の挙動とその起源. *分析化学*, 62, 12. 1057-1069. ⑥
- Kusunoki, S., Mizuta, R., Hosaka, M., 2015. Future changes in precipitation intensity over the Arctic projected by a global atmospheric model with a 60-km grid size. *Polar Science*, 9, 277-292, http://dx. doi:org/10.1016/j.polar.2015.08.001. ①
- Laine, A., Yoshimori, M., Abe-Ouchi, A., 2016. Surface Arctic amplification factors in CMIP5 models: Land and oceanic surfaces, seasonality. *J. Climate*, 29, 3297-3316. ①
- Lambert, F., Kug, J.S., Park, R.J., Mahowald, N., Winckler, G., Abe-Ouchi, A., Oishi, R., Takemura, T., Lee, J.H., 2013. The role of mineral-dust aerosols in polar temperature amplification. *Nature Climate Change*, 3, 487-491. ①
- Lee, Y.J., Matrai, P.A., Friedrichs, M.A.M., Saba, V.S., Antoine, D., Ardyna, M., Asanuma, I., Babin, M., Belanger, S., Benot-Gagne, M., Devred, E., Fernandez-Mendez, M., Gentili, B., Hirawake, T., Kang, S.-Ho., Kameda, T., Katlein, C., Lee, S.H., Lee, Z., Melin, F., Scardi, M., Smyth, T.J., Tang, Sh., Turpie, K.R., Waters, K.J., Westberry, T.K., 2015. An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color/in situ chlorophyll-a based models. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120. doi:10.1002/2015JC011018. ⑥
- Liang, M., Sugimoto, A., Tei, S., Bragin, I.V., Takano, S., Morozumi, T., Shingubara, R., Maximov, T., Kiyashko, S., Velivetskaya, T. A., Ignatiev, A.V., 2014. Importance of soil moisture and N availability to larch growth and distribution in the Arctic taiga-tundra boundary ecosystem, northeastern Siberia. *Polar Science*, 8, 327-341. doi: 10.1016/j.polar.2014.07.008. ②
- Liljedahl, A., Boike, J., Daanen, R.P., Federov, A.N., Frost, G.V., Grosse, G., Iijima, Y., Jorgenson, J.C., Matveyeva, N., Necsoiu, M., Raynolds, M.K., Romanovsky, V., Schulla, J., Tape, K.D., Walker, D.A., Yabuki, H., 2016. Pan-Arctic modern sub-decadal permafrost ice-wedge degradation and hydrologic implications. *Nat. Geosci.*, in press. ②
- Liu, G., Kojima, K., Yoshimura, K., Oka, A., 2014. Proxy interpretation of coral-recorded seawater $\delta^{18}\text{O}$ using 1D model forced by isotope-incorporated GCM in tropical oceanic regions. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 12021-12033. ①
- Liu, G., Kojima, K., Yoshimura, K., Okai, T., Suzuki, A., Oki, T., Siringan, F., Yoneda, M., Kawahata, H., 2013. A model-based test of accuracy of seawater oxygen isotope ratio record derived from a coral dual proxy method at southeastern Luzon Island, the Philippines. *J. Geophys. Res. Biogeo.*, 2012JG002266. ①
- Liu, H., Jin, H., Miyoshi, Y., Fujiwara, H., Shinagawa, H., 2013. Upper atmosphere response to stratosphere sudden warming: Local time height dependence simulated by GAIA model. *Geophys. Res. Letters*, 40. doi:10.1002/grl.50146. ③
- Liu, X., Kondo, Y., Ram, K., Matsui, H., Nakagomi, K., Ikeda, T., Oshima, N., Verma, R. L., Takegawa, N., Koike, M., Kajino, M., 2013. Seasonal variations of black carbon observed at the remote mountain site Happo in Japan. *J. Geophys. Res.*, 118, 3709-3722. doi:10.1002/jgrd.50317. ③
- Liu, Z., Yoshimura, K., Kennedy, C.D., Wang, X., Pang, S., 2014. Water vapor δD dynamics over China derived from SCIAMACHY satellite measurements. *Sci. China Earth Sci.*, 57, 813-823. ①
- Liu, Z., Yoshimura, K., Bowen, G.J., Welker, J.M., 2014. Pacific-North American teleconnection controls on precipitation isotopes ($\delta^{18}\text{O}$) across the contiguous United States and adjacent regions: A GCM-based analysis. *J. Clim.*, 27, 1046-1061. ①
- Liu, Z., Bowen, G.J., Welker, J.M., Yoshimura, K., 2012. Winter precipitation isotope ($\delta^{18}\text{O}$) slopes of the contiguous USA and their relationship to the Pacific/North American (PNA) pattern. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-012-1548-0. ①
- Machguth, H. and 31 others including Sugiyama, S., 2016. Greenland surface mass balance observations from the ice sheet ablation area and local glaciers. *Journal of Glaciology*, 1-27, doi:10.1017/jog.2016.75. ④
- Mahoney, A.R., Eicken, H., Fukamachi, Y., Ohshima, K.I., Simizu, D., Kambhamettu, D., Rohith, M.V., Hendricks, S., Jones, J., 2015. Both sides of the ice: comparison of ice thickness and velocity from moored, airborne and shore-based instruments near Barrow, Alaska. *Ann. Glaciol.*, 56, 363-372. doi:10.3189/2015AoG69A565. ⑦
- Maksyutov, S., Takagi, H., Valsala, V.K., Saito, M., Oda, T., Saeki, T., Belikov, D., Saito, R., Ito, A., Yoshida, Y., Morino, I., Uchino, O., Andres, R.J., Yokota, T., 2013. Regional CO₂ flux estimates for 2009-2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 9351-9373. doi:10.5194/acp-13-9351-2013. ⑤
- Masuda, K., Ishimoto, H., Sakai, T., Okamoto, H., 2016. Backscattering properties of nonspherical ice particles calculated by geometrical-optics-integral-equation method, 27th International Laser Radar Conference, in press. ③
- Matoba, S., Motoyama, H., Fujita, K., Yamasaki, T., Minowa, M., Onuma, Y., Komuro, Y., Aoki, T., Yamaguchi, S., Sugiyama, S., Enomoto, H., 2015. Glaciological and meteorological observations at the SIGMA-D site, northwestern Greenland Ice Sheet, *Bulletin of Glaciological Research*, 33, 7-14. ④

- Matsui, H., Koike, M., Kondo, Y., Fast, J. D., Takigawa, M., 2014a. Development of an aerosol microphysical module: Aerosol Two-dimensional bin module for formation and Aging Simulation (ATRAS). *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 10315-10331. ③
- Matsui, H., Koike, M., Kondo, Y., Takami, A., Fast, J. D., Kanaya, Y., Takigawa, M., 2014b. Volatility basis-set approach simulation of organic aerosol formation in East Asia: implications for anthropogenic-biogenic interaction and controllable amounts. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 1-21. ③
- Matsui, H., Koike, M., Kondo, Y., Moteki, N., Fast, J. D., Zaveri, R. A., 2013. Development and validation of a black carbon mixing state resolved three-dimensional model: Aging processes and radiative impact. *J. Geophys. Res.*, 118, 2304-2326. doi:10.1029/2012JD018446.③
- Matsumura, Y., Ohshima, K.I., 2015. Lagrangian modelling of frazil ice in the ocean. *Ann. Glaciol.*, 56, 373-382. doi:10.3189/2015AoG69A657.⑦
- Matsumura, S., Zhang, X., Yamazaki, K., 2014. Summer Arctic atmospheric circulation response to spring Eurasian snow cover and its possible linkage to accelerated sea ice decrease. *J. Clim.*, 27, 6551-6558. doi:10.1175/JCLI-D-13-00549.1. ③
- Matsumura, S., Yamazaki, K., Sato, T., 2015. Role of Siberian land-atmosphere coupling in the development of the August Okhotsk high in 2008. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 93, 2, 229-244. doi: 10.2151/jmsj.2015-013. ③
- Matsuno, K., Landeira S. J. M., Yamaguchi, A., Hirawake, T., Kikuchi, T., 2016. Spatial and geographical changes in the mesozooplankton community in the Bering and Chukchi Seas during the summers of 2007 and 2008. *Polar Science*, 10, 335-345, in print. ⑥
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Fujiwara, A., Onodera, J., Watanabe, E., Harada, N., Kikuchi, T., 2015a. Seasonal changes in the population structure of dominant planktonic copepods collected using a sediment trap moored in the western Arctic Ocean. *J. Natural History*, 49, 2711-2726. doi:10.1080/00222933.2015.1022613. ⑥
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Hirawake, T., Nishino, S., Inoue, J., Kikuchi, T., 2015b. Reproductive success of Pacific copepods in the Arctic Ocean and the possibility of changes in the Arctic ecosystem. *Polar Biology*, 38, 1075-1079. doi:10.1007/s00300-015-1658-3. ⑥
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Nishino, S., Inoue, J., Kikuchi, T., 2015c. Short-term changes of the mesozooplankton community and copepod gut pigment in the Chukchi Sea in autumn. *Biogeosciences*, 12, 13, 4005-4015. doi: 10.5194/bg-12-4005-2015. ⑥
- Matsuno, K., Ichinomiya, M., Yamaguchi, A., Imai, I., Kikuchi, T., 2014a. Horizontal distribution of microprotist community structure in the western Arctic Ocean during late summer and early fall of 2010. *Polar Biology*, 37, 8, 1185-1195. doi:10.1007/s00300-014-1512-z. ⑥
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Fujiwara, A., Onodera, J., Watanabe, E., Imai, I., Chiba, S., Harada, N., Kikuchi, T., 2014b. Seasonal changes in mesozooplankton swimmers collected by sediment trap moored at a single station of Northwind Abyssal Plain in the western Arctic Ocean. *J. Plankton Res.*, 36, 490-502. ⑥
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Imai, I., 2012a. Biomass size spectra of mesozooplankton in the Chukchi Sea during summers of 1991/1992 and 2007/2008: an analysis by optical plankton counter. *ICES J. Mar. Sci.*, 69, 1205-1217. doi:10.1093/icesjms/fss119. ⑥
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Shimada, K., Imai, I., 2012b. Horizontal distribution of calanoid copepods in the western Arctic Ocean during the summer of 2008. *Polar Science*, 6, 105-119. doi:10.1016/j.polar.2012.01.002. ⑥⑦
- Matsuno, K., Yamaguchi, A., Hirawake, T., Imai, I., 2011. Year-to-year changes of the mesozooplankton community in the Chukchi Sea during summers of 1991, 1992 and 2007, 2008. *Polar Biology*, 34, 1349-1360. ⑥
- Melnikov, V.P., Spektor, V.B., Sheinkman, V.S., Fedorov, A.N., Galanin, A.A., Spector, V.V., Pushkar, V.S., Kadota, T., 2014. Experimental study of isotope composition in the glaciers of the Suntar-Hayata Range. *The Earth Cryosphere*, XVII, 4, 63-73. ④
- Miller, J., Lehman, S., Wolak, C., Turnbull, J., Dunn, G., Graven, H., Keeling, R., Meijer, H.A.J., Aerts-Bijma, A.T., Palstra, S.W.L., Smith, A.M., Allison, C., Southon, J., Xu, X., Nakazawa, T., Aoki, S., Nakamura, T., Guilderson, T., LaFranchi, B., Mukai, H., Terao, Y., Uchida, M., Kondo, M., 2013. Initial Results of an Inter-comparison of AMS-based Atmospheric ¹⁴CO₂ measurements. *Radiocarbon*, 55, 1475-1483. doi: 10.2458/azu_js_rc.55.16382. ②
- Miller, L.A., Fripiat, F., Else, B.G.T., Bowman, J.S., Brown, K.A., Collins, R.E., Ewert, M., Fransson, A., Gosselin, M., Lannuzel, D., Meiners, K.M., Michel, C., Nishioka, J., Nomura, D., Papadimitriou, S., Russell, L.M., Sørensen, L.L., Thomas, D.N., Tison, J.-L., van Leeuwe, M.A., Vancoppenolle, M., Wolff, E.W., Zhou, J., 2015. Methods for biogeochemical studies of sea ice: The state of the art, caveats, and recommendations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 3, 1-53. doi:10.12952/journal.elementa.000038. ⑥
- Miyamoto, Y., Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Yokota, T., Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H., Sweeney, C., Tans, P.P., Andrews, A.E., Patra, P.K., 2013. Atmospheric column-averaged mole fractions of carbon dioxide at 53 aircraft measurement sites. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5265-5275. doi:10.5194/acp-13-5265-2013. ⑤
- Miyazaki, S., Saito, K., Mori, J., Yamazaki, T., Ise, T., Arakida, H., Hajima, T., Iijima, Y., Machiya, H., Sueyoshi, T., Yabuki, H., Burke, E.J., Hosaka, M., Ichii, K., Ikawa, H., Ito, A., Kotani, A., Matsuura, Y., Niwano, M., Nitta, T., O'ishi, R., Ohta, T., Park, H., Sasai, T., Sato, A., Sato, H., Sugimoto, A., Suzuki, R., Tanaka, K., Yamaguchi, S., Yoshimura, K., 2015. The GRENE-TEA model intercomparison project (GTMP): overview and experiment protocol for Stage 1. *Geosci. Model Dev.*, 8, 2841-2856. doi:10.5194/gmd-8-2841-2015. ①②
- Mizobata, K., Watanabe, E., Kimura, N., 2016. Wintertime variability of the Beaufort gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations. *J. Geophys. Res. Oceans*, 121. doi:10.1002/2015JC011218, 1-15. ⑦
- Mizobata, K., Shimada, K., 2012. East-west asymmetry in surface mixed layer and ocean heat content in the Pacific sector of the Arctic Ocean derived from AMSR-E sea surface temperature. *Deep Sea Research II. Satellite Oceanography and Climate Change*, Volumes 77-80, 62-69. ⑦
- Mohn, J., Wolf, B., Toyoda, S., Lin, C-T., Liang, M-C., Brüggemann, N., Wissel, H., Steiker, A. E., Dyckmans, J., Szwec, L., Ostrom, N. E., Casciotti, K. L., Forbes, M., Giesemann, A., Well, R., Doucett, R. R., Yarnes, C. T., Ridley, A. R., Kaiser, J., Yoshida, N., 2014. Interlaboratory assessment of nitrous oxide isotopomer analysis by isotope ratio mass spectrometry and laser spectroscopy: current status and perspectives. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 28 (18), 1995-2007. doi: 10.1002/rcm.6982. ⑤
- Mori, K., Ise, T., Kondo, M., Kim, Y., Enomoto, H., Uchida, M., 2012. The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics. *Open Journal of Ecology*, 2, 90-95. doi:10.4236/oje.2012.22011. ②
- Mori, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Inoue, J., Kimoto, M., 2014a. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geoscience*, 7, 869-873. ①
- Mori, T., Moteki, N., Ohata, S., Koike, M., Goto-Azuma, K., Miyazaki, Y., Kondo, Y., 2016. Improved Technique for measuring the size distribution of black carbon particles in liquid water. *Aerosol Sci. Technol.*, 50, 3, 242-254. DOI: 10.1080/02786826.2016.1147644.③④
- Mori, T., Kondo, Y., Ohata, S., Moteki, N., Matsui, H., Oshima, N., Iwasaki, A., 2014b. Wet deposition of black carbon at a remote site in the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, 119. doi:10.1002/2014JD022103. ③
- Morishita, T., Matsuura, Y., Kajimoto, T., Osawa, A., Zyryanova, O.A., Prokushkin, A.S., 2014. CH₄ and N₂O dynamics of Larix gmelinii forest in a continuous permafrost region of central Siberia during the growing season. *Polar Science*, 8, 156-165. doi:10.1016/j.polar.2014.01.004.②

- Morishita, T., Noguchi, K., Kim, Y.W., Matsurua, Y., 2014. CO₂, CH₄ and N₂O fluxes of upland black spruce (*Picea mariana*) forest soils after forest fires of different intensity in interior Alaska. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 61, 98-105. doi: 10.1080/00380768.2014.963666.②
- Moteki, N., Kondo, Y., Adachi, K., 2014. Identification by single-particle soot photometer of black carbon particles attached to other particles: Laboratory experiments and ground observations in Tokyo. *J. Geophys. Res.*, 119. doi:10.1002/2013JD020655.③
- Mudunkotuwa, D.Y., De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2016. Data assimilation system to improve sea ice predictions in the Arctic Ocean using an ice-ocean coupled model. Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31 – June 3, 8p.⑦
- Nagai S., Nakai, T., Saitoh, T.M., Busey, R.C., Kobayashi, H., Suzuki, R., Muraoka, H., Kim, Y., 2013. Seasonal changes in camera-based indices from an open canopy black spruce forest in Alaska, and comparison with indices from a closed canopy evergreen coniferous forest in Japan. *Polar Science*, 7, 125-135. doi: 10.1016/j.polar.2012.12.001. ②
- Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Uetake, J., Shimada, R., 2014. Mineralogical composition of cryoconite on glaciers in northwest Greenland, *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 107-114. ④
- Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Nakano, T., Shin, K., Kokado, 2014. Geographical variations in Sr and Nd isotopic ratios of cryoconite on Asian glaciers, *Environmental Research Letters*, 9 (4), 045007. doi: 10.1088/1748-9326/9/4/045007. ④
- Nakada M., Okuno, J., Ishii, M., 2013. Twentieth century sea-level rise inferred from tide gauge, geologically derived and thermosteric sea-level changes, *Quaternary Science Reviews*, 75, 114-131.④
- Nakai, T., Kim, Y., Busey, R.C., Suzuki, R., Nagai, S., Kobayashi, H., Park, H., Sugiura, K., Ito, A., 2013. Characteristics of evapotranspiration from a permafrost black spruce forest in interior Alaska. *Polar Science*, 7, 136-148. doi: 10.1016/j.polar.2013.03.003. ②
- Nakamura, T., Yamazaki, K., Iwamoto, K., Honda, M., Miyoshi, Y., Ogawa, Y., Tomikawa, Y., Ukita, J., 2016. The stratospheric pathway for Arctic impacts on mid-latitude climate, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3494-3501. doi:10.1020/2016GL068330. ③
- Nakamura T., Oshika, M., Hara, M., Tachibana, Y., 2015a. Impact of the winter North Atlantic Oscillation (NAO) on the Western Pacific (WP) pattern in the following winter through Arctic sea ice and ENSO. Part II: Multi-model evaluation of the NAO-ENSO linkage. *Clim. Dyn.*, 40. doi: 10.1007/s00382-015-2556-7. ③
- Nakamura, T., Yamazaki, K., Iwamoto, K., Honda, M., Miyoshi, Y., Ogawa, Y., Ukita, J., 2015b. A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn. *J. Geophys. Res.*, 2015, 120, 3209-3227. doi:10.1002/2014JD022848. ③
- Nakamura, T., Akiyoshi, H., Deuchi, M., Miyazaki, K., Kobayashi, C., Shibata, K., Iwasaki, T., 2013. A multi-model comparison of stratospheric ozone data assimilation based on an ensemble Kalman filter approach. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 3848-3868. ①
- Nakano, T., Matsuno, K., Nishizawa, B., Iwahara, Y., Mitani, Y., Yamamoto, J., Sakurai, Y., Watanuki, Y., 2015. Diets and body condition of polar cod (*Boreogadus saida*) in the northern Bering Sea and Chukchi Sea. *Polar Biology*, doi: 10.1007/s00300-015-1769-x. ⑥
- Nakanowatari, T., Inoue, J., Sato, K., Kikuchi, T., 2015. Summertime atmosphere-ocean preconditionings for the Bering Sea ice retreat and the following severe winters in North America. *Env. Res. Lett.*, 10. doi:10.1088/1748-9326/10/9/094023. ⑥
- Nakatsubo, T., Uchida, M., Sasaki, A., Kondo, M., Yoshitake, S., Kanda, H., 2015. Carbon accumulation rate of peatland in the High Arctic, Svalbard: Implications for carbon sequestration. *Polar Science*, 9, 267-275. doi:10.1016/j.polar.2014.12.002. ②
- Nakayama, Y., Ohshima, K.I., Fukamachi, Y., 2012. Enhancement of sea-ice drift due to the dynamical interaction between sea ice and a coastal ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 42, 179-192. doi: 10.1175/JPO-D-11-018.1. ⑦
- Nakazawa, F., Uchida, M., Kondo, M., Kadota, T., Shirakawa, T., Enomoto, H., Fedorov, A., Fujisawa, Y., Konstantinov, P., Kusaka, R., Miyairi, M., Ohata, T., Yabuki, H., 2015. Radiocarbon ages of insects and plants frozen in the No. 31 Glacier, Suntar-Khayata Range, eastern Siberia. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 361, 574-579. ④
- Nakazawa, F., Uetake, J., Suyama, Y., Kaneko, R., Takeuchi, N., Fujita, K., Motoyama, H., Imura, S., Kanda, H., 2013. DNA analysis for section identification of individual *Pinus* pollen grains from Belukha glacier, Altai Mountains, Russia, *Environmental Research Letters*, 8, 014032. doi:10.1088/1748-9326/8/1/014032. ④
- Nakazawa, N., Ono, J., Yamaguchi, H., Ohshima, K.I., Kurokawa, A., 2012. Numerical prediction of spilled oil behavior under sea ice conditions: Modification of the 2011 Model. Proc. OTC Arctic Technology Conf., Houston, Texas, USA, 3-5 Dec.,doi: 10.4043/23801-MS. 5p.⑦
- Natsuike, M., Nagai, S., Matsuno, K., Saito, R., Tsukazaki, C., Yamaguchi, A., Imai, I., 2013. Abundance and distribution of toxic Alexandrium tamarense resting cysts in the sediments of the Chukchi Sea and the eastern Bering Sea. *Harmful Algae*, 27, 52-59. ⑥
- Nihashi, S., Ohshima, K.I., Kimura, N., 2012. Creation of a heat and salt flux dataset associated with sea-ice production and melting in the Sea of Okhotsk. *J. Climate*, 25, 2261-2278. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00022.1. ⑦
- Nishimura, S., Kuma, K., Ishikawa, S., Omata, A., Saitoh, S., 2012. Iron, nutrients and humic-type FDOM in the northern Bering Sea Shelf, Bering Strait and Chukchi Sea. *J. Geophys. Res.*, 117, C02025. doi:10.1029/2011JC007355. ⑥
- Nishino, S., Kikuchi, T., Fujiwara, A., Hirawake, T., Aoyama, M., 2016. Water mass characteristics and their temporal changes in a biological hotspot in the southern Chukchi Sea. *Biogeosciences*, 13, 2563-2578, doi:10.5194/bg-13-2563-2016. ⑥
- Nishino, S., Kawaguchi, K., Inoue, J., Hirawake, T., Fujiwara, A., Futsuki, R., Onodera, J., Aoyama, M., 2015. Nutrient supply and biological response to wind-induced mixing, inertial motion, internal waves, and currents in the northern Chukchi Sea. *J. Geophys. Res.*, 120, 3, 1975-1992, doi: 10.1002/2014JC010407. ⑥
- Nishino, S., Itoh, M., Williams, W.J., Semiletov, I.P., 2013. Shoaling of the nutricline with an increase in near-freezing temperature water in the Makarov Basin. *J. Geophys. Res.*, 118, 635-649, doi:10.1029/2012JC008234. ⑥
- Nishino, S., Kikuchi, T., Yamamoto-Kawai, M., Kawaguchi, Y., Hirawake, T., Itoh, M., 2011a. Enhancement/reduction of biological pump depends on ocean circulation in the sea-ice reduction regions of the Arctic Ocean. *J. Oceanogr.*, Vol. 67, 305-314. doi: 10.1007/s10872-011-0030-7. ⑥
- Nishino, S., Itoh, M., Kawaguchi, Y., Kikuchi, T., Aoyama, M., 2011b. Impact of an unusually large warm-core eddy on distributions of nutrients and phytoplankton in the southern Canada Basin during late summer/early fall 2010. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L16602. doi:10.1029/2011GL047885. ⑥
- 新田友子, 芳村圭, 高田久美子, 大石龍太, 鼎信次郎, 沖大幹, 2012. 陸面モデルにおけるサブグリッドスケールの積雪被覆率と積雪深の変化の表現. *水工学論文集*, 56. ①
- 新田友子, 芳村圭, Annan, J.D., Hargreaves, J.C., 鼎信次郎, 沖大幹, 2012. アンサンブル実験による全球陸域積雪シミュレーションの不確実性評価. *水工学論文集*, 57. ①
- Nitta, T., Yoshimura, K., Takata, K., O'ishi, R., Sueyoshi, T., Kanae, S., Oki, T., Abe-Ouchi, A., Liston, G.E., 2014. Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model: Offline validation. *J. Climate*, 27, 3318-3330. ①
- 新田友子, 芳村圭, 阿部彩子, 2015. 陸域水循環の再現性向上と気温バイアス低減に向けた簡易湿地スキームによる感度実験. *水工学論文集*, 59. ①

