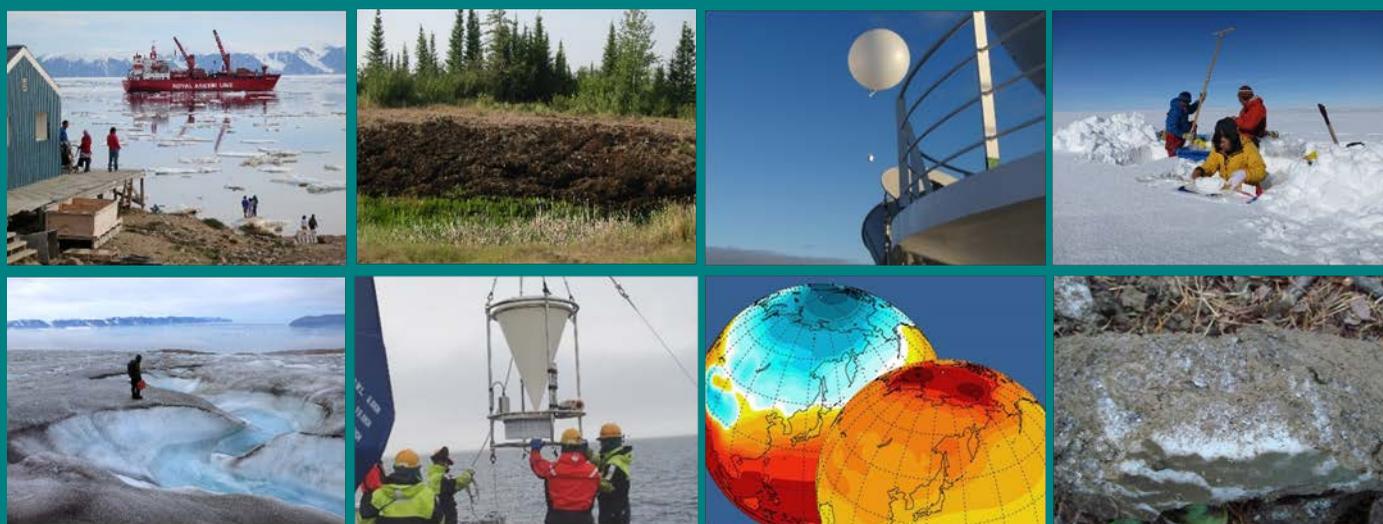


北極環境研究の長期構想



北極環境研究コンソーシアム (JCAR)

2014年9月

2016年6月29日 改訂版

巻頭言

北極環境研究コンソーシアム(JCAR)で取りまとめた「北極環境研究の長期構想」が完成した。

JCARは2011年5月に誕生し、賛同する登録者は2014年8月現在で384人に及ぶ。JCARが生まれた背景には、これまでの日本の北極研究の取組を新しい形で発展させて行きたいという北極研究の関係者の思いがあった。これまで多くの日本の研究者が北極に出かけていた。しかし、個人的な研究能力は高いものの、海外から日本としての成果があまり見えない、と言われていた。個別に北極に出かけている状態であり、過去の観測からの継続性や他の研究者の動向把握、協力体制、調整等の点が弱いという認識があった。このような活動では、どうしても研究は短期間となり、長期観測の展望や実施は不可能であった。JCARが生まれることにより、それぞれの研究者が取り組んできた活動の情報交換をすること、今後の方向性、潜在的な共同研究の相手を得ることが期待された。そのような活動の中では日本の北極環境研究の長期の展望を立てることの重要性が考えられ、2010年の文部科学省北極研究作業部会の議論を経て、中間報告(2010年8月)に提言されている。

JCARが設立されたのと同じ年の2011年秋、GRENE北極気候変動研究事業がスタートする。翌2012年北極海水面積は夏季の最少記録を更新し、春の積雪面積も最少、グリーンランド氷床の融解域も氷床表面ほぼ全域に拡大したことが観測された。2013年3月には、日本の「海洋基本計画」が更新され北極にも注目が集まる。また学会会議にも北極に関する大型研究プランが提出された。2013年5月には北極評議会に日本はオブザーバー国としての参加が承認された。北極評議会の活動は国際関係、環境問題、地域行政など多岐にわたるが、その活動や判断のベースとなるのは科学活動の情報である。急速に変化する北極の環境とそれに関わる研究活動について、国内の研究活動の立案や、国際的な協力要請の機会も増加している。これらにもすぐに応えられるよう国内の状況を把握していることは重要である。

長期構想はJCAR第一期代表の大畑哲夫氏の強い意向で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ワーキンググループ(WG)の活動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、今回の「北極環境研究の長期構想」執筆には140名を超える方が協力を表明した。WGの代表である池田元美氏をはじめとし、執筆者だけでなく、査読に関わられた方、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された方、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本構想作成活動が進められた。日本においてこの長期構想が書かれたこと自体が、新しく始まった北極研究、北極研究者体制の成果であると言え、長期構想の作成に携われた関係者に心から感謝したい。

長期構想では今後10年~20年で取り組むべき課題を考えた。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。

北極の自然の変化は急速に起きている、変化する北極の環境に対する時代の要請、研究者への期待や使命は増加している。北極圏の現象は複雑である。全体における自分の位置を見ること、分野を越えた共同研究を行ない、ある分野の研究者は他の分野の内容から学ぶことが望まれている。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、他の分野の動きや関連の模索を可能にする、それらを形にしていってのがこの「北極環境研究の長期構想」である。これを機に北極研究の議論が深まり、研究に参加する人が増えていくことを期待している。

北極環境研究コンソーシアム運営委員長 榎本浩之

北極環境研究の長期構想

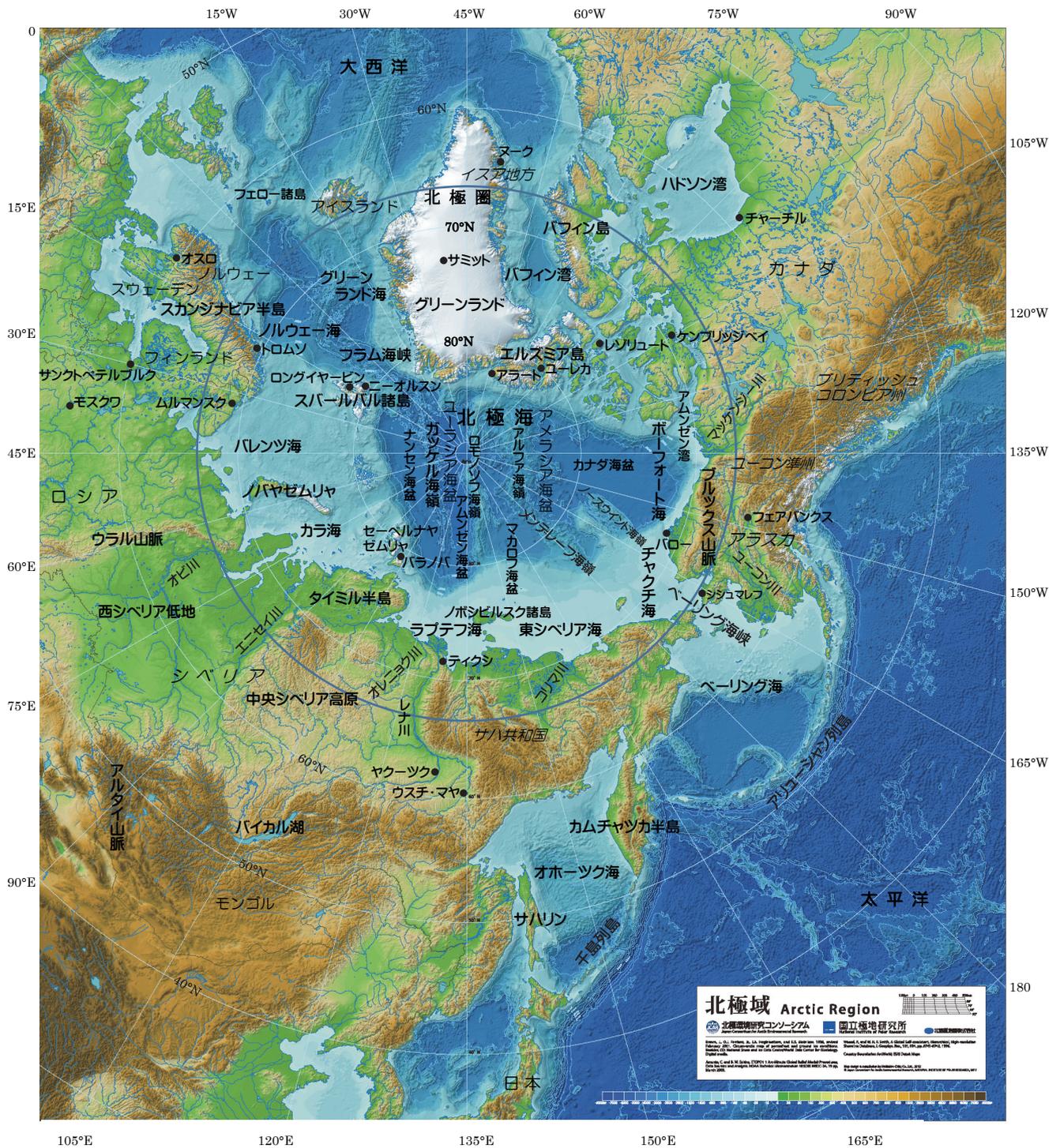
目 次

巻頭言	i
1章 報告書で目指すこと	2
2章 背景と内容	3
3章 北極環境の現在までと近い将来に起こりうる変化	4
4章 北極環境研究の歴史	7
5章 「現在進行中の地球温暖化に伴う北極の急激な環境変化を解き明かす」研究テーマ	9
テーマ 1： 地球温暖化の北極域増幅	9
Q1： 下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送は、北極温暖化増幅にどう影響するか？	10
Q2： 陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？	12
Q3： 季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドの役割はどの程度か？	14
Q4： 雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？	16
Q5： 北極温暖化増幅はなぜ起こっているのか？ その予測と不確実性はどれほどか？ 北極域における放射強制力とフィードバック・プロセスはどう変化するのか？	17
テーマ 2： 海氷減少のメカニズムと影響	19
Q1： 風のパターンや海氷の流動性の変化は海氷減少を促進するか？	20
Q2： 海氷の熱的減少はどのように進むのか？	21
Q3： 海氷減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？	23
Q4： 海氷減少が海洋内部に及ぼす影響は？	23
10～20年後を見据えた戦略	24
テーマ 3： 物質循環と生態系変化	30
Q1： 大気中の温室効果気体やエアロゾルなどの濃度はどう変化するか？	31
Q2： 陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？	34
Q3： 陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か？	36
Q4： 海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？	38
テーマ 4： 氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環	42
Q1： 氷床・氷河の変化は加速するか？	42
Q2： 永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？	46
Q3： 北極域の降積雪はどう変化しているか？	48
Q4： 環北極陸域の水文過程はどう変化するか？	50
テーマ 5： 北極・全球相互作用	53
Q1： <大気の影響について> 北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？	54
Q2： <海洋の影響について> 大西洋・太平洋間の海水循環は強まるか？ 深層水形成は減るか？ 中緯度海洋大循環は変わるか？	56

Q3 : <陸域の役割について> 植生と凍土の変化による炭素収支や物質循環への影響は？ 積雪と植生の変動による広域エネルギー水循環への影響は？	58
Q4 : <超高層大気の役割について> 極域超高層大気が下層大気・超高層大気全球変動に 及ぼす影響は？	60
Q5 : <多圏相互作用について> 超高層大気、大気、陸面積雪と植生、海洋のどれを經由 する影響が大きいのか？	61
テーマ 6 : 古環境から探る北極環境の将来	64
Q1 : 過去の北極温暖化増幅は現在とどれほど異なり、その要因は何か？	66
Q2 : 過去のグリーンランド及び大陸の氷床はどう変動し、その要因は何か？ 気候変動 との関係と海面水位への寄与は？	68
Q3 : 過去の北極海の環境はどのようなものであったか。とくに海氷と生物生産について	70
Q4 : 過去の北極陸域環境は現在とどれほど異なり、大気組成や気候とどう関係したのか？	72
Q5 : 過去の北極において、数年～数百年スケールにおける自然変動の強度や時空間 パターンは現在と異なっていたか？そのメカニズムは何か？	74
【ボックス 1】古環境プロキシや年代推定手法の開発と解釈	76
テーマ 7 : 北極環境変化の社会への影響	77
Q1 : 地球温暖化も含めた気候変動による影響は？	78
Q2 : 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は？	82
Q3 : 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響	83
Q4 : 太陽活動と北極超高層大気の影響	85
Q5 : 北極圏人間社会の対応	86
6 章 「生物多様性を中心とする環境変化を解き明かす」研究テーマ	89
テーマ 8 : 陸域生態系と生物多様性への影響	89
Q1 : 人為的な要因で起こる環境変動は北極陸域生態系にどのような影響を及ぼすか？	90
Q2 : 生物多様性はどのような影響を受けるか？	93
【ボックス 2】生物多様性とは？	93
【ボックス 3】学名の不一致問題	94
Q3 : 北極陸域生態系の変化が動物や気候に与える影響はどうなるか？	95
【ボックス 4】トナカイの生息変化	95
【ボックス 5】水鳥のモニタリング	96
テーマ 9 : 海洋生態系と生物多様性への影響	97
Q1 : 陸域・大気物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？	98
Q2 : 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？	99
Q3 : 北極海食物連鎖と生態系変化・多様性はどうか関係しているか？	101
【ボックス 6】表層-底層生態系のカップリング	102
【ボックス 7】バイオロジカル・ホットスポット	102
Q4 : 成層化、脱窒、および海洋酸性化は北極海の生態系・多様性にどのような影響を 及ぼすのか？	103
7 章 「北極環境研究の広範な重要課題」研究テーマ	105
テーマ 10 : ジオスペース環境	105
Q1 : ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？	107

Q2: 超高層大気が下層・中層大気に与える影響は？	108
Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？	110
Q4: 超高層大気を通した極域から中低緯度へのエネルギー流入は？	112
テーマ 11: 表層環境変動と固体地球の相互作用	114
Q1: 現在活動する北極海海嶺熱水系と海洋環境との相互作用は？	115
Q2: 氷床変動に伴い固体地球はどのように変形してきたか？	117
Q3: 北極海が形成されていく過程で、大気-氷床-海洋の相互作用がどのように変化していったか？	119
Q4: 数千万年～数十億年といった時間スケールでの地球表層環境変動に北極海と周辺大陸の発達過程はどのように影響を与えたか？	121
テーマ 12: 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	124
【ボックス 8】永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	127
Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか？	128
Q2: 永久凍土を構成する物質はどのような分布を持ち、どの程度の不均一性があるか？	129
Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？	130
Q4: 永久凍土-大気-積雪-植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？	133
8章 「環境研究のブレークスルーを可能にする手法の展開」 テーマ	136
テーマ A: 持続するシームレスなモニタリング	136
海洋圏モニタリング	137
雪氷圏モニタリング	140
【ボックス 9】氷河質量収支の観測	142
大気圏モニタリング	143
陸域圏モニタリング	145
テーマ B: 複合分野をつなぐ地球システムモデリング	148
Q1: 地球システムモデルについて開発課題は何か？	149
Q2: 大気モデルについての開発課題は何か？	153
Q3: 海洋・海氷モデルについての開発課題は何か？	154
Q4: 陸面・雪氷モデルについての開発課題は何か？	158
テーマ C: モニタリングとモデリングをつなぐデータ同化	160
北極圏におけるデータ同化研究の現状	161
【ボックス 10】データ同化技術の解説	162
データ同化を北極環境研究に展開する方針	164
北極圏データ同化研究の実現に向けた環境整備	169
9章 研究基盤の整備	173
砕氷観測船	173
衛星観測	175
航空機	177
海外の研究・観測拠点	178
データおよびサンプルのアーカイブシステム	181
人材育成	183
研究推進体制	185

	分野別研究機器等	187
10 章	長期にわたる方向性と取り組み体制のまとめ.....	195
11 章	資料	198
	引用文献.....	198
	執筆者等一覧.....	209



(v.2)

図1 北極域地図。地図中に記した地名は本文中(全体版)に出てくる主な地名である。下地に使用している地図は JCAR のウェブサイトからダウンロード可能。

1章 報告書で目指すこと

本構想では、北極環境の研究者が、極域に関心のあ
る他分野の研究者や、環境について知りたい市民など
に向け、次に示す諸問題の解決を目指して研究の方向
を提案する。地球規模の環境変化でもっとも関心を持
たれているのは地球温暖化であろう。なかでも北極域
は、温暖化のスピードが全地球平均の 2 倍あるいはそ
れ以上とも言われ、氷と雪の変化が目立つので特に注
目される。しかし、地球温暖化が数十年から数百年のス
ケールで起きる変化であるのに対し、大気循環の変動と
それに伴い様々な空間パターンを持つ気温の昇降が
年毎に生じるため、ある期間では寒冷化しているように
見える地域もある。特に私達が居住する日本の気候が
どう変わっていくのか、平年より寒い冬を過ごした後で
は、地球温暖化に疑念を抱いても不思議はない。

地図(図 1)を見ながら話を進めよう。北極に注目する
と、従来は通年海水に覆われていた北極海で、夏に海
水面が開く海域が拡大している。シベリア沿岸はすでに
季節海氷域となっており、北極海全域がそうなるのは、
今世紀中ごろとする将来予測が多いものの、10 年後と
予測するモデルさえある。将来の予測はシミュレーショ
ンモデルを利用する必要があるが、それをどこまで信頼
できるか疑問が沸くであろう。北極海を横切る航路がい
つごろ実質的に利用できるようになるかは、さらに難し
い質問である。

植生分布は主に気候に支配され、中高緯度で徐々
に気温が上がれば植生は活性化するが、土壌水分も重
要なので、降水量や積雪期間の長さにも依存する。た
だし植生、特に森林生態系は容易に移動できないの
で、気候変化の速さに植生が追従できない可能性も高
い。また、森林伐採開発などの人為的影響も加わると、
生物多様性と生物相の変化を推定するのは非常に難し
い。多様性は環境変化に対応する力を決めるものであ
り、広い意味での陸域生態系サービス¹を保証する根幹
であるので、それを如何に保つかは人類の課題であろ
う。陸域の動物は植生に支えられ、その狩猟を生活基
盤とする北極域の先住民がおり、彼らが伝承する文化

は人類共通の財産である。同じことは海洋にも言えて、
海洋の生物多様性と生物相の変化も生態系サービスに
重要であり、住民の生活を支えている。農業と水産業は
気候に影響されるが、農業は水資源の確保と作物種
の選択によってある程度の対応ができるのに対して、水産
業は環境に大きく依存し、そこでは食物連鎖や種の競
合などの複雑な問題が存在する。

極域に特有の氷河・氷床と永久凍土がどう変わるか
が注目されるだろう。グリーンランド氷床が急速に融解し
ていると判断されたのは今世紀に入ってからであり、こ
れからの海面上昇を大きく左右する要素と考えられる。
山岳氷河の縮小は地域による差があるものの、全地球
規模では把握できている。一方でモニタリングが難しい
永久凍土は、その衰退が植生と河川に影響を及ぼすだ
けでなく、含有炭素化合物が分解して温室効果気体を
放出する難しい対象である。近年増えていると言われる
シベリア河川の流量は、おそらく降水量の増加に因るだ
ろうが、凍土を融解させる力を持つかもしれない。

ここまで述べた様々な関心事に広く関わる視点で、過
去の気候変化から何を学べるか、地層や氷床の調査を
する古環境研究が、将来予測を行うシミュレーションモ
デルの検証にも情報を提供する。半閉鎖型の北極海は
いつごろ形成され、北極海と沿岸域の気候はどう変わ
ったのか、太陽活動の変動に伴って超高層大気が変わ
ると成層圏と対流圏にどのような影響が出るのかなど、視
点を広げるとさらに多様な関心が沸いてくるであろう。自
然科学ばかりでなく、先住民族と近年の移住者との間で
協働関係を構築するにはどうするかなど、人文社会科
学の側面にも関心は広がるかもしれない。以上に述べ
た関心事を抱いた読者は、本構想を読み進め、それら
を解き明かす研究の構想を探っていただきたい。

¹ 生態系サービス：生態系から人類が受ける食料、精神的・文化的利益、気候・水環境の緩和などが主なものだが、酸素の供給や二酸化炭素の吸収まで含む。

2章 背景と内容

報告書作成の背景と経緯

長期構想の作成自体は、現在進められている GRENE 北極気候変動研究事業²の運用基本方針、JCAR³の趣意書と規約において謳われている。これまで我が国で「北極環境研究」に特化した長期構想はなく、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る。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。構想には次世代研究者の希望が反映されており、それらの実現に向けた共同作業によって、多くの研究者が共通の目標を持って前進することが可能となる。

地球温暖化と生物多様性は、国際的な取り組みによって現状の把握、将来予測、対応などが取りまとめられており、北極環境研究においても焦点とするにふさわしい。様々な分野が結集している JCAR の特徴を活かし、協働して取り組むべき課題を軸に長期構想をまとめ上げることによって、分野間の相互啓発を促している。これらふたつの焦点には直接含まれない環境研究も北極域について進められており、重要な研究課題が JCAR のコミュニティとしての活動を際立たせるのみならず、研究の進展によっては地球温暖化と生物多様性に関係する情報を与える可能性も考えられる。さらに研究基盤の整備まで提案し、研究プラットフォームの構築や人材育成にも力を結集する方向性を示している。

本長期構想を誰に対して示すのか。北極研究に携わっていない研究者、科学を専門としない政策決定者、環境に関心を持つ市民としている。それと共に、とりまとめを行う過程で、北極研究専門家の考えと意欲を結集することができ、また、異なる分野と相互啓発するための情報交換ができたのも事実である。これは今後の研究推進にとって重要な一石となるであろう。

内容の説明

北極環境に関する研究について、以下に示す4つの目的を設定して、それぞれの中で数件ずつのテーマを選び、まず、現在までの状態の変化とそれに関する研

究の進展をレビューした。10年～20年を視野に入れ、存在するギャップの同定・確認を含め科学テーマを抽出し構想するとともに、必要な研究および体制を示した。科学を専門としない読者、北極研究に携わっていない研究者のため、社会的な関心事を含む「まえがき」から読み始め、さらに知ろうとする興味を持って、専門的な情報にまで読み進められるように構成した。

研究目的は次の4つである。コンソーシアム設立の背景となった課題である「北極地域の強い温暖化に伴い発生している急激で複合的な現象の理解とそのメカニズムおよび影響の解明、さらに、その将来予測を向上させる」研究では、地球温暖化の北極域増幅など7つのテーマを選んだ。「陸域と海洋における生物多様性、および温暖化だけでなく様々な人為的環境変化が生態系に及ぼす影響を解明する」研究については、陸域と海洋に分けた2テーマとした。「広範かつ重要な北極環境およびその基礎情報に関する」研究では、地球を取り囲むジオスペース環境などの3テーマを設定した。4つ目の「環境研究のブレークスルーを可能にするモニタリング、モデリング、およびそれらを統合する」研究に関しては、3つの手法に基づいた3テーマを選んだ。

これらの研究目的で取り上げるさまざまな環境変動の多くは、大気、海洋、雪氷、陸面、物質循環、生態系などの間の複雑な相互作用が絡んでおり、それを理解し予測することは既存学問分野の協働を活性化することにつながる。その一方で各分野の理解を深化させ、未解明現象の究明も推進する。4つ目の研究目的は手法の改善に留まらず、観測とモデリングの手法の革新的な展開から、先駆的なブレークスルー研究のきっかけを創る。

本長期構想の英語版を作成して国際的な情報発信を図ることとしている。日本における研究者コミュニティとして、学問の発展に道筋を示すことに大きな意義がある。国際的には ICARPIII⁴の議論が2014年に開始予定であり、日本の北極環境研究の長期構想をインプットできる機会を逃すべきではない。

² GRENE 北極気候変動研究事業：2011年度から5年計画の文部科学省の補助事業、グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンスの北極気候変動分野の研究プロジェクト。

³ JCAR：北極環境研究コンソーシアム(Japan Consortium for Arctic Environmental Research)。2011年に設置された北極環境研究に関するネットワーク型の組織。

⁴ ICARPIII：The Third International Conference on Arctic Research Planning

3章 北極環境の現在までと近い将来に起こりうる変化

北極環境が現在までどのように変わり、今世紀程度の期間でどう変わらうのかについて、北極環境研究の専門家が答えるべき学究上の質問を挙げていく。現在までの研究の進展についても、すでに取り組みされている方向性まで含めて記述する。まず、長期構想の目的に沿って、複合分野が関わる問題を取り上げる。実際にこれらは現在進行中の GRENE 事業でも焦点となっているものが多い。

地球温暖化を中心に据えて、その原因を作ると共に影響も受ける諸現象を図 2 に示す。温暖化によって進む海氷の減少と積雪の期間短縮と面積縮小はアルベド（太陽光の反射率）を低下させ、温暖化の北極域増幅にフィードバックする。温度上昇に伴う水蒸気の増加によって雲とエアロゾル（微粒子を含む大気）は増える。雲の効果は季節によって異なるが、夏季以外は下方への長波放射を増やすことにより、地表面温度を上げる。これらのメカニズムによって、北極域の温暖化が全球平均より急速になるかを定量的に示すことは、これからの研究課題である。

温室効果気体が地表からの長波放射を吸収するため、下層大気は暖かくなるが、その上にある成層圏と高層大気では寒冷化していることが報告されている。気温の変化が、低緯度－高緯度で、また、下層大気－超高層大気で異なる場合、北極を取り囲むジェット気流速度がどう変化するか、さらに蛇行が発達しやすくなるかなど、低緯度域の大気へフィードバックする様子は、まだ諸説がある。

温暖化は、森林限界を北上させるが、その一方で永久凍土を融かし、凍土によって保持されていた土壌水分が低下して森林が劣化する地域もある。積雪や水循環を介して大気循環のパターンにも影響するなら、陸面へのフィードバックも考慮しなければならず、凍土融解と森林北上は地域によって異なる。これらの変化によって、凍土が融けると温室効果気体を土壌から放出させるが、森林が発達すると二酸化炭素を吸収する。しか

し、土壌水分は降水量にも依存するので、実際に植生がどう変化するか予測するのは難しい。氷床融解の予測を向上させることは、海面上昇を予測し、高潮被害や低地水没など社会基盤の様々な対応を効率的に進める基礎情報を提供する。

温暖化は、海洋にも問題を及ぼす。グリーンランド海の冷却が弱まり、鉛直混合による深層水形成が減ると、全球海洋コンベアベルト⁵の駆動が弱まるか、あるいはそこに含まれる深層水が減るため、栄養塩が表層に昇りにくくなる。北極海とその周辺海域でも鉛直混合が弱化するため、海洋生態系に必ず影響するが、移動が容易な種とそうでない種が混在しているので、実際に起きる影響を見極めるには詳細な調査が必要である。北極海で最も早期に起こる海洋酸性化も、生態系に影響を及ぼす。海面水温、無機炭素化合物濃度、アルカリ度が二酸化炭素分圧を決める要素であり、温暖化は分圧を上げるが、海洋の二酸化炭素吸収を予測するにははまだ不明瞭な要素が多い。

過去の環境変動から将来予測に有用な情報を取り出す研究は、氷床、海底堆積物など様々な記録媒体を対象にしており、多くの分野と情報交換を進めている。本長期構想では主として自然科学を基礎とする研究について述べているが、環境変化の与える社会への影響を説明し、さらに北極域に生活基盤を持つ住民との協働に基づいた対処方法をいくつか提案する。

以下に北極環境の各要素について、それらに起きつつある変化と学究上の質問を掘り下げる。大気を取り巻く状況では、海氷減少に伴って海面からの長波放射、顕熱と潜熱⁶の増加が北極圏に顕著な変化を生む。層雲から層積雲への変化が起きつつあるが、数値モデルにおける雲形成の過大・過小評価を解消し、その上で将来予測の信頼性向上に努める必要がある。温室効果気体の増加は放射バランスを変化させるものの、北極域ではエアロゾルが雲核となり、雲形成を促進する影響が大きく、その過程を精査することに努めるべきである。

⁵ 全球海洋コンベアベルト：北大西洋深層水によって駆動されることは事実であるが、それに加えて以下の要因も重要である。大西洋、太平洋、インド洋において、海面に加熱と冷却が働き、また降水と河川水流入に伴い海水の塩分が減るが、蒸発によって塩分が増える。その結果として子午面（南北断面）循環が作られると、北大西洋で深層まで沈み込んだ北大西洋深層水は大西洋を南下し、南大洋で東に向かってから、太平洋で北上して上層に昇る。その後はインド洋を通過してから大西洋に戻る。これをコンベアベルトと呼ぶ。

⁶ 顕熱と潜熱：大気が低温で乾燥していると、海洋から熱を奪う。顕熱は大気と海洋の間の温度差に伴う熱輸送であり、潜熱は海洋から水蒸気を蒸発させることで熱を奪う。その水蒸気が大気中で凝結する時に熱を大気に放出する。

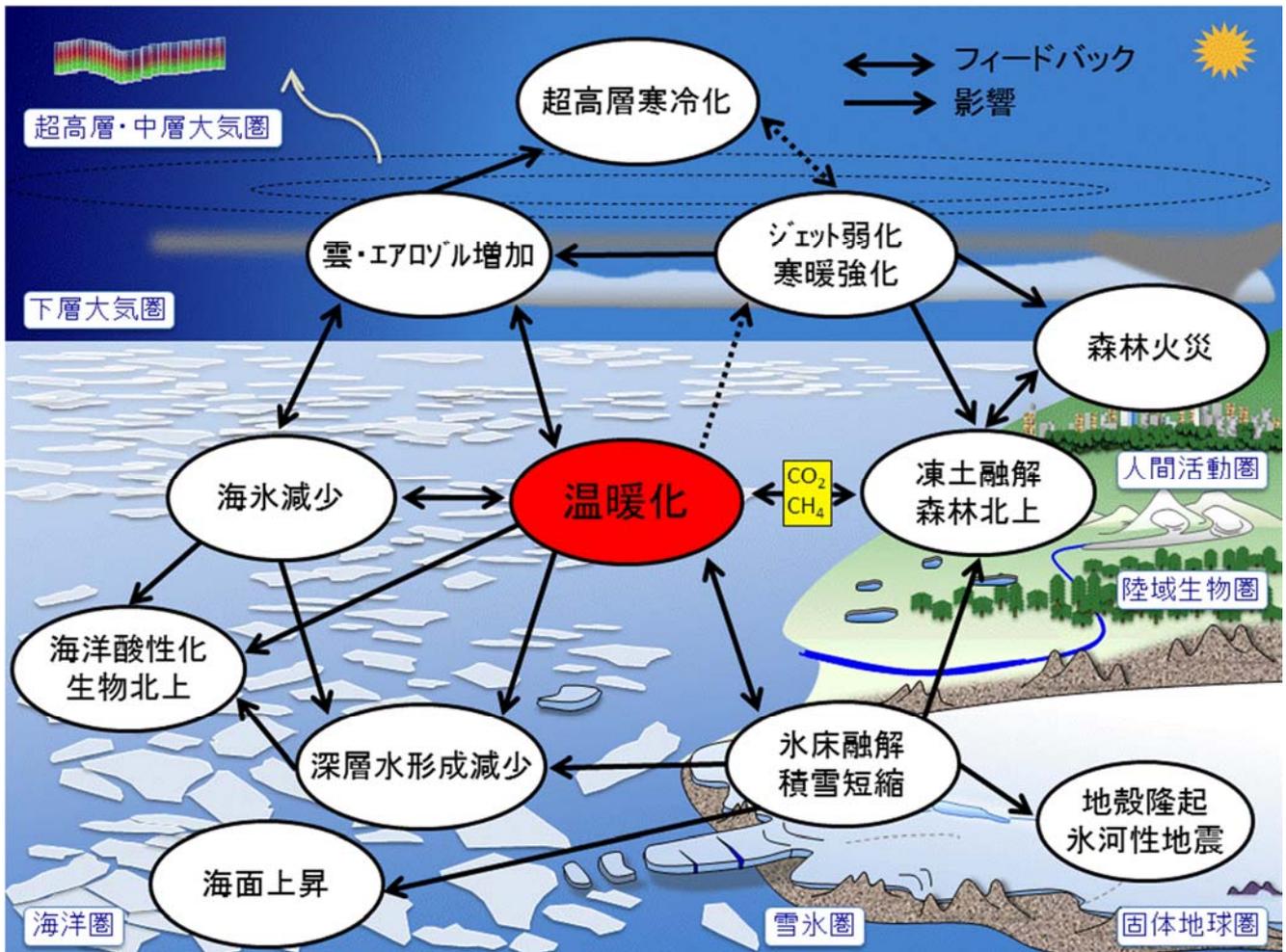


図2 北極温暖化と主要な因子と影響

現在進行中の気候変化に伴って、北極域の大気、陸域、雪氷、海洋に起こりつつある顕著で重要とおもわれる変化を揭示し、それらの間、および地球温暖化との間に働く影響（一方から他方へ）とフィードバック（双方の間で）を示している。あくまでも主たる作用を示したものであり、これら以外にも影響とフィードバックがありうることに留意していただきたい。実線はほぼ確かなものであり、点線は理論的には考えられるがまだ仮説の段階のものを示している。また、雲と温暖化の関係のように、矢印と逆の影響を持つ場合もある。すなわち、ここでは夏季以外のフィードバックが年平均では重要であるものの、夏季には雲が太陽放射をさえぎることによって海氷の融解を抑える、すなわち逆の効果を持っている場合もある。また、森林火災のように、温暖化が無い時でも起きており、その頻度が増しているものもある。

海氷減少と積雪変化の影響は地域によって異なるので、引き起こされる大気循環パターンの変動が冬季東アジアモンスーンを変調させ、日本周辺の気候にも影響を及ぼすであろう。さらに、中緯度や赤道域の大気循環の経年変動とどのように相互作用するかも調べる必要はあるが、その研究はまだ途についたばかりである。

超高層大気は、表層大気温暖化に伴って寒冷化する。その変化をモニターすれば、温暖化進行を推定することに利用できる。南極に加えて北極圏のオゾン層も注目されており、地球温暖化との関係を究明する観測を続けるべきである。また、太陽活動の影響が下層大気にまで現れる可能性も示唆されているので、影響を定

量化する試みが必要である。地球周辺の宇宙空間プラズマは磁力線に沿って極域に降り注ぎ、オーロラに代表されるさまざまな超高層大気現象を引き起こす。これを地上からモニターすることにより、人工衛星の安全・安心な運用に不可欠である宇宙空間プラズマ環境のモニタリングが可能になる。

陸域雪氷に関わるプロセスで、海面上昇を生じる氷床・氷河の融解については、観測とモデリングを用いて氷床の表面エネルギー・バランスと流動のメカニズムを究明し、質量変化を追跡する。高緯度域全体にわたって積雪期間が短縮しているが、積雪深と陸水量は時空間変動が大きい。森林帯の北上と衰退も同時に調べ、

定点観測の継続と衛星観測による面的なモニタリングの統合が必須である。アルベドに関しては、植生変動に加え、積雪に含まれる不純物である微生物効果を定量的に評価する。永久凍土上部の活動層が昇温しているのは容易に想像がつくが、南限域での消失には初冬の積雪深に依存するアルベドと熱伝導が鍵となる。北極海に注ぐ河川の流量が増加する傾向にあり、降水と蒸発の差である正味降水量の増加が背景にあると考えられている。海面と中緯度帯からの水蒸気輸送も合わせて、水循環の全体像を描き出す作業を進めるべきである。

陸域の物質循環は、全球の炭素フラックスを同定する際にも不確定要素として残っている。北極域においては、土壌・永久凍土中の莫大な有機物が、温暖化と大規模森林火災によって二酸化炭素やメタンを放出する。炭素に加えて、栄養塩、微量金属などが河川を通じ、また、海岸侵食で海洋に流出すると、海洋の低次生態系に影響を与える。シベリア、アラスカ、カナダ、北欧における環境監視に貢献することが求められている。

陸域植生は、野生動物の生存を支え、人類には生態系サービスを提供することに加えて、気候変動にフィードバックする機能も持っている。植生の生産性が高まると、二酸化炭素を固定するのは周知であるが、そのレベルは栄養塩の存在量に依存する。さらに、森林帯の北上によりアルベドが低下し、土壌水分を吸収、蒸発散させて水循環に関わると共に、河川を通じて海洋に流出する鉄化合物を生物に利用できる形態に整える役割も持っている。環境変動の中で多様性の低下は脆弱につながるもので、中緯度・低緯度と比較して遅れている高緯度地域の生物多様性を探究すべきである。

海氷減少は非常に目立つ変化だが、その背後には気温上昇と共に海水昇温も役割を果たしている。北極海全域で多年氷が減少する中でも、シベリア側における季節海氷化が最も顕著である。太平洋の海水が昇温し、かつ流入量が増加する効果で有意な海氷減少を起こしている。これまでの実績をふまえて、太平洋側において海洋変動の観測を継続する役割を担い、海氷の諸量と合わせてプロセスを探究すべきである。大西洋側から北極海中層に流入する海水に関しては、バレンツ海の結氷が減ることによって塩分排出が減り、北極海内部の表層水と混合しやすくなるであろう。バレンツ海を経由する海水流入が、海氷分布に与える影響の調査にも力を入れることが望ましい。北極航路の航行可能性を