- Niwa, Y., Machida, T., Sawa, Y., Matsueda, H., Schuck, T.J., Brenninkmeijer, C.A.M., Imasu, R., Satoh, M., 2012. Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO₂ fluxes using passenger aircraft based measurements. *J. Geophys. Res.* 117, D11303. doi:10.1029/2012JD017474. ⑤
- Noguchi, K., Dannoura, M., Jomura, M., Awazuhara-Noguvhi, M., Matsuura, Y., 2012. High belowground biomass allocation in an upland black spruce (*Picea mariana*) stand in interior Alaska. *Polar Science*, 6, 133-141. doi: 10.1016/j.polar.2011.12.002. ②
- Nowicki, S., Bindschadler, R.A., Abe-Ouchi, A., Aschwanden, A., Bueler, E., Choi, H., Fastook, J., Granzow, G., Greve, R., Gutowski, G., Herzfeld, U.C., Jackson, C., Johnson, J., Khroulev, C., Larour, E., Levermann, A., Lipscomb, W.H., Martin, M.A., Morlighem, M., Parizek, B.R., Pollard, D., Price, S.F., Ren, D., Rignot, E., Saito, F., Sato, T., Seddik, H., Seroussi, H., Takahashi, K., Walker, R., Wang, W.L., 2013. Insights into spatial sensitivities of ice mass response to environmental change from the SeaRISE ice sheet modeling project II: Greenland. *J. Geophys. Res. (Earth Surface)*, 118 (2), 1025-1044. ④
- Ogawa, Y., Motoba, T., Buchert, S.C., Haggstrom, I., Nozawa, S., 2014. Upper atmosphere cooling over the past 33 years. *Geophys. Res. Letters*, 41, 5629-5635. doi:10.1002/2014GL060591. ③
- Ogi, M., Taguchi, B., Honda, M., Barber, D.G., Rysgaard, S., 2015. Summer-to-winter sea-ice linkage between the Arctic Ocean and the Okhotsk Sea through atmospheric circulation. *J. Clim.*, 28, 4971-4979. doi:10.1175/JCLI-D-14-00125.1. ③
- Ogura, T., Webb, M. J., Watanabe, M., Lambert, F.H., Tsushima, Y., Sekiguchi, M., 2014. Importance of instantaneous radiative forcing for rapid tropospheric adjustment. *Clim. Dyn.*, 43, 1409-1421. ①
- Ohashi, Y., Iida, T., Sugiyama, S., Aoki, S., 2016. Spatial and temporal variations in high turbidity surface water off the Thule region, northwestern Greenland. *Polar Science*, 10, 270-277. in press. ④
- Ohata, S., Moteki, N., Schwarz, J., Fahey, D., Kondo, Y., 2013. Evaluation of a method to measure black carbon particles suspended in rainwater and snow samples. *Aerosol Sci. Technol.* 47, 1073-1082. doi:10.1080/02786826.2013.824067. ③
- Ohta, T., Kotani, A., Iijima, Y., Maximov, T.C., Ito, S., Hanamura, M., Kononov, A.V., Maximov, A.P., 2014. Effects of waterlogging on water and carbon dioxide fluxes and environmental variables in a Siberian larch forest, 1998 – 2011. *Agric. For. Meteorol.*, 188, 64-75. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.12.012. ②
- O'ishi, R., Abe-Ouchi, A., 2013. Influence of dynamic vegetation on climate change and terrestrial carbon storage in the Last Glacial Maximum. *Clim. Past*, 9, 1571-1587. ①
- Okazaki, A., Satoh, Y., Tremoy, G., Vimeux, F., Scheepmaker, R., Yoshimura, K., 2015. Interannual variability of isotopic composition in water vapor over West Africa and its relation to ENSO. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 3193-3204. doi:10.5194/acp-15-3193-2015. ①
- Okuno, J., Nakada, M., Ishii, M., Miura, H., 2014. Vertical tectonic crustal movements along the Japanese coastlines inferred from late Quaternary and recent relative sea-level changes. *Quaternary Science Reviews*, 91, 42-61. ④
- Ono, J., Inoue, J., Yamazaki, A., Dethloff, K., Yamaguchi, H., 2016. The impact of radiosonde data on forecasting sea-ice distribution along the Northern Sea Route during an extremely developed cyclone. *J. Advances in Modelling Earth Systems*, 8, 292-303. doi:10.1002/2015MS000552. ⑦
- Ono, J., De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2014. Numerical study on a short-term sea-ice prediction for the Northern Sea route and Northwest Passage. Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice, Singapore, August 11-15, 955-962. doi:10.3850/978-981-09-0750-1_1255. ⑦
- Ono, J., Ohshima, K.I., Uchimoto, K., Ebuchi, N., Mitsudera, H., Yamaguchi, H., 2013. Particle-tracking simulation for the drift/diffusion of spilled oils in the Sea of Okhotsk with a three-dimensional, high-resolution model. *J. Oceanogr.*, 69 (3), 1-16. ⑦
- Ooki, A., Kawasaki, S., Kuma, K., Nishino, S., Kikuchi, T., 2016. Concentration maxima of volatile organic iodine compounds in the bottom layer water and the cold, dense water over the Chukchi Sea in the western Arctic Ocean: a possibility of production related to the degradation of organic matter. *Biogeosciences*, 13, 133-145. doi:10.5194/bg-13-133-2016. ⑥
- Ooki, A., Nomura, D., Nishino, S., Kikuchi, T., Yokouchi, Y., 2015. A global-scale map of isoprene and volatile organic iodine in surface seawater of the Arctic, Northwest Pacific, Indian, and Southern Oceans. *J. Geophys. Res.*, 120(6), 4108-4128. doi:10.1002/2014JC010519. ⑥⑦
- Oshchepkov, S., Bril, A., Yokota, T., Morino, I., Yoshida, Y., Matsunaga, T., Belikov, D., et al., 2013. Effects of atmospheric light scattering on spectroscopic observations of greenhouse gases from space. Part 1: Validation of PPDF-based CO₂ retrievals from GOSAT. *J. Geophys. Res.*, 117, D12305, 2012. Part 2: Algorithm intercomparison in the GOSAT data processing for CO₂ retrievals over TCCON sites, *J. Geophys. Res.*, 118. doi: 10.1029/2012JD018782. ⑤
- Oshika, M., Tachibana, Y., Nakamura, T., 2014. Impact of the winter North Atlantic Oscillation on the Western Pacific pattern in the following winter through Arctic sea ice and ENSO. Part I: Observational evidence. *Clim. Dyn.*, 39. doi: 10.1007/s00382-014-2384-1. ③
- Oshima, N., Koike, M., Kondo, Y., Nakamura, H., Moteki, N., Matsui, H., Takegawa, N., Kita, K., 2013a. Vertical transport mechanisms of black carbon over East Asia in spring during the A-FORCE aircraft campaign. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 13,175-13,198. doi:10.1002/2013JD020262. ③
- Oshima, N., Koike, M., 2013b. Development of a parameterization of black carbon aging for use in general circulation models. *Geosci. Model Dev.*, 6, 179-206. doi:10.5194/gmd-6-263-2013. ③
- Otomi, Y., Tachibana, Y., Nakamura, T., 2013. A possible cause of the AO polarity reversal from winter to summer in 2010 and its relation to hemispheric extreme summer weather. *Clim. Dyn.*, 38. doi: 10.1007/s00382-012-1386-0. ③
- 大塚夏彦, 古市正彦, 泉山 耕, 中野佑哉, 2014. 北極海航路によるバルク貨物の海上輸送コストの分析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 70 No. 2. ⑦
- Otsuka, N., Izumiyama, K., Furuichi, M., 2013. Study on feasibility of the Northern Sea Route from recent voyages. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland, 10p. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756. ⑦
- Ozeki, T., Shiga, T., Sawamura, J., Yashiro, Y., Adachi, S., Yamaguchi, H., 2016. Development of sea spray meters and an analysis of sea spray characteristics in large vessels, 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, June 26 – July 2, Rhodes, Greece., accepted. ⑦
- Ozeki, T., Sagawa, G., 2013. Field observation of seawater spray droplets impinging on the upper deck of an icebreaker. Proc. 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756, 7p. ⑦
- 尾関俊浩, 安達 聖, 2012. 巡視船そやにおける飛沫の発生と海水飛沫着氷の観測—2012年2月—. 寒地技術論文・報告集, 28, 157-160. ⑦
- Ozeki, T., Yamamoto, R., Izumiyama, K., Sakamoto, T., 2012. Ice adhesion tests on pliable polymer sheets for protection against sea spray icing. *J. Adhesion Science and Technology*, 26, 651-663. ⑦
- 尾関俊浩, 2011. 砕氷艦しらせにおける飛沫の発生と飛来に関する研究. 寒地技術論文・報告集, 27, 4pp. ⑦

- Park, H., Kim, Y., Kimball, J., 2016. Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. *Remote Sens. Environ.*, 149, 349-358. doi: 10.1016/j.rse.2015.12.046. ②
- Park, H., Fedorov, A.N., Zheleznyak, M.N., Konstantinov, P.Y., Walsh, J.E., 2014. Effect of snow cover on pan-Arctic permafrost thermal regimes. *Clim. Dyn.*, 44, 2873-2895. doi: 10.1007/s00382-014-2356-5. ②
- Park, H., Sherstiukov, A.B., Fedorov, A.N., Polyakov, I.V., Walsh, J.E., 2014. An observation-based assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in Russia. *Environ. Res. Lett.*, 9, 064026. doi: 10.1088/1748-9326/9/6/064026. ②
- Park, H., Walsh, J., Fedorov, A.N., Sherstiukov, A.B., Iijima, Y., Ohata, T., 2013. The influence of climate and hydrological variables on opposite anomaly in active-layer thickness between Eurasian and North American watersheds. *The Cryosphere*, 7, 631-645. doi: 10.5194/tc-7-631-2013. ②
- Patra, P. K., Saeki, T., Dlugokencky, E. J., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Aoki, S., Morimoto, S., Kort, E. A., Crotwell, A., Ravikumar, K., Nakazawa, T., 2016. Regional emission and loss budgets of atmospheric methane (2002-2012). *J. Meteorol. Soc. Japan.*, 94, 91-113. ⑤
- Patra, P.K., Saeki, T., Dlugokencky, E.J., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Aoki, S., Morimoto, S., Kort, E.A., Crotwell, A., Ravikumar, K., Nakazawa, T., 2015. Regional emission and loss budgets of atmospheric methane (2002-2012). *J. Meteorol. Soc. Japan.* 94, 91-113. ⑤
- Patra, P.K., Krol, M.C., Montzka, S.A., Arnold, T., Atlas, E.L., Lintner, B.R., Stephens, B.B., Xiang, B., Elkins, J.W., Fraser, P.J., Ghosh, A., Hints, E.J., Hurst, D.F., Ishijima, K., Krummel, P.B., Miller, B.R., Miyazaki, K., Moore, F.L., Mühle, J., O'Doherty, S., Prinn, R.G., Steele, L.P., Takigawa, M., Wang, H.J., Weiss, R.F., Wofsy, S.C., Young, D., 2014. Observational evidence for interhemispheric hydroxyl-radical parity. *Nature*, 513, 219-223. doi:10.1038/nature13721. ⑤
- Petrich, C., Eicken, H., Zhang, J., Krieger, J., Fukamachi, Y., Ohshima, K.L., 2012. Coastal landfast sea ice decay and breakup in northern Alaska: Key processes and seasonal prediction. *J. Geophys. Res.*, 117, C02003. doi:10.1029/2011JC007339. ⑦
- Podolskiy, E. A., Sugiyama, S., Funk, M., Walter, F., Genco, R., Tsutaki, S., Minowa, M., Ripepe, M., 2016. Tide-modulated ice flow variations drive seismicity near the calving front of Bowdoin Glacier, Greenland. *Geophys. Res. Letters*, 43, 1789-2336. doi: 10.1002/2016GL067743. ④
- Polyakov, I.V., Bolton, R., Greve, R., Hutchings, J., Kim, S.J., Kim, Y., Lee, S.H., Ohata, T., Saito, F., Sugimoto, A., Suzuki, R., 2014. Promoting international, multidisciplinary efforts in detecting and understanding high-latitude changes, and searching for their global impacts. *Polar Science*, 8, 53-56. doi: 10.1016/j.polar.2014.03.002. ②
- Popova, A.S., Tokuchi, N., Ohte, N., Ueda, U.M., Osaka, K., Maximov T.C., Sugimoto, A., 2013. Nitrogen availability in the taiga forest ecosystem of northeastern Siberia. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 59, 427-441. doi: 10.1080/00380768.2013.772495. ②
- Proshutinsky, A. and 28 co-authors (including Itoh, M., Kikuchi, T., Nishino, S.), 2012. Ocean, The Arctic, in "State of the Climate in 2011", edited by J. Blunden and D. S.Arndt. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (7), S142-S145. ⑥
- Rabe, B., Karcher, M., Kauker, F., Schauer, U., Toole, J.M., Krishfield, R.A., Pisarev, S., Kikuchi, T., Su, J., 2014. Arctic Ocean basin liquid freshwater storage trend 1992-2012. *Geophys. Res. Lett.*, 41. doi:10.1002/2013GL058121. ⑥
- Rabe, B., Karcher, M., Schauer, U., Toole, J.M., Krishfield, R.A., Pisarev, S., Kauker, F., Gerdes, R., Kikuchi, T., 2011. An assessment of pan-Arctic Ocean freshwater content changes from the 1990s to the IPY period. *Deep Sea Res. I*, 58, 173-185. doi:10.1016/j.dsr.2010.12.002. ⑥
- Rogozhina, I., Hagedoorn, J.M., Martinez, Z., Fleming, K., Soucek, O., Greve, R., Thomas, M., 2012. Effects of uncertainties in the geothermal heat flux distribution on the Greenland Ice Sheet: An assessment of existing heat flow models. *J. Geophys. Res.*, 117 (F2), F02025. ④
- Sabrekov, A.F., Runkle, B., Glagolev, M.V., Kleptsova, I.E., Machida, T., Maksyutov, S.S., 2014. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling. *Env. Res. Letters*, 9 (4), 045008. ⑤
- Saeki, T., Maksyutov, S., Sasakawa, M., Machida, T., Arshinov, M., Tans, P., Conway, T., Saito, M., Valsala, V., Oda, T., Andres, R., Belikov, D., 2013. Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements. *J. Geophys. Res.* 118. doi:10.1029/2012JD018462. ⑤
- Saeki, T., Saito, R., Belikov, D., Maksyutov, S., 2013. Global high-resolution simulations of CO₂ and CH₄ using a NIES transport model to produce a priori concentrations for use in satellite data retrievals. *Geosci. Model Dev.*, 6, 2215-2258. doi:10.5194/gmd-6-81-2013. ⑤
- Saeki, T., Maksyutov, S., Sasakawa, M., Machida, T., Arshinov, M., Tans, P., Conway, T., Saito, M., Valsala, V., Oda, T., Andres, R., Belikov, D., 2013. Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO₂ measurements. *J. Geophys. Res.* 118. doi:10.1029/2012JD018462. ⑤
- Saikawa, E., Prinn, R.G., Dlugokencky, E., Ishijima, K., Dutton, G.S., Hall, B.D., Langenfelds, R., Tohjima, Y., Machida, T., Manizza, M., Rigby, M., O'Doherty, S., Patra, P.K., Harth, C.M., Weiss, R.F., Krummel, P.B., van der Schoot, M., Fraser, P.B., Steele, L.P., Aoki, S., Nakazawa, T., Elkins, J.W., 2014. Global and regional emissions estimates for N₂O. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 4617-4641. doi:10.5194/acp-14-4617-2014. ⑤
- Saito, F., Abe-Ouchi, A., Takahashi, K., Blatter, H., 2016a. SearISE experiment revisited: sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice-sheet. *The Cryosphere*, 10, 43-63. ④
- Saito, J., Sugiyama, S., Tsutaki, S., Sawagaki, T., 2016b. Surface elevation change on ice caps in the Qaanaaq region, northwestern Greenland. *Polar Science*, 10, 239-248, in press. ④
- Saito, K., Sueyoshi, T., Marchenko, S., Romanovsky, V., Otto-Bliesner, B., Walsh, J., Bigelow, N., Hendricks, A., Yoshikawa, K., 2013a. LGM permafrost distribution: How well can the latest PMIP multi-model ensembles perform reconstruction? *Clim. Past*, 9, 1697-1714. doi: 10.5194/cp-9-1697-2013. ②
- Saito, K., Zhang, T., Yang, D., Marchenko, S., Barry, R.G., Romanovsky, V., Hinzman, L., 2013b. Influence of the Physical Terrestrial Arctic in the Eco-climate System. *Ecol. Appl.*, 23, 1778-1797. doi: 10.1890/11-1062.1. ②
- Saito, M., Ito, A., Maksyutov, S., 2014. Optimization of a prognostic biosphere model for terrestrial biomass and atmospheric CO₂ variability. *Geoscientific Model Development* 7: 1829-1840. doi: 10.5194/gmd-7-1829-2014. ⑤
- Saito, R., Patra, P., Sweeney, C., Machida, T., Krol, M., Houweling, S., Bousquet, P., Agusti-Panareda, A., Belikov, D., Bergmann, D., Bian, H., Cameron-Smith, P., Chipperfield, M., Fortems-Cheiney, A., Fraser, A., Gatti, L., Gloor, E., Hess, P., Kawa, S., Law, R., Locatelli, R., Loh, Z., Maksyutov, S., Meng, L., Miller, J., Palmer, P., Prinn, R., Rigby, M., Wilson, C., 2013c. TransCom model simulations of methane: comparison of vertical profiles with aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, 118, 3891-3904. doi:10.1002/jgrd.50380. ⑤
- 齊藤洋一, 小林文明, 桂 啓仁, 高村民雄, 鷹野敏明, 操野年之, 2013. 衛星 (MTSAT-1R) ラピッドスキャンデータでみた孤立積乱雲の一生, *天気*, 60 (4), 247-260. 雲
- Sakai, O., Yamamura, O., Sakurai, Y., Azumaya, T., 2012. Temporal variation in chum salmon, *Oncorhynchus keta*, diets in the central Bering Sea in summer and early autumn. *Environ. Biol. Fish.* 93, 319-331. ⑥

- Sasakawa, M., Machida, T., Tsuda, N., Arshinov, M., Davydov, D., Fofonov, A., Krasnov, O., 2013. Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/jgrd.50755. ⑤
- Sasakawa, M., Ito, A., Machida, T., Tsuda, N., Niwa, Y., Davydov, D., Fofonov, A., Arshinov, M., 2012. Annual variation of CH₄ emissions from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005–2009): a case of high CH₄ flux and precipitation rate in the summer of 2007. *Tellus B*, 64. doi: 10.3402/tellusb.v64i0.17514.⑤
- Sasaki, M., Kim, Y. -W., Uchida, M., Utsumi, M., 2016. Diffusive summer methane flux from lakes to the atmosphere in the Alaskan arctic zone. *Polar Science*, 10, 303-311, in press. ②
- Sato, H., Ito, A., Ise, T., Kato, E., 2014. Current status and future of land surface models. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 61, 34-47. doi: 10.1080/00380768.2014.917593. 2. ②
- Sato, N.N., Kokubun, N., Yamamoto, T., Watanuki, Y., Kitaysky, A.S., Takahashi, A., 2015. The jellyfish buffet: jellyfish enhance seabird foraging opportunities by concentrating prey. *Biol. Lett.*, doi: 10.1098/rsbl.20150358. ⑥
- Sawa Y., Machida, T., Matsueda, H., Niwa, Y., Tsuboi, K., Murayama, S., Morimoto, S., Aoki, S., 2015. Seasonal changes of CO₂, CH₄, N₂O, and SF₆ in the upper troposphere/lower stratosphere over the Eurasian continent observed by commercial airliner. *Geophys. Res.Lett.*, 42. doi:10.1002/2014GL06273. ⑤
- Sawa, Y., Machida, T., Matsueda, H., 2012. Aircraft observation of the seasonal variation in the transport of CO₂ in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 117, D05305. doi:10.1029/2011JD016933. ⑤
- Sawamura, J., Kioka, S., 2016. Numerical Modeling of Icebreaking and Ice-clearing for an Icebreaker Advancing in Sea ice, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31 - June 3. ⑦
- Sawamura, J., Senga, H., Imaki, K., Suga, K., Kim, H., 2016. Ice Resistance Test of Ship Advancing in Ice-covered Water using Synthetic Ice, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31 - June 3.⑦
- Sawamura, J., Kioka, S., Konno, A., 2015. Experimental and numerical investing on ice submerging for icebreaker with 2D model test using synthetic ice. Proc. 23rd Intern. Conf. Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC'15), June 14 - 18, Trondheim, Norway, 12p. ISSN 0376-6756. ⑦
- Sawamura, J., 2014. Numerical study on ice force distributeon for plate ice failure and broken ice submerging for ship maneuver in level ice. Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice, Singapore, August 11-15, 171-178. doi:10.3850/978-981-09-0750-1_1118. ⑦
- Sawamura, J., Kim, H., 2014. A numerical study for ship-ice interaction simulated in 3D vertical ice terrain generated by fractal theory. Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice, Singapore, August 11-15, 418-425. doi:10.3850/978-981-09-0750-1_1157. ⑦
- 澤村淳司, 山口 一, 志賀俊成, 2014. 砕氷船舶の砕氷航行時の氷板破壊の計測と砕氷パターンの考察. 寒地技術論文・報告集, 30, 1-6. ⑦
- Seddik, H., Greve, R., Zwinger, T., Gillet-Chaulet, F., Gagliardini, O., 2012. Simulations of the Greenland ice sheet 100 years into the future with the full Stokes model Elmer/Ice. *Journal of Glaciology*, 58 (209), 427-440. ④
- Semiletov, I.P., Shakhova, N.E., Pipko, I.I., Pugach, S.P., Charkin, A.N., Dudarev, O.V., Kosmach D.A., Nishino, S., 2013. Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay and adjacent part of the Laptev Sea. *Biogeosciences*, 10, 9, 5977-5996. doi: 10.5194/bg-10-5977-2013. ⑥
- Shibata, H., Izumiyama, K., Tateyama, K., Enomoto, H., Takahashi, S., 2013. Sea ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980-2011. *Annals of Glaciology*, 54 (62), 139-148. ⑦
- Shibata, H., Izumiyama, K., Tateyama, K., Enomoto, H., Takahashi, S., 2012. Interannual changes in sea ice coverage on the Northwest Passage obtained by satellite microwave data. Proc. 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference, June 17-23, Rhodes, Greece. ISBN 978-1-880653-94-4, ISSN 1098-6189. ⑦
- 志賀俊成, 尾関俊浩, 澤村淳司, 山口 一, 2014. 砕氷艦しらせにおける飛沫の発生と飛来に関する研究その2. 寒地技術論文・報告集, 30, 7-11. ⑦
- Shigihara, T., Ishibashi, D., Konno, A., 2015. Experimental and numerical investigation of a model-scale ship and ice floe (2nd report). *Conf. Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC'15)*, June 14-18, Trondheim, Norway, 10p. ISSN 0376-6756. ⑦
- Shimada, R., Takeuchi, N., Aoki, T., 2016. Inter-annual and geographical variations in the extent of bare ice and dark ice on the Greenland ice sheet derived from MODIS satellite images, *Frontiers in Earth Sciences*, 4(43) , doi: 10.3389/feart.2016.00043.④
- Shimada, U., Wada, A., Yamazaki, K., Kitabatake, N., 2014. Roles of an upper -level cold vortex and low-level baroclinicity in the development of polar lows over the Sea of Japan. *Tellus*, 66, 24694. ③
- Shiogama, H., Watanabe, M., Ogura, T., Yokohata, T., Kimoto, M., 2014. Multi-Parameter Multi-Physics Ensemble (MPMPE): A new approach exploring the uncertainties of climate sensitivity. *Atmos. Sci. Lett.*, 15, 97-102. ①
- Shirakawa, T., Kadota, T., Fedorov, A., Konstantinov, P., Suzuki, T., Yabuki, H., Nakazawa, F., Tanaka, S., Miyairi, M., Fujisawa, Y., Takeuchi, N., Kusaka, R., Takahashi, S., Enomoto, H., Ohata, T., 2016. Meteorological and Glaciological observations at Suntar-Khayata Glacier No. 31, east Siberia, from 2012-2014, *Bulletin of Glaciological Research*, 34, 33-40. doi: 10.5331/bgr.16R01. ④
- Simizu, D., Ohshima, K.I., Ono, J., Fukamachi, Y., Mizuta, G., 2014. What drives the southward drift of sea ice in the Sea of Okhotsk? *Prog. Oceanogr.*, 126, 33-43. doi:10.1016/j.pocean.2014.05.013. ⑦
- Smith, I.J., Eicken, H., Mahoney, A. R., Van Hale, R., Gough, A. J., Fukamachi, Y., Jones, J., Surface water mass composition changes captured by cores of Arctic land-fast sea ice. *Cont. Shelf Res.*, in press. doi: 10.1016/j.csr.2016.02.008. ⑦
- Sueyoshi, T., Saito, K., Miyazaki, S., Mori, J., Ise, T., Arakida, H., Suzuki, R., Sato, A., Iijima, Y., Yabuki, H., Ikawa, H., Ohta, T., Kotani, A., Hajima, T., Sato, H., Yamazaki, T., Sugimoto, A., 2016. The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMIIP) stage 1 forcing data set. *Earth Syst. Sci.*, 8, 1-14. doi: 10.5194/essd-8-1-2016. ②ADS
- Sugimoto, F., Tamura, T., Shimoda, H., Uto, S., Simizu, D., Tateyama, K., Hoshino, S., Ozeki, T., Fukamachih, Y., Ushio, S., Ohshima, K.I., 2015. Interannual variability in sea-ice thickness in the pack-ice zone off Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Polar Science*, doi:10.1016/j.polar.2015.10.003. ⑦
- Sugiura, K., Suzuki, R., Nakai, T., Busey, B., Hinzman, L., Park, H., Kim, Y., Nagai, S., Saito, K., Cherry, J., Ito, A., Ohata, T., Walsh, J., 2011. Supersite as a common platform for multi-observations in Alaska for a collaborative framework between JAMSTEC and IARC. *JAMSTEC Report of Research and Development*, 12, 61-69. doi: 10.5918/jamstecr.12.61. ②
- Sugiura, K., Takahashi, S., Kameda, T., Enomoto, H., Kononov, Y., Ananicheva, M., 2016. Spatial characteristics of rainfall at sparsely distributed station network over the high-latitude mountainous regions in eastern Siberia. *International Journal of Earth and Environmental Sciences*, 1 (104), http://dx.doi.org/ojees/2016/104. ④
- Sugiura, K., Nagai, S., Nakai, T., Suzuki, R., 2013. Application of time-lapse digital imagery for ground-truth verification of satellite indices in the boreal forests of Alaska. *Polar Science*, 7, 149-161. doi: 10.1016/j.polar.2013.02.003. ②

- Sugiyama, S., Sakakibara, D., Tsutaki, S., Maruyama, M., Sawagaki, T., 2015. Glacier dynamics near the calving front of Bowdoin Glacier, northwestern Greenland. *Journal of Glaciology*, 61 (226), 223-232. ④
- Sugiyama, S., Sakakibara, D., Matsuno, S., Yamaguchi, S., Matoba, S., Aoki, T., 2014. Initial field observations on Qaanaaq Ice Cap in northwestern Greenland. *Annals of Glaciology*, 55(66), 25-33. ④
- Sumata, H., Lavergne, T., Girard-Arduin, F., Kimura, N., Tschudi, M.A., Kauker, F., Karcher, M., Gerges, R., 2014. An intercomparison of Arctic ice drift products to deduce uncertainty estimates. *J. Geophys. Res.*, 119. DOI:10.1002/2013JC009724. ⑦
- Suzuki, K., Matsuo, K., Hiyama, T., 2016. Satellite gravimetry-based analysis of terrestrial water storage systems and their relationship to runoff from the Lena River in eastern Siberia. *International J. Remote Sens.*, in press. ④
- Suzuki, R., Kim, Y., Ishii, R., 2013. Sensitivity of the backscatter intensity of ALOS/PALSAR to the above-ground biomass and other biophysical parameters of boreal forest in Alaska. *Polar Science*, 7, 100-112. doi: 10.1016/j.polar.2013.03.001. ②
- 鈴木力英, 2013. 北半球寒冷地域におけるリモートセンシングによる広域植生の最近の研究動向. 『日本リモートセンシング学会誌』, 33, 1, 48-55. doi: 10.11440/rssj.33.48. ①②
- Takagi, T., Tateyama, K., Ishiyama, T., 2014. Obstacle avoidance and planning in ice sea using probabilistic roadmap method. Proc. 22nd IAHR International Symposium on Ice, Singapore, August 11-15, 510-517. doi:10.3850/978-981-09-0750-1_1259. ⑦
- 鷹野敏明, 高村民雄, 2014. ミリ波レーダ FALCON-I の開発— 現状と展望 —. 低温科学 (北海道大学低温科学研究所), 72, 219-224. 雲
- Takeuchi, N., Fujisawa, Y., Kadota, T., Tanaka, S., Miyairi, M., Shirakawa, T., Kusaka, R., Fedorov, A.N., Konstantinov, P., Ohata, T., 2015. The effect of impurities on the surface melt of a glacier in the Suntar Khayata Mountain Range, Russian Siberia. *Frontiers in Earth Science*. 3:82. doi: 10.3389/feart.2015.00082. ④
- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Uetake, J., Shimada, R., 2014. Spatial variations in impurities (cryoconite) on glaciers in northwest Greenland. *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 85-94. doi: 10.5331/bgr.32.85. ④
- Takeuchi, N., 2013. Seasonal and altitudinal variations in snow algal communities on an Alaskan glacier (Gulkana glacier in the Alaska range). *Environmental Research Letters*, 8, 035002. doi:10.1088/1748-9326/8/3/035002. ④
- Tanaka, H. L., Tamura, M., 2016c. Relationship between the Arctic Oscillation and surface air temperature in multi-decadal time-scale. *Polar Science*, 10, 199-209, in press. ③
- Tanaka, H. L., Seki, S., 2013. Development of 3D spectral linear baroclinic model and the application to the baroclinic instability associated with positive and negative Arctic Oscillation Index. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 91, 193-213. doi: 10.2151/jmsj.2013-207. ③
- Tanaka, S., Takeuchi, N., Miyairi, M., Fujisawa, Y., Kadota, T., Shirakawa, T., Kusaka, R., Takahashi, S., Enomoto, H., Ohata, T., Yabuki, H., Konya, K., Fedorove, A., Konstantinove, P., 2016a. Snow algal communities on glaciers in the Suntar-Khayata Mountain Range in eastern Siberia. *Russia, Polar Science*, 10, 227-238, in press. ④
- Tanaka, Y., Tateyama, T., Kameda, T., Hutchings, J. K., 2016b. Estimation of melt pond fraction over high-concentration Arctic sea ice using AMSR-E passive microwave data. *J. Geophys. Res.*, in press. ⑦
- 田中康弘, 館山一孝, 高橋修平, 亀田貴雄, 榎本浩之, 2015. 北極海における氷況把握のための画像解析法の開発—自動化した表面状態判別とその測定結果—. *雪氷*, 77(2), 173-190. ⑦
- Tei, S., Yonenobu, H., Sugimoto, A., Ohta, T., Maximov, T.C., 2015. Reconstructed summer Palmer Drought Severity Index since 1850 AD based on $\delta^{13}\text{C}$ of larch tree rings in eastern Siberia. *J. Hydrol.*, 529, 442-448. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.085. ②
- Tei, S., Yonenobu, H., Suzuki, S., Ohyama, M., Gotanda, K., Nakagawa, T., Sugimoto, A., 2015. Reconstructed July temperatures since AD 1800, based on a tree-ring chronology network in the Northwest Pacific region, and implied large-scale atmospheric-oceanic interaction. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 435, 203-209. doi: 10.1016/j.palaeo.2015.06.012. ②
- Tei, S., Sugimoto, A., Yonenobu, H., Ohta, T., Maximov, T.C., 2014. Growth and physiological responses of larch trees to climate changes deduced from tree-ring widths and $\delta^{13}\text{C}$ at two forest sites in eastern Siberia. *Polar Science*, 8, 183-195. doi: 10.1016/j.polar.2013.12.002. ②
- Tei, S., Sugimoto, A., Yonenobu, H., Yamazaki, T., Maximov, T.C., 2013. Reconstruction of soil moisture for the past 100 years in eastern Siberia by using $\delta^{13}\text{C}$ of larch tree rings. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.*, 118, 1-10. doi: 10.1002/jgrg.20110. ②
- Tei, S., Sugimoto, A., Yonenobu, H., Hoshino, Y., Maximov, T.C. 2013. Reconstruction of summer Palmer Drought Severity Index from $\delta^{13}\text{C}$ of larch tree rings in East Siberia. *Quat. Int.*, 290, 275-281. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.085. ②
- Terui, T., Kishi, M.J., Ueno, H., 2012. Lagrangian ensemble model of Copepodda (*Neocalanus cristatus*) in the northwestern subarctic Pacific. *J. Oceanogr.*, 68, 727-741. ⑥
- Timmermans, M.-L., Proshutinsky, A., Golubeva, E., Jackson, J.M., Krishfield, R., McCall, M., Platov, G., Toole, J., Williams, W., Kikuchi, T., Nishino, S., 2014. Mechanisms of Pacific Summer Water variability in the Arctic's Central Canada Basin. *J. Geophys. Res.*, 119, 11, 7523-7548. doi:10.1002/2014JC010273. ⑥
- Tohjima, Y., Kubo, M., Minejima, C., Mukai, H., Tanimoto, H., Ganshin, A., Maksyutov, S., Katsumata, K., Machida, T., Kita, K., 2013. Temporal changes in the emissions of CH_4 and CO from China estimated from CH_4/CO_2 and CO/CO_2 correlations observed at Hateruma Island. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 1663-1677. doi:10.5194/acp-14-1663-2014. ⑤
- Tohjima, Y., Minejima, C., Mukai, H., Machida, T., Yamagishi, H., Nojiri, Y., 2012. Analysis of seasonality and annual mean distribution of atmospheric potential oxygen (APO) in the Pacific region. *Global Biogeochem. Cycles*, 26, doi:10.1029/2011GB004110. ⑤
- Toyoda, T., Fujii, Y., Yasuda, T., Usui, N., Ogawa, K., Kuragano, T., Tsujino, H., Kamachi, M., 2016. Data assimilation of sea ice concentration into a global ocean-sea ice model with corrections for atmosphere forcing and ocean temperature fields. *J. Oceanogr.*, 72, 235-262. ①
- Toyoda, T., Fujii, Y., Yasuda, T., Usui, N., Iwao, T., Kuragano, T., Kamachi, M., 2013. Improved analysis of seasonal-interannual fields using a global ocean data assimilation system. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 61, 31-48. ①
- Toyokuni, G., Kanao, M., Tono, Y., Himeno, T., Tsuboi, S., Childs, D., Anderson, K., Takenaka, H., 2013. Japanese Contribution to the Greenland Ice Sheet Monitoring Network (GLISN). *Ant. Record*, 58 (1), 1-18. ④
- Tran, V.D., Osawa, A., Sato, T., 2015. Estimation of fine-root production using rates of diameter-dependent root mortality, decomposition, and thickening in forests. *Tree Physiol.* doi: 10.1093/treephys/tpv121. ②
- Tsujii, K., Otsuki, M., Akamatsu, T., Matsuo, I., Amakasu, K., Kitamura, M., Kikuchi, T., Miyashita, K., Mitani, Y., 2016. The migration of fin whales into the southern Chukchi Sea as monitored with passive acoustics. *ICES Journal of Marine Science*, doi: 10.1093/icesjms/fsv271, published online. ⑥
- Tsukazaki, C., Ishii, K., Saito, R., Matsuno, K., Yamaguchi, A., Imai, I., 2013. Distribution of viable diatom resting stage cells in bottom sediments of the eastern Bering Sea shelf. *Deep-Sea Res. II*, 94, 22-30. doi:10.1016/j.dsr2.2013.03.020. ⑥
- Tsutaki, S., Sugiyama, S., Sakakibara, D., Sawagaki, T., 2016. Surface elevation changes during 2007-2013 on Bowdoin and Tugto Glaciers, northwestern Greenland. *Journal of Glaciology*. doi:10.1017/jog.2016.106, in press. ④