目前に控えて、海氷の分布と流動を予測する試行実験を試みるには、衛星データ利用とモデル開発に注力すべきである。

海洋の物質循環と生態系は、密接に関係しながら変化するであろう。季節海水域の拡大は生産性を高める効果を持つが、表層の低塩化によって栄養塩の循環が低下する場合は、必ずしも生産性が上がるとは限らない。隣接海域の生物種が北極海に侵入する傾向は止まらず、生物相が大きく変化する可能性は高い。河川水の影響が大きく、陸棚域が広い北極海では、陸棚―海盆間の物質移送と生態系の応答に注目した調査研究が中心となる。また、陸起源物質の影響を追跡することも必須である。海洋酸性化の進行をモニターするには、大陸棚底層や海盆表層で炭酸カルシウム未飽和の領域を追跡する。動物プランクトンから魚類、鳥類への食物連鎖・物質輸送の知見は初夏に限定されているので、他の季節にも拡大するためのプラットフォームを構築しなければならない。

数百年以上の時間スケールを持つ現象については、古環境データが気温変化と物質循環の相互作用に関する情報を提供する。現在進行中の環境変化を理解するための情報でもあるので、多様な学問領域と連携した研究体制を構築し運営することが鍵となる。固体地球分野の中では、海嶺熱水活動と海底地殻変動が海洋循環を介して気候に与える影響に注目する。海面上昇に伴う氷床接地線の後退や融解増大による氷床変動への応答については、近い将来に起こりうる問題を視野に入れた研究の方向性を示す。

最後に、北極環境変化の社会影響にまで触れる。北極航路の航行、地震津波情報の伝達、陸域生態系の変化がもたらす影響、森林火災の増加、水産物の変化と保全を例として取り上げる。その先にあるのは、情報を北極圏の住民に伝えるのみではなく、住民との協力、相互理解、さらに全地球の住人として一体となった人間の尊厳を重んじることである。

4章 北極環境研究の歴史

北極における科学的研究の国際的取組みは、19世紀後半の第一回国際極年⁷(IPY; 1882~1883年)を契機に始まった。IPYには12カ国が参加し、北極圏に14カ所の観測所を開設した。IPYでは、主に気象、地磁気、オーロラの観測が実施された。日本は、当時滞在していた外国人専門家の助言を受け自主参加し、農商務省地質調査所と海軍水路局が地磁気観測を行った。北極の本格的な海洋観測は、その10年後、1893~1896年にかけて行われたナンセンのフラム号探検に始まる。また、北極航路の探査、未踏の地の発見、北極点踏破などに各国がしのぎを削る探検の時代であった。

IPYの成功を踏まえ、その50年後の第二回国際極年(IPY2; 1932~1933年)には、初参加の日本を含む44カ国が参加した。北極圏に領土領海を持たぬ日本は、北極に近い樺太での地磁気観測や、北極の気候に近い富士山頂での気象観測を行った。IPY2の主要課題は、長距離短波通信のための「電波予報」に関する電離層の観測で、日本も観測所を設置しこの国際プロジェクトに参加した。

第二次世界大戦後、冷戦の舞台となった北極では、米ソを中心に、海氷や氷島(ice island)を利用した漂流ステーションや原子力潜水艦による北極海調査、永久凍土やグリーンランド氷床の寒地工学的な研究など、資源探査を含む軍事的な意味合いを強く持った研究が行われた。

日本の研究者が北極で研究活動を行なうようになったのは、1950年代末からである。中谷宇吉郎(北海道大学)のグリーンランド氷床でのアイスコアの研究や、同大学の研究者による北極海のT3やアース2と呼ばれた氷島での気象、雪氷研究が挙げられるが、いずれも米国のプロジェクトへの参加であった。1960年代後半から、名古屋大学による日本上空からアラスカへの氷晶核の追跡観測、北海道大学のシベリアやアラスカなどでの永久凍土調査、アラスカでの氷河調査などが、日本の研究グループ主導の計画として実施された。この時代は、東西冷戦の最中で、北極における研究観測もその影響を色濃く受

けた時代であり、特に、ソ連の北極圏は門戸を閉ざされるとともに、データの入手も困難であった。

北極研究の大きな転機となったのは、ソ連のゴルバチョフ書記長による北極海航路の解放、北極圏における科学研究の促進などを盛りこんだムルマンスクでの演説で、1987年のことである。これを受け北極研究の国際協力の機運が高まり、1990年8月、北極圏8カ国がカナダのレゾリュートで会合を開き、国際北極科学委員会⁸(IASC)を設置した。1991年1月、オスロで開催された第一回IASC評議会において、非北極圏国の加盟審査が行われ、日本を含む申請6カ国の加盟が認められた。

我が国の北極研究も、この頃を機に大きく転換することになった。1990年、国立極地研究所には北極圏環境研究センターが設置され、1991年、同研究所はノルウェー極地研究所の協力を得て、スバル諸島スピッツベルゲン島ニーオルスンに観測基地を設置するとともに、大気、雪氷、海洋、陸域生態、超高層物理の観測を開始した。また、海洋科学技術センター(JAMSTEC; 現、海洋研究開発機構)は、1990年にウヅホール海洋研究所と共同開発した氷海用自動観測ステーションやアラスカ大学の海洋観測船を用いて、北極域の海洋観測を開始した。

国立極地研究所は、ニーオルスン基地での温室効果気体の観測、ポリニア(不凍開水域)での生物観測、グリーンランド氷床などでの雪氷コア掘削、ドイツのアルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所との航空機による大気のコモ観測、日本から北極海を横断してスバル諸島までの航空機による温室効果気体、エアロゾル、雲の観測、スバル諸島とカナダのエルズミア島でのツンドラ植生の炭素循環調査などを行ってきた。一方、JAMSTECは、1998年から海洋地球観測船「みらい」を用いた北極海の海洋観測を開始し、1998年から2013年までに10回の観測航海を行い、国際的な北極海観測に貢献している。また、名古屋大学等は、WCRP⁹のGEWEX¹⁰研究プログラムに対応し、1997年

⁷ 国際極年: International Polar Year (IPY)

⁸ 国際北極科学委員会: International Arctic Science Committee (IASC)

⁹ WCRP: World Climate Research Programme、世界気候研究計画

¹⁰ GEWEX: Global Energy and Water Cycle Experiment、全球エネルギー・水循環観測計画 (2013年以降は以下に変更された。Global Energy and Water Cycle Exchanges Project、全球エネルギー・水循環計画)

からティクシやヤクーツクなどの観測点を設置して、凍土積雪域であるシベリア地域における水・エネルギー循環研究を開始した。当該研究は 2001 年以降、JAMSTEC、北海道大学、名古屋大学、総合地球環境研究所などによって、レナ川流域を中心に拡大・変化し現在に至っている。

また、国立環境研究所は、1991 年以降、航空機や観測タワーを利用したシベリア上空での温室効果気体の観測を持続的に行っている。北海道大学も 1980 年代以降、シベリア、アラスカにおける凍土研究を実施し、北海道大学と北見工業大学は、2000 年代にシベリア地域の氷河観測、森林総合研究所は長年にわたってタイガ帯の森林調査を行っている。東北大学もシベリア地域の定期航空便による温室効果気体の観測を続けている。また、1999 年以降、JAMSTEC と JAXA (宇宙航空研究開発機構) は、アラスカ大学と北極研究に関する共同研究を開始した。

日本における北極地域の観測研究は、幾つかのプロジェクトおよび機関やグループ研究に基づく分散的な形態によって実施されて来たが、研究推進には国内における協力が不可欠との認識を持ち、北極研究に関する連携を目的として 2006 年から有志によって委員会を構成し活動を始めた。その一環として 2007 年以降、日本地球惑星科学連合大会で北極セッション、2008 年から 2 年ごとの国際北極研究シンポジウムを開催している。

一方、国際的な研究機運も 2000 年頃から見られ始めた北極海の海水減少を機に盛んになってきた。国際地球観測年¹¹(IGY)の 50 周年に当たる 2007~2008 年に ICSU¹²、WMO¹³が中心となり、南極も併せた IPY2007~2008 が実施されて、観測・データアーカイブを中心に研究が推進された。IASC でも研究推進を強力に行うため、組織の拡大が議論され、2011 年からワーキンググループの数を増やし、発展している。これを機に日本の研究者も IASC への関与を深めた。

2011 年、文部科学省は GRENE 事業の一環で「北極気候変動分野」を取り上げ、「急変する北極気候システム及び全球的な影響の総合的解明」を目的に GRENE 北極事業が 5 年計画でスタートした。GRENE

北極事業は、国立極地研究所を代表機関、海洋研究開発機構を参画機関とし、全国 36 の大学や研究機関から 300 名近い研究者が参加する大規模な研究プロジェクトである。

2011 年 5 月には JCAR が設立され、北極環境研究に関する長期計画策定に加え、研究・観測推進の基盤整備、国際協力・連携、人材育成の検討を行っている。

北極海の航路は、15世紀の大航海時代より、欧州からシベリア沖を通過して太平洋に向かう北東航路と、欧州(大西洋)からカナダ北部を通過して太平洋に向かう北西航路が知られている。現在は北東航路のロシア管轄下を北極海航路と呼ぶこともあり、用語の使用が定まっていないが、この報告書内では、北極海を利用する航路の総称として「北極航路」という用語を使用している。

¹¹ 国際地球観測年: International Geophysical Year (IGY)

¹² ICSU: The International Council for Science、国際科学会議

¹³ WMO: The World Meteorological Organization、世界気象機関

地球温暖化は人間社会や生態系に大きな影響を与える今世紀の環境変化であり、社会の関心が高いため、それに関わるテーマをあげる。鍵となるプロセスを取り上

げ、北極環境を構成する諸要素の間のフィードバックを解明する。生態系の変化から地球温暖化へのフィードバックにも注目する。

テーマ 1: 地球温暖化の北極域増幅

要旨

北極域では、大気、海洋、雪氷、陸面、生態系等の各要素が複雑に絡み合い、様々なフィードバック効果が働く結果、他の地域より急激な気温上昇になる。「北極温暖化増幅」として知られている現象である。しかし、個々の要素からの定量的な寄与や、物理過程に関する理解は未だ不十分である。そこで、以下の 5 つの Questions に関してそれらの重要性和現状、及び今後の長期研究戦略を提案した。

- Q1: 下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送は、北極温暖化増幅にどう影響するか？
- Q2: 陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？
- Q3: 季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドの役割はどの程度か？
- Q4: 雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？
- Q5: 北極温暖化増幅はなぜ起きているのか、その予測と不確実性はどれほどか？北極域における放射強制力とフィードバック・プロセスはどう変化するのか？

Q1 は大気循環に関する記述で、中緯度からの熱輸送の影響と超高層大気の役割に分け、下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送が北極気温増幅にどう影響するかという点について考察した。Q2 は陸域積雪、凍土、植生、氷床に関するもので、水循環変化を伴う積雪、凍土、氷床の変化と土壌、植生が大気におよぼ

す影響について考えた。Q3 は、季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドが北極域増幅に与える役割について述べた。Q4 は、北極温暖化増幅において最も不確実性が高いと考えられる雲とエアロゾルがもつ定量的役割について考察した。最後に、全体のまとめとして北極温暖化増幅はなぜ起きているのか、その予測と不確実性はどれほどか、北極域における放射強制力とフィードバック・プロセスはどう変化するのかについて扱い、定量的評価の研究の現状と課題を考察した。それぞれの Question では、プロセス観測、長期モニタリング、プロセスモデル、気候モデリングの立場から検討を行った。

10年以上の長期にわたる取り組みは、北極域を中心としたエネルギー輸送に焦点を当て、超高層、雲・エアロゾル、積雪、海氷、そして海洋中層までの各要素間の相互作用を解明していく。そのための手段である地球システムモデルを開発・利用するには、様々な分野のモデラーの協力のみならず、モデル検証に用いるデータの計画的取得が必要である。我が国の貢献として、超高層から海氷に至る衛星観測の拡充を図るため、センサ開発と衛星打ち上げを継続するよう担当機関に働きかける。もうひとつの鍵となる海洋の現場観測については、定期的な実施できる体制を維持しなければならない。

まえがき

現在北極域で起きている気候変化は、その地域だけでなく、遠く離れた地域の自然環境や経済活動などにも直接・間接的に影響を及ぼすと考えられる。その根本的原因は、温室効果気体の増加による温暖化であると考えられるが、北極域では中低緯度域に比べ、気温の上昇幅が大きく、増幅効果をもっていることが分かっている(北極温暖化増幅)。しかし、北極域での温暖化増幅のメカニズムは単純ではなく大気、海洋、雪氷、陸

面、生態系の様々な要素が複雑に絡み合っているため、我々はそれらの相互作用の結果を観測している。

図 3 は、北極域における各要素間の影響の方向とフィードバックを示したものである。各矢印の大きさに関する現在の我々の知見は、それほど正確なものではなく、「仮説」というレベルのものも含まれている。中心にある「温暖化」が進行すると、海氷の減少、雪氷の融解、大気循環の変化、雲やエアロゾルの変化などが起こり、高

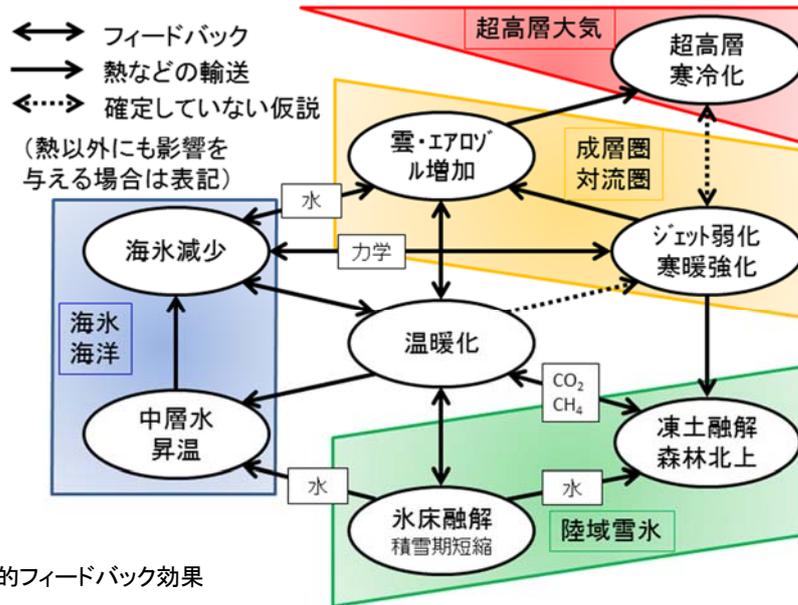


図3 北極域各要素間の潜在的フィードバック効果

いアルベドの雪氷面が相対的に黒い地表面や海面で置き換わることにより、さらに、地表付近の加熱(温暖化)が進行する。また、凍土が融解すると更なる温室効果気体の排出が進む。しかし、一方で海氷が減少し開水面が拡大すると海洋から大気への水蒸気の供給によって雲量が増加し、海氷の更なる融解を変化させる効果もある。このような様々なフィードバック効果の結果、北極域では温暖化は増幅されているということが、観測や数値モデルによる研究から分かってきたが、個々の要素からの定量的な寄与や、物理過程に関する理解は未だ不十分である。

温暖化に伴う環境変化とその結果生じる人間社会への影響を正確に評価し、適切な対策を早急に講じるために、図3に示した各要素やそれらの間で起こっている現象を理解することが強く求められている。そこで本章では代表的な構成要素である大気、海洋、陸域における Question として、大気中の熱輸送、陸域・氷床の水循環変化と植生変化、海氷と海洋について考察し、さらに最も不確定性の大きな雲とエアロゾルの各フィードバック・プロセス、そして、それらのまとめとして北極温暖化増幅はなぜ起こっているのかという Question を設定し、現状分析と長期研究戦略を考える。

Q1: 下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送は、北極温暖化増幅にどう影響するか？

Q1a: 中緯度からの熱輸送の影響

(1) 研究の現状

地球温暖化の中、北極域には多くの変化が現れている。衛星観測による継続的なデータが存在するここ 30 年間で、北極海を覆う海氷面積、積雪域面積は大きく減少し、北極圏の広範囲で、地上気温、地温、海洋上層の水温も昇温傾向を示している。さらに、北極圏陸域を覆っている永久凍土の融解による温室効果気体であるメタンの放出、北極海に注ぐ河川流量の増加、グリーンランド氷床の融解、氷河・氷帽の縮小、積雪面積・期間の減少、北極上空のオゾン量の減少、大気中二酸化炭素増加による海洋酸性化の進行など様々な異変が

起こっている。現実の北極気候変化は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 報告書で報告されている多くの気候モデルの予測よりも早く進行していると考えられる。

北極域の温暖化とその増幅については、海氷面積の減少によるアイス・アルベド・フィードバック¹⁴の効果や極向きエネルギー輸送の増加、ブラックカーボンに伴うアルベドの変化などさまざまな要因が提唱されている (Graversen et al., 2008 など)。この中で極向きエネルギー輸送に関しては、Oort (1971)がレーウィンゾンデデータを用いて季節変動を、Trenberth and Stepaniak (2003)が再解析データを用いて、季節変

¹⁴ アイス・アルベド・フィードバック: 雪氷面のアルベドが植生や土壌面のアルベドよりも大幅に高いことから、寒冷化(温暖化)して雪氷面が増大(減少)するとアルベドが増大(減少)して地表面に吸収される日射が減少(増大)し、寒冷化(温暖化)がさらに進行する、という正のフィードバック。

動、年々変動を示すとともに乾燥静的エネルギー、潜熱、運動エネルギーの各成分の寄与を、定常成分と擾乱成分について示している。Hwang et al. (2011) は第 3 次結合モデル相互比較プロジェクト CMIP3 の複数モデル結果を用いて、極域の気温上昇に伴い北極域で極向きエネルギー輸送が減少していることを示している。現状では、エネルギー輸送(熱輸送)を直接取り扱った研究は少なく、北極域の現況を記述する多数の研究とは十分にリンクしているとは言えない。

(2) 今後の研究

北極でなぜ温暖化が強化されるのか、また、その根底にあるメカニズム、全球気候変動との関係を明らかにするためには、個別のプロセスの理解だけではなく、北極の気候システム全体がどのように働いているのか、その中で大気によるエネルギー輸送に着目し、どのように関わっているかを理解する必要がある。そこで北極大気を 1 つのボックスにとらえ、中緯度との間でどのように熱、水蒸気、物質を交換しているのか、またそこにどのように大気力学が関わっているかを理解することが重要であると同時に、強い温暖化を引き起こすようなフィードバック・プロセスの同定とその理解が必須である。その中で、(1) 中緯度との熱、水蒸気、物質交換、(2) フィードバック・プロセス、(3) 中間圏、成層圏から境界層にいたる北極大気における鉛直方向の結合という 3 点について、包括的に研究を進めていく必要性がある。

この急変している北極圏気候変化の根底にあるプロセスを解く鍵が、その変動・変化の時空間的特徴のなかにあると考えられる。特に 1990 年代に入って海氷面積の減少、地上気温の上昇など、さまざまな変化が顕在化していることは周知の事実である。さらに、北半球寒冷域において、現在進行中の温暖化と同様に急激な地上気温の昇温が 20 世紀前半、1920 年代～1940 年代に起きていた事実は、海氷のアイス・アルベド・フィードバックに代表される急激な気候変化を引き起こすプロセスが、北極圏気候システムに内在することを示唆する。また、北極圏における温暖化は空間的に非一様なパターンを持つ傾向にあり、特に 20 世紀前半はユーラシアセクターの温暖化が明瞭であった。元来、北極海の他の海域に比べてバレンツ海から東シベリア沿岸にかけて海氷の季節・経年変動が大きく、中でもバレンツ海、カラ海周辺は北半球でも最も大気海洋間の熱交換が大きい海域の一つである。

さらに、北極域大西洋セクターは、大気・海洋における極域と中緯度域の熱・水循環の窓口として機能しており、その変動は北大西洋振動(NAO)・北極振動(AO)に代表される大気循環場の変動に強く支配されている。一方、バレンツ海、カラ海の海水変動は大気海洋間の熱交換を通じて、大気の遠隔応答を介して極東の冬季モンスーンの変動に影響を与えていることが明らかになりつつある。このような事実から、特に北極大西洋～ユーラシアセクターの水平・鉛直熱輸送を定量的に見積もることが、北極温暖化増幅を理解する上で重要と考えられる。また、このような北極の急激な気候変動とその空間的非一様性に対して、エアロゾル・雲プロセスにともなう放射強制力やフィードバックメカニズムの水平・鉛直熱輸送への潜在的な寄与が考えられており、北極の気候変動という観点からの総合的な評価を行なっていく必要がある。

Q1b: 超高層大気的作用は何か

(1) 研究の現状

二酸化炭素増加に伴う下層大気温暖化に対して、中層・超高層大気では寒冷化が起きているが、大気密度の小さいこの領域では、この変化がより顕著に表れることが知られている。二酸化炭素濃度増加に伴う中間圏の寒冷化や、メタンの増加に伴う中間圏界面付近での水蒸気の増加により、中間圏界面の夏季極域に発生する夜光雲の発生頻度は、近年増加傾向にあると報告されている。さらに、従来は夜光雲がみられなかった中緯度域でも観測報告がなされている。また、超高層大気では、低軌道衛星の軌道データを用いた大気密度の経年変化から、超高層大気の寒冷化に伴う大気収縮により、大気密度が急激に減少しているとの報告もある。このように、中間圏や超高層大気の寒冷化を定量的に理解することは、下層大気温暖化の程度を理解することにつながるといえる。下層大気環境を映し出す鏡としての超高層大気的作用を認識し、中間圏や超高層大気の中期・長期変動についても詳しく調べることが強く望まれる。しかし、夜光雲の観測、超高層大気の大気密度の観測共に、中期・長期的な変動を議論するためのデータの絶対量が不足しているため、不確実性も多く含まれている。

対流圏起源のプラネタリー波が成層圏に伝播し、成層圏大気大循環を変化させ、それがさらに対流圏大気大循環に影響を及ぼすことが明らかになりつつある

(例えば、Baldwin and Dunkerton, 1999)。また、中間圏や熱圏では、対流圏起源の各種大気波動が、東西平均東西風や子午面循環の形成に大きく寄与していることが知られている。しかし、対流圏起源の各種波動により引き起こされた中間圏や熱圏での大気大循環が、逆に、大気上下結合過程を通じて、対流圏に影響を及ぼすかどうかについてはよく解っていない。温暖化により、対流圏での大気大循環は大きく変調することが知られているが、これに伴って、中層大気や超高層大気に鉛直伝播する大気波動も変調することが推測される。温暖化による対流圏起源の大気波動の変調により、中層大気の東西平均東西風や子午面循環がどの程度影響を受けるのか、また、この変化がさらに対流圏に影響を及ぼす可能性はあるかどうかについては、ほとんどわかっていないのが現状である。

成層圏でのオゾン変動は、成層圏プラネタリー波の活動度と密接に関連している。しかし、成層圏プラネタリー波は、温暖化に伴い大きく変化すると考えられている。さらに、冬季から春季にかけてのオゾン破壊の光化学反応過程は、関連する各種の大気微量成分濃度変化や下部成層圏の温度などとも密接に関連しているため、予測は非常に難しい。例えば、2011年の春には、北極でもオゾンホールが発生したが、この現象が、二酸

化炭素濃度増加に伴う成層圏の寒冷化によるものなのか、今後のオゾンホールの発生頻度は増加するのか、といったことはまだよく解っていないのが現状である(例えば、Manney et al., 2011)。

(2) 今後の研究

北極域での超高層大気と中層大気のグローバル観測ネットワークの構築や、衛星観測が重要である。また、中緯度域の観測との比較や南極域での観測との比較など多角的に行うことにより、総合的な理解が生まれる。中層・超高層大気の寒冷化の影響をより定量的に明らかにするには、大気大循環モデルによる数値シミュレーションが不可欠である。そのためには、中層大気や超高層大気を含む大気大循環モデルの高精度化が課題である。特に、中層・超高層大気が下層大気におよぼす影響を調べるには、数値モデルの上端高度を変更したシミュレーションを各種実行し、比較解析することが大変有効である。また、地球温暖化に伴うオゾン減少を正確に予測するには、光化学反応過程を含んだ高精度の化学気候モデルが必要である。

注) テーマ 5 の Q4、テーマ 10 の Q2、テーマ 10 の Q3 も参照のこと

Q2: 陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？

Q2a: 水循環変化を伴う積雪・凍土・氷床の変化

(1) 研究の現状

地球温暖化の北極域増幅に関する陸上の雪氷、凍土および氷床のフィードバック・プロセスについては、まずそれぞれの要素が持つ特徴の把握、変化プロセスの追跡、そして影響の理解と再現研究が進められている。多点の観測データと衛星データによる連続・広域情報がもとになっており、積雪域の熱収支解析から、雪氷のアルベド・フィードバックによって進む春の融解促進とその後の地表や大気への熱の移動も解析やモデル計算が行われている。しかし、水循環に関係する融解の開始や融解水の動きについては不確定なものも多く、観測による熱伝導や融解水の移動など基本プロセスの理解やモニター観測点の展開や維持が必要である。

北半球高緯度では、春の積雪面積が減少していることが報告されている (Derkson and Brown, 2012)。し

かし、冬季の降水量自体は減っていないことから、春の融雪と流出が早まることが原因と考えられる。積雪域のアルベド・フィードバックが起こるのは日射が増える春であり、また水循環についても春の融雪が重要である。4月以降、北半球高緯度の融解域が高緯度側に急速に北上する。融解の進行、含水率増加と積雪粒径の増加によるアルベド低下が起こることは衛星でも観測されている。日射が最大になる6月には陸上の積雪域はほぼ消失しており、アイス・アルベド・フィードバックの舞台は北極海の海水に移る。この時期の陸域では、融雪水の地中への浸透と河川への流出、また地温上昇が始まる。近年の春の積雪面積の減少は積雪開始・終了の季節サイクルの変調、アルベドの影響時期のシフトを起こすと予想できる。

永久凍土域では、地温上昇が観測されているものの凍土の融解には至っていないと報告されている。季節融解を起こす永久凍土表層の活動層では夏季の気温

だけでなく、積雪が抑制する冬季の地表面冷却や、春の融雪が促進する土壌水分量の増加にも影響を受ける。冬季の温度条件と積雪による凍土融解促進について観測が必要である。衛星 GRACE による重力観測から、北極圏陸域での質量減少が観測され、氷床や氷河・氷帽の縮小、永久凍土から融解水が流出していると推定されている。

グリーンランド氷床では、2012 年夏にはグリーンランド氷床表面全域で融解が観測された。氷床表面の融雪域や融解池の拡大、また、表面で繁殖する微生物は、いずれも表面のアルベドを低下させ、融解を促進する。半球的な気温上昇だけでなく、氷床周辺のシノプティックな気象による暖気流入や、水蒸気増加による大気放射加熱などの融解促進プロセスも報告されている。氷床表面での不純物による反射率低下には森林火災の影響も検出されている。周辺海域の水温上昇も氷床末端部の不安定性を増大させ、氷河後退を加速させると考えられている。一方で氷床からの融解水は海洋循環にも影響を与えると予測され、影響を検出すべく氷床および海洋の共同調査が試みられている。

(2) 今後の研究

雪氷によるアルベド・フィードバックに関わる観測情報源として、衛星観測は重要な広域観測手法であり、アイス・アルベド・フィードバックの解析に重要な、降雪の確認、積雪期間、アルベド変化の観測の情報取得が期待できる。衛星による積雪被覆と融解域の把握には高精度の技術が開発されつつある。しかし、積雪水量の測定について地域・時期ごとの精度確認や改良が必要である。(テーマ A 参照)

積雪予測モデルについても、まず降水／降雪の予測精度の向上、次に融雪予測の不確定性を少なくすることが望まれる。降水観測ミッション衛星 GPM の観測域は北緯 65 度以南に限られるが、フェアバンクスやヤクーツクなどこの観測域にある地上での降雪識別及び強度観測と合わせて、モデルによる降雪予測に必要な基礎情報を得ることが期待される。また、北極海に至る大河川の上流域は GPM の観測域に含まれている。ただし、衛星による降雪量の推定誤差は大きいと、現地観測との較正は今後も重要である。

水循環に関わる凍土融解、河川流量(氾濫)のモニタリングには長期観測体制の整備が必要である。データ

蓄積に時間がかかるため、代表的な地域で早期に観測を開始することが望まれる。これら積雪や凍土の長期継続観測に関しては、北極圏の各国や国際観測ネットワーク活動に依存するが、代表的な観測域における拠点設置や集中観測などは国際的な提携活動として推進すべきである。

積雪表面アルベド変化をもたらす不純物、微生物、粒径の観測では、多点サンプルの分析や、積雪ピットやコアの分析による過去の変動研究が有効である。そのための精度の高い分析手法開発やモニター体制の充実が必要とされる。不純物分布の地域性・時間変動が予想されるが、輸送・沈着過程についてモデルを用いた研究が望まれる。

グリーンランド氷床では、融解水がムーラン等を通じて氷床底面に流れ、氷床の底面滑りの加速により動的不安定性が増大し、さらに氷床質量減少を加速する可能性がある。融解水の滞留や再凍結は周辺海域の海洋循環や結氷にも影響を与える。氷床の融解と流出を定量的に捉え、大気と氷床と海洋の関わりを調べていくことが今後望まれる。

Q2b: 土壌・植生が大気におよぼす影響

(1) 研究の現状と問題点

一般に、植物は気温、降水量、日射量、大気中の二酸化炭素濃度などの外的な環境条件の影響を受けてその分布が定まる。特に、北極域では気温による影響が最も支配的であり、比較的温暖な低緯度側には亜寒帯林が、比較的寒冷な高緯度側にはツンドラ植生が形成されている。過去の温暖な時代や寒冷な時代に、植生の分布が当時の気候を反映して現在と異なっていたことは地質学的証拠から知られている。現在進行している温暖化に伴って起きていると考えられる植生分布の変化を正しく把握することが重要な課題となっている。

最近の過去 20 年程度の時間スケールでは、北半球高緯度の植生の増加トレンドが衛星観測から検出されている(Tucker et al., 2001)。また、空間的なスケールは異なるが、50 年程度の過去の写真風景と現在の同じ場所を比較することで、北極域陸上での植生の増加は検出されており、温暖化に対応して陸域生態系が応答していると考えられる。植生の増加はアルベドの低下を促し、太陽光の吸収を増加させることで、北極域の温暖化を増幅するというメカニズムがモデルシミュレーション

によって示されている。また、北極域は積雪域でもあるので、植生によるアルベド低下は春先の融雪を促進し、さらなる非線形な温暖化増幅が起きうる(O'ishi and Abe-Ouchi, 2011)。また、北極域で直接温暖化を増幅するわけではないが、温暖化による凍土層の融解によってこれまでに凍土層に蓄積されていた有機炭素の大気中への放出が起きる可能性も指摘されている(テーマ1Q2a およびテーマ3 参照)。そのため、北極域全体での植生変化を精度よく把握することが重要である。

しかし、地上観測点は限られており、モデル化されたプロセスがどの程度現実の北極域全体の植生変化を表現しているかは検証が困難であるため、今後どの程度の植生変化と温暖化増幅が北極域全体で起こるかは不確実性がある。また、永久凍土融解による植生変化と有機炭素放出も同様に推定は困難である。

(2) 今後の研究

北極域の植生変化とその気候への影響に関連する個別のプロセスについては、定性的には明らかになりつ

つある。今後 20 年程度の時間スケールでは、これまでに観測された植生の変化傾向がより顕著になることが予想される。既存のモニタリングを継続し今後期待される 20 年分の知見を加味して、さらに長期的な将来における植生変化の推定と極域増幅への寄与の定量化を実現すべく、地上観測、衛星観測、モデル研究の 3 者がより緊密に協力する体制が必要である。協力の必要性は十数年以上前から言われており、研究者の地道な努力によって前進してきている。だが、この問題については画期的な改善をもたらす名案が出ることは期待できず、今後も努力を続けるのが最も近道と考えられる。衛星データを用いたモデル・データ同化や、広域の観測点整備とデータ統合によって、地上観測、衛星観測、モデル 3 者の相互比較と検証が可能となれば、森林帯の北上やツンドラの融解と湿地化を再現するモデルによる将来予測や、数百年先の森林分布の推定等の高精度化に繋がる。このような協力体制の試みは既に始まっており、今後の発展が期待される。

Q3: 季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドの役割はどの程度か？

地球温暖化が進行して北極域も昇温するのは当然として、他の地域に比べ温度上昇が高い理由は、アイス・アルベド・フィードバックだと言われてきた。その他、図 4 を参照しながら、海洋に関係するプロセスの効果を解き明かし、できるだけ定量化する方向性を提示する。

a. 研究の現状

(1) 海氷アルベドと表層海洋の役割を定量的に求める (テーマ 2 参照)

旧来より言われてきたことは、海氷のアルベドが海水より高く、海氷が減少することで太陽放射が海洋により多く吸収される現象である(Perovich et al., 2007)。しかし、このフィードバックは直接には夏季に限られ、蓄積された熱の一部が秋季に鉛直混合で下方に輸送され、開水部から大気へ放出される。海洋の蓄積熱で越年する割合の把握が重要である。また、海氷の体積が減ること負の熱蓄積が前年より減少しているか、翌夏の開水面が増えるかも鍵となる。大気への蓄積も定量化する必要はあるが、観測の難しい海洋中層と海氷厚の変化を

把握することが必須となる。

広くなった開氷部から出た水蒸気によって秋季の降水量が増えるなら、積雪はアルベドを高めるが、その一方で海氷を通る熱伝導を減らすので、降雪および積雪の融解と再結氷も考慮して、熱的效果を定量化する必要がある。夏季のメルトポンドがアルベドと熱伝導に及ぼす効果は、水深が重要になるが、衛星データによる見積りに依存することになる。

海氷が減少すると、融解・結氷の季節変動も大きくなる。SHEBA¹⁵で示されたように、融解による低塩分水が表層に留まる海域が多いものの、海氷域の縁辺や、陸棚などの地形による湧昇が起きる一部海域では、鉛直混合が増大することで、夏季の熱を下方に運ぶ効果も考慮する必要がある。

(2) 大気との相互作用が持つ役割 (テーマ 2 参照)

海氷減少は、秋季になると大気の総観規模擾乱と雲形成を促進することで、海洋から大気への熱輸送を強めるが、同時に雲から下方への長波放射のため、大気

¹⁵ SHEBA: Surface Heat Budget of the Arctic Ocean. 1990 年代に主として米国の資金で運営された北極海(大気も含めて)の北極海表面熱収支観測プロジェクト。カナダの砕氷船に伴われた氷上観測拠点を 1 年間続けたことでも知られている。

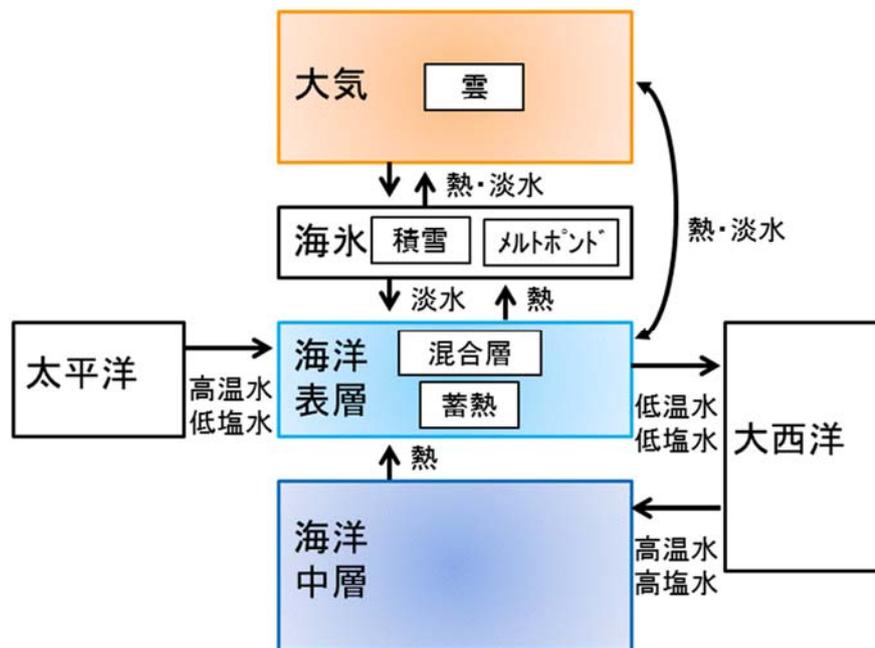


図4 海洋を軸とする地球温暖化の北極域増幅メカニズム

が海氷海洋に熱を供給することになる。この相互作用は、正のフィードバックであるが、実際に進行していることを確認すると共に、定量的な推定を試みる必要があり、その成果に基づいて大気と海氷海洋との結合係が生み出す北極域増幅効果として見積もりを行うことが重要である。