- Uchida, M., Muraoka, H., Nakatsubo, T., 2015. Sensitivity analysis of ecosystem CO₂ exchange to climate change in High Arctic tundra using an ecological process-based model. *Polar Biol.* doi:10.1007/s00300-015-1777-x. ②
- Uchida, R., Kuma, K., Omata, A., Ishikawa, S., Hioki, N., Ueno, H., Isoda, Y., Sakaoka, K., Kamei, Y., Takagi, S., 2013. Water column iron dynamics in the subarctic North Pacific and Bering Sea. *J. Geophys. Res.*, 118: 1257-1271. doi:10.1029/2012JC008440. ⑥
- Uchimiya, M., Fukuda, H., Nishino, S., Kikuchi, T., Ogawa, H., Nagata, T., 2013. Vertical distribution of prokaryote production and abundance in the mesopelagic and bathypelagic layers of the Canada Basin, western Arctic: Implications for the mode and extent of organic carbon delivery. *Deep Sea Res. I*, 71, 103-112. doi: 10.1016/j.dsr.2012.10.001. ⑥
- Uchiyama, A., Yamazaki, A., Shiobara, M., Kobayashi, H., 2014. Case study on microphysical properties of boundary layer mixed-phase cloud observed at Ny Ålesund, Svalbard: observed cloud microphysics and calculated optical properties on 9 June 2011. *Polar Science*, 8, 57-72. doi: 10.1016/j.polar.2013.11.001. ③
- Umezawa, T., Machida, T., Aoki, S., Nakazawa, T., 2012. Contributions of natural and anthropogenic sources to atmospheric methane variations over Western Siberia estimated from its carbon and hydrogen isotopes. *Global Biogeochem. Cycles*, 26, GB4009. doi:10.1029/2011GB004232. ⑤
- Uotila, P., Holland, P.R., Vihma, T., Marsland, S.J., Kimura, N., 2014. Is realistic Antarctic sea ice extent in climate models the result of excessive ice drift. *Ocean Modelling*, 79, 33-42. ⑦
- Wang, Q., Ilicak, M., Gerdes, R., Drange, H., Aksenov, Y., Bailey, D., Bentsen, M., Biastoch, A., Bozec, A., Böning, C., Cassou, C., Chassignet, E., Coward, A., Curry, B., Danabasoglu, G., Danilov, S., Fernandez, E., Fogli, P., Fujii, Y., Griffies, S., Iovino, D., Jahn, A., Jung, T., Large, W., Lee, C., Lique, C., Lu, J., Masina, S., Nurser, A., Rabe, B., Roth, C., Salas y Méliá, D., Samuels, B., Spence, P., Tsujino, H., Valcke, S., Voltaire, A., Wang, X., Yeager, S., 2016a. An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part I: Sea ice and solid fresh water. *Ocean Modell.*, 99, 110-132. ①
- Wang, Q., Ilicak, M., Gerdes, R., Drange, H., Aksenov, Y., Bailey, D., Bentsen, M., Biastoch, A., Bozec, A., Böning, C., Cassou, C., Chassignet, E., Coward, A., Curry, B., Danabasoglu, G., Danilov, S., Fernandez, E., Fogli, P., Fujii, Y., Griffies, S., Iovino, D., Jahn, A., Jung, T., Large, W., Lee, C., Lique, C., Lu, J., Masina, S., Nurser, A., Rabe, B., Roth, C., Salas y Méliá, D., Samuels, B., Spence, P., Tsujino, H., Valcke, S., Voltaire, A., Wang, X., Yeager, S., 2016b. An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part II: Liquid freshwater. *Ocean Modell.*, 99, 86-109. ①
- Ward, T., Trost, B., Conner, J., Flanagan, J., Jayanty, R. K. M., 2012. Source apportionment of PM_{2.5} in a subarctic airshed- Fairbanks, Alaska. *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 536-543. ④
- 渡邊英嗣, 田村岳史, 2015. 北極海ポリニヤ域における海水生産量の衛星—モデル間比較. 日本リモートセンシング学会誌, 35号, 2-9. ⑦
- Watanabe, E., Onodera, J., Harada, N., Aita, M.N., Ishida, A., Kishi, M. J., 2015. Wind-driven interannual variability of sea ice algal production in the western Arctic Chukchi Borderland. *Biogeoscience*, 12, 6147-6168. doi: 10.5194/bg-12-6147-2015. ⑥
- Watanabe, E., Onodera, J., Harada, N., Honda, M., Kimoto, K., Kikuchi, T., Nishino, S., Matsuno, K., Yamaguchi, A., Ishida, A., Kishi, M., 2014. Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump. *Nature Comm.*, 5, 3950, doi: 10.1038/ncomms4950. ⑥
- Watanabe, E., Ogi, M., 2013. How does Arctic summer wind modulate sea ice-ocean heat balance in the Canada Basin?, *Geophys. Res. Lett.*, 40., pp1569-1574. doi:10.1002/grl50363. ⑥⑦
- Watanabe, E., Kishi, M. J., Ishida, A., Aita, M.N., 2012. Western Arctic primary productivity regulated by shelf-break warm eddies. *J. Oceanogr.*, 68, 703-718. doi:10.1007/s10872-012-0128-6. ⑥
- Witrant, E., Martinerie, P., Hogan, C., Laube, J.C., Kawamura, K., Capron, E., Montzka, S.A., Dlugokencky, E.J., Etheridge, D., Blunier, T., Sturges, W.T., 2012. A new multi-gas constrained model of trace gas non-homogeneous transport in firn: evaluation and behaviour at eleven polar sites. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1-19. ⑤
- Xue, B.L., Li, Z., Yin, X.A., Zhang, T., Iida, S., Otsuki, K., Ohta, T., Guo, Q., 2015. Canopy conductance in a two-storey Siberian boreal larch forest, Russia. *Hydrol. Process.*, 29, 1017-1026. doi: 10.1002/hyd.10213. ②
- Yamada, Y., Fukuda, H., Uchimiya, M., Motegi, C., Nishino, S., Kikuchi, T., Nagata, T., 2015. Localized accumulation and a shelf-basin gradient of particles in the Chukchi Sea and Canada Basin, western Arctic. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, doi:10.1002/2015JC010794. ⑥
- Yamaguchi, H., Nakano, Y., 2016. Research on navigation support system and optimum route search for the Northern Sea Route, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA, May 31 - June 3, 8p. ⑦
- Yamaguchi, H., 2013. Sea ice prediction and construction of an ice navigation support system for the Arctic sea route. Proc. 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'13), June 9-13, Espoo, Finland, 8p. ISBN 978-952-60-3635-9, ISSN 0376-6756. ⑦
- Yamaguchi, S., Motoyoshi, H., Tanikawa, T., Aoki, T., Niwano, M., Takeuchi, Y., Endo, Y., 2014. Application of snow specific surface area measurement using an optical method based on near-infrared reflectance around 900-nm wavelength to wet snow zones in Japan. *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 55-64. doi: 10.5331/bgr.32.55. ④
- Yamaguchi, S., Matoba, S., Yamasaki, T., Tsushima, A., Niwano, M., Tanikawa, T., Aoki, T., 2014. Glaciological observations in 2012 and 2013 at SIGMA-A site, Northwest Greenland, *Bulletin of Glaciological Research*, 32, 95-105. doi: 10.5331/bgr.32.95. ④
- Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., 2013. Ocean acidification in the three oceans surrounding northern North America. *J. Geophys. Res.*, 118, 1-11. doi:10.1002/2013JC009157. ⑥
- Yamamoto-Kawai, M., McLaughlin, F.A., Carmack, E.C., 2011. Effects of ocean acidification, warming and melting of sea ice on aragonite saturation of the Canada Basin surface water. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L03601. doi:10.1029/2010GL045501. ⑥
- Yamamoto, T., Kokubun, N., Kikuchi, D.M., Sato, N., Takahashi, A., Will, A., Kitaysky, A.S., Watanuki, Y., 2016. Differential responses of seabirds to inter-annual environmental change in the continental shelf and oceanic habitats of southeastern Bering Sea. *Biogeosciences*, 13, 2405-2414. doi:10.5194/bg-13-2405-2016. 2016. ⑥
- Yamamoto, T., Hoshina, K., Nishizawa, B., Meathrel, C.E., Phillips, R.A., Watanuki, Y., 2014. Annual and seasonal movements of migrating short-tailed shearwaters reflect environmental variation in sub-Arctic and Arctic waters. *Mar. Biol.*, 162, 413-424. doi:10.1007/s00227-014-2589-1. ⑥
- Yamashita, Y., Akiyoshi, H., Shepherd, T.G., Takahashi, M., 2015. The combined influences of westerly phase of the Quasi-Biennial Oscillation and 11-year solar maximum conditions on the Northern Hemisphere extratropical winter circulation, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 93 (6), 613-628. ①
- Yamazaki, T., Kato, T., Ito, T., Nakai, T., Matsumoto, K., Miki, N., Park, H., Ohta, T., 2013. A Common Stomatal Parameter Set to Simulate the Energy and Water Balance over Boreal and Temperate Forests. *J. Meteor. Soc. Japan*, 91, 273-285. doi: 10.2151/jmsj.2013-303. ②
- Yamaguchi, S., Iwamoto, K., Nakai, S., 2013. Interannual fluctuations of the relationship between winter precipitation and air temperature in the heavy-snowfall zone of Japan. *Annal. Glaciol.*, 54, 183-188. doi:10.3189/2013AoG62A302. ③

- Yang, W., Kobayashi, H., Suzuki, R., Nasahara, K.N., 2014. A simple method for retrieving understory NDVI in sparse needleleaf forests in Alaska using MODIS BRDF data. *Remote Sens.*, 6, 11936-11955. doi: 10.3390/rs61211936. ①②
- Yasunaka, S., Murata, A., Watanabe, E., Chierici, M., Fransson, A., van Heuven, S., Hoppema, M., Ishii, M., Johannessen, T., Kosugi, N., Lauvset, S. K., Mzhis, J. T., Nishino, S., Omar, A. M., Olsen, A., Sasano, D., Takahashi, T., Wanninkhof, R., 2016. Mapping of the air-sea CO₂ flux in the Arctic Ocean and its adjacent seas: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability. *Polar Science*, 10, 323-334, in press. ⑤
- Yiou, P., Servonnat, J., Yoshimori, M., Swingedouw, D., Khodri, M., Abe-Ouchi, A., 2012. Stability of weather regimes during the last millennium from climate simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L08703. ①
- Yokoi, N., Matsuno, K., Ichinomiya, M., Yamaguchi, A., Nishino, S., Onodera, J., Inoue, J., Kikuchi, T., 2016. Short-term changes in a microplankton community in the Chukchi Sea during autumn: consequences of a strong wind event. *Biogeosciences*, 13, 913-923. doi: 10.5194/bg-13-913-2016. ⑥
- Yoon, S., Watanabe, E., Ueno, H., Kishi, M.J., 2015. Potential habitat for chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in the Western Arctic based on a bioenergetics model coupled with a three-dimensional lower trophic ecosystem model. *Prog. Oceanography*, 131, 146-158. doi: 10.1016/j.pocean.2014.12.009. ⑥
- Yoshikawa-Inoue, H., Zhu, C., 2013. Ecosystem respiration derived from ²²²Rn measurements on Rishiri Island, Japan. *Biogeochemistry* 115, 185-194⑤
- Yoshimura, K., 2015. Stable water isotopes in climatology, meteorology, and hydrology: A review. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93. doi:10.2151/jmsj.2015-036. ①
- 芳村 圭, 三好建正, 金光正郎, 2013. アンサンブルカルマンフィルタを用いた水同位体比データ同化に向けた理想化実験. *水工学論文集*, 57. ①
- Yoshimori, M., Watanabe, M., Abe-Ouchi, A., Shiogama, H., Ogura, T., 2014a. Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM. *Clim. Dyn.*, 42 (5-6), 1613-1630. ①
- Yoshimori, M., Abe-Ouchi, A., Watanabe, M., Oka, A., Ogura, T., 2014b. Robust seasonality of Arctic warming processes in two different versions of the MIROC GCM. *J.Climate*, 27 (16), 6358-6375. ①
- Yoshimori, M., Abe-Ouchi, A., 2012. Sources of spread in multimodel projections of the Greenland ice-sheet surface mass balance. *Journal of Climate*, 25, 1157-1175. ①
- 吉森正和, 横島徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩籠秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田 暁, 千喜良 稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部 雅浩, 木本昌秀, 2012. 気候感度 Part 1 : 気候フィードバックの概念と理解の現状. *天気*, 59, 5-22. ①
- 吉森正和, 横島徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩籠秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田 暁, 千喜良 稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部 雅浩, 木本昌秀, 2012. 気候感度 Part 2 : 不確実性の低減への努力. *天気*, 59, 91-109. ①
- Yoshizawa, E., Shimada, K., Ha, H.K., Kim, T.W., Kang, S.H., Chung, K.H., 2015. Delayed responses of the oceanic Beaufort Gyre to winds and sea ice motions: influences on variations of sea ice cover in the Pacific sector of the Arctic Ocean. *J. Oceanogr.*, 71, 187-197. doi: 10.1007/s10872-015-0276-6. ⑦
- Yuan, W., Liu, S., Dong, W., Liang, S., Zhao, S., Chen, J., Xu, W., Li, X., Barr, A., Black, T.A., Yan, W., Goulden, M.L., Kulmala, L., Lindroth, A., Margolis, H.A., Matsuura, Y., Moors, E., van der Molen, M., Ohta, T., Pilegaard, K., Varlagin, A., Vesala, T., 2014. Differentiating moss from higher plants is critical in studying the carbon cycle of the boreal Biome. *Nat. Commun.*, 5, 4270. doi: 10.1038/ncomms5270. ②
- Zhang, Y., Enomoto, H., Ohata, T., Kitabata, H., Kadota, T., Hirabayashi, Y., 2016a. Future projection of glacier mass balance in the Altai Mountains for the RCP climate scenarios. *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-016-3006-x. ④
- Zhang, Y., Enomoto, H., Ohata, T., Kadota, T., Shirakawa, T., Takeuchi, N., 2016b. Surface mass balance on Glacier No.31 in the Suntar-Khayata Range, eastern Siberia, from 1951 to 2014. *Journal of Mountain Science*, accepted. ④
- Zhu, C., Yoshikawa-Inoue, H., Tohjima, Y., Irino, T., 2015. Temporal variations in black carbon recorded on Rishiri Island, northern Japan. *Geochem. J.*, 49. doi:10.2343/geochemi.2.0356, in press. ⑤
- 2. 投稿中論文 (査読有、submitted)**
- Alimasi, N., Enomoto, H., Hinzman, L., Cherry, J., Iwahana, G., Kameda, T., Tateyama, K., Hoshino, S., Sugiura, K., Hori, M., Yabuki, H., Sugimura, T., Terui, T., 2016. Winter-spring transition of cryosphere observed by the microwave radiometer over Alaska. *Cold Regions Science and Technology*, submitted. ④
- Crasemann, B., Handorf, D., Jaiser, R., Dethloff, K., Nakamura, T., Ukita, J., Yamazaki, K., 2016. Can preferred atmospheric circulation patterns on the Northern Hemisphere be associated with Arctic sea ice loss?, submitted to *Env. Res. Lett.*, ③
- Konno, A., 2016. Toward the risk assessment of ship navigation in Arctic Sea Route under decreasing ice condition, "Safe and Sustainable Shipping in a Changing Arctic Environment" (ShipArc 2015), 8p, in review. ⑦
- Furuichi, M., Otsuka, N., 2016. Container Quick Delivery Scenario between East Asia and Northwest Europe by the NSR/SCR-combined Shipping in the Age of Mega-ships, IAME, Maritime Economics & Logistics, in review. ⑦
- Hori, M., Sugiura, K., Kobayashi, K., Aoki, T., Tanikawa, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Enomoto, H., 2016. 37-year long (1979-2015) Northern Hemisphere snow cover extent product in 5-km spatial resolution derived with consistent objective criteria from AVHRR and MODIS radiances. *Remote Sensing of Environment*, submitted.④
- Hoshi, K., Ukita, J., Honda, M., Iwamoto, K., Nakamura, T., Yamazaki, K., Dethloff, K., Jaiser, R., Handorf, D., 2016. Characterizing the upward propagation of planetary waves associated with recent Arctic sea-ice loss, submitted to *Geophys Res. Letters*. ③
- Mudunkotuwa, D.Y., De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2016. Improving numerical sea ice predictions in the Arctic Ocean by data assimilation using satellite sea ice observations. *Polar Research*, in review. ⑦
- Nakamura, T., Yamazaki, K., Honda, M., Ukita, J., Jaiser, R., Handorf, D., Dethloff, K., 2016. On the atmospheric response experiment to a Blue Arctic Ocean, submitted to *Geophys Res. Letters*. ③
- Tanaka, K., Takesue, N., Nishioka, J., Kondo, Y., Ooki, A., Kuma, K., Hirawake, T., Yamashita, Y., 2015. The conservative behavior of dissolved organic matter in surface waters of the southern Chukchi Sea, western Arctic Ocean, during early summer. *Geophys. Res. Lett.*, submitted. ⑥
- 塚川佳美, 東久美子, 近藤 豊, 杉浦幸之助, 大畑 祥, 森 樹大, 茂木信宏, 小池 真, 平林幹啓, Remi Dallmayr, 榎本浩之, 2016. アラスカ積雪中のブラックカーボンの緯度分布. *雪氷*, submitted. ④