(3)隣接する海域からの流入が持つ役割（テーマ 5 参照）

太平洋からは、ベーリング海峡を通じて夏季に高温海水が流入し、海氷を減少させる大きな熱的役割を果たしている。その結果として、アイス・アルベド・フィードバックにつながる。また、冬季混合層以深にも貯熱する分は越年し、春季夏季に海氷を融解する効果を持つ。もし太平洋水の流入が温暖化によって増えるならば、このプロセスは北極域増幅に加えられる。特に、流入は大気変動のパターン(双極モード)に影響されるので、このパターンが温暖化によって増幅するか否かが、北極域増幅を見積もる際には鍵となる。

(4)中層・深層を含むプロセスの解明と役割の把握（テーマ 5 参照）

大西洋から流入する高温高塩分の海水は、北極海中層を巡回し一部が大西洋に戻る。バレンツ海で結氷の影響を十分に受けると熱的效果は小さくなり、また、あ

まり結氷しないと北極海表層と混合しやすくなる。結氷量が減ったため塩分が低下し、鉛直混合が局所的に活発化した場合、大西洋水から表層への熱輸送も増大する。このプロセスが顕著になると、大西洋水の熱輸送の一部を表層への熱の水平的輸送として考慮すべき系に変貌する可能性がある。

現在までは、表層から深層に及ぶ混合や海水移動は非常に弱いですが、海氷が減少し水平方向の不均一性が増大すると、部分的に鉛直混合や海水移動が起きる可能性がある。この場合、深層に貯熱される効果は100年スケールで継続する。

b. 今後の研究

海氷が減少していく表層については、海氷厚の経年変動、および大気、中層との熱交換のモニタリングが必須である。中層については、太平洋水、大西洋水の移動と拡散、さらには、より深い層までおよぶ混合の長期にわたるモニタリングが重要である。特に、中深層流速パターンの変化を見るには、化学トレーサーの利用も考える。海面の状態として重要なメルトポンド、そして雲高の変化を高精度で押さえるには、衛星観測が有効である。

また、データ同化とエネルギー解析を利用して、北極海表層と中深層との相互作用に関する重要プロセスを特定することを試みる。

Q4: 雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？

a. 研究の重要性と現状

北極気候における雲とエアロゾルの役割は、きわめて重要である。これまでの研究は、観測が不十分で、個々のプロセス研究が中心の定性的な理解であったため、複雑に相互作用する研究課題の理解は十分に進んでいない。中低緯度との関係、両極間の相違や極域独自の問題など、様々な分野の相互作用について、考えていく必要がある。雲は、放射効果を通じて気候形成に役割を果たす(Curry et al., 1996)。雲は、太陽放射を遮ることで地表面を冷却する方向に働き、また、大気からの長波放射を増加させることで地表面を加熱する方向に働く。両者は相殺する方向ではあるが、極域では太陽の出ない季節が長いこと、雪氷面上であることから、前者より、後者がより支配的である。雲は、下向き長波放射によって温暖化増幅をもたらすフィードバック効果を持つ。エアロゾルの放射を通じた直接効果としては、北極域では散乱性のエアロゾルの冷却効果は雪氷面上ではあまり大きく寄与しないが、ブラックカーボン(黒色炭素エアロゾル)等の吸収性のエアロゾルの温める効果は増幅されて現れる。エアロゾルは、雲核、雲形成、氷晶核としての効果など雲を通じた間接効果による気候影響をはじめ、雪氷面アルベドの変化に寄与するなど、様々な影響をもち、それらの定量的な理解が必要である。

北極域では、雲の存在の不確定性ゆえに、その影響は計り知れない。特に雲の鉛直構造についての精度ある観測がなされていない。北極域では、海氷との関わりでも雲は重要である。雲の存在が、海氷の成長・融解に影響するし、また、海氷の有無が雲の状態や存在に影響するという、雲と海氷の相互作用が考えられる。雲のフィードバックは極域気候モデルにおいて、最も不確実な要素の一つである。雲の核となるエアロゾルは、自然・人為起源による生成・輸送過程、光吸収過程、雲凝結過程など極域変動の異なったスケール間での統合的理解が必要である。例えば、ブラックカーボンに関する分布形態、輸送過程、湿性沈着過程の評価、気候変動への寄与の評価は、大気のみならず、海洋や雪氷との相互作用においても重要である。従って、雲とエアロゾ

ルの働きに関する観測的研究が強く求められている。雲の放射効果を規定するものとして、雲の相、すなわち、どのような粒子からなっているか、氷粒子や水滴の量、サイズ分布、鉛直分布、エアロゾルの生成、成長、除去過程、吸湿特性等を明らかにしなければならない。北極域では、氷粒子と水滴が併存する混合相雲が多いと言われている。雲相の問題とともに、雲そのものの存在、雲量を明らかにすることが求められている。これまでにわかっていることとしては、衛星の観測から、春、夏の雲量は増加してきていることが示されている。

b. 今後の研究

地上観測では、従来は目視で雲を観測してきたが、これをリモートセンシング機器による観測に置き換え、雲の巨視的分布と微物理特性の把握により、長期的に定量化した測定を行うことが必要である。スバル諸島のニーオルスンに設置した雲レーダーは、北極での雲観測の重要な手段で、国際的な活用も期待されている。また、衛星からの観測においても、従来の可視、赤外のパッシブな観測を極域雪氷圏に用いるのは困難が多かった。新しいライダーや雲レーダーによるアクティブな観測の導入、そして航空機や係留気球などによる直接観測での検証、アクティブとパッシブを併用した観測手法を確立する必要がある。その一つとして、わが国の宇宙航空研究開発機構 JAXA が、欧州宇宙機関 ESA と協力して 2016 年に打ち上げ予定の EarthCARE 衛星¹⁶の利用が期待される。これらの結果を、気候モデルにおける雲の再現の高精度化に反映させていくことが重要である。

近年の海氷減少に伴う雲の変化が注目される。衛星観測からは、海氷域面積が減少したことに伴い、実際に雲量が増加していることが示され(Liu et al., 2012)、開水面からの蒸発によって雲が増加し、夏季以外では、雲からの下向き長波放射によってさらに海氷が減るといふ正のフィードバックが働くとも考えられる。そのため、雲-放射と海氷(海面)の相互作用の理解が、北極域の気候変動の予測に重要である。これらのエアロゾル・雲の変化に伴う気候変化を統合的に理解するには、気候モ

¹⁶ EarthCARE 衛星: Earth Cloud, Aerosol and Radiation Experiment。研究基盤の整備(衛星)参照。雲、エアロゾルの鉛直分布およびその放射影響を測定するため、雲レーダー、ライダー、放射計、画像センサを搭載した衛星。

デルが不可欠である。エアロゾルと水雲の相互作用を陽に¹⁷表現した気候モデルの研究はこれまでに進展があったが、極域は氷雲の比率が非常に高く、現状の世界の主要な気候モデルすべてにおいて、エアロゾルと氷晶核の相互作用の表現は未だに不十分である。今後新たに得られる観測データを参照しながら、より適切なエアロゾル・氷晶相互作用を気候モデルで表現でき

るように努力すべきである。その前提として、氷晶核となるポテンシャルを持っているダストやブラックカーボンの極域での分布を、定量的に気候モデルで再現する必要がある。この観点から、極域でのグリッドサイズが低中緯度と大きく異なってしまう Gaussian 格子のモデルではなく、全球一様格子のモデルを用いることも有効な計画である(テーマ B 参照)。

Q5: 北極温暖化増幅はなぜ起きているのか？ その予測と不確実性はどれほどか？ 北極域における放射強制力とフィードバック・プロセスはどう変化するのか？

a. 研究の重要性

北極域の気候変動を理解し予測するには、人間活動による二酸化炭素の排出やエアロゾルの放出などを通じた放射強制力がどのように変化し、気候システムがそれに応答することによって温暖化を増幅したり抑制したりするフィードバック効果がどのように働き変化していくかが鍵となる。Q1~Q4 にあるように、北極温暖化増幅のメカニズムについて、さまざまなプロセスの寄与が指摘されている。プロセス間の相互作用を理解し、個々の寄与を系統的かつ定量的に調べることで全体の理解にとって重要である。

b. 研究の現状

これまでの研究では、考慮あるいは十分定量化されていない放射強制力やフィードバック・プロセスがある。たとえば、不確実性の大きい放射強制力の代表例として光吸収性エアロゾルが挙げられる。ブラックカーボン等光吸収性エアロゾルが雪氷面に沈着するとアルベド低下が起これ、雪氷面温度の上昇や雪氷融解が加速される正のフィードバック効果が働く。アルベド低下量は第一に光吸収性エアロゾル濃度に依存するが、同じエアロゾル濃度でも、積雪粒径が大きいほどアルベド低下量は大きくなる。グリーンランドの氷床コア解析から、産業革命以降のブラックカーボン濃度が還元されていて、1900 年代前半にピークが記録され、その後、1800 年代のレベルまで低下したことが知られている。温暖化に伴う積雪粒径の増加や消耗域の拡大は、光吸収性エアロゾルや雪氷微生物によるアルベド低下をもたらし、正のフィードバックを加速させると考えられる。

植生分布の変化や成層圏以高の大気変動の影響に

ついても、特に将来予測を行う気候モデルにおいて十分考慮されていないのが現状である(Q1~Q2 参照)。北極域の雲フィードバックもまた、非常に不確実性が大きい(Q4 参照)。当然、これらの相互作用についてもよくわかっていない。

気候モデル実験においては、個々の物理プロセスの北極温暖化増幅への寄与が系統的に調べられてきた。マルチモデルについてはエネルギー収支に基づく比較的簡易な解析が、少数のモデルについては詳細な解析が行われてきた(Yoshimori et al., 2014)。その結果、北極域のフィードバック・プロセスは強い季節性を持ち、夏の海氷減少によるアルベド・フィードバックを通じて海洋表層に吸収された太陽放射エネルギーが秋から冬にかけて放出され、また、下層雲の温室効果により北極域の温暖化が増幅されることが示されている。したがって、海洋の熱吸収プロセス、大気海洋の熱交換を決める対流圏下層の逆転層や安定度、下層雲の応答特性などが重要であることが示唆されている。しかし、いずれの研究も理想的なシナリオ下でのモデル実験結果であり、観測との直接的な比較がなされていない。

温暖化予測の不確かさを低減するための一つの方法として、マルチモデルにおいて現在気候の再現性の良し悪しと、将来予測のばらつきの間に関係性を見つけ、観測データにより将来予測幅を制約する方法がある。よく知られたものに、現在の季節変化を利用して、観測された春のアルベド・フィードバックの大きさから、将来の北極域陸上のアルベド・フィードバックの大きさを推定した例がある(Hall and Qu, 2006)。同様に、気候モデルの信頼性や将来予測を評価するには、遠い過去に実際に起きた北極温暖化増幅を利用する方法も考え

¹⁷ モデリングの分野ではある過程(変数の時間変化)をモデル方程式の中で直接、明示的に書き表すことを「陽に」と表現することが多い。

られるが、これについてはテーマ 6 の Q1 で言及する。

c. 今後の研究

すでに、光吸収性エアロゾル濃度や積雪粒径の関数として変化する「積雪アルベド物理的モデル」を組み込んだ地球システムモデルによる気候予測や感度実験が始まっている。例えば、光吸収性エアロゾルの輸送・沈着過程と積雪アルベドの物理的モデルを組み込んだ地球システムモデルによる春季亜寒帯における数値実験では、大気中における炭素質エアロゾルによる地表面日射量の低下効果、暗化(dimming)は、それらエアロゾル沈着による積雪アルベド低下効果、暗色化(darkening)よりも小さいと見積もられている。このようなモデル開発を今後も進める必要がある。さらに、現在ではまだ考慮されていない雪氷微生物によるアルベド低下効果も現地観測に基づきモデル化し、それによるフィードバックを見積もる必要がある。

数値モデルにおける極域の海氷や雲の季節変化など、基礎的な再現性向上の課題が残されている。地表面でのエネルギー収支と雲の効果の定量化が課題であり、観測とモデルの連携による評価が必須である。また、Q3 で触れたように、海氷減少と大気の総観規模擾乱、雲形成プロセスの理解とそれによる寄与の定量化も重要である。さらに、海氷減少のほか低緯度からの熱・水の輸送量変化の効果も含め、雲変化の要因を検証することが重要である。

現実には起きている北極温暖化増幅を理解するには、個々のプロセスの寄与を気候モデル実験だけでなく、データ同化された再解析データにおいて特定することが有効と考えられる。また、データ同化された結合モデルを高度化し、北極温暖化増幅研究への適用が長期の発展として重要である。さらに、日々の現象と定量化された相対的寄与(たとえば、総観規模擾乱による雲形成と雲の放射効果が北極温暖化増幅で果たす役割)を結び付けて、一連の物理プロセスをシステム応答の中で理解することが重要である。その基礎となる個々の要素を理解するには、当然、長期に継続した観測データの果たす役割が非常に大きい。

植生分布の変化やそれともなう鉱物性ダスト放出の変化、その他の光吸収エアロゾルの効果など今後大きく変化していくであろう要素は少なくない。こうしたこれまであまり考慮されてこなかった要素やプロセスを導入

し、その応答特性の不確かさを観測データを利用して低減するには、地球システムモデルの開発・精緻化・利用が不可欠である。

地球システムモデルについてはテーマ B で主に言及するが、将来予測ではこうしたモデルが中心的役割を果たすであろう。テーマ 6 で言及するように、過去に起きた北極温暖化増幅を利用して気候システム応答を制約するには、考えられうる全ての要素が入った地球システムモデルが有効である。また、Q1 で述べたように成層圏以高の効果を検討するには、成層圏における十分な解像度やモデル上端の高度化も検討していく必要がある。上下層大気から雲放射や海氷から海洋成層まで、大気海洋を統合したエネルギー収支プロセスを総合的に検証し、現在の恒常的なバイアスを抑えた(データ同化に頼らない)自立した地球システムモデルの確立が究極的には不可欠である。

要旨

北極海の海氷は近年急激に減少しており、「北極海からいつ海水がなくなるのか？」に人々の関心が集まりつつある。北極海の海水減少は新たな商業航路の開拓や日本の寒冬とも関わりがあり、科学分野だけでなく、社会経済的にも話題となる現象となっている。本テーマでは下記リストに挙げた Questions を取り上げ、現状と今後の課題について執筆を行った。まず海水減少メカニズムとして、海水運動による力学的要因と生成・融解による熱力学的要因について記述し、それに続いて海水減少が大気と海洋に及ぼす影響について論じる構成になっている。

Q1: 風のパターンや海氷の流動性の変化は海水減少を促進するか？

Q2: 海氷の熱的減少はどのように進むのか？

Q3: 海水減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？

Q4: 海水減少が海洋内部に及ぼす影響は？

風のパターンや海氷の流動性の変化は、海水減少と密接な関係があるので、将来の気候下で現れやすい北極域の気圧配置や大気－海氷－海洋間の運動の伝達効率は、長期的に把握すべき情報のひとつである。また、海水減少の全体像を海水自身の動きやすさ、融けやすさや、地球温暖化に伴う気温・海水温の上昇だけで説明することは困難であり、海流や気象の変化が海面での熱のバランスに及ぼす影響など、多様な相互作用も含めて定量的に明らかにしていく必要がある。

北極海環境に関する学術研究、特に現場観測は一国のみで行えるものではなく、国際連携が不可欠であ

る。北極海の太平洋側における現場観測に関して日本は既に多くの実績があるが、当該海域において国際的に貢献し続けるためには、結氷期間を含めた総合的観測を行い、データ空白を埋めることが最大の課題と言える。非欧米諸国が独自の砕氷観測船を建造/運航する中で、日本の科学的貢献を維持・強化するための工夫が必要である。マイクロ波放射計に代表される人工衛星による観測研究は、北極から地理的に離れた日本が北極研究で主導的な役割を果たせる分野である。また、数値シミュレーションを行うモデルの改良が進めば、大気－海氷－海洋間相互作用や、複数の海域間を横断する海水の輸送などを含めてより定量的な情報を提供することが可能になる。このような取り組みで得られる知見は、物理環境だけでなく、海洋生態系の理解にもつながる。

10年以上の長期にわたる取り組みでは、海氷直下から海洋中層までを含めた海洋熱輸送、そして雲や低気圧を介した大気－海氷－海洋間相互作用について、プロセスの理解と定量化を目指す。海氷自身の特性に関しては、表面融解水(メルトポンド)の形成過程と氷盤同士の衝突過程を詳細に明らかにする。これらの現場観測には砕氷船の運用が必須であり、天候に左右されないマイクロ波衛星観測も欠かせない。また個々の氷盤や高密度水沈降を陽に扱える海水海洋結合モデルを構築し、北極航路に関する信頼性の高い情報を船舶に提供できるようにする。

まえがき

一般に「海氷」とは海水が凍ったものであり、陸上に降り積もった雪の塊が海洋に流れ出た「冰山」とは起源が異なる。いまから数十年まで、北極海の殆どの海域は一年を通じて海氷で覆われていたが、海氷が夏に融け切る「季節海氷域」が北極海で広がっていることが近年の観測から明らかになっている(図5)。例えば、2012年は夏季の海氷面積が冬季の約20%まで減少しており、この夏の面積は1990年代平均の約半分にまで減少していることから、季節海氷化がかなり進行していると言える。「北極海から海氷が消失する日が来るのか？」に社

会的な関心が集まりつつあり、様々な手法を用いて予測がなされている。先行研究からは、2020～2040年頃には夏季に海氷が消失するという見積もりが出されているが(Overland and Wang, 2013)、このような予測でよく参照されるCMIP5¹⁸でも数値シミュレーションの結果にばらつきが大きく、将来予測で想定される社会経済シナリオ自体にも多くの不確定要素を含むことは認識しておく必要がある(テーマB参照)。

これに関連して、船舶が北極航路(ロシア側の北東航路およびカナダ側の北西航路)を安全に航行するため

¹⁸ CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5、全球気候モデル間比較プロジェクト

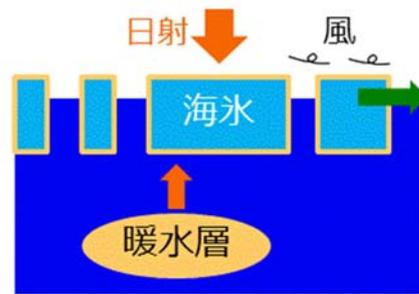
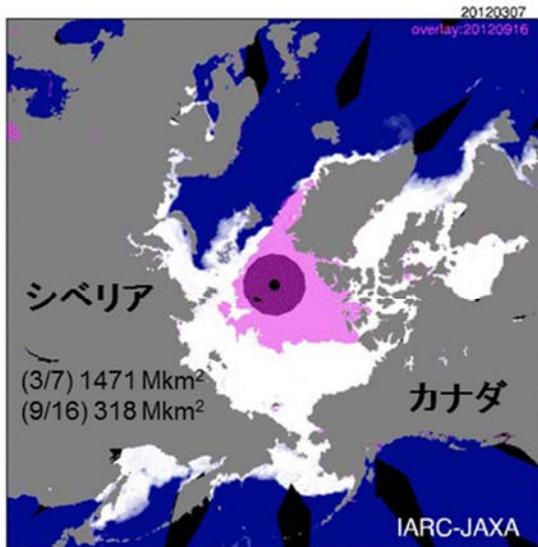


図5 (左)IARC-JAXA 海水モニターで提供されている人工衛星で捉えられた北極海の海水分布。2012年夏季(紫)は冬季(白)の20%まで面積減少。
(上)海水変動の模式図。海水は海水が冷やされることで生成され、日射や海洋からの熱供給により融解する。また風を受けて絶えず動いており、多くは大西洋側に流出する。

には、数日先の短期予測と数ヵ月先の中期予測により、航路上の海水状況を高精度に予測し、その情報を船舶に提供することが必要である。そのためには、急激に変わりつつある北極海の海水減少メカニズムを解明し、得られた知見を取り入れた海水予測システムを構築することが重要である。船舶が航行する北極航路上で海水の存在する日数が激減すれば、低気圧や波浪の影響も懸念事項となるため、高精度な気象・海況予測も求めら

れる。近年、日本を含む中緯度帯で例年よりも寒冷な冬に見舞われる年が頻発している。それに関連して、北極海の海水減少の影響を示唆する解析結果が国内外の研究者によって示され、日本の気候に対してはバレンツ海の海水の多寡が影響していることが指摘されている。このように北極海の海水変動は科学分野だけでなく、日本の社会経済的にも話題となっている。

Q1: 風のパターンや海水の流動性の変化は海水減少を促進するか？

一般に海水の運動は風による駆動力と内部応力(氷盤同士の衝突時に働く抵抗力)に支配される。1990年代前半は、北極振動(テーマ5参照)で説明されるような北極海上の風のパターンの変化により、北極海から大西洋側への海水流出量が増加した。2000年代後半からは海面気圧の双極パターン(北極海のカナダ側での気圧上昇およびシベリア側での気圧低下)出現により、同様の傾向が見られている。平年に比べて冬季は反時計回り、夏季は時計回りの風のパターンが北極海内部で強くなると、いずれも海水流出を促進するという季節間のコントラストは興味深い。また、非一様な風が吹いている海域や沿岸域では、氷盤同士が衝突することで海水が動きにくい、海水が近年脆弱化(海水が薄くなることなどによる強度の低下)していることで風に対する海水の流動性が高まる海域が広がっている(Rampal et al., 2011)。このような海域では、海水下の海流および海洋熱輸送が強化されることも報告されている(海洋熱と海水減少の関係については Q2 を参照

のこと)。風と海水の流動性の関係性については、Wind Factor(風速に対する直下の海水流速の比率)などの指標を利用して定量化が試みられているが、大気-海水-海洋間の運動の伝達効率が海水の厚さや形状などにどう依存するかも含めて、起きているプロセスをより詳細に明らかにすることが、海水減少の力学的要因を理解する上でも重要である。

北極海全域を俯瞰してみると、これまでは極縦断流(Transpolar Drift)によってカナダ多島海北部に海水が蓄積することで夏でも融け切らない多年氷域が形成され、風に対する海水海洋の応答が比較的小さいシステムになっていた。しかし、近年のペースで薄氷化が進むと多くの海域で海水が流れやすくなるため、熱力学的な生成から周辺海域に流出するまでの「滞留時間」が短縮されるであろう。このことは逆に、厚い海水の形成が起きにくくなる結果にもなる(正のフィードバック)。このような風と海水運動の関係性を広範囲でモニタリングできたのは、IABP¹⁹に代表される氷盤設置

¹⁹ IABP: International Arctic Buoy Programme、国際北極海ブイ観測プロジェクト

型ブイの展開による海面気圧と海氷漂流速度の広域データ取得である。ただし、海氷脆弱化は氷盤へのブイ設置を困難にするという側面もあるため、現在の情報量を維持するには、代替手段を準備しておく必要がある。日本も国際連携の中でこのような現場観測に携わるとともに、衛星やモデルも駆使した多角的な視点で力学プロセスを明らかにしていくべきであり、その下地は整っている。広範囲かつ定量的な議論を行うには、海氷モデルが強力なツールとなるが、水平解像度が個々の氷盤と同じ空間スケールまで高まる場合には、海氷力学に関する表現方法を再評価することが必要と

なる。また、データ同化手法を利用して大気－海氷－海洋間の摩擦係数(運動の伝わりやすさの指標)を精度良く見積もるといったモデル改良アプローチも考えられる。

10～20 年後には、1) 全球気候モデリング研究と連携しながら、将来気候下で現れやすい北極域の気圧配置を推定すること、2) 海氷特性への依存性を把握した上で大気－海氷－海洋間の運動伝達に関する情報を広範囲で瞬時に得ること、3) 海氷運動の時空間変化を加味した海氷分布の応答を数日から数十年のタイムスケールで予測していくこと、を目指す。

Q2: 海氷の熱的減少はどのように進むのか？

北極海の長期的な海氷減少傾向は、夏季の融解量増加や冬季の結氷量低下といった熱力学的要因に依るところが大きい。近年、北半球高緯度帯における冬季の低気圧経路が北に移動していることが指摘されているが、このことはユーラシア大陸の降雪量の減少および北極海氷上の降雪量の増加をもたらす。海氷上の積雪は、海氷より熱伝導率が低いため冬季の海氷生成を抑制する働きがある一方で(断熱効果)、アルベド(太陽光の反射率)が海氷表面より高いため、夏季には海氷融解を抑制する働きもある。海氷上での降雪開始時期や積雪深の変化に伴い、海氷の成長がどう影響を受けるかは、今後注目すべきプロセスのひとつである。メルトポンド(夏季の海氷融解により海氷表面で形成される水溜まり)は、アルベドが低いため海氷融解を促進する働きをする。これら海氷特性の変化が大気－海氷－海

洋間の熱や運動の伝達に及ぼす影響は古くから研究されてきたが、その複雑さゆえに依然として定量化が困難である(気候モデルを用いた定量化への取り組みについては、テーマ 1 参照)。

北極域の温暖化に伴って、中緯度からの水と熱の輸送量が増加し、北極海上の降雪量は増加傾向にあると考えられるが、降雪量の増減予測・検証も取り組むべき課題のひとつと言える(水循環についてはテーマ 4 参照)。海氷減少に対する海洋側の熱源としては、中緯度からの暖水流入が挙げられる(図 6)。ベーリング海峡から流入する太平洋起源水は、チャクチ海の大陸棚上で日射吸収により昇温した後、カナダ海盆域の数十 m 深に貫入する。輸送された海洋熱の一部は、翌年以降の海氷生成・融解にも影響すると考えられている。また、フラム海峡やバレンツ海から流入する大西洋起源水はユ

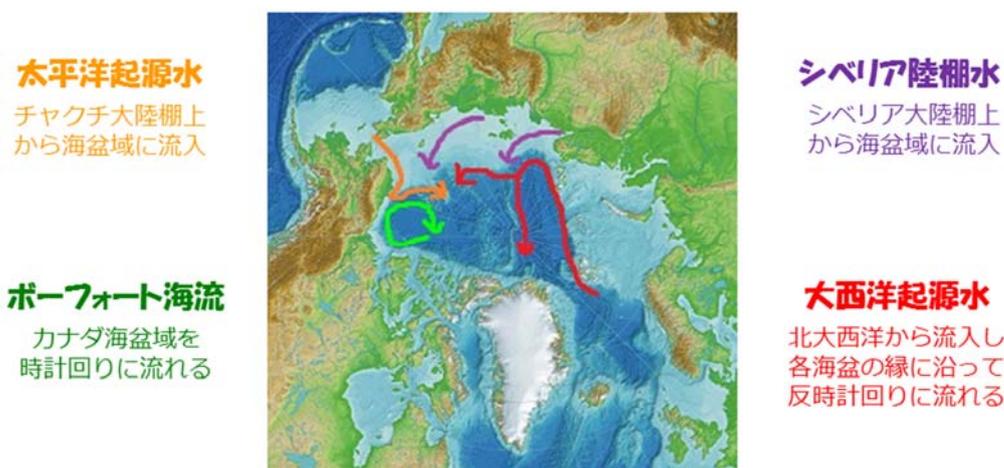


図 6 北極の主要な海流

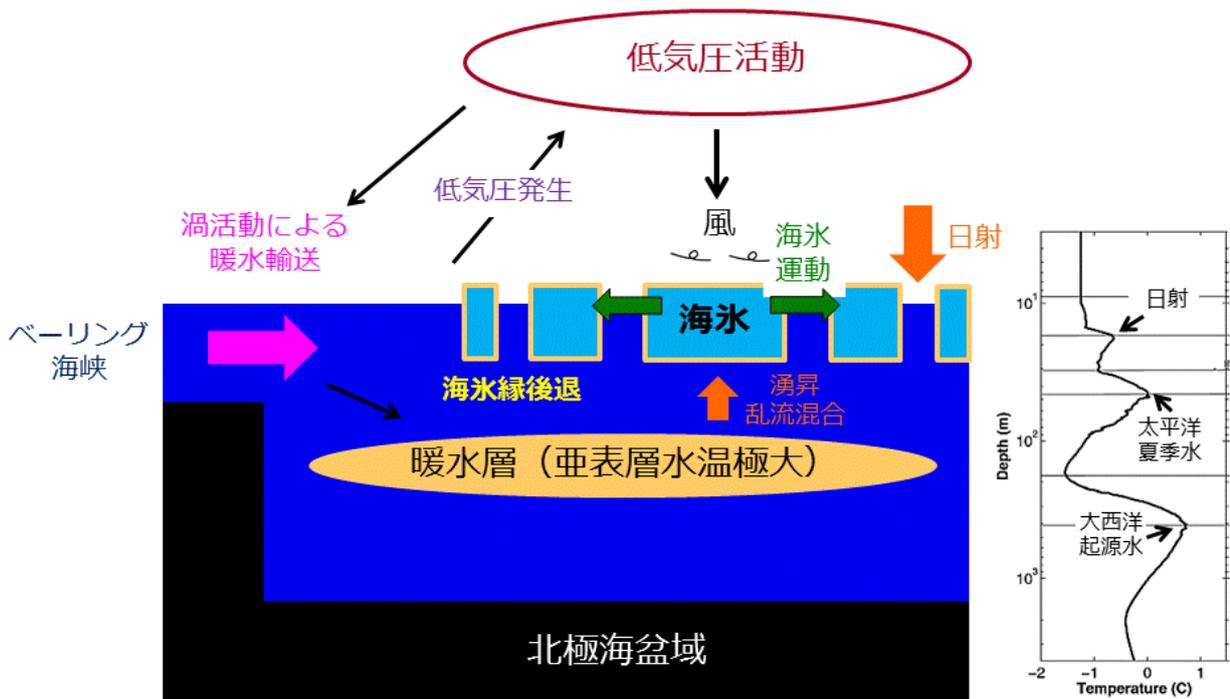


図 7 北極海で想定される大気-海氷-海洋間フィードバックの例。カナダ海盆域には熱源の異なる 3 つの水温極大層が存在し、様々なプロセスを経て海水に作用する。右図はカナダ海盆域で観測された鉛直水温分布 [Jackson et al., 2010]。

ーラシア海盆側の貯熱量および海水分布に直接的な影響を及ぼす。大西洋水は数十年スケールで北極海盆域の広範囲を流れるが、カナダ海盆側では太平洋水より深い約 400 m を中心に位置するため、直上の海水に対する相対的影響は小さい。

海水の熱的減少の全体像を、海氷自身の特性や地球温暖化に伴う気温・海水温の上昇だけで説明することは困難であり、局所的な相互作用を含むフィードバックシステムを明らかにしていく必要がある。北極海の複雑な熱力学的プロセスとしては、まず海氷-海洋アルベド・フィードバックが挙げられる(図 7)。これは海氷と海洋のアルベドの違いから、何らかの作用で海氷域に開水面(氷盤と氷盤の間に露出する海面)が出現すると、日射が海洋表層により多く吸収され、海氷の側面・底面融解を促進、もしくは結氷を抑制し、さらに海氷面積が減少するというものである。

また、海洋表層の水温上昇は、氷縁域での低気圧を活発化させ、海氷上への暖気流入をもたらす。さらに、海氷上の低気圧が海水の発散運動(氷盤同士が離れる向きの動き)を促進することも開水面の拡大に繋がる。このような低気圧を介した海氷減少フィードバックも重要なプロセスとなる。開水面の拡大は風による海洋の慣性振動(地球の自転によって数十~数百 km スケールで

回転する運動)や内部波(風波や潮汐などにより発生する海洋内部を伝搬する波)の発生も促す。海水運動が激しくなることは、海水下における乱流混合を生み出し、海洋表層における鉛直方向の熱の移動を活発化させる。特に海水が激減している太平洋側北極海の表層 100 m には、日射と太平洋夏季水をそれぞれ熱源とするふたつの暖水層が存在するため、乱流混合に伴う海洋熱の解放が海氷融解促進・結氷抑制に寄与し、さらに海水が減少するというフィードバックシステムも考えられる。加えて、北極海の太平洋側の沿岸域では、海洋中層に存在するもうひとつの熱源である大西洋水の湧昇に伴う海洋表層への熱輸送も指摘されている。

以上の熱力学的プロセス群は複合的に関与しており、また、熱源である日射や中緯度からの海水流入に起因する北極海内部の貯熱量分布には、大きな経年変動が存在する (Jackson et al., 2010)。この複雑な海水減少システムを理解するには、大気-海氷-海洋の三者の熱バランスの変動を同時かつ定量的に把握する必要がある。熱的特性において不均一性が極めて大きい海水域の理解には、局所的な観測だけでは限界があるので、広範囲をカバーできる人工衛星データを組み合わせた研究も有用である。

Q3: 海水減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？

海面の露出は大気への大きな熱源となる。海氷に覆われていた場所に特有であった夏季の雲の形状が、海洋からの加熱に伴い層雲から層積雲へと変化することが観測事実から明らかとなってきた。これは、海洋からの熱供給に伴う対流の強化を意味する。雲底高度が高まることによって、大気から海洋への熱放射が減少することが見込まれるが、北極域の温暖化に伴う水蒸気増加によって下向き熱放射が増加する効果と相殺関係にあるため、雲が鉛直熱輸送に及ぼす定量的な寄与という点では依然として不確定性が大きい。一方、層雲が層積雲に変化することによる雲量の減少は海面への日射を増加させるものの、海面付近の乱流で海面が冷却されることが元々の要因であるため、正味の熱収支がどの程度変化しているかは、雲粒を陽に²⁰表現するような数値モデルによって定量的に評価する必要がある。そもそも雲量の増減に関しては、現場観測、衛星観測、再解析の各データセット間や、着目する時空間スケールによって傾向が異なることに留意すべきである

このような雲構造変化は単独の現象ではなく、低気圧活動によって引き起こされることも観測事実から示されてきた (Inoue and Hori, 2011)。例えば、海面水温と海氷表面温度の水平温度勾配が強い高緯度の海氷

縁では、低気圧が急激に発達することがある。この温帯低気圧に似た構造は、南側の暖気を北へ、海氷域の寒気を南へ引き出す効果があり、前線通過後には冬の日本海上で発達する筋状雲と同様の雲降水システムが形成される。これらの雲は、大気と海洋の熱交換の結果でもあり、夏季に蓄積された海洋熱が、秋から冬にかけて効率よく大気へ放出されていることを示唆する。これは、冬の北極域における温暖化増幅に寄与する現象のひとつであろう。

秋から冬にかけての雲量増加は、旧ソ連のラジオゾンデデータからも示されているが、冬の雲の現場観測自体が困難であるため、その詳細には未解明な部分が多い。雲の鉛直構造に関して、CALIPSO²¹や CloudSatによる衛星観測データは蓄積されているが、冬季氷上現場観測のデータは依然として不足している。ちなみに低気圧経路の北上は、北極海上の降水(降雪)量増加をもたらす、海氷生成にもフィードバックされる。近年はNCEP²²-CFRS²³等の大気海洋結合再解析データが利用可能であり、大気と海洋の結合系に着目して解析していくこともひとつの方向性として挙げられる。北極海の海水減少の日本周辺の気候への影響についてはテーマ5を参照のこと。

Q4: 海水減少が海洋内部に及ぼす影響は？

海氷は、大気-海洋間の運動・熱・水・物質の交換を遮る役割をする。まず運動に関しては、開水面よりも海氷の表面の方が風から受ける力が大きいので、海氷は海流を強める効果を持つ一方で、氷盤同士が衝突するような海域では、海氷が動きにくくなるために海流が弱められるというプロセスも存在する。このような風によって駆動される海氷運動およびその直下の海流の強さは個々の氷盤の形状や流向に依存する。大気から海洋への運動の伝達は海洋表層の鉛直混合をもたらす、海氷下部への熱供給とも関連があるので、この力学過程を精密に調べるのが重要である。

また、海氷の生成・融解に伴う熱と水の交換を定量化することが、季節海氷化する北極海においてますます

重要になる。海氷融解の効果だけ考えると、淡水供給および日射により海洋表層は密度の低い水で覆われるので、成層(海水の鉛直密度勾配による安定な層構造)が強化され、鉛直方向の混合が起こりにくくなる。ただし、夏季の海水減少により開水面が広がる、冬季の海面冷却による海氷生成量が増えるので、北極海盆域の100~500 m深を占める大陸棚起源の高密度水(水温が低いか塩分が高いことで密度が高い海水)の形成が、活発化することも考えられる。その結果、北極海中層は、寒冷化・高酸素化する可能性がある。海洋中の酸素濃度は物質循環や生態系と密接な関係がある(テーマ3、テーマ9参照)。

季節海氷化に伴って、大気-海洋間の運動・熱・水

²⁰ モデリングの分野ではある過程(変数の時間変化)をモデル方程式の中で直接、明示的に書き表すことを「陽に」と表現することが多い。

²¹ CALIPSO: Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations、雲・エアロゾル衛星観測網