3. 著書

- Deal, C. J., Steiner, N., Christian, J., Kinney, J. C., Denman, K. L., Elliott, S. M., Gibson, G., Jin, M., Lavoie, D., Lee, S. H., Maslowski, W., Wang, J., Watanabe, E., 2014. Progress and Challenges in Biogeochemical Modeling of the Pacific Arctic Region, in: Grebmeier, J. M., Maslowski, W. (Eds.), "The Pacific Arctic Region, Ecosystem status and trends in a rapidly changing environment". Springer, Dordrecht Heidelberg New York London, pp.133-165. doi:10.1007/978-94-017-8863-2. ⑥
- 檜山哲哉, 2015. 第1章気候・凍土と水環境. 『シベリア 温暖化する極北の水環境と社会』, 京都大学学術出版会, 3-29. ②
- 檜山哲哉, 2014. 第5章河川流出変動. 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動. 気象研究ノート, 第230号, 50-62. ②
- 飯島慈裕, 佐藤友徳, 2014. 第1章最近20年間の寒冷圏陸域研究の進捗. 気象研究ノート, 第230号, 1-11. ③
- 飯島慈裕, 佐藤友徳編, 2014年. 第4章北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動. 気象研究ノート, 第230号, 219. ②
- 飯島慈裕, 佐藤友徳, 2014. 第16章寒冷圏陸域研究の将来像. 気象研究ノート, 第230号, 212-216. ③
- 石川 守, 2014. 第9章気候変動と永久凍土—全球規模での永久凍土観測網による知見—, 気象研究ノート, 230号, 114-130. ②
- 岩崎俊樹, 河宮未知生, 本田明治, 伊藤彰彦, 立入郁, 杉山昌広, 2014. 第8章 温暖化で起こる地球表層の変化. 『地球温暖化—そのメカニズムと不確実性』, 朝倉書店, 97-117. ③
- 松浦陽次郎, 2014. 第10章 植生(森林生態・土壌). 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動, 気象研究ノート, 第230号, 135-146. ②
- 三寺史夫, 中村 哲, 田口文明, 浮田甚郎, 星 一平, オホーツク海・北極域における大気海洋相互作用, 気象研究ノート, 22*, 第8章, 日本気象学会, 2016刊行予定 ③
- 岡本 創, 2014. 衛星搭載アクティブセンサによる雲研究の現状と今後の展開. 雲とエアロゾルをつなぐ観測とモデリング, 『低温科学 Low Temperature Science』, 72, 231-239. ISSN 1880-7593. ③
- 斎藤和之, 宮崎 真, 羽島知洋, 末吉哲雄, 2014a. 第15章 陸域モデル相互比較とモデル—観測連携. 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動, 気象研究ノート, 230号, 196-211. ②
- Sekiguchi, K., Jefferson, T. A., Iwahara, Y., Yoshioka, M., Mori, K., Ford, J. K. B., Mitani, Y., Gorter, U., 2014. "An Infrequently-Occurring Anomalous Color Pattern on Pacific White-Sided Dolphins, *Lagenorhynchus obliquidens*" in: Joshua B. Samuels (Ed), "Dolphins: Ecology, Behavior and Conservation Strategies". Nova Science Publishers, Inc. 183-199. ⑥
- 島田浩二, 2011. 第4章北極海の海洋物理学. 北極の気象と海水, 気象研究ノート, 第222号, 53-70. ⑦
- 島田浩二, 2011. 第8章北極海の海洋変動と海水変動. 北極の気象と海水, 気象研究ノート, 第222号, 107-115. ⑦
- 島田浩二, 2016. 「5.2 北極海海水からみた気候変動」. 『気候変動の事典』, 朝倉書店, (2016年刊行予定) ⑦
- 杉本敦子, 2015. 第2章シベリアの植生. 『シベリア 温暖化する極北の水環境と社会』, 京都大学学術出版会, 31-48. ②
- 杉浦幸之助, 堀雅裕, 2014. 近年の広域積雪面積の変動. 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動, 気象研究ノート, 第230号, 172-181. ④
- 杉山 慎, 2015. I「低温科学便覧」I部6章氷河, 丸善出版, 95-107. ④
- 鈴木力英, 2014. 第11章 植生変動の衛星リモートセンシングによる研究. 北半球寒冷圏陸域の気候・環境変動, 気象研究ノート, 第230号, 147-158. ②
- 鈴木力英, 2014. リモートセンシングによってわかる陸上植生. 地球環境変動の生態学, 『現代の生態学』, 共立出版, 41-60. ②
- 鈴木力英, 加藤知道, 2014. 陸域生態系研究における現地観測. 地球環境変動の生態学, 『現代の生態学』, 共立出版, 20-40. ②
- 高田久美子, 2014. 植生と土壌. 『地球温暖化の事典』, 丸善, pp.136-141. ①
- 館山一孝, 2015, PartII-6 海洋観測船の生活と調査研究の日々:海を見て、データを集める. 『フィールドの見方 FENICS 100万人のフィールドワーカーシリーズ2』, 古今書院, 214p. ⑦
- 浮田甚郎, 本田明治, 2013. 第11章 ENSO-NAOのリンクについて. ENSO研究の現在, 気象研究ノート, 第228号, 151-165. ③
- Williams, W. J., Shroyer, E., Kinney, J. C., Itoh, M., Maslowski, W., 2014. Shelf-break exchange in the Bering, Chukchi and Beaufort Seas, in: Grebmeier, J. M., Maslowski, W. (Eds.), "The Pacific Arctic Region, Ecosystem status and trends in a rapidly changing environment". Springer, Dordrecht Heidelberg New York London, pp.133-165. doi:10.1007/978-94-017-8863-2. ⑥
- Yamaguchi, H., et al., 2015. Northern Sea Route Handbook, The Japan Association of Marine Safety, 2015, 223p. ⑦
- 山口 一, 島田浩二, 2016. 『北極海航路ハンドブック 実務編(上巻)』, 日本海難防止協会, 254p. ⑦
- 山口 一, 島田浩二, 2015. 『北極海航路ハンドブック』, 日本海難防止協会, 124p. ⑦
- 山口 一, 2015. 北極海の航路利用と氷海航行支援システムについて. 『第90回船長教養講座』, 日本船長協会, 86p. ⑦
- 山口 一, 木村詞明, 2012.5.1 節「氷海とその利用」. シリーズ<環境の世界> 『海洋技術環境学の創る世界』, 朝倉書店, 122-132. ISBN978-4-254-18534-8. ⑦
- Zhegusov, Y. I., Ksenofontov, S.M., Maximov, T.C., Sugimoto, A., Iwahana, G., Dincer, I. et al. (eds.), 2013. Environmental Consciousness of Local People of Yakutia Under Global Climate Change. Causes, Impacts and Solutions to Global Warming, 251-260. doi: 10.1007/978-1-4614-7588-0_16. ②

4. 誌上发表(査読無し論文、一般雑誌記事、等)

- Abe, M., Nozawa, T., Ogura, T., Takata, K., 2015. Effect of retreating sea ice on Arctic cloud cover in simulated recent global warming, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 15, 17527-17552. doi:10.5194/acpd-15-17527-2015. ①
- 甘糟和男, 喜多村稔, 西野茂人, 菊地 隆, 2013. チャクチ海南部における体積後方散乱強度の時系列変化. 海洋音響学会 2013年度研究発表会講演論文集, 69-72. ⑥
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2016. Influence of topographic interaction and numerical diffusion on the Arctic Ocean freshwater modeling. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 246-248. ⑦
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2015c. Study of mesoscale ocean eddies and its interaction with sea ice in the marginal ice zone using high-resolution ice-ocean coupled model. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 127-130. ⑦
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., Ono, J., 2014. A high-resolution hindcast study for the Northern Sea Route. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 177-180. ⑦
- De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., Ono, J., 2013. Preliminary results of sea ice prediction in northern sea route using high-resolution ice ocean coupled model. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 127-130. ⑦
- 榎本浩之, 金尾政紀, 杉山 慎, 齋藤冬樹, 坪井誠司, 永塚尚子, 2015. 温暖化とグリーンランド氷床・周縁氷河. 月刊地球, 37(2), 3-8. ④
- 榎本浩之, Alimasi, N., 照井健志, 杉村 剛, 矢吹裕伯, 2014. GRENE 北極気候変動研究事業の戦略研究目標と衛星観測への期待, 計測と制御. ADS

- 榎本浩之, Nuerasimuguli ALIMASI, 柴田啓貴, 田中康弘, 館山一孝, 高橋修平, 2012. 北極海氷変動の季節性と変調および環北極域の環境への影響. 環境科学会誌, 25 (6), 469-476. ④
- Hasumi, H., 2014. A review on ocean resolution dependence of climate biases in AOGCMs. CLIVAR Exchanges, 65, 7-9. ⑦
- Hinzman L.D., Ohata T., Polyakov I.V., Suzuki R., Walsh, J.E., 2013. JAMSTEC-IARC international collaboration enhancing understanding of the Arctic climate system. Polar Science, 7, 49-52. ②
- 平沢尚彦 他, 2012. 2011 年秋季極域・寒冷域研究連絡会の報告「北極温暖化の理解に向けて」. 天気, 63-66. ④
- 平沢尚彦 他, 2012. 2012 年春季極域・寒冷域研究連絡会の報告「厳冬をもたらす大気循環-2011/2012 の冬季をふりかえる-」. 天気, 852-854. ④
- Hoshino S., Tateyama, K., Ushio, S., Tamura, T., 2016. Development and Verification of sea-ice thickness algorithm by AMSR2 data in the Antarctic. The proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 109-112. ⑦
- 星野聖太, 館山一孝, 牛尾収輝, 田村岳史, 2014. 南極リュッツォ・ホルム湾における 2013-2014 年の観測報告. 北海道の雪氷, 33, 65-68. ⑦
- 星野聖太, 館山一孝, 牛尾収輝, 田村岳史, 2013. 衛星および現場データを用いた南極昭和基地周辺の海氷厚モニタリング. 北海道の雪氷, 32, 134-137. ⑦
- Ishiyama, T., Takagi, T., 2014. Growth Modes of Frost Flower and Comparison to Snow Crystal. Proceedings of the 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 146-149. ⑦
- Ishiyama, T., Takagi, T., Chisaka, M., 2013. Three-dimensional Pattern formation and growth mode of frost flower. Proceedings of the 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 87-90. ⑦
- Ishiyama, T., Takagi, T., 2012. Computer Simulation in Pattern Formation of Forest Flower at Coastal Area. Proceedings of the 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 14-17. ⑦
- Ito, M., Ohshima, K.I., Fukamachi, F., Simizu, D., Iwamoto, K., Matsumura, Y., Mahoney, A.R., Eicken, H., 2014. A study of formation processes of supercooled water and frazil ice in a coastal polynya. Proceedings of the 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 138-141. ⑦
- Jin, H., Kimura, N., Yamaguchi, H., 2012. A melt process of coastal sea ice in the Arctic Ocean using satellite images. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 19-24, 40-42. ⑦
- 漢那直也, 西岡 純, 村山愛子, 豊田威信, 2012. 南部オホーツク海域の海氷に含まれる栄養塩と鉄の定量評価. 月刊海洋, 44, 9, 517-522. ⑥
- Kasai, H., Katakura, S., Hamaoka, S., Tateyama, K., Murai, K., Nagata, R., 2016. Influences of change of sea-ice distribution on oceanographic environment in the coastal water around Mombetsu-2: Results from the monitoring survey at Okhotsk Tower. The proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 189-191. ⑦
- Kasai, H., Tateyama, K., Katakura, S., Nagata, R., Hamaoka, S., 2015. Influences of temporal change of sea-ice distribution on oceanographic environments in the coastal region around Mombetsu, the southwestern Okhotsk Sea. The proceedings of the 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 28-30. ⑦
- Kayano, M., Kimura, N., Nakano, Y., Yamaguchi, H., 2014. Effect of sea ice on spatial and temporal variation of spring bloom in the Sea of Okhotsk. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 127-130. ⑦
- Kim, H., Sawamura, J., 2016. Simplified Random Ice Force Modeling for Ice-going Ships Navigating in Pack Ice based on Collision Test between Model Ship and Synthetic Ice, Proceeding of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 155-158. ⑦
- Kim, H., Sawamura, J., 2015. A Study on the Collision Response between Icebreaker and Ice Floe based on the Model Test using Synthetic Ice, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 21, 401-414. ⑦
- Kimura, N., Yamaguchi, H., 2016. Medium-term forecast of the Arctic sea-ice, Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 186-187. ⑦
- Kimura, N., Mori, T., Yamaguchi, H., 2015. Medium-range prediction of the Arctic sea ice area by considering processes controlling the ice-thickness change. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 131-132. ⑦
- Kimura, N., Nakano, Y., Yamaguchi, H., 2014. Factors controlling the summer sea-ice cover in the Arctic: a way to improve the accuracy of medium-range forecast of summer ice area. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 2014, 181-182. ⑦
- Kimura, N., Nishimura, N., Yamaguchi, H., 2014. Medium-range forecast of summer sea-ice extent in the Arctic using satellite data. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 19-24, pp.101-102. ⑦
- Kimura, N., Nakano, Y., Nishimura, A., Yamaguchi, H., 2013. Medium-range forecast of summer sea-ice extent in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 131-132. ⑦
- Kimura, N., 2013. A factor controlling the summer sea-ice cover in the Arctic. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 190-191. ⑦
- 金野祥久, 宇都正太郎, 2015. 氷学分野における水槽試験及びシミュレーション技術の動向, 第 25 回海洋工学シンポジウム論文集, 日本船舶海洋工学会/日本海洋工学会, 491-494. ⑦
- 金野祥久, 黒田翔也, 2015. 船舶の brash ice channel 航行時抵抗評価方法の開発と課題, 第 25 回海洋工学シンポジウム論文集, 日本船舶海洋工学会/日本海洋工学会, 583-587. ⑦
- 久万健志, 中山雄太, 藤田聡志, 西村将太郎, 石川聡子, 小俣 紋, 島田浩二, 2012. 北東部ベーリング海大陸棚域及び西部北極海における鉄の挙動とその起源. 月刊海洋, 44, 531-540. ⑦
- 丸山篤志, 宮崎 真, 小谷亜由美, 栗林正俊, 斉藤 琢, 小野圭介, 2014. International Joint Conference of 11th AsiaFlux International Workshop, 3rd HESSS and 14th Annual Meeting of KSAFM "Communicating Science to Society: Coping with Climate Extremes for Resilient Ecological-Societal Systems" の報告. 生物と気象(Clim. Bios.), 14:D1-7. ②
- 丸山末妃呂, 津滝 俊, 榎原大貴, 澤柿教伸, 杉山 慎, 2014. グリーンランド北西部カナック氷帽における 質量収支・流動速度・表面高度変化の観測. 北海道の雪氷, 33, 81-84. ④
- 松浦陽次郎, 2014. フィンランドとエストニアの北方林: 永久凍土が無い場所の話. 『海外の森林と林業』, 91, 31-35. ②
- 松浦陽次郎, 2012. 北方林を再認識する: 永久凍土の上にも森林がある. 『海外の森林と林業』, 85, 27-31. ②
- Mori, T., Kimura, N., Yamaguchi, H., 2015. Development of a method for medium-term prediction of the Arctic sea ice thickness. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 133-135. ⑦
- 森下裕士, 館山一孝, 大塚夏彦, 2015. 北極海航路の氷況と可航性に関する研究. 北海道の雪氷, 34, 43-46. ⑦

- Mudunkotuwa, D.Y., Yamaguchi, H., 2016. Data assimilation in an ice-ocean coupled model to improve sea ice predictions in the Arctic Ocean. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 235-238. ⑦
- Mudunkotuwa, D.Y., De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2015. Parametric study of assimilating sea ice concentration in a coupled ice-ocean model using nudging. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 64-67. ⑦
- Nagakawa, K., Otsuka, N., Sato, S., Yamaguchi, T., Miyata, K., Tsuzuki, T., Nakamura, T., Fukuuma, T., 2015. Shipping cost analysis of northern sea route: iron ore and PCC. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 163-166. ⑦
- Nagakawa, N., Yamaguchi, H., Ono, J., 2014. Numerical study on a self-melting system of sea ice through eddy formation. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 131-134. ⑦
- 永塚尚子, 竹内 望, 植竹 淳, 2015. グリーンランド氷床の生物学的研究. 月刊地球, 426, 72-82. ④
- Nakano, Y., Otsuka, N., Sumida, T., Mori, T., Koenuma, T., Shiotsubo, K., Uda, R., Maeoka, K., 2014. Ice concentration and navigability of the Northern Sea Route. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 213-217. ⑦
- Nakano, Y., Yamaguchi, H., Kimura, N., 2013. Sea ice production and reduction in the Sea of Okhotsk. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 220-222. ⑦
- 西岡純, 2012. 海水がオホーツク海の物質循環と生物生産に及ぼす影響—凍る海の豊かな生態系を支える機構の解明を目指して—. 月刊海洋, Vol.44, 9, 368-374. ⑥
- Nishimura, A., Yamaguchi, H., Kimura, N., 2012. Prediction of summer sea-ice extent in the Arctic based on the analysis of the winter ice motion. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 19-24, 36-39. ⑦
- Nishizawa, B., Matsuno, K., Labunski, E., Kuletz, K., Yamaguchi, A., Watanuki, Y., 2015. Seasonal distribution of short-tailed shearwaters and their prey in the Bering and Chukchi Seas. Biogeosciences Discuss., 17721-17750, doi:10.5194/bgd-12-17721-2015. ⑥
- Noda, T., Kimura, N., Fujiyoshi, Y., Yamaguchi, H., 2012. Prediction of the Okhotsk sea ice by high-resolution model. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 19-24, 2012, pp.7-9. ⑦
- 小倉知夫, 2013. 入門講座地球温暖化—第2講 気候モデルによる地球温暖化のシミュレーション—. 大気環境学会誌, 48, A11-A18. ①
- 大貫 伸, 山口 一, 2015. 北極海航路の安全航行のための運航実務書の作成, 第25回海洋工学シンポジウム論文集, 日本船舶海洋工学会/日本海洋工学会, 115-118. ⑦
- 太田岳史, 小谷亜由美, 2014. 東シベリアにおける水・炭素循環に関する研究. 『海外の森林と林業』, 89号, 38-44. ②
- 太田岳史, 小谷亜由美, 2014. 東シベリア・カラマツ林における水・エネルギー・炭素循環:フラックスから流域, そしてモデル. 『水利科学』, 340, 43-73. ②
- Ono, J., De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2014. Modeling study of sea ice for the Northern Sea Route: toward the short-term prediction. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 175-176. ⑦
- Ono, J., Tateyama, K., De Silva, L.W.A., Yamaguchi, H., 2013. Observation and modeling of sea ice in the Arctic Ocean: toward the short-term forecast for the Arctic sea route. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 17-20, 125-126. ⑦
- Otsuka, N., Imai, K., Nagakawa, K., Furuichi, M., 2016a. Northern Sea Route transport scenarios for various cargoes. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 53-56. ⑦
- Otsuka, N., Izumiyama, K., Nagakawa, K., Imai, K., 2016b. Feasibility of LNG transport via the NSR by icebreaking LNG carrier. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 151-154. ⑦
- Otsuka, N., Nagakawa, K., Ito, R., Iwasaki, K., Nakashio, Y., Araoka, K., Odagiri, T., Saito, K., 2015. Shipping cost analysis of northern sea route: LNG and Naphtha. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 159-162. ⑦
- Otsuka, N., Morishita, H., Tateyama, K., Izumiyama, K., 2015. Study on Navigability and Ice Condition of the Northern Sea Route from the 2014 Sailing Record. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 15-19, 171-173. ⑦
- Otsuka, N., Nakano, Y., Adachi, Y., Iki, S., Kamiko, Y., Kaewngern, S., Hoshi, M., Yamashita, K., 2014. Cost analysis of Northern Sea Route shipping. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-14 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 16-19, 218-222. ⑦
- Otsuka, N., Izumiyama, K., Furuichi, M., Kobayashi, W., 2013. Study on Feasibility of Northern Sea Route Shipping. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 2014.2, Mombetsu, Japan. ⑦
- Otsuka, N., Izumiyama, K., Shibata, H., Furuichi, M., 2012. Feasibility of Northern Sea Route based on the recent voyage. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, Mombetsu, Japan. ⑦
- 大塚夏彦, 田村 亨, 古市正彦, 2015. 北極海航路及び競合ルートによるLNG海上輸送路の経済的フィージビリティの分析. 第49回土木計画学研究発表会, 北九州. ⑦
- 大塚夏彦, 2015. 北極海航路の現状と将来. 科研費基盤B: 「アジア・ヨーロッパ大陸間のマルチモード国際物流シミュレーションモデル構築と政策分析」公開ワンデーセミナー, 東京大学. ⑦
- 大塚夏彦, 永川圭介, 森下裕士, 2015. 北極海航路の近年の航行動向と展望, 第25回海洋工学シンポジウム論文集, 日本船舶海洋工学会/日本海洋工学会, 220-226. ⑦
- 大塚夏彦, 永川圭介, 森下裕士, 2015. 北極海航路の近年の航行動向と展望. 第25回海洋工学シンポジウム, 東京. ⑥
- 大橋良彦, 飯田高大, 杉山 慎, 2014. グリーンランド氷床沿岸の海洋環境変動. 北海道の雪氷, 33, 85-88. ④
- 大塚夏彦, 泉山 耕, 古市正彦, 2011. 定期航路としての北極海航路NSRの可能性に関する考察. 第27回寒地技術シンポジウム論文・報告集, 札幌. ⑦
- 尾関俊浩, 八代裕平, 安達 聖, 2015. SPC型しぶき計と船舶用雨量計型しぶき計による飛沫量の比較計測, 寒地技術論文・報告集, 31, 134-139. ⑦
- Polyakov, I.V., Bolton, R., Greve, R., Hutchings, J., Kim, S.J., Kim, Y., Lee, S.H., Ohata, T., Saito, F., Sugimoto, A., Suzuki, R., 2014. Promoting international, multidisciplinary efforts in detecting and understanding high-latitude changes, and searching for their global impacts. Polar Science, 8, 53-56. doi: 10.1016/j.polar.2014.03.002. ②
- Polyakov, I.V., Bolton, R., Greve, R., Hutchings, J., Kim, S.J., Kim, Y., Lee, S.H., Saito, F., Suzuki, R. (eds.), 2014. Special Issue: The Third International Symposium on the Arctic Research (ISAR-3). Polar Science, 8, 53-216. ②

- Saiki, R., Mitsudera, M., Fujisaki-Manome, A., Toyota, T., Kimura, N., Ukita, J., Nakamura, T., 2015. A mechanism of ice-band pattern formation due to resonant interaction between sea ice and internal waves. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 61-63. ⑦
- 斉藤 潤, 津滝 俊, 澤村教伸, 杉山 慎, 2014b. グリーンランド北西部における氷帽の表面高度変化. 北海道の雪氷, 33, 77-80. ④
- Sasaki, H., Matsuno, K., Fujiwara, A., Onuka, M., Yamaguchi, A., Ueno, H., Watanuki, Y., Kikuchi, T., 2015. Distribution of Arctic and Pacific copepods and their habitat in the northern Bering Sea and Chukchi Sea. Biogeosciences Discuss., 12, 18661-18691, doi:10.5194/bgd-12-18661-2015. ⑥
- 佐藤篤司, 大宮 哲, 對馬あかね, 2013. フィンランド積雪縦断観測 2013. 雪氷北信越, 33. ④
- Sawamura, J., 2016. Numerical simulation of local ice pressure distributions and structural response of ship hull for ship advancing in level ice, Proceeding of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, 175-178. ⑦
- 澤村淳司, 金野祥久, 木岡信治, 2015. 砕氷片の沈み込み運動による船体氷荷重推定のための模擬氷を用いた2次元模型船実験. 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, Vol.20, 303-306. ⑦
- 澤村淳司, 千賀英敬, 2015. 模擬氷を用いた模型船実験による砕氷船の流氷中での氷荷重の計測. 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, 21, 395-399. ⑦
- 澤村淳司, 2015. 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, 日本船舶海洋工学学会/日本海洋工学学会, 464-471. ⑦
- Shiga, T., Ozeki, T., Sawamura, J., Yamaguchi, H., 2015. Analysis of sea spray characteristics in large vessels - Case study of the icebreaker Shirase. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 147-150. ⑦
- Shigihara, T., Konno, A., 2016. Risk Assessment Method for Collision of Ship with an Ice Floe, Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, 171-175. ⑦
- Shimada, K., Yoshizawa, E. 2016. Sea ice variation in a new state of the Arctic Ocean. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 1-4. ⑦
- Song, C., Maksyutov, S., Belikov, D., Takagi, H., Shu, J., 2015. Simulating CO₂ profiles using NIES TM and comparison with HIAPER Pole-to-Pole Observations. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 6745-6770. doi:10.5194/acpd-15-6745-2015. ⑤
- Sueyoshi, T., Saito, K., Miyazaki, S., Mori, J., Ise, T., Arakida, H., Suzuki, R., Sato, A., Iijima, Y., Yabuki, H., Ikawa, H., Ohta, T., Kotani, A., Hajima, T., Sato, H., Yamazaki, T., Sugimoto, A., 2015. The GRENE-TEA Model Intercomparison Project (GTMP) stage 1 forcing dataset. Earth Syst. Sci. Data Discuss., 8, 703-736. doi: 10.5194/essdd-8-703-2015. ②
- Suga, K., Sawamura, J., Kim, H., 2016. Ice resistance test using synthetic ice for ship advancing into ice-covered water, Proceeding of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, 163-166. ⑦
- 杉山 慎, 津滝俊, 榊原大貴, 斉藤 潤, 丸山未妃呂, 澤村教伸, 2015. グリーンランド北西部における氷帽およびカービング氷河の変動. 月刊地球, 37(2), 9-18. ④
- 杉山 慎, 澤村教伸, 津滝 俊, 榊原大貴, 丸山未妃呂, 2014. グリーンランド北西部における氷床・氷帽・カービング氷河の変動. 北海道の雪氷, 33, 73-76. ④
- Takagi, T., Tateyama, K., 2016. Ice navigation according to the ability of the icebreaker using ship radar images. Proceedings of the 31th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 179-181. ⑦
- 高木敏幸, 2015. 船舶レーダを用いた航路選択アルゴリズムの開発. 巡視船「そうや」海氷観測速報, SIRAS-15, Cruise Report Volume 1, 71-72. ⑦
- Takagi, T., Tateyama, K., Ono, J., 2015. Arctic sea route path planning based on the sea ice edge prediction. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 140-141. ⑦
- Takagi, T., Tateyama, K., Ishiyama, T., 2014. Obstacle Avoidance and Path Planning in Ice Sea using Probabilistic Roadmap Method. Proceedings of the 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 183-186. ⑦
- Takagi, T., Tateyama, K., Ishiyama, T., 2013. Pack Ice Routing with Ant Colony Optimization using Radar Images. Proceedings of the 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 133-136. ⑦
- Takagi, T., Tateyama, K., Ishiyama, T., 2012. Pack Ice Routing with Ant Colony Optimization using Radar Images. Proceedings of the 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 105-108. ⑦
- 竹内 望, 2013. 雪に宿る生命: 雪氷藻類. 極地, 96, 3-9. ④
- 竹内 望, 2012. 氷河の暗色化とクリオコナイト. 低温科学, 70, 165-172. ④
- Tanaka, Y., Tateyama, K., Kameda, T., Enomoto, H., 2015. Estimation of melt pond fraction on Arctic sea ice using satellite microwave data. The proceedings of the 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 73-75. ⑦
- Tateyama, K., Tokudome, Y., Tanaka, Y., Ono, J., Kimura, N., Takagi, T., 2016. Validation and improvement of estimated sea ice thickness from AMSR-E/AMSR2 in comparison with in-situ observations. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 68-71. ⑦
- Tateyama, T., Tanaka, Y., Kimura, N., Ono, J., 2015. Validation the sea ice thickness estimated from the satellite passive radiometer by comparing with the in-situ thickness. Proc. 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-15 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 136-139. ⑦
- Tateyama, K., Tanaka, Y., Nakano, Y., Sagawa, G., Ono, J., Takagi, T., 2014. Observation of sea ice condition along the Northwest Passage using the satellite passive microwave radiometer AMSR2. Proc. 29th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido. ⑦
- Tateyama, K., Ono, J., Yamaguchi, H., Shibata, H., 2013. Observation of sea-ice condition in the North West Passage and the Canada Basin - from JOIS2012 cruise -. Proc. 28th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-13 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 123-124. ⑦
- 館山一孝, 星野聖太, 中村和樹, 山川絃一, 戸村嘉実, 森 裕太, 2013. 電磁誘導式氷厚計を用いた2013年サロマ湖の湖水観測. 北海道の雪氷, 32, 138-141. ⑦
- 鄭 峻介, 2013. 樹木年輪から東シベリアタイガ林の過去を探る. 『北海道立北方民族博物館友の会季刊誌 アークティック・サークル』, 6月号, 14-17. ②
- 内田雅己, 2013. 野外研究サイトから (25) スパールバル諸島・スピッツベルゲン島. ノルウェー, 日本生態学会誌, 63, 369-374. ②
- Watanuki, Y., Suryan, R., Sasaki, H., Yamamoto, T., Hazen, E., Renner, M., Santora, J.A., Sydeman, W., 2015. Spatial ecology of marine top predators in the North Pacific: Tool for integrating across datasets and identifying high use areas. Report of marine and mammal advisory panel PICES Scientific Report. ⑥
- 山口 一, 2015. 北極海の航路利用の現状と課題. 総合物流情報誌『海運 (KAIUN) 』, No.1049, 日本海運集会所, 20-22. ⑦
- 山口 一, 大塚夏彦, 2015. 北極航路の利用動向. 北極環境研究コンソーシアムニューズレター, 1, 4-5. ⑦
- 山口 一, 2015. 北極海の商業航路利用に向けて. 『PETROTEC』, Vol.38 No.3, 176-179. ⑦

- 山口 一, 2015. Development and use of the Arctic Sea Route for shipping. *The Mariners' Digest*, 37, 18-20. ⑦
- 山口 一, 2015. 北極海航路開拓への取り組み. 『エネルギーレビュー』, 12月号, 19-22. ⑦
- 山口 一, 2015. 北極航路航行支援システムの研究プロジェクトについて. 第25回海洋工学シンポジウム論文集, 日本船舶海洋工学会/日本海洋工学会, 128-132. ⑦
- Yamaguchi, H., 2016. Research on navigation support system for the Arctic sea routes. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 45-48. ⑦
- Yamaguchi, H., 2012. Sea ice prediction and construction of ice navigation support system for the Arctic sea route. Proc. 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-12 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, 2p. (additional). ⑦
- Yamanouchi, T., 2016. Rapid change of the Arctic Climate System and its global influences. Adjacent Government, February 2016. 192-193.PM
- Yamanouchi, T., Enomoto, H., Fujii, Y., 2015. Recent Activities and Selected Outcomes of the GRENE Arctic Climate Change Research Project. Proceedings of the 30th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice, Mombetsu, Japan, 55-58. PM
- 山内 恭, 2015. 北極温暖化増幅と社会影響. アークトス, 46, 12-15. PM
- 山内 恭, 2016. 極域気象研究の系譜と極域・寒冷域研究連絡会. 天気, 63 (3), 157-171. PM
- Yamamoto-Kawai, M., Mifune, T., Kikuchi, T., S. Nishino, 2016. Prolonged aragonite undersaturation in bottom water of a biological hotspot in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Biogeosciences Discuss.*, doi:10.5194/bg-2016-74. ⑥
- 川合美千代, 2012. 北極海における生物化学的变化. 月刊海洋, Vol.44, 9, 541-547. ⑥
- Yamazaki, T., 2013. Long-term simulation of soil condition and energy flux in eastern Siberian taiga forests. Proceedings of 2nd International Conference on Global Warming and the Human-Nature Dimension in Siberia, 35-38. ②
- Yoshida, R., Sawada, M., Yamazaki, T., Ohta, T., Hiyama, T., 2013. Estimation of regional water cycle changes by various land-cover-change scenarios in eastern Siberia. Proceedings of 2nd International Conference on Global Warming and the Human-Nature Dimension in Siberia, 86-89. ②
- 吉森正和, 2014. 北極温暖化増幅. 日本気象学会北海道支部機関誌, 細氷, 60号. ①
- Yoshizawa, E., Shimada, K., 2016. Estimation of mechanical increases in Arctic sea ice thickness due to sea ice rafting using satellite-derived sea ice velocities. Proc. 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Mombetsu-16 Symposium), Mombetsu, Hokkaido, Feb. 21-24, 135-137. ⑦
- Zamora, L.M., Kahn, R.A., Cubison, M.J., Diskin, G.S., Jimenez, J.L., Kondo, Y., McFarquhar, G.M., Nenes, A., Thornhill, K.L., Wisthaler, A., Zelenyuk, A., Ziemba, L.D., 2015. Aircraft-measured indirect cloud effects from biomass burning smoke in the Arctic and subarctic. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 15, 22823-22887. doi:10.5194/acpd-15-22823-2015. ③
5. その他
- ・学会での招待講演
- Hasumi, H., April 7, 2014. Resolution dependence of climate biases, variability and sensitivity in comprehensive Earth System Models. WGOMD Workshop on High Resolution Ocean Climate Modelling. Kiel, Germany. ⑦
- Hasumi, H., December 4, 2014. Toward coordinated observational and modeling studies on the polar oceans. The 5th Symposium on Polar Science, Tachikawa, Japan. ⑦
- 木村詞明, 2014年11月1日. GRENE北極プロジェクトでの北極航路研究と海氷予報. 日本航海学会第131回講演会, 函館. ⑦
- 木村詞明, 2015年12月3日. 衛星リモートセンシングと海氷観測～北極海航路の航行支援～. 電子情報通信学会東北支部学術講演会, 八戸. ⑦
- 北川弘光, 2015年8月6日. 温暖化影響が進む北極圏の諸問題. 第25回海洋工学シンポジウム, 日本大学駿河台キャンパス. ⑦
- 小池 真, 2013年11月18日. 航空機観測による下層雲のエアロゾル-雲相互作用研究. 日本気象学会第40回メソ気象研究会, 仙台. ③
- 小池 真, 近藤 豊, 塩原匡貴, 東 久美子, 鷹野敏明, 岡本 創, 浮田甚郎, 2013年10月21日. Aerosol and Cloud Observations in the Arctic. Japan-Norway Polar Science Seminar, トロムソ, ノルウェー. ③
- 近藤能子, 小畑元, 大木淳之, 山下洋平, 西岡純, 久万健志, 2014年9月. 北極海における過酸化水素の分布. 2014年度日本地球化学会, 富山大学. ⑥
- 金野祥久, 2014年11月1日. 氷海航行の研究動向と関連話題. 日本航海学会第131回講演会, 函館. ⑦
- Miyoshi, Y., Fujiwara, H., Jin, H., Shinagawa, H., 27 June. 2015. Impact of stratospheric sudden warming on the general circulation in the MLT region simulated by a whole atmosphere model. 26th IUGG General Assembly, Prague Czech Republic. ③
- Nomura, D., Delille, B., Dieckmann, D.S., Granskog, M.A., Tison, J.L., Meiners, K.M., Fransson, A., Ohshima, K.I., Tamura, T., August 21, 2015. Mid-winter surveys of sea ice biogeochemistry in polar oceans. Goldschmidt 2015, Prague, Czech Republic. ⑦
- Ohshima, K.I., August 1, 2014. Global view of sea ice production and its linkage with dense/deep water formation. Distinguished Lecture in 11th Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society, Sapporo, Japan. ⑦
- 大島慶一郎, 2014年10月9日. 海氷がつくる海洋大循環とその変動. 国立大学附置研究所・センター長会議第1部会シンポジウム「激変する地球環境の現状と未来像」, 札幌. ⑦
- 大塚夏彦, 9 May 2015. IMPLICATIONS FOR GLOBAL TRADE AND DISTRIBUTION SYSTEM Workshop on the Climate Change Impact on Oceans and Fisheries Resources. ASIA-PACIFIC ECONOMIC COOPERATION PHILIPPINES 2015, Philippines. ⑦
- 大塚夏彦, Masahiko, F., 1 June 2015. Effects of the Arctic Sea Routes (NSR and NWP) Navigability on Port Industry (Part 2). IAPH 29th World Ports Conference, Hamburg, Germany. ⑦
- 大塚夏彦, 24 June 2015. Recent Activities and Feasibility of the NSR. 2015 Shanghai Seminar of North Pacific Arctic Research Community, Shanghai, China. ⑦
- 大塚夏彦, 2015年7月1日. 北極海航路活用戦略～試論: 北極海航路の拠点を目指して. 北極海航路活用戦略セミナーin 苫小牧, 苫小牧市. ⑦
- 大塚夏彦, 2015年7月3日. 地球温暖化の hotspot 北極～保全と利用. 北極圏のフィールド情報学, はこだて未来大学, 函館市. ⑦
- 大塚夏彦, 2015年8月31日. 2015年シーズンの北極海航路の利用動向および最近の各国の動向. 第2回北極海航路活用戦略セミナー, 札幌市. ⑦
- 大塚夏彦, 2015年9月3日. Navigability, cost effectiveness and feasibility of the NSR, Russia's Arctic Energy Policies in a new Political Context. Joint Finnish-Japanese research project "Russia's Final Energy Frontier – Sustainability Challenges of the Russian Far North", Academy of Finland and JSPS, 2014-2016., Helsinki. ⑦
- 大塚夏彦, 2015年9月19日. 北極海航路輸送の現状と各国の動向. 北海道フィンランド協会セミナー, 札幌市. ⑦
- 大塚夏彦, 2015年10月17日. Asian NSR Shipping and Trade: A Commercial Feasibility Assessment, Arctic Circle 2015. Breakout session 2 - "Building Arctic Resilience Asia and the Northern Sea Route (NSR): Trade, Logistics and Actors, Iceland. ⑦
- 大塚夏彦, 2015年11月11日. the Northern Sea Route Trade, Today and the Future. Hokkaido University-Finnish Universities Joint Symposium: University Rolls of Contribution for Arctic Region Sustainability, Maritime activities and Innovation in the Arctic, Sapporo. ⑦

- 大塚夏彦, 2015年11月26日. NSR Navigation and Feasibility of Trade, Perspectives of Japan. The 4th Ulsan International Arctic Seminar, Ulsan, Korea. ⑦
- 大塚夏彦, 2015年12月1日. Northern Sea Route, infrastructure needs, ports, communication, “Arctic maritime challenges”. AsiArctic seminar in Busan organized by KMI and FNI, Korea. ⑦
- 野沢 徹, 2013. 温暖化シグナルの検出とその原因特定. 化学工学会, 岡山. ①
- 澤村淳司, 3 June 2016. Ship-ice interaction in Arctic and Antarctic sea ice. 23rd IAHR International Symposium on Ice, Ann Arbor, Michigan USA. ⑦
- Shimada, K., May 9, 2015. Arctic, as the Most Affected Ocean; Sea Ice Decline. Workshop on the Climate Change’s Impact on Oceans and Fisheries Resources (APEC PROJECT proposed by JAPAN), Boracay Island, Philippines. ⑦
- 島田浩二, 吉澤枝里, 2016年2月22日. 新しい北極海の状態における海水変動. 第31回北方圏国際シンポジウム「オホーツク海と流氷」, 紋別. ⑦
- 島田浩二, 2015年11月7日. 北極海の海水分布変動をもたらす要因 ～北極海航路利用に向けて～. 日本航海学会海上交通工学研究会, 東京. ⑦
- 島田浩二, 吉澤枝里, 2013年11月26日. 北極海海氷の実態と気候変動に及ぼす影響. 第59回気候影響・利用研究会, 東京. ⑦
- 島田浩二, 2013年5月25日. 地球温暖化: 沈黙を破った北極海. 東京都市大学環境学部開設記念公開講演会 / 環境経営学会公開講演会, 横浜. ⑦
- 島田浩二, 2011年11月17日. 北極域における大気・海洋・海氷相互作用に関する研究. 「日本気象学会堀内賞記念講演」, 日本気象学会秋季大会, 名古屋. ⑦
- Tachibana, Y., 13-15 November 2013. A cause of the AO polarity reversal from winter to summer in 2010 and its relation to extreme hot summer associated with polar jet, summer AO and blocking. The Northern Hemisphere Polar Jet Stream and Links with Arctic Climate Change Workshop, Reykjavik, Iceland. ③
- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Nakano, T., Ohte, N., Onuma, Y., Tanaka, S., Uetake, J. June 25 2015. Multi isotope approach to dynamics of impurities in snow and ice on the Greenland Ice Sheet. IUGG, Prague Czech Republic. ④
- Takeuchi, N., Nagatsuka, N., Shimada, R., Uetake, J., Jan.16,2013. Biogenic impurities darkening the Greenland Icesheet. The third International Symposium on the Arctic Research, 東京, 日本科学未来館. ④
- Ukita, J., September 12-13, 2013. Arctic Influence on Weather and Climate in Japan. US National Academies Arctic Linkages Workshop, MD, U.S.A. ③
- 矢吹裕伯, 杉村 剛, 2014年5月1日. 北極域データアーカイブ. JpGU2014, 横浜. ADS
- Yabuki, H., Kawamoto, H., 23 May 2012. Toward a new phase of Arctic research data activity, Toward a New Framework of Global Data Activity. Japan Geoscience Union (JpGU), 幕張. ADS
- 山口 一, 9 March 2016. Navigation support system (including oil-spill pollution) and ice forecast using satellite data. Special Seminar in connection with the 6th Meeting of Japan-Finland Joint Commission for Science and Technology Cooperation, Mita Conference Center, Tokyo, Japan. ⑦
- 山口 一, 11 Nov. 2015. Development of navigation support system for the Arctic sea routes. Symposium1: Maritime activities and Innovation in the Arctic, Hokkaido University Finnish Universities Joint Symposium, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan. ⑦
- 山口 一, 中山由美, 2014年2月19日. 北極と南極とオホーツク海の今. 第29回北方圏国際シンポジウム 子どもと親の流氷シンポジウム, 紋別. ⑦
- 山口 一, 2015年5月19日. 両極域の氷海航行に関する最近の話題について. 溶接接合工学振興会・国民工業振興会共催平成27年度総会: 特別講演, ニューオータニイン東京, 大崎, 東京. ⑦
- 山口 一, 2014年12月12日. 北極海の調査・研究開発に関する全般動向. 日本船舶海洋工学会関西支部・KFR 共催シンポジウム「氷海分野における技術動向と展望ー北極域の開発に向けてー」, 神戸. ⑦
- 山口 一, 2014年10月27日. 北極航路研究に必要な砕氷観測船機能について. 研究集会「両極域における砕氷船を利用した観測研究」, 札幌. ⑦
- 山口 一, 2014年10月17日, 11月21日. 北極海の航路利用と氷海航行支援システムについて. 第90回船長教養講座, 日本船長協会, 10月東京, 11月神戸. ⑦
- 山口 一, 2014年8月15日. Recent Researches in Japan to Support Safe and Efficient Navigation along the Northern Sea Route. IAHR Symp. Ice 2014, Singapore. ⑦
- 山口 一, 29 April 2015. Research on navigation support system for the Arctic sea routes. Invited lecture of the session “Navigation and Fisheries in the Arctic: Prospects, Problems and International Policies”. Science Symposium ISAR-4/ICARP-III, Arctic Science Summit Week 2015, Toyama. ⑦
- 山口 一, 2014年4月19日. 北極航路の課題について. 第187回船用プロペラ研究会, 鉄鋼会館, 東京. ⑦
- 山口 一, 2013年11月29日. 北極海航路・氷海油拡散予測の現状と今後の課題について. 氷海技術研究講演会, エンジニアリング協会, 東京. ⑦
- 山口 一, 11 Nov. 2013. Transpolar Shipping / Sea Ice. Workshop on Japan-USA Collaborative Arctic Studies, National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan. ⑦
- 山口 一, 2013年8月7日. 北極海の航路利用の現状と研究課題. 「北極圏」プロジェクト勉強会, 東京大学. ⑦
- 山口 一, 2013年1月14日. 北極海を航路として使う. ISAR-3 公開講演会「今、北極がアツイ!」, Program and Abstracts of 3rd Intern. Symp. Arctic Research. 日本科学未来館, 東京. ⑦
- 山口 一, 2012年7月6日. 北極海航路の利用促進に向けて. 総合地球環境学研究所シベリアプロジェクトワークショップ, 総合地球環境学研究所, 京都. ⑦
- 山口 一, 17 May 2012. New Sea Status Index by Weather and Performance DB. The 15th TFMS Forum, SHIRASE, Funabashi, Japan, WNI. ⑦
- 山口 一, 17 November 2011. Sea ice prediction and ice navigation systems for northern passages. The 14th TFMS Forum, SHIRASE, Funabashi, Japan, WNI. ⑦
- 山内 恭, 2015年5月21～24日. 極寒連の系譜と極域気象研究. 極域・寒冷域研究連絡会特別講演, 日本気象学会2015年春季大会, つくば. PM
- Yamanouchi, T., Takata, K., Enomoto, H., Fujii, Y., 23-30 April 2015. Current Status and Selected Outcomes of the GRENE Arctic Climate Change Research Project (Fy2011-2015) - Rapid Change of the Arctic Climate System and its Global Influences -. Keynote Speech at the Plenary Session, ISAR-4/ ICARP III, ASSW2015, Toyama, Japan. PM
- Yamanouchi, T., Takata, K., Enomoto, H., 16-19 November 2015. Aim of the Special Session “Warming in the Arctic and Its Influences” and Brief Overview of “GRENE Arctic Climate Change Research Project”. Special Session [S], The Sixth Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research, Tokyo. PM
- Yamazaki, K., March 9-10, 2015. GRENE Arctic Climate Change Research Project, some research results, and possible collaboration with GREENICE. GREENICE Annual Meeting, Copenhagen, Denmark. ③