²² NCEP: National Centers for Environmental Prediction、米国環境予測センター

²³ CFRS: Climate Forecast System Reanalysis、気候変動予測システム再解析

の交換を合わせた影響がどうなるか、カナダ海盆域を時計周りに流れるボーフォート海流が近年強化されている事例も参考になる (McPhee, 2013)。特に、循環南端では西向きの海流と大陸棚側の東向きの海流の間に大きな水平流速差を形成し、同時に直径数十 km の渦が生成される。活発な渦活動は陸棚—海盆間輸送(水深の浅い大陸棚と水深の深い海盆域の間の海水交換)を促進する役割がある。このような渦による海水交換を定量化するには、局所的なモニタリングと高解像度モデルによる数値実験が有効である。

一般に海洋の鉛直混合は、高密度水の沈み込みによる対流混合と内部波などによって駆動される乱流混合に分けられる。内部波による乱流混合が初冬に起これば、海洋熱輸送を介して結氷開始時期を変える一因にもなる。内部波の発生頻度や強度は、海水密度の鉛直分布に支配されるので、この分布の季節～経年変動を明らかにすることは海氷減少の影響評価にとって有用な情報となる。また、不思議な現象として、北極海の大陸棚縁から海盆中央部にかけて水平方向に 1000 km 近い拡がりを持つ水温と塩分が一樣な極薄い層(厚さ数 m)が 200～300 m 深で観測されている。二重拡散(海水中において塩分よりも水温の方が速く混ざる現象)が形成要因のひとつとして指摘されているが、水平方向への拡大プロセス、詳しい分布や出現頻度については未解明な点が多い。このような海洋微細現象と海氷減少の関係を見出すことも、海洋物理学の進展につながる。

現在の気候下では、塩分の低い太平洋起源の海水と塩分の高い大西洋起源の海水による密度差に河川水の効果も加わって、塩分分布が北極海洋循環を支配している。仮に太平洋起源水の高塩分化、または、大西洋起源水の低塩分化が各々の上流域で起これば、鉛直対流強化により太平洋水と大西洋水の混合水塊が点

在する状態になり得る。これらの鉛直混合が重要になる状態を数値モデルで陽に再現するには、1 km 以下の水平解像度が必要なので、計算資源的制約を勘案すると、まずは既存の対流スキームの精査や個々のプロセスにターゲットを絞ったモデリングから始めるべきである。将来予測の観点では、温暖化気候下で海洋表層への蓄熱が進むことで、水温主導の密度分布が支配的な熱駆動循環になる可能性を議論することにも意義がある。

上述したような海洋の物理的変化は、北極海の物質循環、生態系とも密接な関わりがある。海洋循環の強化により、河川水、海氷融解水、大陸棚起源の海水の影響が及ぶ空間スケールが拡大すれば、海盆域での動植物プランクトンによる生物生産量の増大につながり、物質循環が加速する。また、海氷面積の減少やそれに伴う鉛直混合の活発化は、大気—海洋間のガス交換を促進する一方で、海氷融解による海洋表層への淡水供給は、ガス交換を妨げる結果ともなる。結氷に伴う海洋から大気へのガス放出も事例報告があるが、季節海氷域が拡大することで北極海が二酸化炭素の吸収源と放出源のどちら側にシフトするかについては不確定性が大きい。日本ではオホーツク海を共通の対象フィールドとして、物理から生態系までを含めた分野間連携が積極的に行われてきた。そのノウハウを生かして、北極海においても物質循環システムの鍵となる領域とプロセスを陸棚—海盆間輸送、渦、湧昇流といった物理的側面と、河川、海岸浸食、海底永久凍土融解からの有機物供給といった生物地球化学的側面の双方から抽出し、船舶・衛星観測・モデリング等を駆使してそれらを定量的に精査することで、世界のモデルケースともなり得るであろう。物質循環・生態系の詳細についてはテーマ 3 およびテーマ 9 を参照のこと。

10～20 年後を見据えた戦略

a. 国際的動向と日本の役割、今後の国際連携の在り方

北極海に関する学術研究、特に現場観測は、一国のみで行えるものではなく、国際連携が不可欠であることは IASC²⁴でも強く認識されている。近年は中国、韓国、南アフリカなど非欧米諸国が独自の砕氷観測船を建造

する中で、日本の科学的貢献を維持・強化するための工夫が必要である。砕氷船を保有する北極海沿岸諸国の主たる観測海域は領海・排他的経済水域を中心とした沿岸に集中しており、非北極沿岸国である日本が中立な立場で権益に捉われない科学調査を主導することは、今後の北極環境研究に対して重要な意味を持つ。

²⁴ IASC: International Arctic Science Committee、国際北極科学委員会

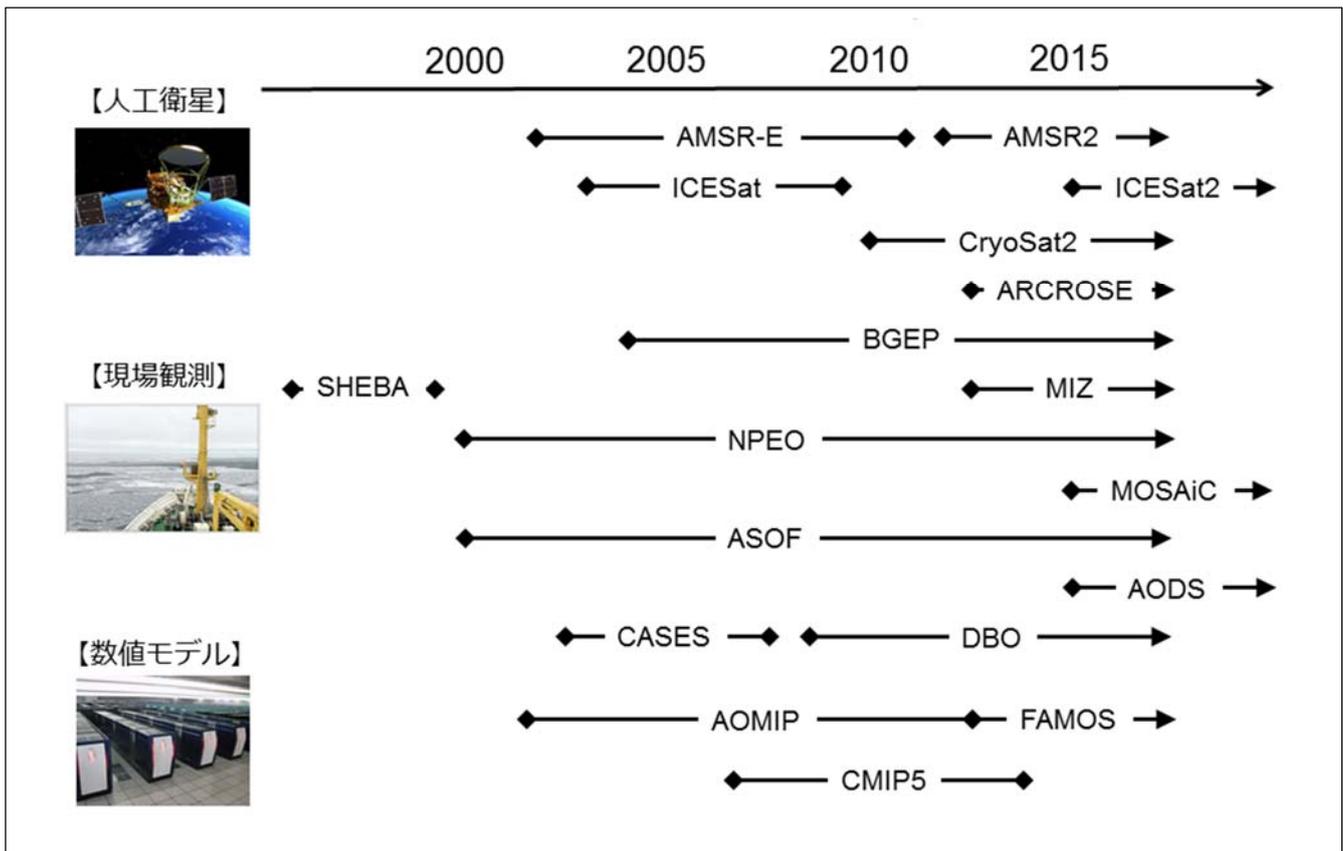


図8 北極海研究に関する代表的な国際プロジェクト。“→”は終了時期未定。

また、日本は衛星観測やモデル開発において世界に誇る先導性を持っている。これら現場観測・衛星・モデル研究者間での交流も活発であり、三位一体の体制とその推進を司る拠点形成がなされれば世界に先駆ける成果が期待できる。

北極海を対象とした国際観測プロジェクトを年代別に俯瞰すると(図8)、まず大気-海氷-海洋間の熱収支に関する通年観測 SHEBA²⁵が1990年代後半に実施された。熱収支に関する通年規模の観測は他に例がないため、15年経った現在でも最新の観測や数値モデルの比較対象として SHEBA の結果が引用されている。2000年代に入ると、太平洋側では CASES²⁶、BGEP²⁷、DBO²⁸、大西洋側では NPEO²⁹、ASOF³⁰な

ど大小様々なプロジェクトが展開され、日本からも JAMSTEC(海洋研究開発機構)、北海道大学、東京海洋大学、国立極地研究所を中心に積極的に参画してきた。今後10年以内には IASC プログラムとして、MOSAiC³¹、AODS³²が予定されており、日本も計画立案および実際のフィールド観測に関わっていくことが望まれる。大気側ではラジオゾンデによる同時観測 ARCROSE³³がいままさに進行中であり、日本が主導的な役割を担っている。衛星観測においては、JAXA が主導する GCOM-W³⁴に、日本の極域研究者の多くが関わっている。取得された海氷データは世界的に活用されており、マイクロ波放射計の長期的な運用に向けた取り組みを継続すべきである。モデリング研究は必ず

²⁵ SHEBA: Surface Heat Budget of the Arctic Ocean、北極海表面熱収支観測プロジェクト

²⁶ CASES: Canadian Arctic Shelf Exchange Study、カナダ側北極海における陸棚-海盆間輸送研究

²⁷ BGEP: Beaufort Gyre Exploration Project、ボーフォート循環観測プロジェクト

²⁸ DBO: Distributed Biogeochemical Observatory、太平洋側北極海における生物地球化学観測

²⁹ NPEO: North Pole Environmental Observatory、北極点環境観測プロジェクト

³⁰ ASOF: Arctic-Subarctic Ocean Fluxes、北極-亜北極間海洋輸送観測プロジェクト

³¹ MOSAiC: Multidisciplinary Drifting Observatory for the Study of Arctic Climate、学際的漂流観測網

³² AODS: Arctic Ocean Drift Study、北極海漂流観測研究プロジェクト

³³ ARCROSE: Arctic Research Collaboration for Radiosonde Observing System Experiment、ゾンデ観測網

³⁴ GCOM-W: Global Change Observation Mission-Water、水循環変動観測衛星

しも国際連携を前提としないが、2000年代に始まった相互比較プロジェクト AOMIP³⁵は既存の北極海モデルに共通して見られる問題点を同定し、再現性を向上させるための貴重な情報交換の場となっており、その後継となる FAMOS³⁶の年次会合にも日本から複数名が参加している。人的交流の場としては、ART³⁷が次世代を担う若手研究者の分野間連携を推進しており、日本からも複数名が参加している。これらの国際的な枠組みは新たな共同研究のきっかけにもなるので、有効に活用していくべきである。

b. 衛星観測

現場観測が容易ではない北極海の海氷域をモニタリングするために、人工衛星による観測は極めて有用である。地球観測用の衛星搭載センサには様々なものがある。中でもマイクロ波放射計は、日射や気象条件の影響を殆ど受けずに極域全体を毎日観測できることから、数十年に渡って海氷研究で中心的な役割を果たしてきた。現在の主力センサは日本国産のマイクロ波放射計 AMSR2³⁸である。AMSR2 は米国の SSM/I³⁹に対しピクセル密度にして4倍以上の空間解像度を持ち、データの有用性を大きく向上させた。今や AMSR は海氷の現況モニタリングや変動研究において生命線であり、その観測を間断なく継続させることは国際的な責任でもある。具体的には AMSR2 の想定耐用年数を考えると、後継を遅くとも 2020/21 年までに打ち上げることが最重要である。また、より詳細な氷縁のモニタリングや細かいスケールの海氷変動の解析を可能にするために、マイクロ波放射計の高解像度化を目指した開発を継続すべきである。

海氷全体量の把握と生成・融解量の見積りのためには海氷厚データの取得も不可欠である。これまでも衛星で捉えられる海氷表面状態から海氷厚を推定する研究がなされているが、多年氷域で十分な精度を得ることは難しい。海氷タイプに依存しないデータ取得のためには海氷表面の高さを計測する方法が有用である。米国

航空宇宙局 NASA と欧州宇宙機関 ESA では、それぞれレーザーおよびレーダー高度計を搭載する ICESat⁴⁰(初代:2003~2009年、後継機:2016年~)と CryoSat(初代:2005年打上げ失敗、後継機:2010年~)を運用している。これらの高度計からは海氷表面だけでなく、海面高度の情報も得られる。海面高度から導かれる海洋循環の空間分布と強度は、北極海の水平熱輸送を左右するため、海氷変動要因の理解と将来予測において重要な観測項目である。しかし、その精度、解像度、観測頻度はまだ十分でない。今後日本においても海氷表面高度や海面高度を広範囲かつ高解像度で通年計測できる高度計の開発および複数小型衛星の打ち上げ等も視野に入れるべきである。

MODIS⁴¹、LANDSAT⁴²等の可視・赤外域センサや PALSAR⁴³、RadarSat 等の合成開口レーダーによる観測も有用である。日本は地球観測衛星技術と衛星データを用いた海氷海洋研究の双方で世界最高レベルの技術と実績を有しているにも関わらず、それらのデータは北極研究に十分に利用されているとは言い難い。今後は積極的にこれらのセンサのデータを利用していくべきであり、そのためにはデータを利用しやすい環境を整備すること、衛星データ利用者の裾野を広げることが必要である。人工衛星による観測研究は北極から地理的に離れた我が国が北極研究で主導的な役割を果たせる分野である。日本の北極研究をさらに進展させるため、既存センサの最大限の利用・新規センサの開発・人材育成・研究組織の確立を行う必要がある。

c. 現場観測

太平洋側北極海での現場観測において、日本には既に多くの実績があるが、現状の設備では海氷融解期以外の観測が困難である。当該海域において国際的に貢献し続けるためには、海氷に覆われる期間を含めた総合的観測を行い、季節変動と経年変動の両面からデータ空白を埋めることが最大の課題と言える。海氷が急激に減少する今だからこそ、海氷周辺の現地調査を集

³⁵ AOMIP: Arctic Ocean Model Intercomparison Project、北極海モデル間比較プロジェクト

³⁶ FAMOS: Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis、北極海モデル観測統合フォーラム

³⁷ ART: Arctic in Rapid Transition、IASC 主導の若手研究推進プロジェクト

³⁸ AMSR2: Advanced Microwave Scanning Radiometer 2、改良型高性能マイクロ波放射計

³⁹ SSM/I: Special Sensor Microwave Imager、衛星搭載型マイクロ波放射計

⁴⁰ ICESat: Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite、氷・雲・標高観測衛星

⁴¹ MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer、中分解能撮像分光放射計

⁴² LANDSAT: Land Remote Sensing Satellite、陸域観測衛星

⁴³ PALSAR: Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar、合成開口レーダー

中的に行い、熱収支観測に例えると、SHEBAに代わる新しい北極研究のスタンダードを提示することが重要である。そのためには結氷期および海氷域の現場観測に耐え得る観測設備(砕氷船や無人観測ステーション)の導入が必要不可欠である。砕氷船についての詳細は、「9章 研究基盤の整備」の章を参照のこと。

海氷観測に関しては、時間方向にはIPS⁴⁴による係留観測、空間方向にはAUV⁴⁵や耐氷プロファイリングフロートによるデータ取得が重要である。さらに、ADCP⁴⁶による海氷厚の計測が実用化されれば、飛躍的なデータ量増加が期待できる。個々の氷盤スケールの海氷観測は海氷モデルの精緻化にも寄与する。しかし、これらの体制を構築・維持するには、海外の研究機関と連携を図りながら、ノウハウを持った人材を育成することが欠かせない。海氷上の雲・降水システムや、積雪過程の把握も海氷変動メカニズムの理解のために重要である。氷上積雪の経年変化を捉える観測手法としてはIce Mass Balance ブイが有効だが、展開個数が限定されているために空間代表性という意味で難がある。一方、現在利用可能な再解析データにはNCEP-CFSRのように氷上の積雪深が出力されているものもあり、長期トレンド解析に資するかを観測データで検証しておくことも重要である。気象レーダーによる降水システムの把握とともに、現場の積雪および海氷厚の時間変化を捉えるためには、SHEBA的な集中観測も望まれる。NSIDC⁴⁷によるOperation IceBridge ミッションでは、ICESat とICESat-2 のギャップを埋める一環として、2009年以降、ヘリコプターに搭載した電磁誘導式氷厚計を用いて、北極海の太平洋側において春先の氷厚・積雪観測を不定期に行っている。

日本は、これまでJAMSTECの海洋地球研究船「みらい」を主な基盤として、海氷消失域での大気海洋観測を10年以上継続しているが、特にオリジナリティがあるのはラジオゾンデ観測である。ラジオゾンデ観測の自動放球装置は少人数で高頻度の観測が可能である。2013年には「みらい」北極航海初の二週間定点観測期間中に、ニューオルスン、アラート、ユーレカなど陸上現業ステーションの協力の下で北極海を網羅するラジオ

ゾンデ同時観測が実現された。その実現においてドイツやカナダの国際協力が得られたのは、事前にIASC大気作業部会にて観測の重要性・先見性を表明したところが大きく、アメリカやロシアも理解を示していた。「みらい」が主たる船舶として観測網を拡充したこの試みはARCROSEと名付けられ、北極域の天気予報や中緯度域への影響評価を含めた新規性のある研究に発展しつつある。これは世界気象機関が提案しているPPP⁴⁸にも合致した取り組みであり、それを日本発で始動したことは特筆すべきことである。さらにこの活動は2018～2019年に計画されているMOSAicの予備調査としても認識されており、近未来の北極研究の根幹をなすことは間違いない。

d. 数値モデリング

気候モデルによる地球温暖化予測実験では、世界のどの結果も近年の急激な海氷減少および氷厚分布の変化を十分に予測できていないという問題を抱えている。その要因は多岐にわたるが(テーマB参照)、ここでは北極海内部で起きているプロセスの理解といった目的において、海氷・海洋モデルをどのように改良すべきかについていくつか紹介する。

海氷モデルに関しては、1970年代に開発されたSemtner型の熱力学やHibler型の力学の表現方法が現在まで継承されている。そのうち熱力学過程においては、積雪やメルトポンドを含めた海氷上アルベドの精緻化がひとつの鍵になる。特に、海氷融解期におけるアルベドの時間変化は多年海氷域と季節海氷域で異なることが報告されており、このような海域間の違いまで十分に表現できることが望ましい。メルトポンドそのものの時間変化を計算するモデルも開発されているが、直接的に表現するか、アルベドの変化として間接的に扱うかについては、検証データの有無や計算に要する時間に応じてその都度見極めるべきである。力学過程においては、例えば10km以下の氷盤スケールで局所的に生じているプロセスが十分に考慮されていない。従来の内部応力レオロジー(氷盤衝突に伴う力学エネルギーの変化を表現したものは、水平解像度が数十kmの

⁴⁴ IPS: Ice Profiling Sonar、超音波氷厚計

⁴⁵ AUV: Autonomous Underwater Vehicle、自律型無人潜水機

⁴⁶ ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler、音響式流向流速計

⁴⁷ NSIDC: National Snow and Ice Data Center、米国雪氷データセンター

⁴⁸ PPP: Polar Prediction Project、極域予測プロジェクト

海氷モデルを念頭に開発されているが、計算機性能の向上に伴って数 km まで高解像度化したモデルに対して同じ表現方法を適用できるかは、再検証する必要がある。季節海氷化が進むと、風波によって海氷が破碎され、氷盤が小さくなるという「波－海氷相互作用」も重要になってくる。大気－海氷－海洋間の運動の伝達という観点では、海氷の厚さやメルトポンドの状態まで反映することができればより精度が上がると考えられる。

一方、北極海を主対象にした海洋モデリングは、世界的にもまだ発展途上であり、例えば、水平解像度が 20 km 程度のモデルでは、冬季陸棚水(冬季に大陸棚上で形成される密度の高い海水)の海盆域への輸送を十分に表現できていないという問題が、共通認識となっている。北極海では、中・低緯度海洋に比べて小さい空間スケールの物理現象と複雑な海底地形が海盆スケールの海洋循環をも支配しているという特徴から、現実の水温・塩分分布を忠実に再現するには、水平解像度を数 km まで高める必要がある。これらの制約は最先端の大型計算機資源を十分に確保できれば解消に近づくことが期待されるが、モデルの表現方法や実験設定を新たに整える必要も出てくる。北極海の包括的な理解のためには、海洋中規模渦・内部波・鉛直対流による海水混合にも着目すべきである。特に水平 100 m スケールの鉛直対流混合は、世界最高峰の計算機資源を駆使しても北極海全域で陽に解像できるレベルではない。高解像度化が実現したとしても、海氷生成に伴う高密度水の沈み込みや海水混合の精緻化には、新たなアプローチが必要になる。理想的な実験設定で得られた知見などを生かして、既存のモデルで使用されている鉛直対流の表現方法を改良することが必要である。

大気モデルでは、WRF⁴⁹のような領域気象モデルを北極海の各海域で実装できるように整備し、氷縁域での大気－海氷－海洋間相互作用を含めた気象の時空間変動を明らかにしていくことがひとつの方向性として挙げられる。いずれにせよ数値モデルの改良には観測データの取得が不可欠であるが、現場観測だけでなく、日本の実績が高く評価されている衛星観測データも次世代モデルの開発に有用であろう。上述した素過程の解明の他、大気境界条件に使用する再解析データの高精度化やモデルの性能評価手法の確立にも力を注ぐ必要がある。

るが、これらの詳細はテーマ B、C を参照のこと。

まとめ

日本は太平洋側北極海において、既に多くの観測実績を残している。この海域は、北極海の中で最も早いペースで季節海氷化が進み、現在では夏季に大部分の海氷が消失する状況にある。「みらい」による北極航海では、約 15 年に渡りチャクチ海の大陸棚およびカナダ海盆域を中心とした大気海洋観測を実施してきた。特に、北太平洋から流入する海水の熱量を把握するための係留系観測や海洋の鉛直熱輸送を見積もる乱流計観測を継続的に行っている。同時に詳細な気象観測を実施することで、大気による海面冷却の効果や低気圧の発生メカニズム、雲底高度の変化など下層大気についても多くの知見を得ている。近年では、北海道大学の練習船「おしよる丸」もベーリング海からチャクチ大陸棚にかけての海洋観測を実施している。これらの点から、太平洋側北極海での大気・海洋に関するデータ収集能力と観測ノウハウに関しては、日本に一日の長があり、国際的にも高い評価を受けている。

現在北極海は全域が季節海氷化する傾向にあり、日本が多くの観測実績を得ている太平洋側北極海はそのモデルケースとなり得る。ゆえに今後も当該海域を重点観測対象と位置付け、継続的な総合観測を実施していくべきである。カナダ、中国、韓国の砕氷船は、北極海中央部を縦断的に観測する傾向にある一方で、氷縁域・季節海氷域に特化した観測例は相対的に少ない。ちなみに米国では Marginal Ice Zone プロジェクトにおいて、ボーフォート海氷縁域の集中観測に着手している。また、ICESCAPE⁵⁰プロジェクトでは、チャクチ海の高氷融解期の観測を行い、海水下での大規模な植物プランクトンの生産活動の発見など画期的な成果を挙げている。このような不定期観測が今後も継続するのかは定かでないが、ひとつの参考材料になるであろう。また、北極海では厳しい気象条件などの制約により冬季の船舶観測が殆ど行われていないが、暖水流入域などを狙った集中観測を行い、係留系による時系列データなどと融合することで少しでも多くの情報を得ることができれば国際的にも大きく貢献できるだろう。

観測だけで得ることが困難な時空間変動の仕組みを

⁴⁹ WRF: Weather Research and Forecasting Model, 局地気象予測モデル

⁵⁰ ICESCAPE: Impacts of Climate change on the Eco-Systems and Chemistry of the Arctic Pacific Environment, 気候変動に伴う太平洋側北極海での生物地球化学的影響の評価

記述・理解するには、数値モデリングが有用であるが、北極海モデリングの現状を鑑みるに、今後 10 年程度では、海洋熱の海氷への寄与、冬季陸棚水の海盆域への流入過程、氷縁域での雲と低気圧の形成過程を定量的に明らかにすべきである。南北両極域に端を発する全球規模の海洋深層循環は、乱流混合・鉛直対流・中規模渦・大規模海流とマイクロスケールからマクロスケールまでを包括する現象である。その統一的な理解に向けて、異なるスケールを持つプロセス間の相互作用を北極海を含む領域モデルで解き明かしていく。

北極海の海氷変動要因に関して、大気・海洋それぞれの寄与については様々なプロセス研究が繰り返されてきたが、大気－海氷－海洋間相互作用については、未解明の点が多い重要な研究テーマである。例えば、渦生成の頻度やそれに伴う海洋熱輸送は風の向きや速さに依存することが推察されるが、海洋熱の変化が海氷縁後退を通じて北極海全域スケールの大気循環にどのように作用するかといったフィードバックプロセスについては今後優先的に取り組むべき研究課題のひとつとして挙げられる。それに関連して、これまで海氷分布の季節予報を行う場合には特徴的な風の分布を仮定したり、あるいは複数の風を与えて平均的な結果を議論することが多かったが、海氷海洋の変化が大気にどう影響するかを定量的に理解することで季節予報精度の向上につながる。上記の解決に向けたひとつのアプローチとして、北極領域気候モデルの構築および改良が挙げられる(テーマ B も参照)。このような取り組みは既に米国モンレーの Naval Postgraduate School などが主導して始められているが、幅広い時空間スケールに対応するにはまだ課題も多い。北極研究に限らず、モデル開発や計算機資源に関して日本は世界に誇る先導性を持っており、大気・海洋・陸面・氷床などの各要素モデルは既に保有している。それらをいかに整合的に結合させるかを議論する時期に来ている。

極域研究を進展させるには、観測とモデルを融合させることが戦略的にも重要だと考えられるが、これに関しては観測値とモデル結果を比較するだけでなく、データ同化を介した様々なアプローチが有用となる。中低緯度域では、漂流ブイによるアルゴデータ等を最大限活

用し、既に研究手法としてデータ同化が認識されているが、北極域では海氷下の情報が比較的少ないことや数値モデルによる海洋の再現性がまだ十分でないなどの事情により、既存の同化例は海氷密度や一部の大陸棚上の海洋流速に限られている。

しかし、10～20 年先の長期構想を考える際には、自動観測装置の普及による観測網の充実や、モデルの高解像度化に伴う海洋循環の再現性向上が期待されるので、北極海においてもデータ同化を利用した研究を現実的なプロジェクトとして見据えておくべきであろう。データ同化システム自体は特に海域に依存しないものであるが、極域では海氷下の情報をいかに取得するかが鍵になる。例えば、冬季は海氷下を自動昇降し、夏季の海氷縁後退後は海面まで測定できるような測器が開発できれば、中低緯度域に劣らない精度でデータ同化結果を提供でき、様々な時空間スケールでの研究基盤となるであろう。データ同化は、他にもモデルパラメータ(モデルの定式化に用いる経験的な係数)の最適値推定や予報変数の初期値作成にも有用とされている。既に日本近海で運用されている JCOPE⁵¹や JADE⁵²のような短期予測システムを将来的に北極海でも構築できれば、北極航路に関する船舶への情報提供なども可能になり、社会経済への貢献度も増すことが期待される。データ同化の詳細についてはテーマ C を参照のこと。

⁵¹ JCOPE: Japan Coastal Ocean Predictability Experiment、日本近海変動予測システム

⁵² JADE: Japan Sea Data Assimilation Experiment、日本海海況予測システム

テーマ 3: 物質循環と生態系変化

要旨

大気中での温室効果をつかさどる CO₂ やメタン、雲の形成や日射量を左右するエアロゾル、それから海洋生態系を育む栄養塩などは、大気-陸-海洋を巡るさまざまな物質の循環に密接に関係している。北極域では、さらに海氷、氷床、積雪、永久凍土が物質循環に対して大きな役割を果たすとともに、そのプロセスを複雑にしている。ここでは、環境変動と表裏一体の関係にある物質循環変動について要となる以下の 4 つの Questions を挙げ、10~20 年将来の長期的な研究の展望を述べる。

- Q1: 大気中の温室効果気体やエアロゾルなどの濃度はどう変化するか?
- Q2: 陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか?
- Q3: 陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か?
- Q4: 海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか?

大気に関しては、観測データが著しく乏しいシベリア地域に新たに観測拠点を設け、大気微量成分の通年観測を実施する一方で、海洋域では人工衛星データの利用や、定期的に船舶を活用したエアロゾルなどの観測を

実施することが必要である。陸域生態系に関しては、長期調査プロットを設定し、100 年スケールの植生の種、構造などについての継続的データの取得を行うとともに、衛星観測によって植生変動のシグナルを明らかにし、さらに植生動態モデルで長期変動について信頼性の高い予測を行う一方で、土壌有機炭素の分布の把握と蓄積・分解のメカニズムを理解することも重要である。陸から海洋への物質輸送に関しては、北極域における広範囲の河川と沿岸に観測網を整備し、海岸浸食、氷床融解、および土壌侵食や凍土の融解に由来する、汚染物質、炭素、栄養塩、微量金属などのモニタリングを行う必要がある。海洋生態系に関しては、地域的にも季節的にも空白の無い観測データを取得する必要がある。例えば、冬季の氷上キャンプでの観測やセジメントトラップ・係留系による通年観測を通じてデータを取得し、海洋構造や物質循環・生態系の季節変化を把握する必要がある。また、それらのデータと培養・飼育実験や数値モデリング結果を比較・融合することにより、物質循環過程と生態系との関係や酸性化の仕組みと実態を定量的に評価する必要がある。

まえがき

世界的に関心を集めている近年の地球温暖化は、大気中の CO₂ 濃度の増加が主因であることがほぼ確実となっている。CO₂ は人為的に大気中に放出され続けてきた一方で、陸や海洋が吸収することによって、大気中の濃度の増加は抑えられてきたことも事実である。IPCC の第 5 次評価報告書 (IPCC, 2013a) を参考に計算すると、年間で見ても化石燃料の燃焼などによって大気中に放出された CO₂ の約 4 割を陸が、約 2 割を海洋が吸収していると見積もられる。このように、大気中の CO₂ 濃度を理解しようとした場合、大気-陸-海洋をめぐる炭素の循環として考える必要があることがわかる。図 9 に北極域における環境中の物質循環の模式図を示す。北極のような寒冷圏の場

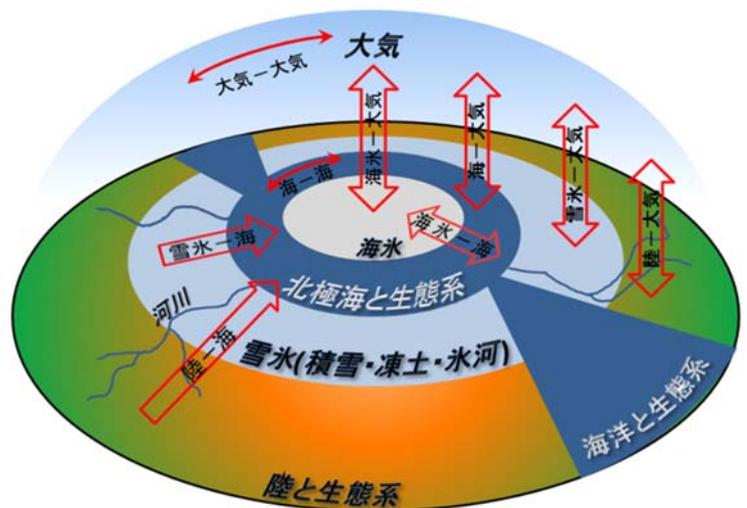


図 9 北極域における物質循環の概念図

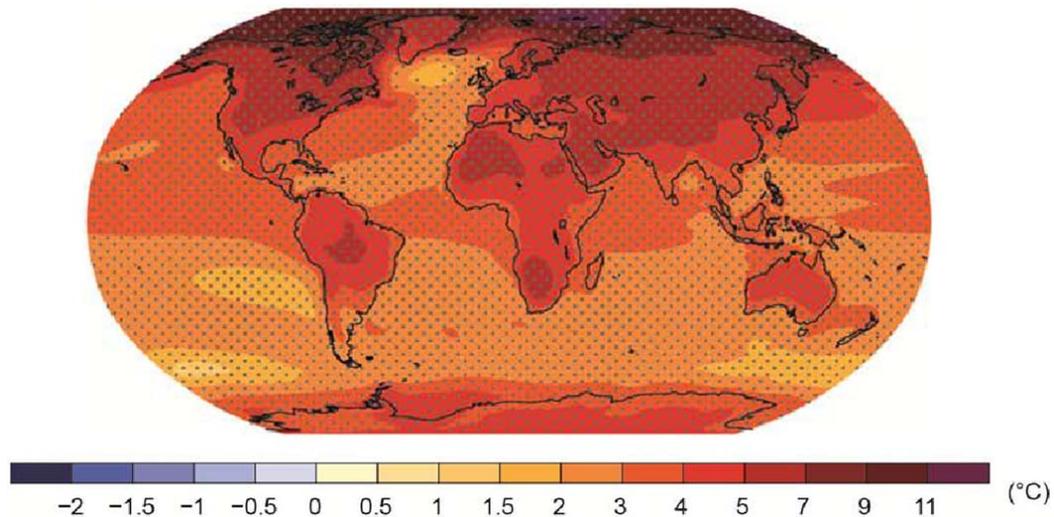


図 10 IPCC がまとめた地球温暖化の予測(シナリオ RCP8.5)。1986～2005 年の平均気温から、2081～2100 年の平均気温が何度(°C)上昇するかを表している。特に北極付近の温暖化が激しいことに注目したい。この原因は、温暖化に伴う雪氷域の縮小によるアルベドフィードバックと考えられる。(IPCC, 2013b, Figure SPM.8. Maps of CMIP5 multi-model mean results for the scenarios RCP2.6 and RCP8.5 in 2081-2100. (a) annual mean surface temperature change.)