研究業績

・受賞

CONTRAIL チーム (町田敏暢、松枝秀和、澤 庸介、丹羽洋介、坪井一寛) , 2015 年 4 月 15 日. CONTRAIL プロジェクト. フジサンケイグループ 第 24 回地球環境大賞審査委員特別賞. ⑤

De Silva Liyanarachchi Waruna Arampath, 2014 年 2 月 19 日. A high-resolution hindcast study for the Northern Sea Route. 第 29 回北方圏国際シンポジウム『オホーツク海と流氷』第 1 回青田昌秋賞. ⑦

羽角博康, 2014 年 10 月 22 日. 海洋の数値モデル開発とプロセス研究を通じた気候研究への貢献. 日本気象学会堀内賞. ⑦

本田明治, 2013 年 9 月 19 日. 海氷域変動が気象・気候に及ぼすメカニズムの解明. 日本雪氷学会平田賞. ③

野村大樹, 2014 年 3 月 28 日. 海氷の生成と融解が極域海洋の物質循環に与える影響. 日本海洋学会岡田賞. ⑦

大島慶一郎, 2015 年 3 月 23 日. 海氷域の変動とその海洋循環に与える影響に関する研究. 日本海洋学会賞. ⑦

大島慶一郎, 2015 年 3 月 22 日. NHK スペシャル「流氷“大回転”」. 日本放送協会第 90 回放送記念日感謝賞. ⑦

大塚夏彦, 2014, Furuichi, M. and Otsuka, N., Proposing a common platform of shipping cost analysis of the Northern Sea Route and the Suez CanalRoute. Maritime Economics & Logistics, Maritime Economics & Logistics Paper Award, (17, 9-31, 10.1057/mel.2014.29) . ⑦

尾関俊浩, 2012 年 10 月. 北海道開発技術センター寒地技術シンポジウム 2012 年度寒地技術賞 (学術部門) . ⑦

島田浩二, 2011 年 11 月 17 日. 北極域における大気・海洋・海氷相互作用に関する研究. 日本気象学会堀内賞. ⑦

田村岳史, 2014 年 3 月 28 日. 海氷生産量のグローバルマッピング及び深層水形成域の特定と変動解明. 日本海洋学会岡田賞. ⑦

矢吹裕伯, 2015 年 9 月 25 日. 雪氷圏データ公開・解析システムの構築. 日本雪氷学会技術賞. ADS

山口 一, 2012. 船舶の安全運航のための個船の情報を利用した、実海域における貨物・船体ダメージリスクインデックスの検討. (財) WNI 気象文化創造センター第二回気象文化大賞. ⑦

・学位取得論文で参照されたもの
(博士)

榊原大貴, 北海道大学環境科学院雪氷寒冷圏コース, 2016. Ice front variations and velocity changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield and northwestern Greenland (南バタゴニア氷原およびグリーンランド北西部におけるカービング氷河の末端変動と流動変化) . ④

(修士)

岩原由佳, 北海道大学大学院水産科学院水圏生物化学専攻, 2013. Distribution of baleen whales in the northern Bering and the Chukchi Seas. (ベーリング海北部およびチュクチ海におけるヒゲクジラ類の分布について) . ⑥

太田直紀, 北海道大学大学院環境科学院生物圏科学専攻, 2014. Interannual variation of solar heating in the Chukchi Sea, Arctic Ocean (チャクチ海における太陽放射加熱の経年変動) . ⑥

大額実咲, 北海道大学大学院環境科学院生物圏科学専攻, 2016. 太平洋側北極海 (チャクチ海) における成層強度の時空間変動. ⑥

片山直紀, 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻, 2016. グリーンランド北西部におけるカービング氷河の表面高度変化. ④

門田 萌, 北海道大学環境科学院地球圏科学専攻, 2016. グリーンランド北西氷床 (SIGMA-D) アイスコア解析に基づく小氷期以降の環境変動. ④

田中和樹, 北海道大学大学院環境科学院地球圏科学専攻, 2014. チャクチ海・ベーリング海における溶存有機物の動態. ⑥

中野 翼, 北海道大学大学院水産科学院海洋生物資源科学専攻, 2014. ベーリング海北部およびチャクチ海における底生生物に関する研究. ⑥

夫津木亮介, 北海道大学大学院水産科学院海洋生物資源科学専攻, 2014. Biological contribution to partial pressure of CO2 in the western Arctic region (西部北極圏海域における海水中の二酸化炭素分圧に対する生物活動の寄与) . ⑥

三船尊久, 東京海洋大学海洋環境保全学専攻, 2013. 北極チャクチ海における海洋環境酸性化. ⑥

吉野勇太, 北海道大学大学院環境科学院地球圏科学専攻, 2014. Estimates of new production and its contributors in surface waters of the Bering and Chukchi Seas during summer (夏期のベーリング海およびチャクチ海表層における新生産とその寄与者の評価) . ⑥

和賀久朋, 北海道大学大学院水産科学院海洋生物資源科学専攻, 2014. The response of phytoplankton community to the recent global climate change (近年の地球規模環境変動に対する植物プランクトン群集の応答) . ⑥

卷末資料

1. 北極研究検討作業部会報告書
—中間とりまとめ—
2. 北極研究戦略小委員会
中間評価票（北極気候変動分野）

卷末資料

— 目次 —

北極研究検討作業部会報告書
— 中間とりまとめ —

I. 序文	1
II. 北極圏研究の現状	1
1. 我が国における北極圏研究の現状	1
2. 北極圏研究の国際的枠組み	4
3. 諸外国における北極圏研究体制	4
III. 我が国の北極圏研究の将来戦略	5
1. 北極圏研究における戦略的重要課題	5
2. 「北極圏研究コンソーシアム」の設置と体制整備	6
3. 「北極圏気候変動研究プロジェクト」の創設	7
4. 北極圏観測の強化	8
5. 北極圏研究における国際協力	9
IV. 結語	10

平成 22 年 8 月
 科学技術・学術審議会
 研究計画・評価分科会
 地球観測推進部会
 北極研究検討作業部会

I. 序文

北極は、地球温暖化による平均気温の上昇が最も大きく、地球上において気候変動による影響が最も顕著に表れると予測される地域の1つである。また北極における変化は、大気・海洋循環の変化や雪氷圏変化などを通して、全球的な気候システムにも大きな影響をもたらす可能性があることから、気候変動のメカニズム解明のため、北極における継続的な地球観測を実施することは非常に重要である。

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

「地球観測における推進戦略」(平成16年12月、総合科学技術会議決定)に基づき我が国の地球観測推進の取組において、地球観測連携拠点(温暖化分野)が、重要であるにもかかわらず依然不十分である極域及び雪氷圏の長期継続観測の実現に向けて、「雪氷圏観測の機関間連携に関する取組について」が平成22年3月にまとめられ、地球観測推進部会に報告された。

こうした状況を踏まえ、北極における我が国として組織的かつ継続的な観測・研究体制を整備し、関係府省庁・機関間の連携をより強化することにより、我が国の北極研究の1層の推進を図るため「北極研究検討作業部会」を設置し、我が国における北極研究の強化に向けた検討を実施した。なお、検討にあたっては北極に限らず広く雪氷圏を視野に入れて議論を行った。

II. 北極圏研究の現状

1. 我が国における北極圏研究の現状

我が国の現在の北極圏研究を概観すれば各研究機関別に以下の通りとなっている。

a) 国立極地研究所 (NIPR)

NIPRは、長く南極観測を続けてきたが、1990年、新たに北極環境研究センターを設置し(2004年に北極観測センターと改称)、現在我が国における北極研究の中核研究機関としてノルウェーのスバルバル諸島の観測基地を中心とした観測施設を管理・運営している。同観測基地は大学等の研究者への共同利用施設として提供され、オーロラ・大気・雪氷・陸上生態系等の観測を実施している。特に、南北両極の比較観測に重点をおき、その分野においても実績がある。また、総合研究大学院大学極域科学専攻の基盤機関と

して、大学院教育にもあたっている。

b) 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

JAMSTECは、国際連携による現場観測、衛星データ収集を含む統合的データ解析及び数値実験を組み合わせたことにより、北半球寒冷圏の海洋・雪氷・大気・陸域システムの実態・変動とプロセスを把握する北半球寒冷圏研究プログラムを実施している。また、様々な国際協力も活用しながら海洋地球研究船「みらい」をはじめとする船舶を用いた海洋観測や現地調査協力による陸域観測を行っている。1997年からはアラスカ大学に設置された国際北極圏研究センター(IARC)と共同研究もしくは委託研究を実施している。

c) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

2009年に策定された「日本の宇宙基本計画」において、アジア等の地域に貢献する陸域・海洋観測衛星システム及び全球環境変動と気象観測衛星システムに関する衛星計画が研究開発計画に取り込まれることとなった。

JAXAは、地球観測衛星長期計画に基づいて陸域観測技術衛星「だいち (ALOS)」をはじめ、水循環変動観測技術衛星「Aqua」や温室効果ガス観測技術衛星「いぶき (GOSAT)」等の観測衛星を有しており、こうした衛星観測データを北極域の陸海城双方で提供・活用することで北極域観測に貢献している。1999年からはIARCとの共同研究も実施している。

d) 総合地球環境学研究所

総合地球環境学研究所では、人間と自然との相互作用のあり方を捉え直すべく、文理融合型のプロジェクト研究を行っている。北極域関連研究としては、①東北アジアの人間活動が北太平洋の生物生産に与える影響研究、②温暖化するシベリアの自然と人-水循環をはじめとする陸域生態系変化への社会の適応、③中央アジアの氷河を水源とする乾燥地の研究、の3つが行われている。

e) 気象研究所

気象研究所においては、積雪変質アルベドモデルや海氷モデリングを始めとする各種のモデルを研究するとともに、北極圏における大規模な観測は行っていないものの、衛星データの活用や札幌での現地観測を実施している。これらを通じて、北極圏温暖化のメカニズムの解明と影響評価の研究を行っている。

f) 国立環境研究所

国立環境研究所では、シベリアの拠点での観測活動に加え定期貨物船や旅客機を利用した温室効果気体観測を行っている。また、大気海洋結合モデルを検証するとともに気候再現シミュレーションを実施し、長期観測データと統計解析することで北極圏陸域の温

暖化及び降水量の変化の原因特定に関する検証を行っている。

g) 森林総合研究所

森林総合研究所は、これまで関心の高かった熱帯林に加えて、永久凍土の分布とも密接に関連している周極域の森林生態系の研究を進めている。特に1990年代以降シベリアの北方林の研究が進んだ結果、北方林における多様な植生・土壌分布が明らかになった。北極域の温暖化に関しては、特にこうした多様性が北極域内の各地域におけるそれぞれの温暖化シナリオに与える影響に着目して研究を進めている。

h) 北海道大学

北海道大学では、低温科学研究所をはじめとする多数の部局にて北極研究を行っている。研究対象は、北米/ペーリング海、シベリア/オホーツク海、モンゴル・北欧/スラブ・ユーラシア、北極海と幅広く、森林火災・海氷に関しては IARC/JAXA との共同研究、水循環・雪氷変動については JAMSTEC との共同研究である。「おしよろ丸」による北極海観測や留学生受入れによる人材育成も行っている。

i) 北見工業大学

北見工業大学では、個人的なネットワークを生かした多数の研究機関、他大学との連携研究を機動的に進めている。その研究内容は幅広く北極域の海陸双方を対象として多岐にわたるもの、いずれも短期的な共同研究への参加が中心である。教育活動の観点から、若手研究者を派遣することで北極研究に携わる人材の育成も行っている。

j) 東京大学大気海洋研究所

東京大学大気海洋研究所は、モデルによる研究を通じての将来予測や気候システムの影響の理解に繋がる研究を行っている。北極域関連研究としては、①モデリングによる北極振動のメカニズムと予測可能性、②北極海の海洋と海氷のモデリング、③グリーンランド氷床の変動と気候感度、④過去の高緯度気候のモデリングの4つテーマに沿ったモデルの研究を行っている。

k) 東京海洋大学

東京海洋大学は、2008年の国際極年を契機に北極研究として、海洋観測と Aqua などの衛星観測データの高度利用を行っている。特に海洋観測に関しては、「みらい」・「おしよろ丸」を利用した観測に加え、2013年まで担保されているカナダ砕氷船による観測や2011年より開始される韓国砕氷船による観測など海外砕氷船による観測も行っている。

l) アラスカ大学国際北極圏研究センター (IARC)

1997年に日米両国が共同して設置した北極圏の気候変動の研究機関で、日本からは上述の通り JAMSTEC 及び JAXA が、米国からは国立科学財団 (NSF)、エネルギー省 (DOE)、

航空宇宙局 (NASA)、大気海洋庁 (NOAA) が参加している。JAXA の衛星データを活用した北極圏森林火災の影響調査や JAMSTEC の観測データを活用して海陸域での様々な寒冷圏プロセスのモデルと観測による研究が行われている。

2. 北極圏研究の国際的枠組み

北極圏研究に関連する代表的な国際的枠組みとしては以下のものがある。

a) 国際北極科学委員会 (IASC)

IASC は北極及び北極が全球システムに与える影響についての科学的理解を深めることを目的として1990年に設立され、現在我が国を含む19カ国が加盟している。IASC は以下(b,c,d)の活動の支援も行っており、北極研究の中長期的な計画を提言している。

b) 国際北極科学計画会議 (ICARP/ICARPID)

ICARP では、北極研究の関係諸機関がかかわる中期的な研究計画を作成している。10年に1度北極研究計画に関する提言書を作成し、10～15年ごらのスパンでの国際協力の方向付けを行っている。2005年には ICARPID 科学計画書^(*)が作成され、現在の北極研究における主要なガイドラインとなっている。

(*) <http://web.arcticportal.org/iase/science-development/icarp>

c) 国際北極変化研究委員会 (ISAC)

ISAC は、北極システムの変化とそうした北極の変化が全球システムに及ぼす環境影響を研究するべく、学際的な長期計画を策定している^(*)。北極システムの変化への理解を促進・文書化し、科学的な要請に基づく観測とモデルの統合を行うなど、将来の影響の評価のための必要な科学的知識を提供すべく、網羅的な活動を展開しようとしている。

(*) "ISAC Science Overview Document" と "ISAC Draft Science Plan":

<http://www.arcticchange.org/>

d) 持続的北極観測ネットワーク (SAON)

SAON は、2006年の北極評議会の決議に基づき開始されたものであり、北極において、持続的で費用負担なく、公開された、かつタイムリーな質の高い観測データへのアクセスを可能とする北極観測活動をどのように実現するかについての提言を行っている。

3. 諸外国における北極圏研究体制

北極圏に領土・領海を有する北極国においては、ノルウェーやロシアのように北極研究の中核研究機関が強力に牽引するタイプや、米国のように国家戦略の観点から北極圏研究の目標を設定する政府内委員会を置き複数の中核研究機関が研究を遂行するタイプに大別さ

れるが、北極圏研究が国家として戦略的に推進されている。また、非北極圏においても、ドイツのように中核研究機関が設立されている国や、中国のように政府内委員会の管轄のもと北極圏研究を進める中核研究機関が設立されている国もある。このように、海外の北極圏研究の有力国においては、北極圏・非北極圏の区別なく北極圏研究の体制が機能面から十分に整備されている事例が多い。

III. 我が国の北極圏研究の将来戦略

1. 北極圏研究における戦略的重要課題

北極圏研究の重要性は、北極がもたらす全球の気候変動へのフィードバックや我が国への影響に基づいており、将来の変化を的確に予測し、必要な対策を講じるためには、気候モデルにおける北極地域の水・物質・エネルギー過程の精緻化を図ることが優先順位の高い課題である。このモデリングの高度化のためには、未だに十分とは言えない古気候を含む観測データの充実が不可欠である。また、北半球高緯度の寒冷圏を含む北極圏での急激な気候変化のプロセスとメカニズムをより精確に評価し気候モデルと対話できる「北極圏システムモデル」の構築も重要であり、このための観測・プロセス研究の高度化も同時に必要である。

これらの気候モデルの精緻化、および「北極圏システムモデル」の構築にあたっては、モデリング研究者が観測研究者と協力して、モデルの高度化・精緻化に必要な観測情報を提示し、観測研究者側は、最適な観測データを提供しつつ、現実のプロセスにとつて重要な新たな観測事実も提示するという観測研究者と気候モデル研究者の協働による進め方が適当と考えられる。

a) 北極圏気候モデルの改良・高度化

近年、北極において地球温暖化の影響と考えられる事象が増加している。すでにここ20年程度の間北極域では気温上昇、そして顕著な雪氷衰退が起こっているが、特に、2007年夏期に北極海の海水が激減し、同年9月には海水面積が観測史上最小となったことは記憶に新しい。しかしながら、現実に行っている温暖化には乖離があり、その地域性や物理過程なども含め、まだ大きな不確定性を残している。また、北極振動指数の変化により北極圏の寒気が中緯度地域に流れ込み、地域的な寒波や我が国の不順な天候に影響与えるなど、気候・気象の極端現象に、北極圏の変化がどう作用しているかについては、その重要性にもかかわらず、十分に解明されていない。IPCC第4次評価報告書においても、「極域の複雑な大気・海洋・陸域凍土及び生態系に対する理解が不十分であり、また観測データの不足により極域のモデル評価にも課題がある」と報告されている。

気候モデルについては、北極海における海水面積が、その後回復傾向を見せているとは

いえ、IPCCの予測を超える速度で減少したことは、気候モデルにおける北極領域の再現性において大きな課題があることを示している。将来予測を改善し、どのような影響が発生するかを見極めるためには、必要なデータの取得・整備など観測データを充実させ、既存のシミュレーション結果を北極域の気候モデル研究者と観測研究者が協働して解析・検証し気候モデルの改良・高度化を行うことが喫緊に取り組むべき北極圏研究における戦略的重要課題である。

b) 観測研究を通じたプロセスとフィードバック過程の解明

気候モデルの改良・高度化が北極圏研究における最重要課題であるが、この課題に密接に関連した以下に列記するプロセスとフィードバック過程の解明は、地球の水・物質循環や生態系への影響も含めた重要な課題として位置付けられる。

① 北極海の急激な変化の発生と原因

海水の急激な減少や海水温の上昇及び海水運動の活性化、海水変化が大気の挙動を制約し海水変化を加速すること、海水減少や海洋循環及び貯淡水量変化に伴う北極海生物化学過程への影響と海洋酸性化が起こっているが、いまだ総合的な理解はできていない。

② 北極圏の雲、エアロゾル、雪氷が放射収支に与える影響

北極圏の気候形成のもとになるエネルギー収支を支配する雲、エアロゾル、中でも放射強制力を弱め地球温暖化作用のあるブラック・カーボンは大気中においても、また積雪や海水の表面においても大きな影響を与え得るものとしてその実態の把握が必要である。