合、陸上の雪氷や海氷の果たす役割の大きいことが、他の地域には無い特徴である。また、気候変動は、亜寒帯、寒帯の陸域において特に顕著になると予想されている(図10; IPCC, 2013b)。気候変動が亜寒帯・寒帯の陸域の生態系(以降、「北極陸域生態系」と呼ぶことにする)に与える影響を的確に把握することは、物質循環を通じた気候へのフィードバックの理解のために欠かせない。

北極域では、陸上を広く覆う亜寒帯林や海洋の植物プランクトンなどの一次生産(光合成)が、大気中のCO₂濃度を支配する大きな要因のひとつとなっており、全球炭素循環に対する役割も大きい。温暖化が特に顕著である北極域の炭素循環の変動とその生態系への影響を定量的に把握することは、地球の将来の気候を予測する上で非常に重要である。

気候変動に関わるのはCO₂だけではない。永久凍土が温暖化によって湿地化することによって増加する可能性のあるメタンの大気中への放出、北極海の海底永久凍土からのメタンの放出も気候に大きな影響を及ぼすだろう。さらに、亜寒帯で頻発する林野火災によって生じるブラックカーボン(BC)⁵³などのエアロゾルも雲凝結核となるほか、大気や雪氷面の放射過程を変化させ、その結果気候を変化させる。河川や海岸から海洋に注ぐ陸起源の物質や、大気によって輸送され海面に降りそぐ物質も、海洋生態系にとって欠かせないものである。

陸-大気-海を巡る物質の挙動は、気候や環境に対して決定的であり、現場や衛星観測をはじめ、モデルによって気候変動に対するその動態と生態系の役割を明らかにしていくことが、長期的に重要であろう。

Q1: 大気中の温室効果気体やエアロゾルなどの濃度はどう変化するか？

a. 研究の重要性と現状

図 11 に模式図を示したように、大気中に存在する微量成分(温室効果気体、短寿命気体⁵⁴、エアロゾル)は、大気中の放射収支過程を通して、気候変動に大きな影響を与えている。北極域は、北極海のほとんどを占める海水域、莫大な生物生産量を有する海洋域、広大な永

久凍土帯や森林帯が分布する陸域で構成されている。これらの領域は、大気微量成分にとっては、ソース、シンク両方の役割を担うため、大気微量成分の循環過程と密接に関係している。大気微量成分の循環過程やトレンドを明らかにすることを目的として、日本を含め各国がニーオルスン(スバルバル諸島)、バロー(アラス

⁵³ ブラックカーボン(BC): ブラックカーボンは、強い光吸収性を示す“グラファイト状の微小構造を持つ黒色の粒子状炭素”である。

⁵⁴ 短寿命気体: 反応性が高く、大気中での化学的な寿命が1日未満～数週間と短い気体(例、O₃, NO_y, SO₂, 揮発性有機物など)のことを示す。

カ)、アラート(カナダ)を拠点として長期的な観測が継続している。近年、北極域では、気候変動の影響とされる変化、例えば、夏季海氷面積の急激な縮小などが観測されている。このような急激な環境変化は、大気微量成分の分布や濃度変化に大きな影響を及ぼすことは間違いない。環境変化による大気微量成分の分布の変化やその影響を理解するには、起こり得る環境変化に対応して、観測的研究を進め、大気中の物質循環過程の変化に関して知見を蓄積していくしかない。

季節海氷域と開水域の拡大により、これまでと比べると、CO₂の交換過程、エアロゾル前駆物質⁵⁵(DMS: 硫化ジメチル)など短寿命(1日未満~数週間)気体の大気への放出、海塩粒子の放出が活発になることが考えられる。CO₂交換海域の分布やその季節変化については、大気中のCO₂循環過程を理解する上で非常に重

要である。また、海洋表面からはエアロゾル前駆物質や海塩粒子の放出が促進されるため、開水域の拡大はエアロゾル数濃度増加の要因となる。エアロゾル数濃度の増加は、雲凝結核⁵⁶の増加をもたらし、最終的には雲過程を通して間接的に放射収支に影響を及ぼし得る⁵⁷(Lubin and Vogelmann, 2010)。大気中の海塩粒子の増加は、エアロゾル粒子上の不均一反応と海塩粒子の沈着過程により、人為起源の酸性ガス(SO₂, NO_yなど)の効率的な除去を促進させるため、一部の短寿命気体の循環過程と密接に関係する。また、冬~春季の季節海氷上に形成されるフロストフラワー⁵⁸は、海氷起源海塩粒子のソースとなる。季節海氷域からの海塩粒子放出は、冬~春季の北極海上のエアロゾル分布を変える可能性がある。フロストフラワーや海氷起源海塩粒子上の不均一反応は、高反応性ハロゲン成分を大気に

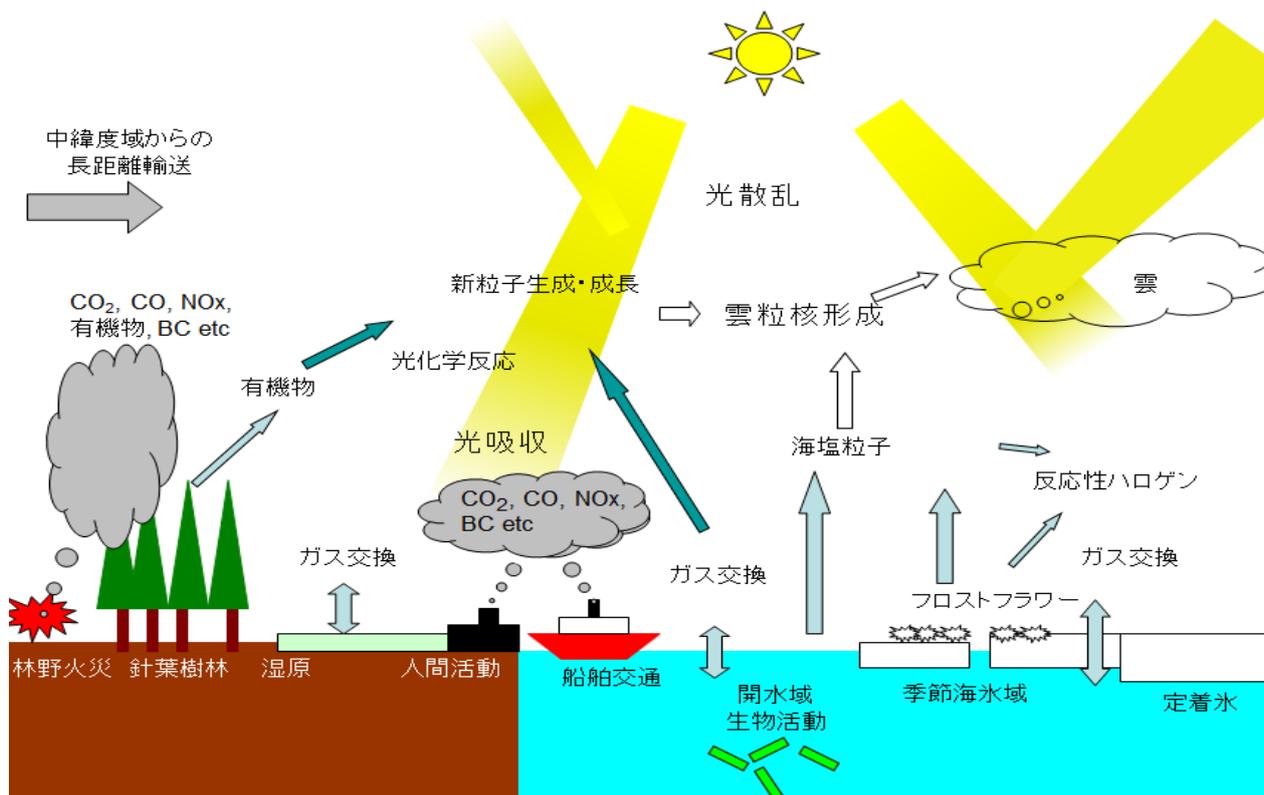


図 11 大気を中心とした物質循環の模式図

⁵⁵ エアロゾル前駆物質: 大気中では気体として存在し、気相中の酸化反応を経て蒸気圧が低い成分に変換され、新粒子生成過程や既存粒子への凝縮過程を経て、最終的にエアロゾル粒子となりうる気体や、既存粒子に凝縮後、エアロゾル粒子上の化学反応を経て、エアロゾル粒子成分へ変換される気体のことを示す。

⁵⁶ 雲凝結核: Cloud Condensation Nuclei (CCN)

⁵⁷ エアロゾルと雲形成と気候に対する影響: 大気中に存在するエアロゾル粒子上に水蒸気が凝縮して雲粒となり、雲が形成される。エアロゾル数濃度の増加(減少)は、雲粒濃度の増加(減少)、雲粒径の減少(増加)をもたらす、雲の寿命と光学特性を大きく変化させる。これらの変化は放射収支と密接に関連しており、気候変動に大きく影響を与える可能性がある。

⁵⁸ フロストフラワー: 低温条件下で、海氷形成時に海氷表面に形成する氷の結晶であり、海氷上のBrine(濃縮海水)がしみ上がるため、フロストフラワーの塩分濃度は非常に高い。フロストフラワー上での化学反応過程や、強風による破碎により、反応性の高い成分や海塩粒子が大気へ放出される。

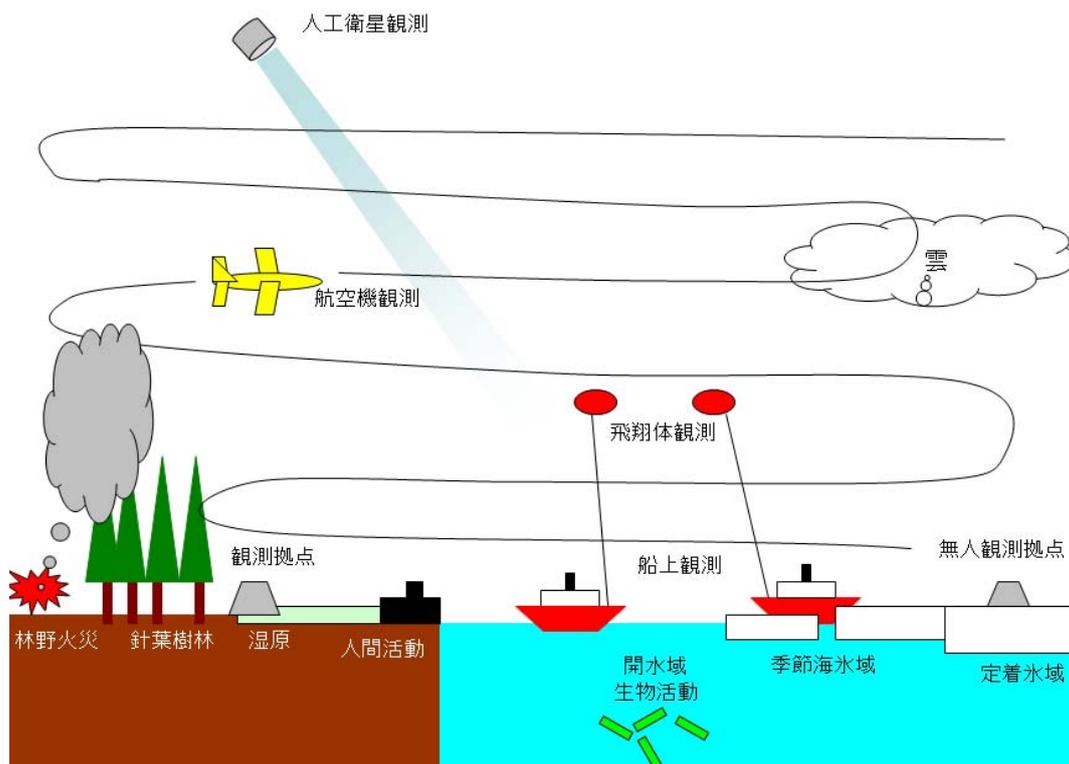


図 12 大気を中心とした物質循環の観測の概念図

放出するため、日射条件下(特に polar sunrise 時期)の大気化学過程(たとえば、短寿命気体の酸化、 O_3 消失現象、 Hg 除去過程など)とも密接に関係している。

陸域においては、土壌環境の変化や植生の変化により、湿地帯からの温室効果気体放出量、森林からの短寿命気体(揮発性有機化合物(VOC)など)の放出量、林野火災発生領域の分布に変化が起こる可能性がある。これまでの北極域の温室効果気体と関連気体成分の観測から、経年・季節変化は化石燃料消費、森林消失、林野火災、湿地帯からの放出との関係が示唆されている(森本ほか、2010)。なかでも、林野火災による影響は、温室効果気体の放出だけではなく、 BC やブラウンカーボン(BrC)⁵⁹などの光吸収性エアロゾルの重要なソースでもあり、雪氷面への BC 、 BrC の沈着により雪氷表面のアルベドに大きな影響を及ぼす。さらに、北極航路の利用や北極域の資源開発による人間活動の拡大が、一部の大气微量成分(CO 、 CO_2 、 NO_x 、 BC など)の濃度レベル、空間分布、気候変動に与え得る影響も今後の研究対象に含めるべきであろう。北極圏内の温室効果気体やエアロゾル長期観測から、北極圏外からの人為起源物質の長距離輸送の寄与も指摘されて

いる(Quinn et al., 2007; 森本ほか、2010)。北極大気中の微量成分の循環やその及ぼし得る影響については、これまでの精力的な研究により、その一端に関する科学的な知見は得られてきてはいるが、大気中の微量成分がかかわる相互作用や全体の変動メカニズムについては、依然として大きな不確実性が含まれており、多くの未解明な点が存在している。

b. 今後の研究

北極大気中の温室効果気体、短寿命気体、エアロゾルの循環過程とその気候変動への影響を理解、検証するには、それらの時空間分布の観測を長期的に、かつ、高精度に把握することが重要である。大気を中心とした物質循環に関する観測の概略を図 12 に挙げた。対象となる観測領域は、海水域、海洋域(開水域)、陸域、上空と広域に亘るため、観測する対象や地域に合わせて、日本の研究コミュニティが中心となり、地上観測、船舶、航空機、飛翔体、衛星を用い、大気微量成分濃度、同位体比、エアロゾル数濃度・粒径分布、雲などの観測を展開することが重要である。

地上観測では、これまでの観測データとの比較のた

⁵⁹ ブラウンカーボン(BrC): ブラックカーボンは、強い光吸収性を示す“グラファイト状の微小構造を持つ黒色の粒子状炭素”である。ブラウンカーボンは、光吸収性を示す粒子状有機化合物である。いずれも燃焼によって大気へ放出される。

め、現在の拠点における観測を国内外の研究機関と共同して継続させる。観測データが著しく乏しいシベリア地域では、新たに観測拠点を設け、大気微量成分の通年観測も実施する。海洋域では、開水域から海氷域上の分布を把握することが必須となるため、定期的に船舶を活用したエアロゾル・短寿命気体の観測を実施する。これまでの船舶による観測は、夏季の開水域で実施されることが多かったため、砕氷船を用いた海氷域、冬季北極海での観測、海氷上に設けた無人気象・エアロゾル観測拠点での通年観測も必要である。また、大気微量成分(特に、短寿命気体やエアロゾル)の動態を理解するには、陸上から北極海上の観測に加え、航空機や飛行体を駆使した集中観測を定期的 to 実施し、地上近傍から対流圏上層にかけての鉛直分布、陸域ー開水

域ー海氷域にかけての水平分布を捉えることが重要である。さらに、船舶、航空機による空間的な観測の展開は制約も多いため、人工衛星観測により、温室効果気体、短寿命気体、エアロゾル、雲の空間的な構造の把握も行う。これらの観測結果から、大気微量成分の時空間分布、陸面と海面からの気体成分・エアロゾルの発生、吸収、沈着量分布、その季節変化、それらの経年変化を高解像度、高精度で明らかにする。得られた観測結果に基づき、大気組成・輸送モデルを駆使し、陸面や海面と大気との相互作用のメカニズム、及び、北極域大気中の大気微量成分(温室効果気体、短寿命気体、エアロゾル)の挙動や動態を解明し、より高精度の気候変動の予測を目指す。

Q2: 陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか?

a. この研究の重要性と現状

気温や降水量の変化は、北極陸域生態系に強い影響を与える。植生については、光合成量と呼吸量の変化、バイオマスの変化、植生タイプの変化などが起こる。また、大気中の CO₂ 濃度の上昇がもたらす生態系に対する施肥効果⁶⁰の影響も大きく、CO₂ 濃度が 20 世紀後半の約 2 倍の環境下では全球の平均的な光合成量は 10~30% 程度も増加すると考えられている。これに関連し、化石燃料の燃焼などによって人為的に大気中に放出される年間の炭素の約 4 割を陸がシンクとして吸収していると見積もられており(IPCC, 2013a)、これら炭素収支に対する北極生態系の寄与を適切に見積もることが重要であろう。北極陸域生態系は、気候変動の原因として大きな放射強制力を持つ CO₂、さらに CO₂ に次ぐ放射強制力を持つメタンの大きなソースになる可能性が高いため、これらのダイナミクスを正確に理解することが緊急な課題となる。

北極陸域生態系は気候から一方的に影響を受けて

いるわけではなく、生態系から気候に対する影響もあるため、複雑な相互作用を伴っている⁶¹(図13)。よって、陸域生態系と物質循環の変動を理解するには、北極陸域生態系が物質循環および地表面物理過程を通して気候に与える影響を考慮しなければならない。つまり、北極陸域生態系と環境変動をシステム科学の観点から理解することが重要である。しかし、現状では、北極陸域の関わるシステムの理解はなほだ不完全な状態である。システム科学の観点からの科学的理解を促進することにより、温暖化による植生動態への影響と、植生の変化によるアルベドや炭素循環を介した気候への影響など、不確実性の高いフィードバックの定量的理解が進められる。

北極陸域生態系に蓄積されている炭素の大部分は SOC(土壌有機炭素)の形で地表面近くに存在しているが、温暖化がもたらす熱・水環境の変化によって SOC の劇的な変化が生じることが懸念されている。今世紀末までに 4℃ という比較のおだやかな温度上昇が泥炭地

⁶⁰ 施肥効果: CO₂ 濃度の増加によってこれを原材料とする植物の光合成効率が上昇する現象が知られ、施肥効果と呼ばれる。施肥効果によって大気中の CO₂ の吸収が促進されるため、気候変動を抑制する負のフィードバックとしてのはたらきを持つ。しかし施肥効果の定量評価は進んでおらず、その大きさは人為的な CO₂ 排出量の 5-30% と不確実性の幅が広く、今後の研究の進展が待たれている。

⁶¹ 陸域炭素循環にひそむさまざまなフィードバック: 気候変動を引き起こす温室効果気体の CO₂ とメタンはともに炭素を含む気体であり、これらは植物や微生物などの生理的はたらきによって陸域生態系と大気を循環している。気候変動による環境の変化によって植物や微生物の生理的活性は大きく変化し、これにより炭素循環が変わることで気候変動とのフィードバックを引き起こす。このフィードバックは多様で、あるものは温暖化を加速する正のフィードバック、別のものは温暖化を抑制する負のフィードバックとして作用する。正のフィードバックを挙げると、土壌温度上昇にともなう微生物活性の向上が土壌有機炭素の分解を促進し、大気中へのさらなる CO₂ の放出につながる可能性がある。負のフィードバックとしては、気候の温暖化によって光合成量と植物バイオマスの増加が起こり、これが大気中の CO₂ を陸面に固定する効果を持つ。正確な将来予測を行うためには、これら相反する影響を持つフィードバック要素それぞれを理解し、モデル化する必要がある。

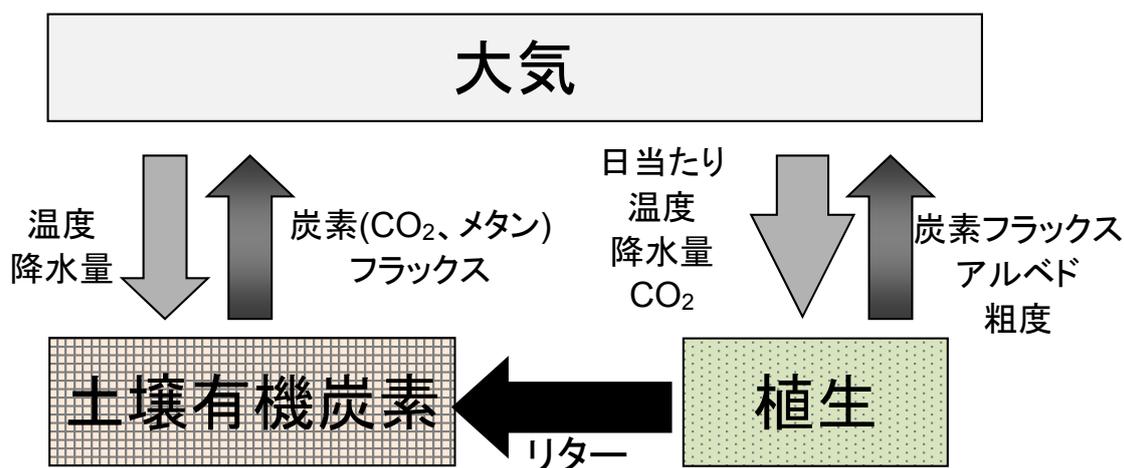


図 13 陸域生態系と気候は強い相互作用を持ち、お互いに影響を与えあっている。気候変動下でこれらの作用がどのように変化するか全体的な解明を行うために、複雑にからみあう要素やプロセスをひとまとめにしたシミュレーションモデルの開発・検証・適用が緊急に求められている。

に蓄積される炭素量を最大80%減少させるという報告もあり(Ise et al., 2008)、SOC 動態の正確な把握は重要な課題である。これは、特に永久凍土表層の融解深が関係する場合、劇的な変化をもたらす可能性があり、特に、温暖化による永久凍土の湿地化はメタンの発生を助長する可能性もあることが指摘されている。また、林野火災は短時間で大量の CO₂を排出するうえに、地表面アルベドや植生の蒸発散量を変化させ、さらに雲凝結核となるエアロゾルを発生させるため、気候への影響が大きいと見積もられているが、その定量予測は現時点では困難である。

北極陸域生態系の物質循環を把握するには現地観測・調査が重要だが、アクセスが困難な地域が大部分であるため得られる取得可能な現地データは限定的である。よって、今後も貴重なデータをもたらす現地観測・調査を継続的に実施する必要があるとともに、観測を空間的に広げて広域での生態系の変化をとらえるリモートセンシングなどの技術のさらなる活用が求められる。そして、気候変動などの環境変動と陸域生態系の物質循環との相互作用を理解し、将来予測によって社会に貢献するには、これらの観測データやプロセスを明示的に再現するシミュレーションモデルの開発が不可欠であるが、ふくめるべき要素は多数におよび、それらの相互間のフィードバックはきわめて複雑であるため、統合的なモデル開発は遅々として進んでいないことが現状である。

b. 今後の研究

今後必要となる北極陸域生態系の研究テーマは枚挙にいとまがないが、ここでは特に広域・全球での物質循環の理解に直接貢献するもの、長期的視点で解明すべきものをいくつか列挙する。

植生バイオマスは全球炭素循環中の炭素プールとして機能していることから、物質循環の変動を知るには、その変動を把握する必要がある。陸上では長期調査プロットを設定し、植生種や植生構造について 100 年規模の継続的データの取得を行うとともに、衛星観測によって植生変動のシグナルを明らかにする。さらに、植生動態モデルで植生の長期変動について信頼性の高い予測を行うことが必要であろう。以上は、前述した全球炭素循環に対して陸が果たす炭素循環の役割を定量的に解明することにつながるだろう。具体的なフィールド観測の手法としては、広大な環北極陸域を効率的・戦略的にカバーするための非接触観測技術(プリズム法による胸高断面積計測や円周魚眼レンズ撮影データにもとづく葉面積指数計測など)の積極的な活用も重要となる。

特に、SOC は北極陸域生態系における最大の炭素プールとして機能しており、その分布の把握と蓄積・分解のメカニズムの理解の重要性は特筆すべきである。主に SOC が蓄積される有機質土壌は、SOC の増減によって土壌の厚みが変わり、それに伴って土壌の物理条件も変化するため、炭素循環と熱・水循環を同時にモ

デル化しなくてはならない。そのため、物質循環モデルと土壌物理モデルの融合を中長期的視点で推進すべきである。従来は学問分野の相違のため協力があまり見られなかった生態学的研究と地表面物理研究の統合化が求められる。また、メタンの動態を把握するためにも、観測に基づく土壌の物理環境の理解とモデルによる予測が重要である。物質循環モデルと土壌物理モデルを統合したモデルを構築することで、気候変動による永久凍土の深さ(活動層の厚さ)の変化を明示的に予測することができ、土壌の層ごとの微生物活性とCO₂およびメタンのダイナミクスを示すことが可能になる。また、陸域の統合モデルを構築することによって陸域の物質循環の定量的な理解と将来予測が達成されることによって、水循環とそれにとまなう陸域から海洋への物質の流れの解明にも貢献できる(くわしくは、Q3を参照)。

シミュレーションと並んで、衛星リモートセンシングは北極陸域生態系の理解と将来予測のための強力なツールである。特に近年はリモートセンシング技術の進歩により光合成ポテンシャルや植生バイオマス推定の実現が進められており(Suzuki et al., 2013)、これによりフィールド観測結果にもとづいた広域での炭素循環を把握するための研究を発展させるべきである。また、リモートセンシングは林野火災などの大規模で重大なイベントの観測にも活用できる。

データ同化技術の応用は、観測結果と将来予測をつ

なくための今後 10 年間の鍵といえるかもしれない。蓄積されつつある現地とリモートセンシングのデータを活用するために必要な、客観的・総合的な統計技術であるからだ。特に、アンサンブル・カルマンフィルターなどを使った 4 次元データ同化技術の応用により、フィールド観測とリモートセンシング観測による客観的なモデル改良という重要なテーマに変革をもたらす可能性が大いにある。これらのデータ同化技術はすでに大気科学や海洋科学では利用されているが、その陸域生態系研究への応用はほとんど存在しない。重要なのは統計理論と計算科学に熟達した研究者を養成することである。

これら今後の目標を達成するにあたり、日本の研究コミュニティをまとめること、また、国際的なプロジェクトやネットワークとの協働が不可欠となる。例えば、長期観測プロットに関しては、ILTER⁶²、地表面と大気間の CO₂ 交換の観測に関して FLUXNET や GEO GFOI⁶³などが挙げられる。従来は研究グループが個別に取得・管理してきたデータを一元化して利用を促進すること、オールジャパン的なモデル開発を行う体制を整えることが必要である。北極陸域生態系に由来する物質循環の変動は IPCC 報告書などでも大きく取り上げられており、海外の地球システムモデリングを行うグループ(NASA、GISS、Hadley Centre など)とのモデル相互比較を積極的に実施していくべきである。

Q3: 陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か?

a. 研究の重要性と現状

陸起源の物質は、主に河川や海岸浸食などによって海洋へ供給される。北極海には、全球河川の 10%に相当する河川水が流入し、多量の陸起源炭素などを海洋へ運んでいる。つまり、北極海は陸から海への物質輸送の要といえる。温暖化に伴って凍土表層の融解深の深化、氷床の融解、河川水量の増加、海岸浸食の加速などが進んでおり、北極海への陸起源物質のフラックスはさらに増すと予想されている。さらに、季節海水域の占める割合が多くなることで、陸起源物質の影響の及ぶ範囲と時期も拡大すると予想される。永久凍土に多量に含まれている有機炭素の行方は特に注目されており、海洋に輸送された際に沿岸域で沈降除去されるか、

あるいは無機化されて CO₂ やメタンといった温室効果気体として大気に放出されるかによって、気候へのフィードバックは大きく異なってくるのが指摘されている。また、人為起源 CO₂ 濃度の増加による海洋の酸性化は北極海で特に深刻であり、ここに陸起源炭素の流入量が増加することは、海洋酸性化をさらに促進し、北極の海洋生態系に深刻な影響を及ぼす可能性がある(テーマ 9)。

一般に、陸起源物質のうち、栄養塩、微量金属、溶存有機物は、海洋の低次生態系の生産を直接左右する因子である。また、陸起源の溶存・懸濁物質は表層における光の透過率を減少させることで、一次生産を制限する。しかし、これまで北極海の生物生産における陸起

⁶² ILTER: International Long Term Ecological Research

⁶³ GEO GFOI: Group on Earth Observation - Global Forest Observations Initiative

源物質の寄与は小さいと考えられており、あまり重要視されてこなかった。近年、北極主要河川における陸起源物質濃度の季節的、空間的変動が明らかになってきたこと、温暖化によって海洋へ輸送される物質の量及び質(無機物/有機物、易分解性/難分解性など)の変化が予想されること、季節海氷域の拡大や水温上昇など沿岸域の環境変化が進んでいることなどから、陸起源物質が北極の海洋生態系に与える影響について改めて注目が集まっている。

北米の河川およびシベリアの主要河川の炭素、栄養塩類その他の化学成分のフラックスとその季節・経年変動の基礎的情報は米国地質調査所 USGS や Arctic-GRO プロジェクトの観測により提供されている(例えば、Holms et al., 2012)。しかし、海岸浸食、土壌浸食、氷床融解、シベリアの中・小規模河川や地下水由来の物質についての定量的な把握は充分なされていない。温暖化に伴い、海岸浸食や氷床融解による粒子や有機物の海洋流出が増加することは確実である。河川においては、永久凍土の融解に伴って地下水の寄与が上昇し、主要イオン濃度およびリン酸塩やケイ酸濃度が増加すると予想されているが、一方、溶存無機窒素や有機物に関しては地域差が大きく、全体としての増減は不明である(Frey and McClelland, 2009)。植生の変化や農業などの人間活動による陸起源物質の質および量

の変化も不明である。また、重金属その他の汚染物質の陸から海洋への流入も増加すると考えられる。

海洋に流入した淡水の行方については化学トレーサーや衛星海色センサを用いた溶存有機炭素の分布解析によりある程度の推測がなされている。しかし、ほとんどの陸起源物質については、河川水中や沿岸域での変質・除去・分配過程およびこれらの季節変動が不明なため、その行方や海洋生態系、物質循環への影響を定量的に議論することは困難な状況にある。

b. 今後の研究

陸から海への物質輸送の重要性および温暖化に対する応答を明らかにするには、図 14 に示したように、河川から河口域・沿岸域までを総合的に観測するための観測網を整備し、陸起源の炭素、栄養塩、微量金属などの海洋への流入とその影響をモニタリングする必要がある。これらの成分の流入量や海洋での循環過程は温暖化に伴って今後顕著に変化する可能性が高いため、早急なモニタリングの開始と 10 年以上の長期的な継続が望まれる。他国の沿岸での観測は国際協力の体制を整備して実施する必要があるため容易ではないが、日本ではこれまでにシベリアや北米などでの陸上観測を継続して行ってきた。新たに沿岸観測と融合させることで、陸と海を繋ぐ新領域における研究の発展が大いに

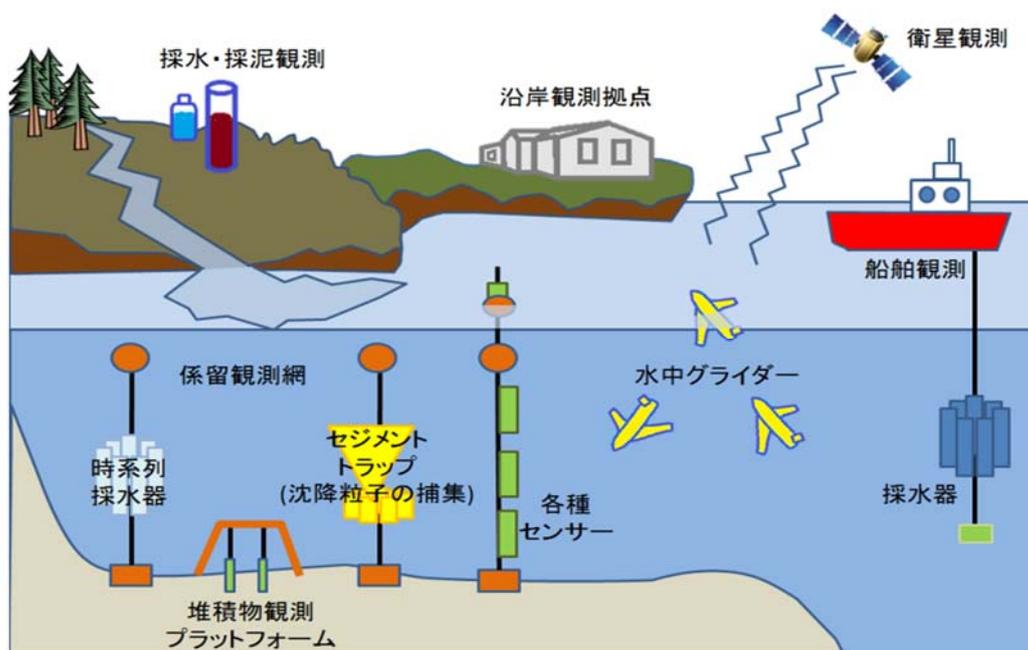


図 14 陸から海への物質輸送に関する観測の模式図

期待できる。

陸においては、中・小規模河川を含む様々な河川においては、センサの係留や定期的な採水観測により各物質の濃度やフラックスの季節変動や長期変動をモニタリングし、陸上の水文学的観測(テーマ 4)を併せることで、物質が河川を通じて海洋へ供給されるプロセスを定量的に解明することが重要である。また、温度や水分の変化が土壌からの物質溶出に与える影響を定量的に明らかにするための現場実験や室内実験などを行うことも、モニタリング観測結果の解釈や将来予測モデルの開発に必要であろう。さらに、土壌や採水試料について多種の化学分析を行い、新たな陸起源物質のトレーサの探索・開発を行うことは、陸起源物質の海洋での循環過程を定量的に把握する上で有用である。

河川以外の海岸侵食や氷床融解に由来する物質に関しては、陸域観測と沿岸の船舶観測により、その分布、海洋への供給の規模、頻度を把握する必要がある。

河口域および沿岸域での変質・除去・分配過程は、陸起源物質の海洋への影響を理解・予測する上での鍵となるが、現状では定量的な理解が大きく不足している。陸起源物質の影響が大きいと思われる主要な海域を選定し、陸域から河口域・沿岸域での物質循環を総合的にモニタリングすることが必要である。小型船舶による定期的な観測に加えて、係留型のセンサや時系列採水器、堆積物観測プラットフォームなどを利用するこ

とで、陸起源物質の分布、および光化学プロセスや生物による取り込みなどの詳細な季節変動や経年変化およびこれらの変化・変動と物理環境との関係を明らかにすることが望まれる。浅海域での係留観測には生物による汚染や海水による破損等の問題があるが、これらを克服することで、陸起源物質が沿岸の生物生産や海洋酸性化に与える影響や、陸起源炭素の除去・再無機化について詳細かつ定量的な理解が可能になるだろう。

また、北極海に入った陸起源物質は北大西洋に流出し、より広範囲の物質循環や生物生産に影響を与える可能性がある。このため、北極海周辺海域を含めた外洋域での観測も必要である。広域船舶観測に加えて、衛星海上センサを用いた溶存有機炭素の分布の把握、係留系やグライダーに搭載した各種センサや採水器による海水下の観測などによる3次元解析により、陸域起源物質の行方を把握することが望まれる。新たな陸起源トレーサの利用が可能になれば、海洋における陸起源物質の分布に関する知見を大きく広げることが期待できる。

さらに、これらの観測や実験結果をもとに、陸から海までの物質循環モデルの開発・改良を行い、気温・水温上昇や季節海水域の拡大などの環境変化の中で、陸起源物質の動態がどのように変化し、それが北極海ならびに全球の海洋生態系へどのような影響を及ぼすかの予測に繋げることも非常に重要である。

Q4: 海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか?

a. 研究の重要性と現状

近年、北極海で急激に進行しつつある温暖化や海水減少によって、北極海の物質循環や生態系がどう変化し、CO₂ やメタンをはじめとした温室効果気体が大気-海洋間の交換にどの程度影響するのかを定量的に評価することは、北極圏、ひいては全球の気候システムを理解するうえで重要な課題である。図 15 に温暖化・海水減少に伴う北極海の物質循環・生態系の変化についての模式図を示した。現在の北極海は年間 $66 \sim 199 \times 10^{12}$ gC の CO₂ を吸収すると見積もられており、これは全球の CO₂ 収支の 5~14%に相当する (Bates and Mathis, 2009)。このことから、北極海は全球的な炭素循環に大きな影響を及ぼしていると言える。しかし、この見積もりは限られた海域の春から夏に偏ったデータに基づくもので、より信頼のおける見積もりのために

は、大気-海洋間の CO₂ 交換の季節変動や海域による違い(縁辺海・海盆スケール)を明らかにしていく必要がある。また、北極海の水温上昇、淡水化、酸性化、一次生産(植物プランクトンによる CO₂ の取り込み)など、CO₂ の吸収や放出に影響を及ぼす物理・化学・生物プロセスを総合的に理解することも必要である。

他の温室効果気体やエアロゾルの大気-海洋間の交換と気候変動との関連については、本テーマの Q1 を参考されたい。特に、北極海から大気へ放出されるメタンについては、全海洋から放出されるメタンの約半分にも匹敵する量(年間 8×10^{12} gC)がシベリア沿岸から放出されていると見積もられているが、海底永久凍土の融解によりメタンの放出量はさらに増えると予想される (Shakhova et al., 2010)。

大気-海洋間の CO₂ 交換を左右する一次生産は、

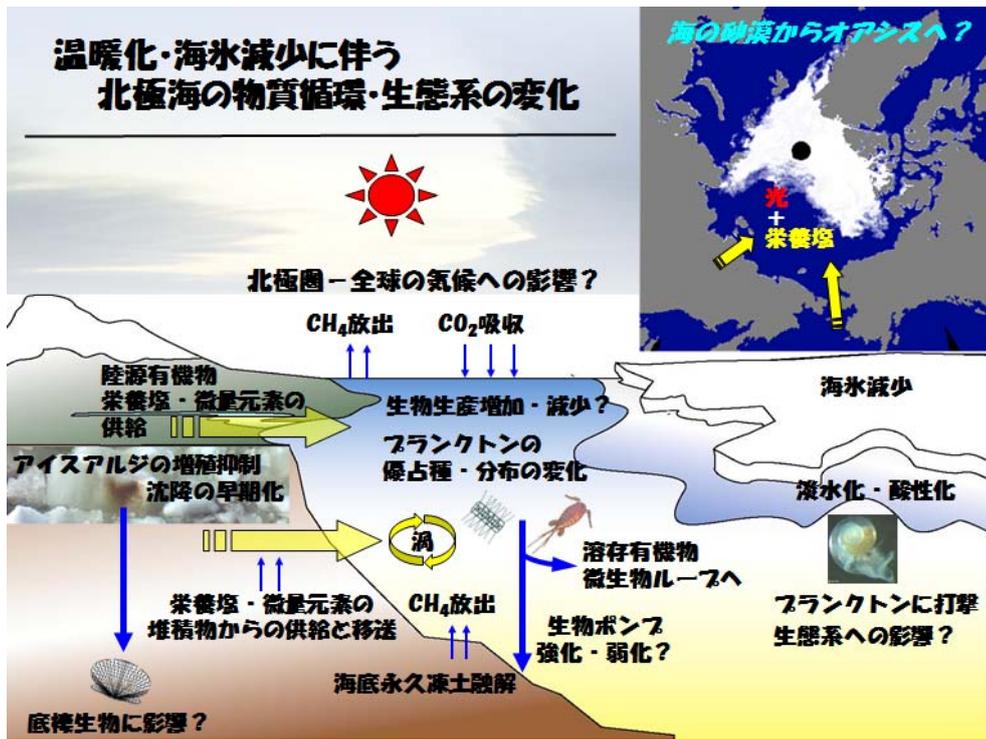


図 15 温暖化・海水減少に伴う北極海の物質循環・生態系の変化。右上の図は、Compiled by F. Fetterer and C. Fowler. 2006, updated 2009. National Ice Center Arctic Sea Ice Charts and Climatologies in Gridded Format. (<http://dx.doi.org/10.7265/N5X34VDB>) を元に加工した。

海洋生態系にとっても重要な要素である。近年の北極海の海氷減少により、海水中への入射光量が増加し、一次生産が増加するとの見積りもあるが、場所によっては海氷融解に伴う成層の強化や淡水蓄積による栄養塩躍層⁶⁴の深化のため下層からの栄養塩供給が抑えられ、一次生産が低下することも考えられる。また、表層栄養塩濃度が低下すると植物プランクトンが小型化するとの報告もある。一次生産による CO₂ 吸収能を正確に評価するには、プランクトンのサイズ（群集組成）を把握する必要もある。一般に、より大型の（あるいは群体を形成する）プランクトンが優占すると、粒子の沈降フラックスが増加し、CO₂ 吸収能が大きくなる。表層栄養塩濃度の低下が著しい海域では、渦が陸棚域から栄養塩や有機物を運ぶ役割が相対的に重要性を増し、物質循環や生態系に影響を及ぼす可能性もある。また、近年北極域で観測される低気圧活動の活発化により、海洋の鉛直混合が促進され、栄養塩の表層への供給が一次生産や沈降粒子を増加させる可能性もある。一方で、海氷減少はブライン⁶⁵中に付着して生息するアイスアル

ジー⁶⁶や海氷下でブルーム⁶⁷を起こす植物プランクトンのように、暗所に馴化した微細藻類の増殖を抑制する可能性がある。また、早期に海水が後退することにより、アイスアルジーが早期に深層へ沈降し、底棲生物の生態に影響を及ぼす可能性がある。

北極海で一次生産により生物に固定された炭素の 20～50%は、他の海域同様、溶存有機物を介して微生物ループと呼ばれる食物連鎖系に流れるものと推定される。また、北極海では、表層の一次生産とともに、次のような独自の有機物供給メカニズムが存在することに注目する必要がある。

- 1) 河川からの大量の溶存有機物の流入
- 2) 氷の融解に伴う有機物供給
- 3) 生産性の高い縁辺海からの有機物流入

特に 3) についてはアラスカ沖のカナダ海盆では、太平洋起源水が一次生産の高いチャクチ海陸棚域を通して有機物を運んでくるため、その層で細菌生産活性が高いことが分かってきたが、陸起源有機物の供給が多いシベリア沖の細菌分布や生産速度については、観測

⁶⁴ 栄養塩躍層：水深とともに栄養塩濃度が急激に増加する層。

⁶⁵ ブライン：海氷生成時に海水に含まれる塩分が排出されることで形成される高塩分で高密度の水。

⁶⁶ アイスアルジー：海氷底部に繁殖する藻類。

⁶⁷ ブルーム：海洋植物プランクトンの光合成活動が盛んになり爆発的に増殖する現象。

が少なく未知な点が多い。また、北極海における水温上昇が、細菌やその他の微生物に対して及ぶ影響についても不明な点が多く残されている。

海洋生態系にとって、もうひとつ重要な要素は、海洋酸性化である。北極海は、CO₂の吸収を妨げていた海水の蓋がとけて無くなったことで、酸性化が急速に進行した(Yamamoto-Kawai et al., 2009)。酸性化の進行により、すでに一部の海域で炭酸カルシウムが溶ける環境になっており、今後さらに拡大することは必至である。炭酸カルシウムの殻を持つプランクトンや底棲生物がダメージを受け、さらに食物連鎖網を通じてより高次の生態系に影響することが懸念されている。一方、チャクチ海や東シベリア海の陸棚底層では、生物由来あるいは陸起源の有機物の分解に伴い生成されるCO₂が海水をさらに酸性化している。今後予想される陸起源有機物供給の増加により、底棲生物への影響が深刻化する可能性がある。

チャクチ海や東シベリア海などの陸棚底層は、窒素や微量元素の循環を議論するうえでも重要な海域である。この海域の陸棚底層では脱窒素⁶⁸が起きており、そこを通過して北極海に流れ込む太平洋起源水は大西洋起源水に比べて窒素栄養塩が不足している。このため、太平洋側北極海の一次生産は、主に窒素栄養塩によって制限されている。一方、一次生産に必須の微量元素である鉄分は、冬季に陸棚上で海氷が生成される際に、海水中に高濃度で取り込まれ、海氷と共に移送されている。また、海氷生成に伴うブライン排出によってできる高密度陸棚水(DSW)⁶⁹にも、陸棚上の堆積物由来の鉄分が多量にとりこまれ、DSWと共に陸棚斜面に移送されている。微量元素は、また、エアロゾルによっても北極海に運ばれている可能性もある。このような窒素や微量元素の循環が、環境変動に伴ってどのように変化するかという点が、今後の太平洋側北極海における一次生産力を左右する鍵であると考えられる。

b. 今後の研究

北極海の炭素、窒素、微量元素の循環とその変動を明らかにし、北極圏—全球気候システムの理解に資するには、地域的にも季節的にも偏りの無い観測データを取得する必要がある。広域な観測データを取得するには、国際協力の下に複数船舶で観測を実施する必要がある。海洋渦等を分解できる中規模スケールの観測が望まれるが、時間的制約があるため、衛星観測や数値モデルの結果をもとに対象海域を絞る必要もある。これまでは、日本、米国、カナダ、ロシア、中国、韓国が、国際生物観測網⁷⁰を組み複数船舶でチャクチ海の繰り返し観測を行ったり、日本—カナダが共同でカナダ海盆の広域観測を行ったりして、前述のような研究成果に貢献してきた。

しかし、まだまだデータ空白域が多く、特にシベリア側の北極海は、生物地球化学的な変化が最もダイナミックに起きている海域にもかかわらず、ロシアEEZ内、あるいはそれに近接しているため、利用できるデータが非常に限られている。また、厚い海氷に阻まれて観測が困難であった多島海側の大陸斜面から海盆にかけてもデータが不足しているが、氷河・氷床融解による物質循環や生態系への影響を評価するために重要な海域である。さらに、冬季の氷上キャンプでの観測やセジメントトラップ⁷¹・係留系⁷²による通年観測を通じて、夏季の船舶観測だけでは得られないデータを取得し、海洋構造や物質循環・生態系の季節変化を把握する必要がある。また、培養・飼育実験や数値モデリングを行い、それらのデータと、船舶観測やセジメントトラップ・係留系等から得られる現場データとを比較・融合することにより、物質循環過程と生態系との関係や、酸性化の仕組みと実態を定量的に評価する必要がある。これらの研究活動は、今後計画されているRUSALCA⁷³やAODS⁷⁴等のプロジェクトと連携し、国際協力のもとにボーダーレスに実施することが望まれる。同時に、日本が得意とする多項目分析や高品質データの取得、また、日本が先導する衛星観測やモデル研究との連携により日本のオ

⁶⁸ 脱窒素：海底堆積物などに存在するバクテリアの働きで主として硝酸態窒素NO₃⁻が窒素ガスN₂もしくは酸化窒素N₂Oの形に還元されて大気中にガス状で放出される現象。

⁶⁹ 高密度陸棚水：Dense Shelf Water (DSW)。陸棚上で冬季に冷却を受け海氷生成時に形成される高塩分で高密度の水。

⁷⁰ 国際生物観測網：Distributed Biological Observatory (DBO)。

⁷¹ セジメントトラップ：海水中の沈降粒子を採取する漏斗型の捕集器。

⁷² 係留系：海底に沈めたおもりと海水中の浮き(フロート)を索でつなげ、主に水温や塩分、流速などを時系列で計測するセンサーを取り付けた観測システム。

⁷³ RUSALCA: Russian-American Long-term Census of the Arctic

⁷⁴ AODS: Arctic Ocean Drift Study

リジナリティを示すことが重要である。

新しい技術を取り入れ、化学・生物センサや観測プラットフォームの開発、および、衛星観測の高度化を進めることにより、新たな物質循環像や生態系の変動が見えてくることが期待される(9章 研究基盤の整備を参照)。化学・生物センサについては、係留系に取り付けることで観測パラメータの季節変動を把握したり、CTD⁷⁵や乱流計⁷⁶に取り付けることで、今まで捉える事のできなかった微細構造を計測し、新たな水塊の起源や形成過程を議論できるだろう。また、物理センサの計測と合わせて物質のフラックス等を見積もることにより、炭素・窒素・微量元素の循環の定量的な解析が可能となるであろう。プロファイリングフロート、水中グライダー、自律型無人潜水機⁷⁷等に化学・生物センサを搭載したり、採水機能を付けることにより、開放水域のみならず海水下の多様な化学・生物観測も可能となるかも知れない。海底堆積物と直上水間の栄養塩や、メタン、微量元素などのフラックスを観測できるシステムも、陸棚域での物質循環や陸棚-海盆間相互作用の理解に必要である。衛星からのデータ、特に Chl-a 分布は北極海の生態系の理解に欠かせない。しかし、雲によるデータの欠損や、河川から供給される有色溶存態有機物(CDOM)による Chl-a の過大評価、亜表層 Chl-a 極大の見積もりなど克服すべき問題がある。また、将来的には植物プランクトンのサイズ分布や一次生産などの時系列変化を広範囲に精度良く捉えることができれば、環北極海域の海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのかということに応えるための強力な武器となる。

⁷⁵ CTD: Conductivity Temperature Depth profiler の略で、海洋中の電気伝導度、温度、水深(水圧)を計測する測器。電気伝導度と水温、圧力から塩分を計算する。

⁷⁶ 乱流計: 海洋中の乱流混合の大きさを計測する測器。

⁷⁷ 自律型無人潜水機: Autonomous Underwater Vehicle(AUC)。

要旨

北極域における氷床・氷河の変動は、地域の気候変動や水循環に影響を与え、海水準上昇やアルベド変化など全球規模の環境変化をもたらす。その変動メカニズムを解明し、将来変動の予測精度を向上するには、現場観測・衛星観測とモデリングの強い連携が重要である。また、これまで十分に考慮されていなかった海洋との相互作用や、雪氷生物のアルベド影響、氷河地震などの理解を進めていくことが必要である。

永久凍土表層(活動層)の変化は、温暖化に加え、積雪深や土壌の湿潤度とも強く関係している。活動層が凍土氷(地中の氷塊)の層まで達すると、氷の融解に伴う地形沈降(サーモカルスト)が不可逆的に進行し、生態・水文過程の変化を介して気候システムにもフィードバックする要因となる。これらの変化過程の解明には、既存の凍土観測網と地表面環境変動の観測を統合し、衛星や陸面モデルの援用も合わせた研究体制の構築が必要である。

北半球大陸上の積雪は、積雪期間が減少傾向にあり、特に春季の積雪面積減少が顕著である。しかし、その量的、質的变化の情報は現在も十分ではない。高精

度な冬季降水量、雪質や不純物・微生物効果などの観測精度を高めるため、現場観測と衛星データ観測を組み合わせ、積雪モデルの改良と合わせた統合的な研究体制の構築が望まれる。

陸域(河川)、大気、海洋に対する北極域の水(淡水)循環研究は、各分野での理解は進みつつあるが、相互関係の理解はまだ十分ではない。凍土や積雪、植生、河川水、気象の変化が環北極陸域の水文過程や北極海の海水生成、物質循環へ及ぼす影響を解明するには、現地と衛星の観測を継続し、陸面-気候-水文-海洋モデルが連携した包括的な研究推進が必要である。

ここでは、次の 4 つの鍵となる科学 Questions を取り上げる。

- Q1: 氷床・氷河の変化は加速するか?
- Q2: 永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するか?
- Q3: 北極域の降積雪はどう変化しているか?
- Q4: 環北極陸域の水文過程はどう変化するか?

Q1: 氷床・氷河の変化は加速するか?

a. 研究の背景

(1) グリーンランド氷床の質量変化とそのメカニズム

グリーンランド氷床の氷の量は、地球に存在する氷の約 10%(海水準の 6~7 m)に相当する。1990 年代は横ばいにあった氷床体積が、2000 年以降に明瞭な減少傾向を示し、その後 2010 年まで質量損失が加速している。2000 年から 2011 年にかけての質量変化は 200 Gt a⁻¹の減少であり、年間約 6 mm の海水準上昇に相当する(Shepherd et al., 2012)。氷床質量の変化は、主に、①降雪による涵養量、②融解量、③カービング氷河末端での氷損失量(氷山流出と海洋による融解)の総和によって与えられる。近年の観測から、気温上昇による②の増加が顕著であり、氷河の流動加速によって③が増加していることも明らかである。その一方で、①は増加傾向にあると考えられているが、②と③の増加を補うには十分でない。

(2) 氷河・氷帽の質量変化とそのメカニズム

北極域の氷河・氷帽(放射状に流動する氷体)は、北極圏カナダ、グリーンランド沿岸部、アラスカ、北極海のロシア領群島、スバルバルに広く分布し、その氷全量は、海水準に換算して 200~300 mm 程度と見積もられ、グリーンランド氷床と比べれば小さいが、その変動の速さから北極域の環境変化では重要である。特に、北極圏カナダ、グリーンランド、アラスカ 3 地域における 2003~2009 年の質量損失は著しく、同時期に全世界の氷河・氷帽で失われた氷の半分以上に相当する(Gardner et al., 2013)。氷河・氷帽の質量変化は主に降雪と融解のバランスで決まるが、カービング氷河では氷河末端での氷損失が消耗量に加わる。北極域には海洋へ流入するカービング氷河が数多く存在するが、これらは末端が陸地にある通常の氷河よりも急激な変動を示

し、近年の氷損失に大きな役割を果たしている。

(3) 数値モデルによる氷床・氷河の現在状態、変化過程の再現の試み

氷床・氷河変動を再現する数値モデルは、通常さまざまな過程のサブモデルの組み合わせであり、目的や対象、支配的な過程に応じて要素を単純化することが多い。近年は国内研究者らの取組で Full Stokes の高解像度氷床流動モデルが実用的になってきたが、氷期-間氷期サイクルなど長い時間スケールの計算を行うのは困難であり、現状では力学的な近似を仮定した比較的軽いモデルで長期計算を行っている。氷床・氷河の流動計算において、不確実性が大きな過程は、底面滑りや末端でのカービングなどである。いずれの過程も観測が困難であり、経験的なパラメタリゼーションを用いているのが現状である。

(4) 雪氷微生物の繁殖が氷床・氷河に与える影響

氷床・氷河の融解量に影響する表面アルベドは、雪水中の微生物の繁殖が原因で大きく低下することが明らかになってきた。氷河表面には、低温環境で繁殖可能なシアノバクテリアや緑藻等の光合成微生物が生息している。これらの微生物によって生産された有機物は、分解をうけて暗色の腐植物質に変化し、鉱物粒子や微生物とともに氷河上でクリオコナイトと呼ばれる黒い物質を形成する。氷河消耗域の裸氷表面では、このクリオコナイトの堆積量が大きくアルベドに影響する (Takeuchi et al., 2001)。微生物によるアルベド低下は、日本の研究者を中心にアジア山岳域で研究が進め



写真1 グリーンランド氷床から海へ流出するカービング氷河 (撮影:杉山慎)

られてきたが、近年グリーンランド裸氷域でも顕著な変化が観測されて注目を集めている (Yallop et al., 2012 など)。

(5) 氷河地震活動の増加

氷河地震 (Glacial Earthquake) は、グリーンランド氷床、特にその縁辺部での氷の流動・崩壊、流出に伴う振動現象である (Ekström et al., 2006)。21 世紀に入りその発生頻度が増加し、また、季節変動が見られることから、氷河底面に流入する融解水量の変化、氷河流動やカービングの活発化を反映した現象と考えられる。その頻度は 2005 年に最大となった後 2005 年以降減少したが、その後は再度増加している。日本の研究者も参画する観測ネットワークの結果によると、特に最近グリーンランド北西部での増加が顕著である。

b. 鍵となる科学 Question: 氷床・氷河の変化は加速するか？

(1) 将来の氷床・氷河・氷帽の質量変動の不確実性

グリーンランド氷床の将来変動は、降雪量、融解量、およびカービング氷河からの氷流出量の変化で決まる。今後も北極域の気温上昇や氷床表面のアルベド低下が予想され、融解が進行する可能性が高い。一方で、降雪量とカービング氷河からの氷流出が今後の氷床変動に与える影響は不明瞭である。温暖化する気候下で降雪が増加して、融解量増加の一部を補う可能性がある。また、現在進行しているカービング氷河の流動の加速と後退は、いずれ収束に向かうとの見方も示されている。さらに、海洋の水温や循環がカービング氷河末端部に与える影響も、将来変動を考える上での不確定要素である。

氷河・氷帽においては、北極域の気温上昇のもとで、氷の減少傾向が続くと予想される。氷河・氷帽は氷床よりも気候への反応速度が速く、近年の温暖化傾向をより直接的に反映すると考えられており、今後の変動速度の見積もりが重要課題である。近年の変動がより激しいカービング氷河においては、氷床同様に海洋との相互作用を含めた不確定要素が大きく、現在の急激な縮小傾向が今後継続するかどうかは明確ではない。

(2) 海水準変動への影響の不確実性と予測の試み

山岳氷河が、氷体体積の大きい氷床と比較して、海水準上昇により大きな影響を与えていることが早くから

指摘されてきた。その正確な見積りは難しい課題であったが、GRACE 衛星による重力測定、氷・雲・標高観測衛星 IceSat による標高測定に基づいて、より信頼性の高い数字が報告されている(Gardner et al., 2013)。その結果は、北極域の氷河・氷帽が海水準に与える影響が非常に大きいことを示しており、特に北極圏カナダ、アラスカ、グリーンランド沿岸の氷帽は、世界で最も氷質量減少の激しい地域となっている。今後は山岳氷河の海水準変動への寄与を精度良く監視し、将来変動を予測することが課題である。近年では質量収支の地域性、氷河面積と体積との関係などをパラメータ化し、予測される気候変動下での氷河質量変化を全球で計算する試みがなされている。

グリーンランド氷床の海水準上昇への寄与も、近年増加傾向にあることが衛星観測等から示されている。モデルの将来予測は、気候モデルでの表面質量収支計算に基づくもの(通常氷床分布を固定)や、氷床流動モデルを用いたものがある。例えば、Yoshimori and Abe-Ouchi (2012)では 1980 年から 2099 年までのグリーンランド氷床融解が、海水準に換算して 2~13cm と見積られている。また、氷床モデルの比較プロジェクト SeaRISE では、RCP8.5 相当の温暖化シナリオ下で、2100 年までに 16cm の海水準上昇に寄与すると見積られている。

(3) 氷床-海洋・固体地球の相互作用と氷床流動変動への影響

グリーンランドのカービング氷河が、急激に加速、後退したことを受けて、氷床と海洋との相互作用の理解が求められている。これまでに、海水温度の上昇がカービング氷河の変動を駆動した可能性が指摘され、氷床周辺で新しいデータが得られつつある。また、グリーンランドからの融解水流入による海洋循環の変化は、古くからその重要性が認識されており、氷河末端から流出される土砂や化学成分が、海洋生態系に与える影響も大きい。今後の氷床変動を左右する鍵のひとつは、棚氷底面の融解過程や潮汐といった海洋から氷床への作用であり、氷床質量の減少が続けば、氷床から海洋への作用も顕在化するであろう。

グリーンランド氷河地震は、21 世紀になり確認され、未説明の点が多い現象である。この発生メカニズムの解明は、氷河地震活動の時間的推移と氷河末端部のダイナミクスに新たな指標を与えることが期待される。現在

進行中の気候変動と氷河地震頻度の時間的推移とを関連づけたり、他の雪氷学・気象学・地球物理学的なデータとの比較により、新たな知見が得られる可能性がある。気候モデリングや氷床古環境研究との対比・連携により、気候変動がグリーンランド氷河変動に及ぼす影響評価の精度向上が期待される。

(4) 氷床・氷河の生態系変動と気候変化因子(アルベド)・流動変化への影響

氷床・氷河の消耗域のみならず、涵養域や季節積雪の表面でも緑藻類の繁殖による赤雪現象がアルベド低下を引き起こし、積雪の融解を加速する可能性がある。このような雪氷微生物由来のアルベド低下は、黒色炭素や鉱物粒子に比べて定量的な理解が不足しているが、北極圏の氷床・氷河の変化を加速させる可能性がある。温暖化のような環境変動が、氷床・氷河上の生態系とくに生物地球化学過程に与える影響、およびその結果としてのアルベド変化について定量的解明が必要である。

c. 今後の氷床・氷河変動研究

(1) 現地データと衛星データによる氷床・氷河変動の定量化とメカニズム解明

グリーンランド氷床、氷河・氷帽ともに、人工衛星データによる変動測定が有力な手段となっている。従来からの氷河末端位置や面積変化の画像判読に加えて、可視画像や合成開口レーダー(SAR)データから作成した数値標高モデル(DEM)や、人工衛星に搭載された高度計のデータを使って、氷表面高度の経年変化を精密に測定可能となった。また、画像相関法や InSAR による流動速度の測定、重力衛星による氷質量変化の測定などが、近年の研究において強力な武器となっている。日本による衛星観測がこれらの技術発展に貢献しており、今後も解析手法の高度化、衛星搭載センサの開発など、次世代の衛星観測手法へと展開することが重要である。

人工衛星データの重要性が高まっているとはいえ、野外観測データは引き続き非常に重要である。特に、氷床・氷河変動のメカニズムを理解するために、現地でのみ測定できる高い時間・空間分解能、高い精度を持ったデータが必要となるからである。また、氷河内部や底面での測定やサンプリングなど、野外観測でしか得られないデータも数多い。さらに、人工衛星データの校正

や、数値モデルの入力データを得るためにも、野外観測データの重要性は高い。既に国内の研究者による研究実績のあるグリーンランド北西部、ロシア、アラスカなどを中心として、より効率的で質の高い観測の実施が求められる。

(2) 氷床・氷河それぞれの数値モデリングの改良

氷河の数値モデリングは、その目的によって適切なモデルの開発と改良が重要である。北極全域の氷河が海水準に与える影響を見積もるためには、数多くの氷河変動を取り扱うための簡略化やパラメータ手法の開発が求められる。その一方で、正確な氷河変動予測やカービング氷河の急激な変動メカニズムを解明するには、プロセスモデルの精緻化やモデルの高次元化が必要になる。数値モデルの評価と改良のためには様々なデータが必要となるため、衛星解析や野外観測との連携も不可欠で、特に、氷河の基盤地形、表面質量収支、流動速度などの測定データを整備することが重要である。

氷床モデリングでは、着目する時空間スケールなど目的に応じて適切なモデル開発と改良が求められる。統一的なモデルによる過去・現在の氷床分布の再現と観測事実との比較による検証、表面質量収支過程の高度化、底面水文過程と氷流動との相互作用の高度化、海洋や固体地球も含めた地球システムのモデリングとの有機的な結合など、モデルを改良すべき点は多い。モデルの検証のために観測から得られる情報を最大限利用することが望まれる。また、全球規模の気候と氷床の変動を再現するには、気候が氷床に与える影響だけでなく、両者の相互作用を適切に表現することが重要である(Abe-Ouchi et al., 2013 など)。表面質量収支、氷河末端と海洋間の相互作用(棚氷下の底面融解)や固体地球との相互作用(氷床荷重変化に応答した地殻変形)を再現することが重要である。たとえば、観測データを活かして、グリーンランド用領域気象モデルの開発による表面質量収支過程の研究を進めることが不可欠である。(氷床・氷河モデルについてはテーマ B でも記述あり)

(3) 氷河上の生態系変動と気候変化因子への影響

雪氷微生物による氷河・積雪の融解加速過程について、微生物の繁殖およびそのアルベド低下効果についての定量化が必要である。微生物繁殖過程については、雪氷面の物理、化学条件との関係を明らかにした上でモデル化をおこない、さらに微生物生産物の光学特性を明らかにした上で、黒色炭素やダストと共に不純物として雪氷アルベド物理モデルに組み込み、氷河の熱収支や質量収支の計算につなげていく。実際の現象の把握のために、衛星による長期的なスペクトル反射率の観測、現地調査による微生物群集のモニタリングが必要である。

(4) 海洋と氷床の相互作用の実態と将来変化予測

グリーンランド氷床と海洋との相互作用についてその重要性が認知されつつある。しかし、氷床周縁部の海域で実施された観測は限られており、人工衛星と野外観測を組み合わせた観測体制の充実が求められる。特に、カービング氷河が流入するフィヨルド内の海水特性、海洋循環、海氷状態などが重要で、氷河の変動や融解水の流出との関係解明が急務となっている。極域での観測に実績を持つ国内の海洋研究者と協力して、係留系や観測船を使った観測やサンプリングを実施する他、人工衛星データによる観測を進め、精度よく数値モデルへの導入をする必要がある。

ポスト国際極年(IPY)における、グリーンランド氷床変動の長期監視に向けて、国際的な研究グループによるグリーンランド氷床の地震モニタリング観測計画⁷⁸が進行中である。我が国は平成23年度より米国地震観測網IRISとの共同で、氷床上に地震観測点(ICE-S)を設置している(Toyokuni et al., 2014)。この氷床上観測点で得られる地震データをGLISN計画観測網のデータと統合し、氷河地震活動を解析する。具体的には、正確な震源と震源メカニズムの決定により、氷床中の発生位置とその原因となる断層パラメータの決定を試みる。氷河地震活動と発生過程から、地球温暖化の影響を評価する研究計画は独創的であり、グリーンランド氷床の気候変動に対する応答メカニズムの解明と将来予測について、新しいデータセットと学際的視点をもたらすことが期待される。

⁷⁸ グリーンランド氷床地震モニタリング観測計画: The Greenland Ice Sheet monitoring Network(GLISN)

Q2: 永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？

a. 研究の背景

(1) 地球温暖化に伴う永久凍土変化

永久凍土は、少なくとも 2 年以上 0°C 以下を保つ土壌、または地盤とされ、全陸地の約 20% に存在するといわれている。また、季節凍土は冬季に凍結し夏季に融解する土壌であり、その分布域は全陸地の 60% にも及ぶ。最近の数十年の観測から、永久凍土は温暖化の影響を受ける傾向にある。高緯度に連続的に分布する寒冷な永久凍土ほど温度上昇量が大きく、ロシアや極北カナダでは 10 年で 1°C を超える上昇率を示す地点もある。南限の不連続と点在永久凍土帯では、顕著に地温上昇・凍土融解が生じており、その結果、連続と不連続永久凍土帯の境界が北進している傾向が示されている (Romanovsky et al., 2010)。

(2) 活動層の深化

永久凍土帯で、冬に凍結し夏に融解する地表付近の層を活動層という。活動層の厚さは、アラスカの連続・不連続永久凍土帯では各 0.5m、1.5~3m 程度、東シベリアの連続永久凍土帯のツンドラ域、北方林域で各 0.4m、~3m 程度になる。活動層深さは夏の気温(積算暖度)と冬の積雪深に大きく依存する。その長期的傾向は地域的に異なり、北米では気温上昇とは逆に活動層は浅くなっている。これは冬の積雪深減少が凍結を強め、夏の土壌水分の乾燥が融解を抑えるためと考えられている (Park et al., 2013)。一方、シベリアでは温暖化に加えて積雪深の増加によって活動層が深くなっている (Park et al., 2013)。このように、活動層の変動は積雪深や土壌水分などの地表面の水文状態にも大きく依存し、気温上昇とは異なる変動形態を示す。

(3) 活動層変動と水文・植生変化

活動層変動は様々な生態・水文過程の変貌の誘因となる。氷に富む永久凍土が融解し流出すると、サーモカルストと呼ばれる地形沈降が生じ、低平地が拡大して融解湖が形成される。連続的永久凍土帯では、融解層の深化による新たな融解湖の形成が、不連続永久凍土帯では永久凍土の消失による地下水位の低下や乾燥化が進行していると考えられている。北米の連続永久凍土

帯では、河川や海岸沿いの崩壊地形が近年急激に増えてきたことが報告され、この要因として凍土氷の融解と消失が指摘されている (Jorgenson et al., 2006)。

東シベリアでは、2000 年代に活動層が深くなった (Iijima et al., 2010)。これは冬の雪と夏の雨が共に過剰に増加した年が複数年続き、地表付近の凍土融解が進み、活動層内に過剰な水分が継続した特長的な現象である。その影響により、活動層が深く、過剰に湿潤状態となった森林では、根の生育環境が悪化しカラマツの枯死が進行した (Ohta et al., 2014)。

また、双子衛星間の距離変化を計測して重力分布を調べる GRACE 衛星の重力変化データから、2000 年代の東シベリアの陸水貯留量は、年間約 11mm の割合で増加したことが示されている (小川ほか 2010)。この経年変化は、サーモカルストで形成される北方林に点在する湖沼(アラス)の貯留水量と活動層内の土壌水分量の増加によると考えられている。

(4) 活動層の観測体制

活動層厚の変化は、環北極で測定されており、国際永久凍土学会の観測ネットワーク GTN-P⁷⁹や CALM⁸⁰としてまとめられている。その一方、活動層と地表面の気象・土壌水分・植生状態などを統合して観測する地点は非常に少なく、相互作用研究が可能なプラットフォームやそのネットワーク化は進んでいない。



写真 2 東シベリア・ヤクーツク近郊のアラス周囲の永久凍土融解斜面 (撮影: 飯島慈裕)

⁷⁹ GTN-P: Global Terrestrial Network for Permafrost

⁸⁰ CALM: Circumpolar Active Layer Monitoring Network

b. 鍵となる科学 Question: 永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？

(1) 活動層の変化(深化)の状況とその要因

気温上昇による活動層変化として、春に融解が進行し始める時期が早まることと、秋に再び凍結期へ移行する時期が遅くなることが重要である。活動層の深さは、春の消雪時期や、夏の降水に伴う土壌水分変化も大きく影響する。また、活動層と永久凍土層との間では、析出した氷晶が成長しやすい物理環境にあるため、厚さ数十cmから1m程度の高含氷率の層が形成されていることが多い。この層は遷移層と呼ばれ、数年から数百年の周期で融解・凍結を繰り返すと考えられている(Shur et al., 2005)。

氷楔などの大型な凍土氷を含む永久凍土(エドマ)層と活動層の間には、この遷移層が存在する。氷楔が融解し地盤が沈下するには、高含氷率の遷移層が融解する必要があるため、サーモカルストは急激には起こりにくい。ただし、気候・環境変化で地表面からの熱伝導が増え、一旦活動層が遷移層を越えて深くなるとサーモカルストが進み、不可逆的な永久凍土融解に繋がると考えられる。しかし、これらの融解過程の観測は極めて少ない。

(2) 永久凍土表層の融解(活動層の深化)による影響

永久凍土が変動する時間規模を過去1、2世紀および今後数十年程度と考えるならば、“永久凍土の温暖化”や“活動層の深化”が、気候・環境変化に本質的な影響を与える現象と考えられる。環北極陸域における多くの環境変化(河川流量の増加、北方林の衰退、メタンの放出、サーモカルストの進行など)は、いずれも“活動層の深化”によって起こりうる現象であり、“活動層の深化”や“永久凍土の温暖化”を実証する観測的知見も数多く存在する。活動層の深化が進み、かつての永久凍土層上部がタリク(通年で未凍結な地層)化した事例はシベリア各地で報告されている(Hiyama et al., 2013)。また、近年の東シベリアのように、活動層が降水量増加で深くなり、気候偏差の極端な継続による北方林の衰退や、水域や湿原の分布域の変化に繋がる凍土—生態系—水文の連鎖過程の理解が、凍土変動が気候に与える影響として今後さらに重要になる。

(3) 活動層変化と広域的な水循環との関係

活動層の深さは土壌水分の鉛直分布を変え、ひいて

は陸面の水文特性も大きく異なるものになる。例えば、活動層の深化は地表付近の乾燥化を引き起こし、不連続永久凍土帯や凍土分布の境界で湖沼の面積や数が大幅に減少し、地域的な水循環や陸域生態系に大きな影響を及ぼすことが予想される。また、近年の気候変動は降水や蒸発散の変調をもたらし、活動層の熱的動態を変化させて陸域水収支にも影響を及ぼす。活動層を含む凍土表層は土壌水や地下水のバッファとなるため、大気と陸域との水収支の変動には位相と振幅が特徴的に連動、遅れがあるものと考えられる。例えば、上述のGRACE衛星の重力変化データでは、時間的に一ヶ月程度、空間的に数百km程度の分解能で、地表面、活動層での陸水貯留量変動が示されている。しかし、流域ごとの凍土分布の不均質性を理解できる現地観測がないことなどから、それらを検証する凍土—水文過程の理解は進んでいない。

c. 今後の永久凍土表層変動研究

(1) 活動層の進化とサーモカルスト進行過程の理解

活動層の変化や永久凍土の融解に対する安定性を議論するには、活動層の土壌水分動態と永久凍土層の含氷率の空間的分布の把握が不可欠である。基本となる活動層の地温変化の観測は、活動層厚、遷移層と長期的永久凍土層上部を含む深度まで高密度に行い、活動層厚の変化に留まらず、その融解期の季節的な広がり捉える観測を増やすことが重要である。地温観測の展開・維持はもちろんであるが、さらには活動層の水分状態や凍土中の氷の測定も同時に展開する必要がある。永久凍土上層部でコア採取し、雪氷学的な分析と地下水の安定同位体比や年代情報の解析を様々な永久凍土地域に対して行い、過去の活動層厚の変動範囲と頻度を推定することが重要である。加えて、サーモカルストによる地盤沈下・地形変化の現地測量観測の展開はほとんどなく、早急な実施検討が望まれる。

(2) 活動層深化の地表面環境と水循環・気候変化への影響の理解

永久凍土表層(活動層)の変化が地表面環境、さらには熱・水・炭素収支の変化を介して気候にどのようにフィードバックするのかを理解するには、統合的な観測サイト(スーパーサイト)における継続的観測と、それに基づく陸面過程モデルの精緻化を連動して実施する必要がある。森林火災、気候変化(乾湿偏差)など、広域

に生じる活動層深化に繋がる現象の理解とその気候相互作用の評価のためには、衛星リモートセンシングと、領域的な陸面モデル適用が有効である。衛星データの利用に関しては、マイクロ波・光学センサを駆使して活動層深化に起因する植生荒廃域や、湖沼の面積や数の変動と分布を定量化することで、間接的な凍土融解の時空間的変動と気候との関連について追求することが有効であろう。しかし、活動層厚を直接的に観測可能な衛星センサは存在しない。今後、地表下の温度プロファイルを推定可能な新たな衛星センサ・アルゴリズムの開発が必要であるとともに、数値モデル、現場観測、衛星観測を融合させた活動層厚の統合的解析法の開発とそれによる水文気候学的研究も有効であろう。

(3) 活動層変動の統合的観測体制の構築

永久凍土温度の観測は、全球凍土モニタリングネットワーク(GTN-P)の方針に合わせて推進すると良いが、寒冷・遠隔環境の耐性と精度を備えた測定機器の開発を進め、大規模なサーモカルストが予測される永久凍土地域をカバーするように観測網を展開するとともに、観測様式の国際的な標準化も早急に進める必要がある。また、永久凍土表層の変化を決定する地表面の気象・生態・水文要素も併せて測定する観測デザインを確立する。そこでは、日本の研究者が主導している東ユーラシアや、連携実績のあるアラスカ、極北カナダなどが集中観測地域として担当すべき領域といえる。その際、アクセスとインフラ設備の制限に影響を受けないよう、二国間(または国際的な)科学協定に基づく観測サポートの体制強化が求められる。

Q3: 北極域の降積雪はどう変化しているか？

a. 研究の背景

(1) 環北極域の積雪

20世紀半ば以降、特に1980年ころから、北半球の春季の積雪面積には顕著な減少傾向が見られる。積雪面積は月毎の経年変化が異なり、特に春と夏の減少傾向が顕著であるほか、地域によって経年変化も異なる(Brown and Mote, 2009)。一方南半球では、過去40年以上にわたり、おおむね減少しているか変化がない。積雪の減少には、気温の上昇が降雪の減少と積雪期間を短縮させる支配的な要因となる一方で、積雪の増加には、ほぼ降水量の増加が要因となる(Lemke et al., 2007)。

(2) 高緯度降水量の観測精度

北極域では降水量の観測地点が少なく、また、観測精度が低いことから、気候データの信頼性は低く、改善が望まれている(Goodison et al., 1998)。2014年2月に全球降水観測(GPM)計画の主衛星が打ち上がり、北緯65度までの降水量推定の精度向上が期待される。特に、シベリア南部、アラスカ南部などの情報が得られるため、これらの地域で精度向上が期待される。また、降雪量と積雪深の観測精度の現状把握と改善を目指して、WMOが主導する固体降水比較観測⁸¹(Nitu,



写真3 シベリア北方林内のしもざらめ層が発達した積雪(撮影:飯島慈裕)

2013; Rasmussen et al., 2012)が2013~2015年を中心に実施されており、日本からも気象庁、防災科学技術研究所、国立極地研究所が、新潟県上越市及び北海道陸別町を観測サイトとして参加している。