③ 氷床・氷河群の変化の実態とその機構

融解域が拡大し流速や流出が増大していると言われているグリーンランド、全面的に後退しつつある北極域やユーラシア・アラスカの氷河群の衰退の実態およびその水収支や海水準への影響を早急に把握すると共に、古気候・古環境を研究を通じて過去の地球環境の変化も把握する必要がある。

④ 永久凍土の融解過程とその影響

北半球寒冷圏の凍土融解が進行しているが、その水文学的影響、陸域生態系変化への影響の解明は、陸域からの温室効果気体放出・吸収の変化、その温暖化へのフィードバックも含めた評価が早急に求められている。特に、ユーラシア寒冷圏の凍土はタイガ（北方林）との共生的関係を有しており、温暖化によるこのシステムの変化は、北極海域水循環や生物多様性にも大きな影響を与える可能性があり、その評価は重要である。

2. 「北極圏環境研究コンソーシアム」の設置と体制整備

北極圏を巡る重要課題は、分野横断であってかつ総合的であるとともに、モデリングと観測の共同作業を含み、多くの研究者の連携を必要とすることから、適切な研究推進体制を整えることが的確な対応、効果的・効率的な成果創出につながる。

国内の研究推進体制という観点からは、我が国においては大学共同利用機関である国立極地研究所に北極観測センターが設置され、我が国の中核研究機関として位置付けられ、独立行政法人や様々な大学がその研究ポテンシャルや機関の有する特長を活かして、多様な研究活動に取り組み、一定の存在感を示していることはすでに概観した通りである。しかしながら、我が国全体としての総合力や連携による相乗効果を十分に発揮しているというには未だ改善の余地がある。

一方で、海外においては北極圏研究中核研究機関が強力に牽引する、もしくは政府内委員会により多数の中核研究機関を牽引して北極圏研究を一体的に推進する例が多く見られ、これらも参考となる。

我が国において、北極圏研究における総合力を発揮するためには、モデリング及び観測双方の分野の北極圏研究関係者が広く結集して議論を行い、戦略と方向性を見だし、連携していく、またデータ・研究成果を共有・発信し、さらには新たな研究に協調して取り組んでいく、という共通プラットフォームとなる組織を整備することが有効であると考えられる。このため、「北極圏環境研究コンソーシアム」（仮称、以下コンソーシアムという）を設置し、多岐にわたる各研究機関間の連携を推進し、オールジャパン体制による北極圏研究の強化に取り組むことが適当である。このことは、また限られた研究資源を共有することで、有効活用し、より大きい効果をもたらすことにつながる。

また、コンソーシアムは、広く研究者が結集する緩やかな連携組織であることから、より焦点を絞ってモデルと観測の融合をはじめとする研究計画、持続的に強化する観測、国際協力、人材育成など課題別に具体的な議論を行う場をコンソーシアムの中に設置することが、コンソーシアムを北極圏研究の実質的な推進役として真に機能するものとするためには不可欠である。

コンソーシアムの事務局は、海洋研究開発機構の協力を得つつ、国立極地研究所が担うべきである。

また、日本として、現有の資源をもとに最大限の効果を発揮する体制を考える必要がある。連携は一つの方法ではある。しかしながら現在、研究機関が分担している業務にみられる重複と不足が見られ、このような観点から考えると、現在の状況は必ずしも妥当とはいえない。それを是正するには組織的調整が必要である。研究機関・グループの再編および構築を実施することにより、日本として効率的・効果的に研究を行っていきける体制を築くこ

とが重要である。

3. 「北極圏気候変動研究プロジェクト」の創設

北極圏研究における重要課題は、北極の変動をもたらす全球の気候変動へのフィードバックや我が国への影響の解明及び将来予測であり、そのためのモデル研究とモデルの精緻化に直結する観測研究をパッケージで推進する必要があることから、「北極圏気候変動研究プロジェクト」（仮称）を立ち上げることが適当である。

北極圏総合研究の実施にあたっては、モデルと観測をつなぐデータ同化研究、各機関・大学等で取得されている観測データの統合も並行して推進することがモデル研究の一層の精緻化には不可欠であり、パッケージの一環として取り込むことが重要。

また、これらの研究を国際研究計画として提案し、モデリングと観測が一体となった国際共同研究を主導することも一案である。

プロジェクトの実施期間としては、概ね5年程度として、この期間に集中的に取り組み、北極圏・ユーラシア寒冷圏の極めて大きな温暖化進行の精緻な予測と、その雪氷圏や生態系へのインパクトと気候フィードバックの評価等を当面の目標とすることが考えられる。

北極圏研究には、中長期的に取り組まなければならないことは自明であるが、解決すべき課題を明確にし、各機関が連携して研究を行い、その成果を踏まえて、選択と集中による重点化を図りつつ新たな研究計画を策定するという研究のPDCAサイクルを内在した取り組みが求められる。

5年間の目標としては、まず観測とモデリングのインターフェースを促進して気候モデルを精緻化し、北極における地球温暖化の影響を明らかにする。その後、精緻化された気候モデルをベースとした上で地域モデル活用し、北極域の温暖化によってもたらされる地域的な極端現象や北極振動等の変化を統計的に予測できるレベルを目指し、モデルを駆使して北極における地球温暖化が日本の気候や社会に与える影響等を検証する。

4. 北極圏観測の強化

北極圏に関する観測データについては、各機関・大学が積極的に取得に努めているが必ずしも十分なデータが得られているとはいえず、多面的な取り組みが必要である。

まず、北極圏環境研究コンソーシアムでの議論をもとに、既存の観測拠点の施設整備の選択的強化と相互利用の推進を行うことが望ましい。具体的には、国立極地研究所などがある観測拠点を必要性と重要度を考慮し整備を強化するとともに、直接、海水が後退した北極海の海洋観測が行える海洋地球研究船「みらい」を最大限活用することも視野にその観測能力の拡充などを進めることが望ましい。その際、これらの観測拠点等の相互利用も重要であり、人材交流・育成にも活用されることが期待される。

また、近年充実が図られている人工衛星 Aqua による海水を含む水循環観測や дай

(ALOS) との連携による北方林観測、2011年に打上げが予定されている GCOM-W1 による海氷変動を含む水循環観測、2014年 GCOM-C1 による陸上・海洋生態系・積雪・雲・エアロゾルなどの極域環境観測、2013年に打上げが予定されている GPM(全球降水観測ミッション)による固体降水観測などの衛星データについても、地上観測データとの統合などを通じて一層の利用が有効と考えられる。これらの既存および今後の持続的な観測データの取得、着実なアーカイブ化及び活用しやすしいデータセットの整備体制が求められる。

観測空白域の改善や観測項目の充実については、限られたリソースの中で優先順位を見極めることが重要であるものの、それでも必要な観測には国際協力や利用可能な既存の施設等を活用して取り組むべきである。

なお、北極海観測には、当面は耐氷性能を有する海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」を活用していくことが重要であるが、変化のプロセスを理解し予測するために必要となる海氷域の変化を捉える観測をより機動的に行うべく、将来的には砕氷船の利用についても検討する必要がある。

5. 北極圏研究における国際協力

国際的な研究計画等の枠組みに基づいて推進されている国際協力の現状を見れば、各機関・大学等の努力によって、研究者・研究機関間のネットワークが構築されてきており、国際的な情報発信や研究成果創出への貢献など一定の存在感を見せているといえる。しかし残念ながら、それらの活動は、個別の研究者・研究機関のレベルにとどまっておろ、国内の機関・大学等での観測データや研究成果の共有など連携が十分ではない。コンソーシアムの活動を通じて、国内の連携を強化し、国際的な情報発信、個別の国際協力の充実に努めることが重要である。

我が国は北極圏に領土領海を持たないため、観測データの取得をはじめ観測活動に制約が生じることは避けられないが、国際協力を推進することにより我が国単独では得られない観測データ、研究成果を協働して生み出すことが可能となる。我が国として重要な観測データについては、国際研究コミュニティに対して国際共同研究を提案し、主導することもあり、我が国にとっても貴重な研究成果を得るとともに国際社会への貢献も行うことが期待できる。更に、2国間の協力プロジェクトではなく、多くの国が参画する国際研究計画として推進することが観測データ利用と理解に対し有効に機能する可能性がある。

その際特に注意する必要があるのが、日本としてどのような情報を取得し、どのような見を得ることが必要かを明確化し、それに沿った国際協力を行うことである。一つの具体的方法は、国際委員会等への積極的参加を行い日本の研究コミュニティにとって好ましい主張を通じて、日本にとって利益のある事項を国際計画に反映させることである。二つ目は、観測・データ整備等における他国との具体的関係である。この場合は、特に北極圏との協力が重要になるであろうし、その場合には一国に偏ることなく、必要な諸国、機関、プロジェクトとの協議を保つことが重要であろう。

北極を巡る国際的な枠組みとして北極評議会がある。北極評議会は、北極圏の持続可能な開発、環境保護などに関し、北極圏諸国間の協力・交流を促進することを目的として協議を行っており、北極における研究、経済活動等に重要な影響力を有している。北極に領土を有するカナダ・デンマーク・フィンランド・アイスランド・ノルウェー・ロシア・スウェーデン・アメリカの8カ国(いわゆる北極国)を加盟国とする他、フランス・ドイツ・ポーランド・スペイン・オランダ・イギリスがオブザーバ資格を付与されている。北極評議会のオブザーバとなること、北極圏研究の円滑な推進につながるものと期待される一方、オブザーバ資格の獲得には北極圏研究の実績が有力な根拠となりうる。現在、オブザーバ資格の申請中であるが、北極圏研究の推進にあたっては留意するべき事項である。

なお、国際協力のひとつとして、アラスカ大学国際北極圏研究センター (IARC) は衛星データを活用拠点や寒冷圏観測拠点として実績があり、我が国の大学との連携により、北極圏システムモデル開発も含めた人材交流の機能も期待できることからその特長を活かした協力を進めることが適当である。

IV. 結語

北極圏研究検討作業部会においては、北極圏研究の現状を踏まえつつ、ユーラシア寒冷圏を含む北極圏研究における重要課題、国内の研究推進体制、国際協力の在り方等に関して、精力的に議論を重ねた。その結果、我が国の北極圏研究の一層の活性化に向けた骨格を示した。本報告書は中間的まとめであり、この骨格のさらなる具体化に向けた検討を引き続き行う必要がある。

結びに、本報告、また今後の検討を踏まえて、行政に対して適切な対応を要請するとともに、我が国における北極圏研究の飛躍をもたらし研究コミュニティの奮起を促したい。

(丁)

中間評価票（北極気候変動分野）

（平成25年8月現在）

1. 研究課題名：大学発グリーンイノベーションイノベーション創出事業「グリーン・ネットワーク・エクスレンス」(GREEN) 事業北極気候変動分野 (23年度～27年度)

2. 評価結果

(1) 課題の進捗状況

〔必要性に関する進捗度〕

前半期を終え、4つの戦略研究目標達成に向けた各取組に係る個別の成果が見えてきている。また、これまで、個別に活動してきた国内北極研究者を、極域研究の共同利用・共同研究拠点である国立極地研究所が中核となつて一つにまとめ、連携コーディネーターの配置による観測とモデルの連携支援など、我が国として横断的、統合的に活動する体制が構築されていると評価できる。国際的にも、主要国へのアプローチが積極的に行われ、連携が強化されつつあると評価できる。

一方、観測とモデルへのフィードバックについては、現状、断片的な範囲にとどまっており、また、並行して開発されている様々な制約条件を持つモデルが、後半期に相補する関係に至るまでのプロセスが不明確である。結果として、個々の取組がばらばらとなっており、4つの戦略研究目標との関係も不明瞭になっている。

このため、観測とモデルに係る各取組の現状が、4つの戦略研究目標とどのように関連しているのか改めて検証し、各取組間の連携を強化しつつ、目標達成までのプロセスをより具体化する必要がある。

〔有効性に関する進捗度〕

国立極地研究所が中核となり、35機関約300人の国内北極研究者が一定の方向性をもつて観測研究活動を行えるよう、17名の学識経験者からなる運営会議を独自に設置し、その進捗管理を行っていることは評価できる。

一方、北極域の気候変動への重要性を理解するためには、観測とモデルの連携から、陸域、大気、海洋、雪氷等、各分野をまたがる統合的なアウトプットを創出することが求められるが、現状、この連携が弱く、各分野がばらばらに進展しているように見受けられるため、この更なる強化が必要である。

また、国際的に見て、我が国の北極研究がどのように評価され、各国とどのように連携を図ることができるのか、我が国の独自性、優位性を明らかにして検証する必要がある。

なお、本事業により整備を進めるデータアーカイブは、国立極地研究所が我が国の極域研究に係るデータセンターとして国際的な認知を得るためにも、引き続き、世界の研究者を対象としてできる限り早期に公開することが望ましい。

〔効率性に関する進捗度〕

4つの戦略研究目標達成に向けた各観測研究グループ間の連携が弱いことなどから、目標達

成に向けた進捗状況が見えにくく、効率的な運営が行われているのか判断しがたい。限られた予算の効率的かつ効果的な執行に資するよう、各グループ間における取組の統合と目標達成に向けた取組の明確化を早急に進め、定期的なPDCAサイクルの展開を徹底する必要がある。

これまで、我が国の北極研究は、個別の研究者が国際的な共同研究プログラムに参加するかたちで行われることが多く、国際的な認知度は必ずしも高くなかったが、本事業を通して、我が国としての北極研究が見えやすくなったことは、今後、北極圏において様々な活動を行う上でも良い影響を生むものと期待できる。

特に27年度（本事業の最終年度）に開催される The Arctic Science Summit Week (ASSW) の国際大会において、画期的な観測研究成果を数多く提示することで本事業の国際的な評価が定まると思われる。

(2) 各観測の再評価と今後の研究開発の方向性

当初計画通り、ほぼ順調に進捗しており、水準以上の成果を上げておりと評価できる面もあるが、4つの戦略研究目標との関係では、個々の取組間の連携が弱いことが指摘される。更には、本事業が最終的に目指すところの「急変する北極気候システム及びその全球的な影響の総合的解明」に向け、4つの目標が全体として集約され、統合的な研究成果を創出するまでの道筋が不明瞭である。

今後、本事業の推進に当たっては、以下のことに留意する必要がある。

●北極域の気候変動への重要性を理解するためには、長期的な観測データの取得が重要であり、我が国自らが取得したデータのみならず、世界各国がこれまでに取得してきたデータをよく発掘することも必要である。このため、鍵となる国際連携を強化しつつ、我が国の強みを明確にし、我が国のプレゼンスを高めていく戦略性が必要である。

●4つの戦略研究目標に向かって各観測研究グループが個別に活動している感があり、その意味で北極圏における地域・海域研究にはまだ成熟できていない。今後、観測の結果がモデルの改良に反映されると同時に、各モデル間の相補性が確保されて全体像が出てくるような事業の運営が必要である。

●北極気候システムの全球的な影響に係る総合的解明に向け、4つの目標が一体となった研究への深化を図るため、観測とモデルの連携を着実に進展させ、本事業終了以降も機能する確固たる共同体制とする必要がある。

(3) その他

数字で見る GRENE 北極気候変動研究事業

研究業績 609 件

原著論文	377 件
(出版済)	367 件
(投稿中)	10 件
著書・一般雑誌	159 件
招待講演	60 件
受賞	13 件

主要な観測件数 153 件

シベリア	24 件	北極海等	39 件
カナダ	11 件	北極域上空	18 件
アラスカ	19 件	日本	13 件
グリーンランド	5 件		
スカンジナビア・			
スバルバル	24 件		

参加研究者 363 名

PM・サブPM・PM代理	3 名
研究代表者	9 名
研究分担者・特任研究員等	236 名
研究協力者	115 名

学位取得者 127 名

博士	15 名
修士	55 名
学士	43 名
準学士	14 名

報道 503 件

新聞	438 件
TV・ラジオ	25 件
雑誌	40 件

参加機関マップ

国立極地研究所の他 39 機関



WEB版改訂2018年2月5日

編集・発行

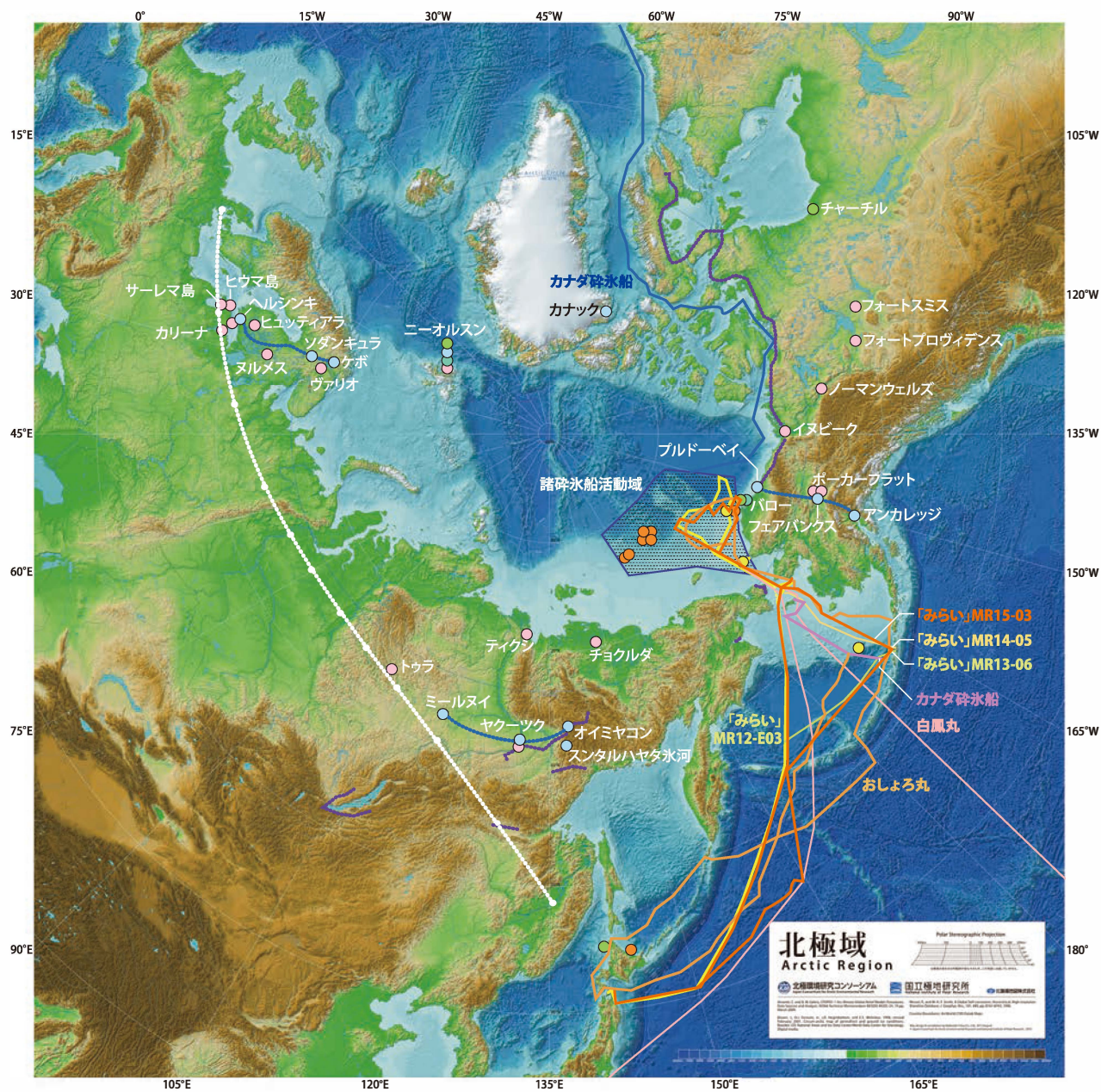
2016年8月31日

大学共同利用機関法人
情報・システム研究機構国立極地研究所
国際北極環境研究センター
GRENE 北極気候変動研究事業事務局
東京都立川市緑町 10-3

ISBN: 978-4-906651-05-4

doi:10.15094/00013469

GRENE北極気候変動研究事業の観測・活動が行われた地域



- 陸域植生観測
- エアロゾル・雲・放射観測
- 積雪・氷河・氷床観測
- 温室効果気体観測
- 海洋生態系観測
- 海洋変動・海水観測
- 積雪調査ライン
- 永久凍土調査ライン
- 白点線：民間航空機観測ライン
- 実線(黄、橙、ピンク、青)：船舶観測