グリーンランド氷床上では、衛星から表面高度や氷床質量の測定はある程度可能であるが、降雪量を測定する手段としては限られた自動気象観測装置によって積雪深の変化として見積もられている。また、降雪量の時空間変動はモデルに頼っているのが現状である。

⁸¹ 固体降水比較観: Solid Precipitation InterComparison Experiment (SPICE)

b. 鍵となる科学 Question: 北極域の降積雪はどう変化しているか？

(1) 積雪期間・積雪深・水量の時空間変動

積雪に関して、北半球全体で見れば積雪期間の短縮傾向は明らかである。しかし、地域毎には積雪深・積雪水量の年々変動は異なるため、より多くの地域を代表する観測網の構築が望まれている。地上観測点の配置、衛星観測による広域把握、それらとモデル予測降水量の同化が求められている。衛星観測では、積雪分布と融雪域の観測は信頼性が高いと考えられるが、積雪水量は長年のマイクロ波観測手法の開発にもかかわらず、時期・地域を問わず信頼できるものに至っていない。また、森林域での積雪量の把握は課題である。

(2) 積雪不純物・雪質・微生物効果の定量的評価

積雪不純物・雪質・微生物効果の定量的評価は幾つかの地点のケーススタディとして理解されており、北極域スケールでの現象を捉える観測に基づいた理解が望まれている。これを受けて、衛星データから、積雪不純物や粒径といった積雪物理量を抽出する研究が進められており、より多くの地上検証データの必要性が高まっている。

(3) 積雪と土壌・生態系・大気(アルベド変化)との相互作用

春に積雪の減少が記録される一方で、冬季の降水量は減っていない。これは春の融雪期の短期間に集中して融解が起きることを意味している。また、冬季の降水の増加のため、冬から春の融雪水量の増加は、河川流量の増加に影響していると考えられている。さらに、積雪域からの昇華蒸発による大気水蒸気量の増加が極域沿岸分が多いことが指摘されている(Sugiura and Ohata, 2008)。積雪と土壌・生態系・大気(アルベド変化)との相互作用に関しては、現地での降水・積雪・陸面過程の統合的観測とモデル研究の連携による研究の進展が今後期待される。

c. 今後の降積雪変動研究

(1) 降積雪観測とモデル化

北極海上、ツンドラ、北方林、氷河、氷床、氷帽上で、精度の高い降水(特に降雪)量観測、積雪物理量観測を展開し、衛星データと組み合わせて北極域における長期データアーカイブを開始する。また、過去のデ

ータの補正方法を確立し、同データアーカイブに含める。これにより、降水量、積雪量の気候変化を評価し、気候モデルの境界条件作成及び検証、衛星データの解析アルゴリズム開発及び降雪・積雪観測用の衛星センサの開発に貢献する。全球降水観測計画 GPM での二周波降水レーダー DPR 等の新規降水衛星データや、大気データ同化手法の高度化等を組み合わせて、全球北緯 90 度から南緯 90 度までの衛星による降水量の推定に取り組む。

観測測器に関する技術開発の進展を背景に、強風域や森林域での水循環の各構成要素を高精度で観測して、雪氷圏の冬季水循環像を提示する。降雪に関しては、これまでより時間間隔の短い降雪量(時間、分を単位とする“降雪強度”)及び降雪粒子に関する自動観測の展開が開始される。積雪深の観測においても、レーザーを利用した自動観測点を増やす。また、近年普及し始めたインターバル撮影カメラの利用により植生の周りをはじめとした分布の不均一性などの地上観測から、生態系との相互作用の研究を進展させる。そのために、画像データを定量化する方法の構築が必要となる。

こうした高精度、多項目の観測データ及びそれらによって検証された数値モデルに基づいて、植生、土壌、積雪、降雪、大気の相互作用を解明する。数値モデルにおいては、特に積雪モデルの高度化を行い、気象、海洋、土壌モデルとの結合を進める。この際、雪質変化に関わる要因を明らかにし、積雪モデルに反映させる。衛星利用も積極的に進める必要があり、積雪パラメータ(水等量、樹冠着雪量、雪質、汚れなど)の標準プロダクト化を目指す。その地上検証として、積雪水量の推定精度向上、森林域での観測実施が望まれる。

(2) 海氷上の積雪

海氷上の積雪は、急変が報告されている海氷の成長、融解に関わる重要な要素であるが、積雪の役割、積雪・海氷の変質過程の理解とともに、広域積雪の観測手法の開発が望まれる。海氷上の積雪は見かけ上の厚さ、アルベド、熱伝導の点から重要な観測要素である。NASA による海氷上積雪の衛星観測手法は、開発が滞っており、新たな手法による進展が望ましい。海氷上の積雪は見かけ上の海氷の厚さの観測精度にも影響するため、現場・衛星両方での正確な観測法の確立が望まれる。

Q4: 環北極陸域の水文過程はどう変化するか？

a. 研究の背景

北極域陸域における水循環は、凍土と積雪、北方林が重要な役割を果たす。この地域の河川は、北極海への淡水と栄養塩、有機物の供給源である。河川流量の急激な増加は、春のアイスジャム洪水や夏洪水として住民に被害を与える一方で、栄養分を運ぶことで牧畜等の生業にとっては恵みとなる。また、河川氷や凍土の状態の変化は交通や住環境に影響を及ぼす。このように北極域の河川は地域住民の生活に大きく関わる。

河川流量変化は、淡水や陸源物質供給の変化をもたらし、北極海の海水形成や海洋循環、物質循環へ影響を与えることが懸念される。河川流量の変化には、大気循環変動に伴う降水量変化とともに、流域における様々な陸域水文過程が関わっている。気候システムにおいては、北極と中緯度の間に位置する陸域は中高緯度相互作用として無視できない。陸域水文過程の変化に伴う水・熱フラックスやアルベドの変化は大気下層の気温を変え、北極海とそれを囲む陸域との気温コントラストを変えることで、大気循環や気象への影響を及ぼすことが懸念される。

b. 鍵となる科学 Question: 環北極陸域の水文過程はどう変化するか？

(1) 北極海へ流入する河川流量の変化とその要因

北極海へ流入する河川流量は、近年増加傾向にある。これはシベリアの河川流量が2000年代後半に数年間連続して多かったことに起因する。一方、北米の河川流量の変化は顕著ではない。流量の長期変化の要因として、ダムや凍土融解、森林火災の影響がこれまで検討されてきたが、現状の変化量に対する影響はいずれも小さい。河川流量は、主に正味降水量(降水量と蒸発散量の差)の影響を受けており(Zhang et al., 2013)、総観規模の大気循環や低気圧活動に伴う水蒸気輸送が変動要因となる。加えて、植生からの蒸散や凍土融解による土壌水分の変化などの陸域水文過程も、また、河川流量の変動要因となると考えられる。最近、東シベリアでは夏の基底流量の増加と活動層深化の関係が指摘されており(Brutsaert and Hiyama, 2012)、今後ますます陸域水文過程の調査が重要になるであろう。

気候モデルでは温暖化に伴って高緯度の降水量が増加すると予測されており、環北極域の河川流量も長

期的には増加すると予測される。よって北極海への淡水供給は増し、同時に熱や栄養塩、有機物の供給も増すと予想される。陸域水文過程の変化は、河川から流出する陸源物質のソース自体にも変化をもたらす可能性が考え得る(テーマ3)。しかし、気候モデルによる降水量増加の大きさやその地域分布は予測の不確実性が高く、また、陸域過程に関しては特に広域の調査がまだ不十分である。現状でのこれらの陸域過程の相互関係を解明しつつ、将来変化を検討する必要がある。

(2) 環北極陸域の水文過程の変化

21世紀に入り、環北極の広い地域で積雪深の減少(東シベリアのみ増加)が見られ、土壌水分量、河川流出量への影響が予想される。一方で同期間に北米とシベリアの土壌水分は、増加傾向にあることがGRACE衛星で検知された(Landerer et al., 2010)。積雪変動には、量の変化に加えて、積雪期間の変化も重要である。近年の気温上昇に伴い、秋の積雪の遅れと春の融雪の早まりから、積雪期間が短縮する傾向にある。積雪には、大気と土壌の間の断熱効果があるため、地温と土壌凍結(凍土)に影響を与え、さらに土壌水分や植生のフェノロジー(植物季節)、放射・地表面熱フラックスの変化を引き起こす。消雪の影響には地域性があり、西シベリアではアルベドの差異が初夏の放射収支に影響する一方で、東シベリアでは融雪水が夏の顕熱と潜熱の割合に影響を及ぼす(Matsumura et al., 2010)。



写真 4 東シベリアのレナ川。広大な流域面積から集められた淡水が北極海に注がれる。(撮影: 飯島慈裕)

温暖化に伴う環北極陸域の大きな昇温と降水量増加は、積雪期間の短縮や活動層深化、そして土壌水分、蒸発散量、植生活動などの水文過程の変化を引き起こすと予想される。昇温は積雪期間を短縮させ、昇温に伴う大気中水蒸気量の増加は東シベリアの乾いた大陸内陸での蒸発量と蒸散、昇華を変化させる可能性がある。実際、長期的な蒸発散量の増加が観測とモデル研究から示されている(Zhang et al., 2009)。また、東シベリアの消雪では融雪とともに昇華蒸発の重要性も指摘されている(Suzuki et al., 2006)。降水量の増加は、活動層深化と土壌水分の増加を進行させる可能性がある。これらの陸域過程は、雪氷が鍵であり、種々の水文過程に加え、陸域の熱収支に関わる諸過程の解明も重要であることを示している。

(3) 北極海の淡水収支と北極域の水循環

陸起源の淡水供給の増加は海洋表層の成層を強化し、また、塩分を低下させて海氷生成を促進する働きがある。北極海へ流入した淡水はやがて北大西洋に流出するため、淡水供給の増加は長期的に北大西洋での深層水形成を弱める働きをする。その解明には、北極海の海氷生成と海洋循環の変化を併せて理解することが重要である。

温暖化の進行によって海氷上の積雪量は増加すると予想され、これは海氷の生成・融解を大きく左右する可能性がある。また、気温上昇や季節海氷域の拡大によって海水へ直接流入する降水量が増加し、海洋表層の淡水化をもたらす可能性もある。しかし、海氷上の積雪に関する研究はほとんどなく、今後、海洋上や氷上での雲・降水・積雪過程の観測が必要である(テーマ 2)。これらを踏まえ、北極海とそれに接する陸域や太平洋、大西洋、上空の大気を含めた北極域全体で、水循環の理解と淡水収支の定量的な評価が望まれる。

c. 今後の水循環変動研究

(1) 水文過程を理解するための陸域観測サイトの充実

観測結果の統合的な利用には、モデルとの緊密な連携が推進されるべきである。そのためには、観測地点で長期運用管理した入力データセット(気象要素)、パラメータデータ(植生情報、土壌情報)、検証データ(地温、土壌水分、光合成量など)を作成する必要がある。これまで日本とロシアの研究者が中心となって東シベリア域

の現地観測が行われ、多くの陸域水文過程に関する成果が得られた。しかし、冬の間はデータの空白期間であった。通年観測を視野に入れて、基盤となる気象要素と熱・水・炭素フラックス、凍土・土壌水分変動を一体として測定できるスーパーサイトを整備し、長期的に維持できるように、二国間、多国間の協力体制と日本側の責任研究機関の設定が必要である。東シベリアを考えるならば、ヤクーツク近傍のスパスカヤパッド(Spasskaya Pad)、ウスチ・マヤ(Ust-Maya)近傍の Elgeei、そして Voluyi 川の Ol'okminsk 当たりが候補である。これらの観測データは、客観解析データや領域モデルによるダウンスケール、衛星観測データを組み合わせて、長期データセットとして構成し、水循環の極端現象などを検証できるようにするために、国内の共同研究体制が望まれる。

(2) 河川由来の淡水および有機物、熱輸送の観測と海洋モデル開発

河川を介した陸域水文過程と海洋過程との関係を解明するには、水文学的に異なる流域に観測点を設置し、河川流出の量やタイミング、水温、陸源物質などの測定が求められる(テーマ A)。降水量、蒸発散量、土壌水分に対する観測とモデルの研究を組み合わせることで、陸域から北極海への淡水と物質の流出量、流出場所、タイミングおよび質を決める要因を明らかにし、予測に繋げる。水の安定同位体比は様々なスケールや場所での水文過程の理解に適した指標であり、過去を復元する調査には有効な観測手法となる。北極域の流量観測は期間も場所も限られるが、今後も観測を継続し、水収支解析やモデル研究、古気候プロキシデータ解析と合わせて、変動要因の解明を目指すことが重要である。

河川流量変化による海洋への影響を評価するには、海洋観測と海洋循環モデルの利用が有用である。沿岸域での係留系の展開や小型船舶の利用により、淡水流入の時空間変化を捉え、陸起源の熱や物質と海氷生成量の関係を調べられる観測が望まれる。陸域水文過程の変化による北極海、大西洋への淡水供給や、海洋循環、物質循環、海洋生態系への影響を評価するには、主要河川だけではなく、小河川や氷床・氷河融解水、地下水などからの淡水や物質のピンポイントでの供給を考慮し、現実的な海洋循環場を再現できる高精度な海洋循環モデルの開発が必要である。

(3) 氷床・氷河、永久凍土、積雪、水循環の統合的把握

現地観測ではカバーできない広域な水循環変動の理解には、衛星観測や陸域モデル、客観解析データの利用が有効である。

北極域における大陸や流域を対象とした広域の水・熱収支の定量的な評価は十分でなく、陸域水循環の重要な研究対象といえる。GRACE 衛星による陸水貯留量や AMSR2 による積雪水量、今後の全球降水観測計画 GPM での二周波降水レーダー DPR による高頻度の降水観測、また、ALOS および ALOS2 による高分解能な水域抽出などの土地被覆分類は広域の陸域水文過程の把握と解明に役立ち、モデル実験の検証においても有益である。また、衛星プロダクトにとって現地地上観測データとの比較検証は必要不可欠であり、特に観測が少ない北極域での現地観測の継続が求められる。

陸域モデルにおけるより正確な水文過程の理解に

は、凍土に関わる土壌の透水や熱伝導に関する適切なモデル化や、積雪、吹雪過程の改良が必要である。さらに数 10 年以上の長期的な時間スケールでは、植生変動が蒸散、土壌環境に影響するため、凍土地帯に対応できる植生動態モデルが必要となる。これらのモデルの検証に使用できる総合的な地上観測は必須である(テーマ A)。

客観解析データは、気候変動研究にとって重要な基礎データの一つである。客観解析データの技術開発は、地上観測や数値モデルによる表現が制限されている北極域の気候研究にとって重要な意味を持つ。現在の客観解析データは、主に大気と海洋を対象としているが、陸域過程を考慮した大気海洋陸域結合データ同化技術を開発し、その客観解析データを用いて解析を進めることで、北極域水循環研究のブレークスルーが期待される。

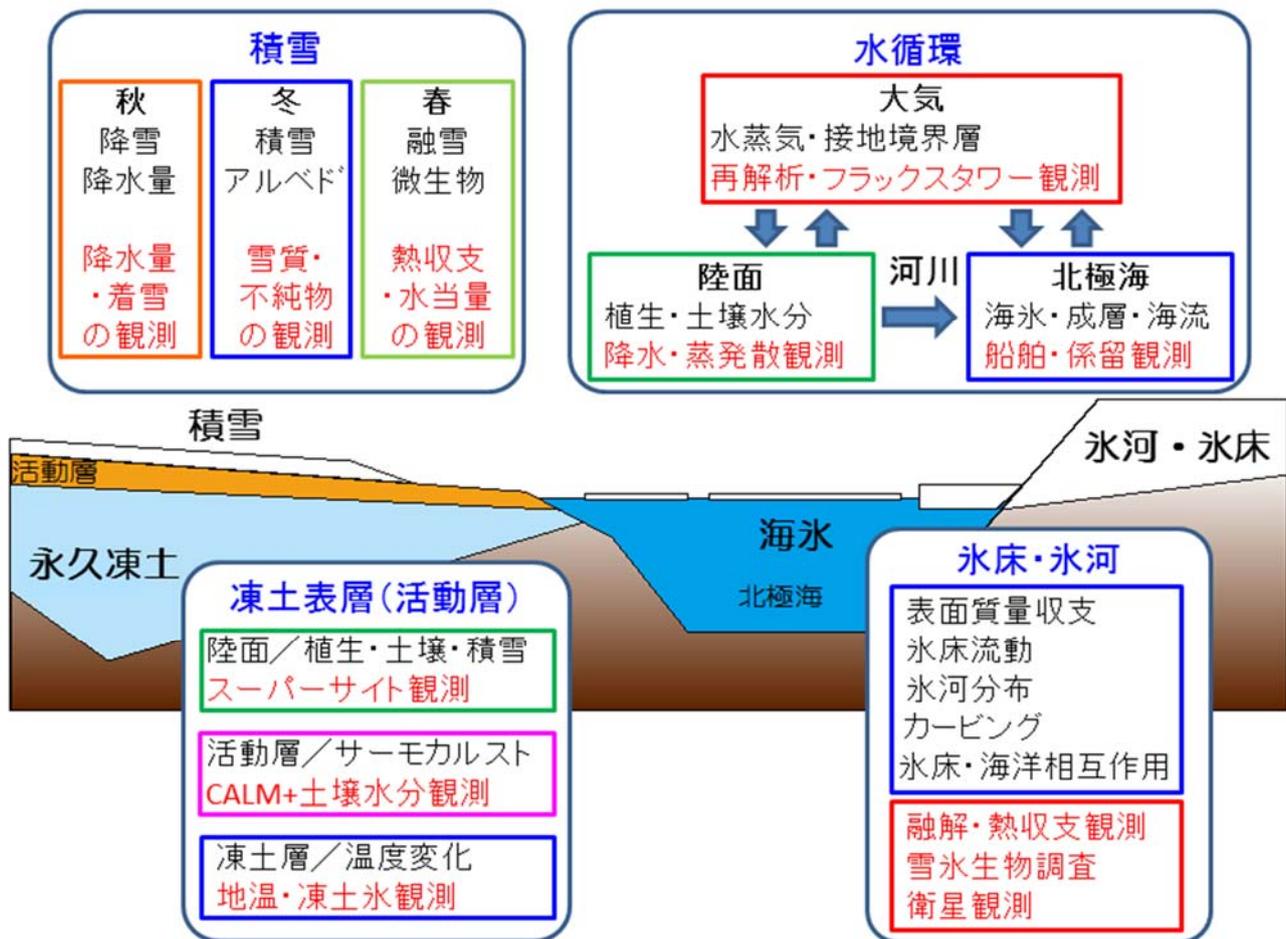


図 16 氷床・氷河、凍土(活動層)、降積雪の変動と水循環変化の研究全体像

要旨

テーマ 5 では、気候システム研究の中で注目を集め始めている北極・全球相互作用について議論する。これまでの研究においては、北極・全球相互作用に関しては、あまり関心を払われない傾向にあった。しかし、最新の研究により、北極域の大気・海洋などの循環が、他地域へ様々な面で重要な影響を及ぼしうる事が明らかになりつつある。例えば、近年、北極域の海氷減少が冬季東アジアモンスーンに与える影響についての議論が活発化しており、異常気象などの季節予測の改善に寄与する可能性がある。また、数年から数十年以上の時間スケールの気候変動(地球温暖化も含む)のメカニズムを理解するためにも、北極・全球相互作用のプロセスを理解する必要性が、様々な視点から指摘されるようになってきている。

ここでは、まず、気候システムを形成している対流圏・成層圏大気、海洋、陸域及び超高層大気のそれぞれの圏で起きている北極・全球相互作用を取り上げる。対流圏・成層圏大気の研究では、北極を取り巻く偏西風及び極渦の様々なテレコネクションパターンや気候変動モードの力学的過程の解明などが重要となる。これは、大気と他の圏(海洋、陸域、超高層大気)との相互

作用や、今世紀に予測される気候変動などを考える際に基礎的な知見を与える。

海洋分野では、大西洋・太平洋間の海水循環、深層水形成、中緯度海洋大循環などの研究が重要になると思われ、そのために、研究船等の観測インフラの整備や高解像度モデルの利用とそれによる検証が必須であろう。陸域の研究分野では、積雪の変動による広域エネルギー・水循環への影響や、植生や凍土を含む土壌の変化による炭素収支等の物質循環への影響などを定量的に評価するための研究が注目を集めている。これまでも現地観測やプロセスモデルによって精力的に研究が進められてきたが、中低緯度を含む広域での陸域プロセスの気候影響を定量的に評価するには、陸域プロセスの広域評価手法の確立も含めて、更なる基礎的な研究が必要とされている。超高層大気分野では、宇宙空間から極域へのエネルギー流入に起因する中低緯度の超高層大気変動、温室効果気体の増大に伴う超高層大気の寒冷化、及び、極域超高層大気の下層大気に及ぼす影響等の研究が重要になると思われる。超高層大気の気候システムにおける役割については、発展途上の興味深い研究テーマが様々な存在し、広域

地上観測ネットワークや複数機の人工衛星等によるグローバルかつ多角的な観測の整備や光化学過程を含めた数値モデルの利用等により、さらに理解を深化させねばならない。

次に、古くて新しい難題として我々に残されている、それぞれの圏の間に見られる相互作用(すなわち多圏相互作用; 図 17)の研究を取り上げる。対流圏大気は、その存在の物理的位置から、相互作用において重要な役割を果たす。すなわち、成層圏、または超高層大気など「上方」とも相互作用しうるし、または海洋や陸域などの「下方」とも相互作用しう

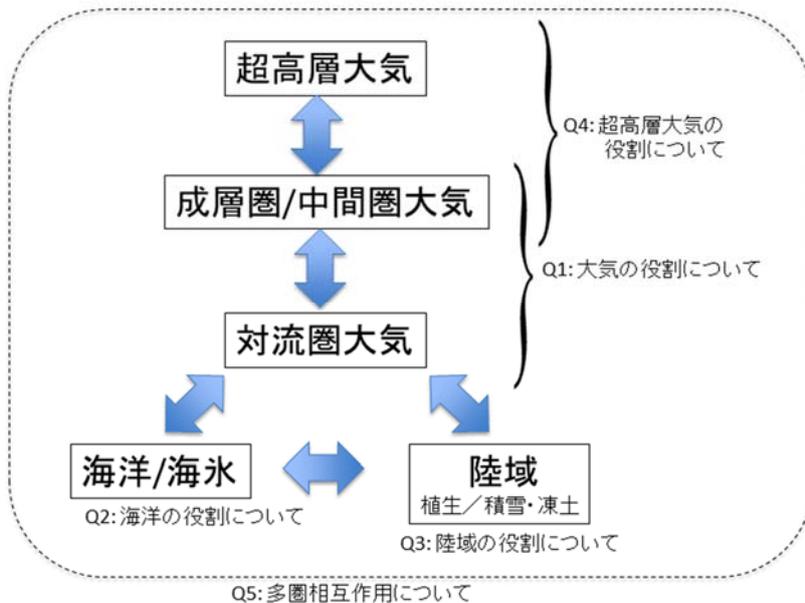


図 17 大気・海洋・陸域等の複数の圏の相互作用の模式図

るという事である。その一例として、上で例に挙げた北極海氷の減少に伴う冬季東アジアモンスーンへの影響の研究があるが、他のテーマに関しても研究のさらなる発展が期待される。

北極域の変動の影響がまず現れるのは、気候変動のシグナルが大きく現れ易い極東域などの中緯度域であり、このテーマにおける日本の研究コミュニティが果たすべき役割は大きい。実際、例に挙げた、北極海氷が大気循環に及ぼす影響の研究に関しては、日本の研究者による貢献が非常に大きいという事実がある。これらの蓄積などを基にして、我々は気候システムの中での北極気候システムの役割の理解を進めていくべきであろう。その結果として、将来の北極域のみならず全球気候予測の高度化・高精度化が達成されると考えられる。

ここでは、次の 5 つの鍵となる科学 Questions を取り上げる。

まえがき

ここでは、北極・全球相互作用について議論する。これまでの気候変動、または地球システム研究では、エルニーニョ/ラニーニャに代表されるような熱帯循環から全球への影響に注目が集まる傾向にあった。しかし、近年の北極域での急速な海氷減少や環境変化が進行するにつれて、冷源としての北極域の役割とその中低緯度への影響に注目が集まり始めている。実際、北極海の海氷減少の遠隔影響が、大気循環の変動を通じて冬季東アジアモンスーン活動に現れているとする研究が近年複数発表される等、北極と他地域の各々の

Q1: 大気の影響について：北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？

Q2: 海洋の影響について：大西洋・太平洋間の海水循環は強まるか？ 深層水形成は減るか、中緯度海洋大循環は変わるか？

Q3: 陸域の影響について：植生と凍土の変化による炭素収支や物質循環への影響は？ 積雪と植生の変動による広域エネルギー水循環への影響は？

Q4: 超高層大気の影響について：極域超高層大気が下層大気・超高層大気全球変動に及ぼす影響は？

Q5: 多圏相互作用について：超高層大気、大気、陸面積雪と植生、海洋のどれを経由する影響が大きいのか？

循環の相互作用研究が日本を中心に盛んになりつつある。このような研究は、異常気象や気候変動の解明と密接に関係する事から、学術的な関心にとどまらず、社会的な関心も高い課題であり、今後の研究の進展が期待される。以下、大気、海洋、陸域、超高層大気のそれぞれの圏における北極・全球相互作用を、科学的疑問(Q)に答える形で議論する。さらに Q5 では、各圏間で見られる相互作用を議論する。このテーマ 5 の議論が、北極と全球のそれぞれの循環の相互作用の概要を捉える研究指針の一助となる事を期待する。

Q1: <大気の影響について> 北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？

a. 研究の重要性と現状

テレコネクションパターン(「テレコネクション」と呼ぶ事もある)は、全球規模の大気循環変動に見られるある特定のパターンの事であり、北極を取り巻く偏西風及び極渦の変動モードとの解釈も可能である。以下に挙げるように、様々なテレコネクションが過去に報告されており、これらは異常気象の発生と密接に関係しているとされている。また、数年から数十年規模の気候変動にもテレコネクションが重要な役割を果たす可能性が指摘されて

おり、気候変動モードと密接な関係があるとする研究者もいる。テレコネクションのうち、北極振動⁸²(AO)、または北半球環状モード⁸³(NAM)は過去 15 年ほど最も研究者の注目を集めてきたものの一つであろう。加えて、北大西洋振動(NAO)、北太平洋・北アメリカ(PNA)パターン、西太平洋(WP)パターンなどが異常気象や気候変動との関連で注目される事が多い。また、それと関連し、対流圏・成層圏力学結合の研究も最先端の研究テーマの一つとして浮上している。それまでの常識で

⁸² 北極振動: Arctic Oscillation(AO)

⁸³ 北半球環状モード: Northern Hemisphere annular mode(NAM)

は、成層圏循環は対流圏循環から一方的に影響されるのみと思われてきたものが、逆のプロセスも注目されるようになった事は画期的であろう。一方、海氷減少や積雪変化などにより引き起こされる大気変動の研究、例えば冬季東アジアモンスーンへの影響の研究なども最近注目を集めている。

b. 今後の研究

これから必要とされる研究とはどのようなテーマが考えられるだろうか。AO、WP パターンなどのテレコネクションパターン(または気候変動モード)の力学的過程は、まだ不明な部分が多く、それらの解明が大気循環のより高度な理解や予測可能性の向上に必須である。例えば、熱帯域の海水温変動とこれらのテレコネクション(または気候変動モード)との関係という基本的な問題ですら我々は答えを持っているとは言いがたい。また、これらのテレコネクション(または気候変動モード)の研究に加え、最近注目を集めている「北極低気圧」、夏季ポーフォート高気圧、北極上のストームトラック、及び成層圏突然昇温の頻度(の将来予測)などの循環要素(素過程)の解明も重要であろう。

最近注目されている、バレンツ海などの北極海海氷の変動(減少)が、冬季東アジアモンスーンなど大気循環に与える影響についての力学的理解もまだ十全とは言えず、以下のような重要な課題が残されている。例えば、北極海海氷の減少に伴う地表付近の熱的条件の変化する領域の水平スケールは、大規模大気循環の水平スケールと比較すると相対的に狭小である事が多い。また、極域・寒冷域の下部対流圏の西風は一般的に非常に弱い。双方の条件とも、大気にロスビー波応答を引き起こすには不利な条件であるのにも関わらず、なぜ海氷変動が大規模大気循環を引き起こす事ができるのか、その力学についての解明が待たれる所である。また、対流圏下層の渦位(PV)分布など基本的と思われるテーマについても十分に調査されていない部分がある事も、海氷から大気への力学的影響の理解を妨げている可能性がある。さらに、現在気候に見られるとされる「北極海氷減少が大気循環変動(例えば、日本付近の寒冬)に繋がる」現象が、将来気候においても変化する

のか(または、しないのか)、また、変化していくとするとどの様に変化していくのか、という視点も重要な研究課題となろう。加えて、近年北部ユーラシア全域に見られがちな異常寒波や、2014年冬季の北米の異常寒波などの現象に対し、どの程度、北極域の循環変動が影響を及ぼしているのかも興味ある課題である。

上記のような海氷の影響に加え、陸域の変化が大気循環に与える影響の調査も今までそれほど注目されておらず、今後の発展が期待される。例えば、近年及び将来の暖候期の大陸上の積雪減少が、その後の北極域、低中緯度の気候にどう影響するか、もしくは熱波やブロッキング高気圧などの発生頻度に影響しうるか、などという研究課題が考えられる。

対流圏・成層圏力学結合の研究もさらに深化させる必要がある。対流圏から成層圏への影響の研究では、今まで注目されてきたロスビー波の鉛直伝播のみならず、等価順圧的な大気循環変動も惑星ロスビー波の鉛直伝播に影響を及ぼす事が明らかになりつつある。しかし、その研究は緒に就いたばかりの状況である。力学結合に関して一つキーワードとなりうるのは、「惑星ロスビー波の変調」であり、これは北極関係の研究のみならず、ENSOの中高緯度への影響や、またはその影響の「季節内シフト」(intraseasonal shift; 例えば、Fereday et al., 2008 や Ineson and Scaife, 2009 など)などの研究でも重要となろう。また、成層圏から対流圏への影響の力学過程の解明も大変重要である。そのためには、大気循環のラグランジュ的循環(物質循環)の解明が大事な要素の一つとなると思われる、それを記述できる理論の発展やモデルの開発が必要となる。加えて、成層圏よりもさらに上層の中間圏以上も考慮に入れた上下結合の解明も重要である。中間圏を考察する際に重要なのは重力波であり、その活動度及び基本場とのフィードバック研究が進展する必要がある。

北極海海氷変動の大気循環変動に与える影響の研究では、日本の研究者による貢献が大きい。これに代表されるように、日本の研究者による対流圏／成層圏大気の北極・全球相互作用に対する関心は大きいと思われる、今後とも研究の発展に日本の研究コミュニティが果たす事のできる役割は大きい。

Q2: <海洋の役割について> 大西洋・太平洋間の海水循環は強まるか？ 深層水形成は減るか？ 中緯度海洋大循環は変わるか？

a. 研究の重要性と現状

北極海から海洋を通じた全球との相互作用を考えると、北大西洋深層水の形成と循環、および、太平洋から流入し北極海の中で異なる水塊と混ざりながら大西洋に流れ出る経路が主たるものである。さらに、海洋は循環が大気の状態に大きく影響されるだけでなく、海面水温などから大気にフィードバックもするはずである。これらの要素について、将来起きる可能性にも仮説を含めて言及し、研究方針を提起する。

(1) グリーンランド海における北大西洋深層水形成

図 18 に北極海循環を模式的に示す。北極海の表層(200m 深程度まで)とその下の中層(700m 深まで)では、太平洋起源の海水に河川水を加えた低塩分水が表層(北極海面混合相)とその直下であり、中層に北大西洋から流入する高塩分水との密度差によって駆動される流速場を形成して、風応力による移動も合わせ、海水分布を決める主要要素となっている。北極海で形成した水塊が大西洋に多く流出すると、グリーンランド海における北大西洋深層水を低塩化し形成量を減らす。この変化は長い時間スケールを持つものの、大西洋ではすでに検知されており(Dickson et al., 2002)、全球海洋にも徐々に広がるであろう。

一方、北大西洋深層水に起源を持つノルウェー海深層水は、フラム海峡からナンセン海盆、アムンゼン海盆の下層に流入し、北極海下層の水質を支配する。ただし、地球化学トレーサーに基づいて推定したところ、中層の北大西洋水に加えて太平洋水の影響も示唆されてい

る。北極海下層から流出する水塊は上部北極海深層水とよばれ、ノルウェー海深層水と入れ替わる。

地球温暖化の進行に伴い、さらに海氷と低塩分水の流出およびグリーンランド氷床の融解が促進されることによって、深層水は低塩化し深層下部まで到達しなくなる。北大西洋深層水は 50 年前から低塩化しており、これが続くとグリーンランド海の下層から北極海下層にあふれ出る海水は密度が低下し、その流れも弱くなる(図 18 の青色流)。それに伴いカナダ海盆からマカロフ海盆に出てくる流れ(図 18 の黄色流)も弱くなるのが想定される。最初はその直上にある上層・中層にも大西洋から北極海に向かう流速が加わるだろうが、中層に流れ込んでいる大西洋水(図 18 の赤色流)と表層に流れ込む太平洋水(図 18 の緑色流)は北極海で滞留する傾向となり、北極海の上層・中層の密度分布とそれに伴う流れを変えてしまう可能性もある。十年以上の時間で起こる変化に関する仮説のひとつとして考えられるのは、上層・中層の密度分布の強化により、北極海・大西洋間の海水交換が増加し、下層の海水交換の役割が低下することである。この場合に大西洋水による北極海蓄熱量は増加し、一部は下層と混合するであろうが、上層と混合することも考えられる。その結果として、海氷を減少させる可能性があり、その定量化に向けた取り組みが求められる。一方で、全球海洋コンベアベルトに乗って流れる北大西洋深層水はさらに低塩化することにより、大西洋を南下する時、その上部に位置する水塊との混合が盛んになると、コンベアベルトを特徴づける水質が見つけにくくなることも考えられる。

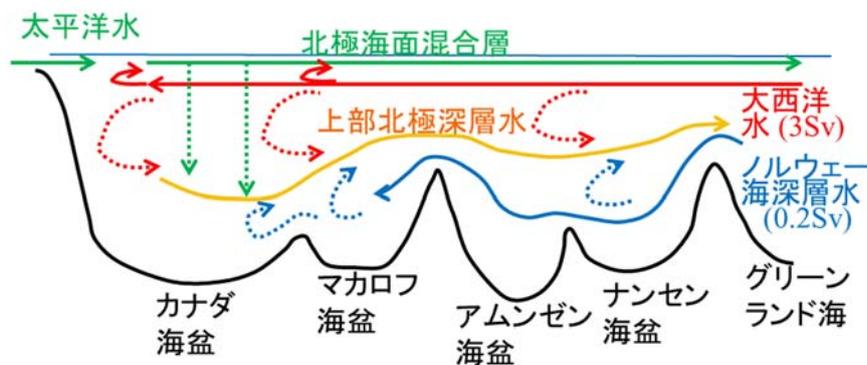


図 18 ベーリング海峡から Fram 海峡に至る断面における北極海循環。全水深は 4000m ほどであり、赤線の Atlantic Water が 300~700m を占めている。実線は明瞭な海流、点線は弱い流れと海水の混合が混在していることを示す。点線で示された海水の振る舞いが特に解明されていない。

(2) 太平洋から大西洋への海水通過

ベーリング海峡は幅わずか 85km で、北極海への太平洋水の平均流量は 0.8Sv ($1\text{ Sv}=1\times 10^6\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ 、黒潮流量の約 3%) でありながら、北極海や大西洋の気候システムにおいて重要な役割を持つ。例えば、最終氷期の急激な気候変動であるダンスガード・オシュガーサイクルは、ベーリング海峡の閉鎖に伴う北極海—太平洋間の淡水フラックスの遮断で起きることが示唆されており（例えば、Hu et al., 2012）、また、太平洋水がもつ熱量が太平洋側北極海における海水激減の主要因であることが報告されている。

この太平洋水の流入には、「太平洋・ベーリング海」と「北極海内部・大西洋」との海面力学高度差に起因する長周期変動 (Steel and Ermold, 2007) と、ベーリング海峡沿岸部における地衡流調節 (海上風に対する海の応答) に起因する短周期変動がある。主な駆動源である海面力学高度を変化させる要因には、グリーンランド氷床融解や海水流出に伴う北大西洋への莫大な淡水加入、降水量・蒸発散量の変化による各大洋の貯淡水量変動、海洋貯熱量変動、大気循環の変化が挙げられる。地球温暖化の結果として、太平洋からの流入を増加・減少させる要因が混在しており、今後の変動とその要因を解明するには、大気—海水—海洋—陸面を網羅的に扱う分野横断的な観測研究およびモデル研究が必要である。

(3) 中緯度の気候海洋大循環を介する北極へのフィードバック

北半球に現れる大気循環の変化、そしてそれが影響を及ぼす中緯度海洋の大循環を通じたフィードバックに注目する。数年から数十年の周期を持つ大気変動 (AO, PDO 太平洋十年規模振動, PNA など) が地球温暖化の進行に伴ってどのように変化するかについては、いくつかの異なる見解が示されている。例えば、AO が正に偏り (北極海上空の極渦が強まり) 中緯度域が暖冬になるとするモデル予測に対し、21 世紀に入って負になることが多いデータ解析結果も報告されている。AO のように自然変動が大きい現象については、モデルと観測データを合わせた慎重な検討が必要な段階である。さらに、このような大気循環変動は海洋循環を変動させるので、中緯度から亜寒帯に広がる海水の北上が数十年周期で変動することになり、北極海まで影響を及

ぼす可能性に留意する必要がある。

地球温暖化実験に参加したモデルの間で共通に示されているのは、今世紀後半の気圧変化として、ベーリング海上の気圧低下、および北大西洋亜寒帯域の気圧上昇である (Chapman and Walsh, 2007)。ベーリング海上の気圧低下は上記 (2) につながる。大西洋では、海面水温の上昇が陸面より遅れるため、地表面気圧は上昇傾向を示す。その結果として、メキシコ湾流の流量が増加し、高温海水が現在より北上すると予想される。しかし、今世紀後半に北極海上の大気が非常に温暖化していると、大西洋水の北上する量が増えたとしても、北極海流入水の熱的効果は増大しないであろう。また、高塩分の大西洋水がフラム海峡近くまで北上するため、大西洋・北極海の海水交換は塩分差によって駆動され続けるという仮説を立てて、今後の研究の方向性を探ることに役立つ。

b. 今後の研究

上に示した原理的な推定と将来予測モデルに準拠する仮説に対して、「水温の急激な上昇によって水温駆動循環になる」など、いくつかの異なる仮説も提案されるであろう。モデル研究はモデルの精緻化だけでなく、仮説を立て確かめることによっても発展することを考え、客観的な視点を忘れることなく大胆に進めるべきである。海洋と陸域の温暖化応答が異なることにも注目する場合は、大気と海洋だけではなく陸域の植生や積雪の表現を適切に含む地球システムモデルの利用が必須である。

現場観測による循環と水塊のモニタリングを進めるには、研究船が必須であるが、我が国は研究砕氷船を持ったことがない。それに加えて、自動昇降型流速計、自動走行型採水装置などの開発が急務である。さらに、長い時間スケールを持つ変動をモニターするには、化学トレーサーの利用も進める必要がある。

北極海・大西洋間の海洋循環のように、中深層の流動が海底地形に大きく影響される海域では、高解像度モデルの利用と検証を格段に進展させる方針を立てるべきである。また、その結果を検証するには、鉛直密度勾配を持つ海洋内部の流速分布を基本的な鉛直モードに展開するなど、海洋物理学の基礎となる理論に基づいた考察も重要である。希少データによるモデルの客観的な検証が鍵となる。

Q3: <陸域の役割について> 植生と凍土の変化による炭素収支や物質循環への影響は？ 積雪と植生の変動による広域エネルギー水循環への影響は？

北極・全球相互作用における陸域プロセスの影響は、植生や凍土を含む土壌の変化による炭素収支・物質循環の変化や、積雪・植生の変動によるエネルギー・水収支の変化が、大気の循環場や広域エネルギー・水循環を変化させ(図 19)、他地域や中低緯度の気候に影響を及ぼすことになる。従って、その影響を定量的に解明するには、地表面状態を広域的に把握するとともに、広域スケールで重要なプロセスを特定することなどが必要になる。しかし、地表面状態は水平の非一様性が大きいので、現地観測に基づく物理量の変動特性や相互作用プロセスに関する知見を広域的に定量評価すること(スケールアップ)が困難である事が大きなボトルネックとなっている。スケールアップには、(i)プロットスケール(数 10 から数 100 メートルのスケール)における観測や詳細な陸面プロセスモデルを用いた鉛直 1 次元実験によるプロセスの解明、(ii)領域スケールでの広域観測網や衛星データなどを活用した実態解明ならびに多地点・多モデルによる比較検証、(iii)領域モデルや全球モデルによる相互作用を含めた感度実験による影響調査など、多様なアプローチを組み合わせる必要がある(図 20)。

a. 植生

(1) 研究の重要性と現状

陸域植生は、CO₂の吸収・放出に伴い全球の炭素収支や物質循環に影響を及ぼし、人間活動による CO₂ 排出の吸収源(シンク)として注目されてきた。また、北半球高緯度地域では、植生活動の季節振幅が大きいことから、全球の

大気中 CO₂ 濃度の季節変動にも大きく寄与しているとされる。植生動態の広域的な分布と変動については、衛星観測によるデータが蓄積されてきており、例えば、最近数 10 年間に於いて、アラスカの北極沿岸でのバイオマスの増大傾向なども指摘されている(Tape et al., 2006)。地球温暖化予測では、寒帯林の分布域が北進しバイオマスが増大すると考えられている一方で、2050

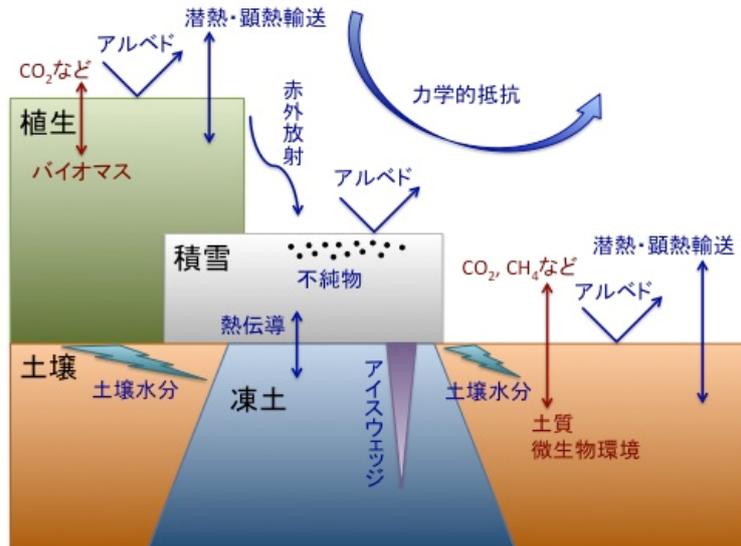


図 19 陸面プロセスが大気に及ぼす影響

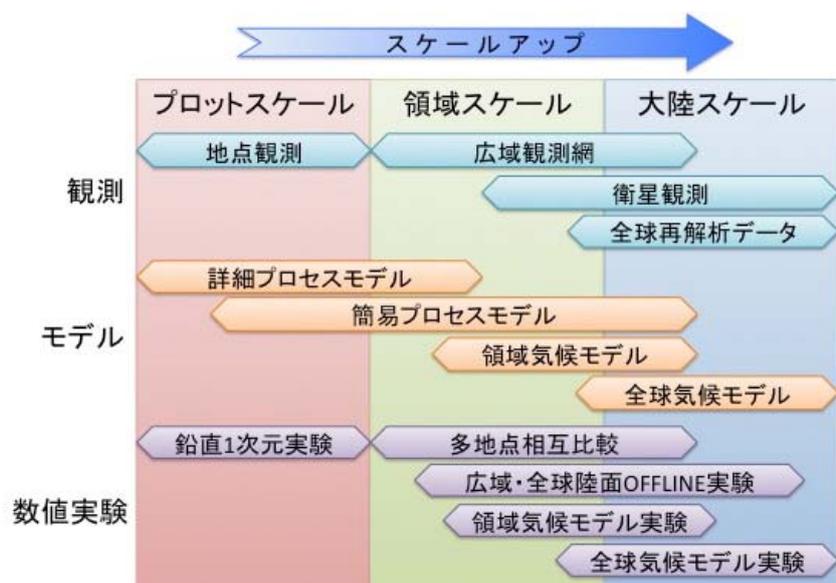


図 20 陸域プロセスのスケールアップ

年頃をピークに土壌も含めたバイオマスは頭打ちになるとする予測もあり、地域毎の変動傾向を含む定量的な評価にはまだ大きな不確実性が残っている。それ以前に、陸域において CO₂ のシンクがどこにあるのかさえ、はっきりわかっていない。

このほか、植生の変動はアルベドの変化を通じてエネルギー・水収支にも影響を及ぼすことが知られている。特に、雪面から突き出た植生によって地表面全体としてのアルベドが減少する効果は、広域エネルギー収支に大きな影響を及ぼすが、定量的な評価はまだ十分にされていない。また、植物体からの赤外放射によってその近傍の雪面の放射収支が変化したり、植生による吹きだまりの形成や融雪の促進などによって積雪深の非一様性が増大したりすることも知られている（例えば、Liston, 2004）。また、植生の力学的抵抗による大気循環への影響については、寒帯林を対象とした研究は非常に少なく、内部変動が大きい中高緯度の大気循環場に対する影響は十分に解明されていない。また、寒冷域での安定な接地境界層における顕熱・潜熱の乱流輸送に関しては、新しい観測手法や数値実験手法による実態解明の国際的な研究の取り組みがはじめられているものの、具体的な知見はまだ極めて少ない。このような植生から大気循環への影響と、大気循環から雲・降水過程を通じた植生への影響とを合わせて、植生・大気循環の相互作用について理解を進めていく必要がある。

(2) 今後の研究

植生動態のプロセス解明のために、現地観測や詳細なプロセスモデルによる研究が進められてきた。アジアや欧米では、広域観測網としての整備も進められつつあり、北極域でもそれらと協調できる観測網の整備が望まれる。植生構造（特にバイオマス）や構成種の変動に伴う炭素収支や物質循環の変動は応答時間が長く、全球の気候変動に対する北極域の生態系の役割を把握する上から、長期的な観測態勢とそのネットワーク（例えば、LTER: The Long Term Ecological Research）の構築が必要である。これらのプロセス研究の知見に基づいて、広域的な炭素収支や物質循環への影響を定量的に解明するには、広域評価で考慮すべきプロセス

の抽出と定式化、衛星観測データを用いた広域での比較検証、地球システムモデルによる相互作用を含めた影響評価が必要である。

植生による地表面アルベドの変化に関しては、衛星観測による植生分布や地表面アルベド等の広域データが蓄積されつつある中で、それらを活用して、植生と積雪の相互作用やその広域影響について、定量的な解明が進むことが望まれる。植生の地表面摩擦や乱流構造に対する力学的抵抗に関しては、安定な接地境界層のメカニズム解明を含めて、地表面付近の潜熱・顕熱輸送に関する基礎的な研究から見直す必要がある。その一つとして、乱流による輸送過程を直接計算する Large Eddy Simulation による研究 (Beare et al., 2006) が近年注目されており、その推進も有効であると考えられる。

b. 積雪・凍土

(1) 研究の重要性と現状

積雪はアルベド・フィードバック⁸⁴によって北極温暖化増幅の中心的な要因とされているほか、モンスーンシステムなどの中高緯度の広域エネルギー・水循環に影響を及ぼすことが、これまでに多くの研究で指摘されてきた（例えば、Groisman and Davies, 2001）。積雪のプロセス解明もまた、植生と同様に、現地観測や詳細なプロセスモデルによって長年進められてきた。加えて、積雪域の広域変動も衛星データの蓄積によって季節変化を含む長期変動が把握できるようになってきており（例えば、Brown et al., 2010）、全球気候モデルの検証などにも利用されるようになってきている。積雪の気候影響の鍵となるアルベドには、積雪粒径等の雪質が影響することが知られているが、積雪中の不純物濃度（黒色炭素 (Black Carbon: BC)、土壌粒子、雪氷微生物）の影響も近年注目を集めている。積雪アルベドに対する不純物濃度の効果については、現地での積雪・放射・熱・水収支の総合観測に基づくプロセス研究と並行して、衛星データによる広域的な地表面アルベドの定量評価が進められている。

積雪が大きな断熱効果を持つことはよく知られているが、それによって凍土の形成が大きな影響を受け、初冬の積雪深が夏の融解深と強い関係を持つことが、近

⁸⁴ アルベド・フィードバック：雪氷面のアルベドが植生や土壌面のアルベドよりも大幅に高いことから、寒冷化（温暖化）して雪氷面が増大（減少）するとアルベドが増大（減少）して地表面に吸収される日射が減少（増大）し、寒冷化（温暖化）がさらに進行する、という正のフィードバック。

年指摘されるようになってきた(Zhang, 2005)。凍土のプロセス研究もまた、現地観測や詳細なプロセスモデルによって進められてきているが、凍土変動の広域的な影響として、凍土の融解深がCO₂、メタン等の温室効果気体(Greenhouse gas; GHG)の放出速度に影響を及ぼすことや、植生に利用可能な土壌水分を増減させることなど、炭素収支や生態系との相互作用も注目されるようになってきている。温暖化による凍土の湿地化は、メタン発生を引き起こす可能性があり、全球気候に対する影響も懸念される。しかし、凍土の変化による水文環境や炭素収支(メタンやCO₂の放出)の変化には、土壌の物理的・化学的性質や微生物環境など、多様な条件が関係しており、広域的な影響に関する定量的な議論には大きな不確実性が残っている。

(2) 今後の研究

積雪や凍土の広域的な気候影響を定量的に明らかにしていくには、プロットスケールでのプロセス理解を広域的な振る舞いの理解へと拡張していくことが要となる。積雪域については、衛星データによって広域変動が把握できるようになってきているが、積雪変動プロセスにおいて重要な雪質や積雪深、積雪水当量などについては、マイクロ波データ等から粒径や湿雪/乾雪の区別等の推計データが幾つか出されているものの、定量的

な信頼性については今後の検証が待たれる。地表水文プロセスにおいて鍵となる表層土壌水分も、広域の分布や変動の把握が望まれており、マイクロ波データによる推定が出されているが、植生の影響の除去など、定量的な信頼性は、まだ十分とは言えない。積雪物理量(粒径、積雪深など)や表層土壌水分などについて、衛星データが検証できるような広域的な観測を展開し、衛星データの信頼性を向上するとともに、広域変動の特徴やメカニズムの解明が望まれる。

凍土の変動とそれに伴う水文環境やGHGの放出速度等の変動は、植生や微地形などの局所的な地表面状態に加えて、土質、土壌水分、アイスウェッジ、土壌微生物などの土壌条件に強く影響を受ける。土壌条件は非一様性が極めて高い上に、植生の影響を受けるため衛星観測による広域把握が難しく、地表面の凍結状態に関する推計があるのに留まっている。炭素収支においても土壌は特に不確実性の大きい部分であり、現地観測に基づくボトムアップによる推計と、大気中のGHG濃度変動に基づくトップダウンによる推計との比較による研究の進展が望まれる。土壌・凍土過程による炭素収支や水文環境への影響を明らかにしていくには、プロセスの解明、評価手法の確立を含めた広域変動特性の把握、モデルを用いた感度実験による不確実性の定量評価など、様々なアプローチが必要であろう。

Q4: <超高層大気役割について> 極域超高層大気は下層大気・超高層大気全球変動に及ぼす影響は？

a. 極域へのエネルギー流入に起因する中低緯度の超高層大気変動

(1) 研究の重要性と現状

極域超高層大気には、オーロラ現象などに伴って地球近傍の宇宙空間(磁気圏)から粒子及び電磁エネルギーが流入する。特に、磁気嵐に際して、極域電場や電気伝導度の増大による強いジュール加熱に起因して、全球的な熱圏循環の強化や大気波動の励起・伝搬が生じることが知られている。このように、極域へのエネルギー流入は中低緯度の超高層大気変動を引き起こす要因の1つであるが、定量的な理解や電離圏変動予報には至っていない。

(2) 今後の研究

広域な観測網を整備し、また、GCM(全球気候モデ

ル)シミュレーションにより、極域超高層大気は超高層大気全球変動に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。さらに、世界的には、複数機の人工衛星からの超高層大気観測が進められており、日本のコミュニティにおいても、複数機の人工衛星による超高層大気観測を実現する必要がある。テーマ10のQ4も参照のこと。

b. 温室効果気体の増大に伴う超高層大気寒冷化

(1) 研究の現状

夏季の極域中間圏に夜光雲と呼ばれる不思議な雲が出現するようになったのは、産業革命以降と言われている。夜光雲は、人間活動の影響が極域の上層大気に現れた顕著な例であると考えられる。

人工衛星軌道データを用いた超高層大気(特に上部熱圏)密度の経年変化推定、夜光雲の観測頻度や中

緯度での観測報告、数値シミュレーション等によって、下層大気(CO₂増加による)温暖化に伴って、超高層大気の寒冷化が進んでいると考えられている。下層大気では様々な大気変動現象があり、温暖化による気温上昇と他の大気変動による気温上昇とを区別することは困難である。一方、下層大気起源の大気変動は、振幅を増大させながら超高層大気へ影響を及ぼすものと考えられている。したがって、超高層大気の寒冷化を定量的に理解することは、下層大気の温暖化の程度を理解することにつながると考えられる。下層、中層の大気環境を映し出す鏡としての超高層大気役割を認識し、超高層大気の中期・長期変動について調べる事が望まれるが、中期・長期変動を議論するためのデータの蓄積が不足していることから、不確定さも多く含まれている。また、人工衛星軌道データからの超高層大気密度の経年変化推定量と、GCMシミュレーションからの推定には食い違いも見られる。

(2) 今後の研究

人工衛星軌道データの再解析など、過去のデータを再度吟味し、データ校正などを行う必要がある。観測、モデルの精度向上により、微小な寒冷化のシグナルをとらえることが望まれる。過去から現在まで継続して行われている観測を、さらに長期にわたって維持・発展させる必要がある。Q5も参照のこと。

Q5: <多圏相互作用について> 超高層大気、大気、陸面積雪と植生、海洋のどれを経由する影響が大きいのか？

ここでは、超高層大気、中層大気、下層大気、陸域、海洋/海氷等の間に見られる多圏相互作用、または、北極域と他領域の間で働くフィードバックの力学的過程や、エネルギー、水の輸送過程などに注目する研究方針を提起する。

a. はじめに:考えられる研究課題

地球上の多圏相互作用の解明には、対流圏大気と他の圏の相互作用の把握が一つの重要なテーマになると思われる。なぜなら対流圏の大気は、その下部境界としての海洋、海氷そして陸域と強く相互作用している一方、同時に上方に存在している成層圏や中間圏などの上層大気とも密接に相互作用して、その循環を形成

c. 極域超高層大気の下層大気に及ぼす影響

(1) 研究の重要性と現状

太陽プロトン現象やオーロラ現象に伴って、極域下部熱圏や中間圏では一酸化窒素(NO)が生成されることが知られている。このNOは下方へ輸送され、また、大気循環の影響により中低緯度へも広がると考えられている。輸送されたNOは上部成層圏のオゾン(O₃)破壊を引き起こすと考えられているが、どの高度でどれだけの破壊に寄与するかなど、定量的な理解は進んでいない。また、O₃減少が起こる領域の広がりも正しくは把握されていない。

(2) 今後の研究

成層圏から熱圏に至る大気領域の同時観測や、GCMシミュレーションにより、極域下部熱圏や中間圏で生成されたNOがさらに下方の大気領域に与える影響を定量的に評価することが望まれる。そのため、グローバルな観測ネットワークの構築や、人工衛星による超高層大気領域の大気微量成分、ダイナミクスを観測を実施する必要がある。さらに、精密な光化学モデルを構築し、超高層大気GCMへの組み込み、または連携した数値計算を実施する必要がある。テーマ10のQ3も参照のこと。

しているからである(図17参照)。すなわち、他の圏と比べ対流圏大気は相互作用の「相手」が多いと言える。もちろん、対流圏大気があまり関係しない相互作用(例えば海洋循環と陸域水循環の関係等)も地球システムの中で重要な役割を果たしている。これらの相互作用のテーマは近年ようやく取り上げられるようになったばかりであり、Question1~4でも一部例を挙げたような、様々な研究課題が数多く残されている。このような課題の解明は、気候システムの季節内、または数年から数十年以上の時間スケールの変動の理解をより深化させるだけでなく、季節予測などの予報精度向上にも繋がると思われ、今後の重要な研究課題となる。

最近の研究では、海氷減少がもたらす大気循環の変

動の研究に代表されるように、下部境界から対流圏大気への影響の研究が新しい方向として注目されつつあり(テーマ 5Q1 参照)、この方向性を今後さらに深化させる必要がある。その上で、逆の方向、すなわち、対流圏大気から海水、海水等の下部境界への影響の研究を併せ(例えば、Q2 参照)、海洋/海水-大気、または陸面-大気間の「相互作用」系としての描像に迫る事が重要である。

b. 大気と下部境界としての海洋・海水との相互作用

季節内の時間スケールでの、大気と下部境界との相互作用過程の解明は、季節予報の精度向上も期待できる興味深い研究テーマである。近年の研究では、例えば、バレンツ海の海水減少と冬季東アジアモンスーンとの関係の研究が注目されている(テーマ 5Q1 参照)。しかし、そのプロセス一つをとっても、低気圧経路が重要(Inoue et al., 2012)なのか、定常ロスビー波応答 - つまり偏西風の蛇行の励起 - が重要(Honda et al., 2009)なのか、未だに完全には判明していない。ましてや、他の海域の海水の大気への影響の研究はまだ緒についたばかりである。海洋(SST 偏差等)、または陸域(積雪分布等)の大気への影響の研究についても同様であり、これらの研究の進展が望まれる。

数年から数十年以上の気候変動の解明は、地球温暖化との関係もあり、今後も重要な課題であり続けられると思われるが、ここでも相互作用の解明が鍵となる。AO や NAO、PNA、PDO、AMO 北大西洋数十年規模振動等の気候変動モードの変化など興味深い研究課題が山積している。現在、または将来の気候変動が、自然変動の範疇なのかそれとも人為的な原因によってもたらされたものなのかを見極めるためにも、相互作用系の理解を含めたさらなる研究の発展が必要である。特に、上記の気候変動モードのように自然変動が大きい現象については、モデルと観測データを合わせた慎重な検討が必要である。

地球温暖化に代表されるような、数十年から数百年より長い時間スケールの気候変動の研究も重要である。例えば、Q2 で触れた Chapman and Walsh (2007) に代表されるような大気循環変動に伴う海洋循環の変動の研究や、または、その逆の影響の研究などが注目されるようになると思われる。

c. 大気と下部境界としての陸域との相互作用

陸域では、植生、積雪、凍土が相互作用しながら変動し、その結果、地表面-大気間のエネルギー水交換や物質交換などを通して、広域の気候変動に影響を及ぼしている。植生、積雪、凍土のプロセス解明は、現地観測や詳細なプロセスモデルによって着実に進められてきた。それらの広域的な変動を定量的に把握することが広域の気候変動への影響評価に必要なステップになる。植生分布や積雪域など一部の物理量については衛星データが蓄積されつつあり、広域変動の定量評価にも利用されている。しかし、広域評価の手法確立を含めた基礎的な研究が必要な物理量(土壌水分や土壌条件など)もある。また、個々のプロセスの役割をスケールアップして広域的な定量評価に繋げることが今後の課題である。

d. 対流圏、成層圏、中間圏、熱圏大気の相互作用

対流圏・成層圏力学結合や、または中間圏・熱圏大気とそれよりも下層の大気との上下結合の研究もまだ緒に就いたばかりである。Question1 で触れたような、対流圏/成層圏間の双方向の影響の理解や、ロスビー波と重力波双方の活動とその基本場への影響を考慮した研究、さらに Question4 で触れたような大気微量成分の輸送の正確な把握のための研究などが重要である。さらに、成層圏突然昇温に起因する中間圏・熱圏大気変動が、観測的にも GCM シミュレーションからも明らかになってきた。成層圏から中間圏・熱圏大気までの変動を引き起こす物理機構の解明などの研究テーマに関し今後の進展が期待される。

e. 陸起源物質の海洋流出に伴う水・物質循環の役割

以上では、大気に関係する相互作用に関し記述してきたが、大気を介さずに陸圏と海洋圏が直接持つ相互作用の研究も大きな課題となる。具体的には、気候システムにおける陸起源物質の海洋流出を介した水・物質循環の役割の解明などが、今後の大きなテーマになると思われる。河川などを通じた陸からの物質流出は、海洋の生物生産に大きな影響を与える(テーマ 3、9 参照)。栄養塩はもちろんのこと、金属元素も重要な役割を持っている。北太平洋亜寒帯域のように栄養塩は十分だが鉄が不足しているところでは、微量とは言え、鉄が河川および大気を経由して海域に入ることによって生産性を高める。鉄は溶存鉄として陸域に存在しており、その

形態は水環境や植生などに依存する。森林とその周辺の河川では、鉄と錯体を形成する溶存有機物が多量に存在するため溶存鉄が多く、河川から海洋に入ると植物プランクトンに利用される。しかし、自然環境であるか人為的な開発であるかにかかわらず、森林がない土壌から流出する鉄は海洋に入ってからすぐに粒状鉄として沈降してしまうので、生物に利用されない。気候変動により中緯度で特定の陸域の降水量が減ると、鉄化合物の形態が変わり、海洋生態系に影響を及ぼす可能性がある。

ルに大気変動パターン、それに影響される水循環、そして植生分布までを含めることにより、物質循環への影響も調査する事が重要である。

f. 北極域に影響を及ぼす領域の淡水収支

テーマ 4 で水循環を記述し、北極海の淡水収支を取り上げている。また、テーマ 2 では北極海上層の海氷・海洋結合システムの状況を詳しく説明している。テーマ 1 は北極域のエネルギー輸送に注目するものの、それに伴う水循環の仕組みも示している。本テーマでは、これらの取り組みと連携し、北極域河川の流域における正味降水量(降水から蒸発を差し引く)を推定するために、大気中の水蒸気輸送を精査すること、そして北極海と太平洋、大西洋の間の淡水輸送を解明する研究に力を注ぐ。北極域とつながる地域にも目を向け、大気中の水蒸気輸送と比較検討する対象として、北太平洋と北大西洋の正味降水量の調査研究を進める。その際に注目するのは、大気循環パターンの経年変動であり、Q1 に示した研究の焦点を踏まえることが基本となる。また、両大洋の亜熱帯、亜寒帯まで含めた塩分輸送の調査と解明を進める活動に際しては、全球海洋コンペアベルトのメカニズムにも注目した研究に取り組む。

g. 全体を通じた研究方針

上記の議論をふまえると、今後の研究方針は以下の通りとなる。まず、大気海洋結合系、大気陸面結合系などの多圏相互作用の振る舞いを解明することが、大きな軸となる。その解明なしには、例えば、南北熱水輸送の定量化等の課題に取り組む事は困難であると考えられる。AOMIP⁸⁵などのプロジェクトは、これらの問題の解明に大きな役割を果たしう。相互作用研究には、地球システムモデルの利用が重要な役割を果たすが、さらに、データ同化の適用によって、データ誤差も的確に考慮して各要素モデルを検証する。地球システムモデ

⁸⁵ AOMIP: Arctic Ocean Model intercomparison Project

テーマ 6: 古環境から探る北極環境の将来

要旨

北極域の温暖化が氷床や海氷、凍土、植生、大気エアロゾル等を与える影響や、それらによるフィードバックが注目されているが(図 21 参照)、変動の時間スケールが万年以上におよぶ北極気候システムの全容を理解することは、現在や近代的観測データのある過去百数十年を対象とした研究のみでは不可能である。過去数千万年には、大気中 CO₂ 濃度が現在よりはるかに高く氷床が存在しなかった時代や、北極気温・氷床が地球軌道要素に伴って周期的に大きく変動した氷期-間氷期サイクルなどがあり、それらの研究を通じて北極気候システムを解明し数値モデルを検証することができる。ここでは、モデルとデータの連携により北極古環境の復元とメカニズムの理解を目指すため、5つの Questions を挙げた。

- Q1: 過去の北極温暖化増幅は現在とどれほど異なり、その要因は何か?
- Q2: 過去のグリーンランド及び大陸の氷床はどう変動

し、その要因は何か?

- Q3: 過去の北極海の環境はどのようなものであったか(特に、海氷と生物生産について)?
- Q4: 過去の北極陸域環境は現在とどれほど異なり、大気組成や気候とどう関係したのか?
- Q5: 過去の北極における数年~数百年スケールの自然変動は現在と異なっていたか?

研究手法としては、データについてはアイスコア(氷床や氷河を鉛直に掘り出した柱状の氷)や海底コアの採取と分析、陸上および海底の地形地質調査などであり、モデルについては気候と氷床、植生、固体地球等の多要素を結合した地球システムモデルの開発と長期間・多数のシミュレーションである。過去に起こった温暖期の環境を復元し理解することが特に重要だが、氷期や退氷期に繰り返された突然の気候変動や、数年から数百年スケールの自然変動など、気候システムの不安定性や変動性に関する研究も重要である。

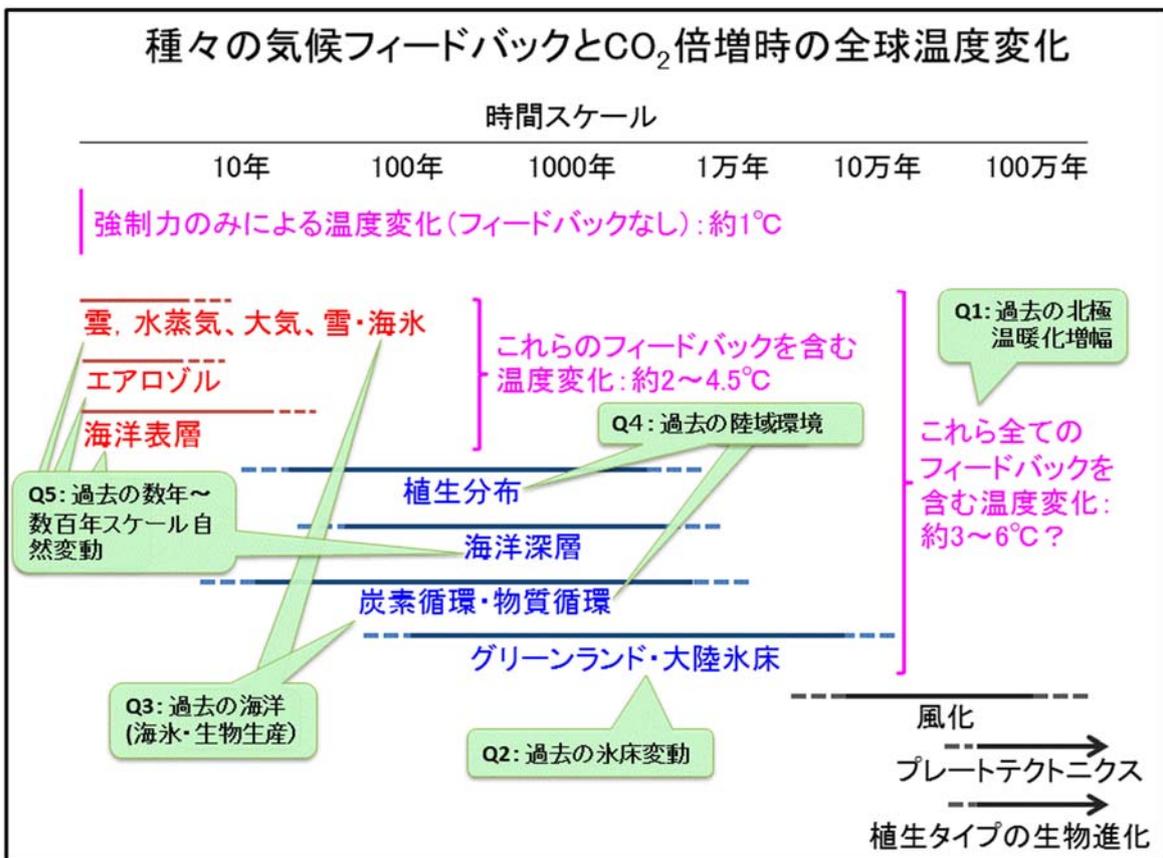


図 21 種々の気候フィードバックと、それらによる CO₂ 倍増時の全球温度変化。各気候要素の時間スケールや、各設問と気候要素との主な対応関係も示す。

はじめに

地球大気の CO₂ 濃度は時代により大きく異なり、約 5500 万年前には 800 ppm 以上の高値であった(表 1)。温室効果により地球表面気温は高く、北極海の水温は 18°C 以上、亜熱帯性シダ類の繁茂した時代もあった。さらに時代が下り、鮮新世では CO₂ 濃度は 330 ppm 以上あり、カナダ北極諸島に巨木の森林が広がっていた。12.5 万年前の最終間氷期や 1 万年前の前期完新世には高い夏季日射を反映して北極域のツンドラは消失し、タイガ林が北極海に面して広がっていた。他方、繰り返し起きた氷期には、北極域の広い範囲で氷床が成長し、北極海は棚氷と海氷に覆われた。CO₂ 濃度や日射量の違いは地球全体の気候に影響を及ぼしたと考えられるが、北極域の変化はどこよりも大きかった。

現在、北極域の温暖化が進行中である。北極域には温度変化に対して敏感な海氷、凍土、ツンドラ植生などが広範囲にひろがり、その気候変化の増幅に果たす役割が注目されている。この役割を明らかにするうえで、過去の北極域の環境を復元し、CO₂ 濃度や日射量と環境条件の関係を明らかにしてゆくことは、重要なアプローチになりうる。

古環境研究は、過去の気候、環境を復元し、その変動メカニズムを明らかにすることを目的としている。海底、陸上、氷床に含まれる物質を様々な手法により分析し、年代を与え、環境変遷を間接的に復元、解釈する(p76、ボックス 1 参照)。また、メカニズムを明らかにするためのコンピューターシミュレーション(数値モデリング)も進展してきた。古環境研究は、過去の現象に関する知見を与えるだけでなく、気候モデルの検証や高度化など、将来予測に関する意義も大きい。とりわけ、氷床や植生、炭素循環など、変動の時間スケールが数年

から数万年までと極めて幅が広い要素の変動を復元し、そのメカニズムを理解することは、たかだか 100 年程度を対象とした現在気候の研究では不可能である。そのため、気候科学が社会的要請に応えるためにも、古環境研究は重要である。こうした北極域での古環境研究の進展には、1990 年代に始まった地球圏-生物圏国際協同研究計画(IGBP)傘下の古環境変遷研究計画(PAGES)による推進力が寄与している。日本においても、PAGES の設立当初から日本学術会議 IGBP 分科会 PAGES 小委員会により大きな貢献を行ってきた。また、多くの国際研究プロジェクトに国内のコミュニティや個人が貢献してきた(アイスコア掘削研究、北極海海底掘削、古気候モデル比較など)。

北極域における気候変動や気候感度の特徴について、古気候データとモデリングの両面による研究が進められており、IPCC 評価報告書でも多くの紙面が割かれている。過去数千万年の間には、現在より明らかに高温であった時代や、気候モデルの検証に利用できるイベントは豊富にある。とりわけ、今後加速しうる北極の温暖化やその影響の理解を深めるには、過去に起こった温暖期の理解を深めることが重要である(表 1)。例えば、大気中 CO₂ 濃度が現在より有意に高く氷床が存在しなかった時代や、北極気温や氷床が周期的に大きく変動した氷期-間氷期サイクルの中の間氷期がある。また、氷期や退氷期における氷床変動や突然の気候変動などは、将来起こりうる気候システムの不安定性の発現に関する知見を与えるため、これらの時代も重要である。最近の 1000 年間にも温暖期があり、年々から数十年スケールの気候や温室効果気体の復元に加え、太陽活動や火山活動の復元、全球気候モデルによる再

表 1 北極古環境復元の温暖期ターゲット

時代	年代	CO ₂ 濃度	日射	北半球高緯度域気温
暁新世末期	5500 年前	800-2000 ppm	現在と同じかより高い	現在より 18-35°C 高い
鮮新世温暖期	350 万年前	330-380 ppm	現在と同じかより高い	現在より 11-16°C 高い
間氷期	40 万年前、 12.5 万年前など	270-280 ppm	現在より高い	現在より 5°C 高い
前期完新世	1 万年前	270 ppm	現在より高い	現在より 2°C 高い
中世温暖期	1000 年前	280 ppm	現在とほぼ同じ	現在より 0-5°C 高い

現実験も活発に行われるようになってきた。

しかし、定量的かつ空間的に密な古環境復元や、古環境データとモデルとの連携には、まだ課題も多く残さ

れている。以下では、北極古環境に関する主要な問いを挙げ、研究の現状と課題を整理する。

Q1: 過去の北極温暖化増幅は現在とどれほど異なり、その要因は何か？

a. 研究の重要性と現状

数千万年間にわたる長期の気候の変遷をみると、大気中 CO₂ 濃度の高い時代には気温や海水温が高く、CO₂ 濃度が低下するにつれて氷床が出現し発達してきたことが分かる。北半球氷床の拡大とともに、夏の日射量の変動ともなう氷期-間氷期サイクルが発現

し、その振幅が拡大してきた。この間の気候変動の要因は様々であるが、現在までに得られているデータから、いずれの場合にも極域気温増幅が存在していたことが分かっている(図 22)。

ロモノソフ海嶺で 2004 年に行われ、日本も参加した北極海掘削計画⁸⁶により、北極点近傍において過去

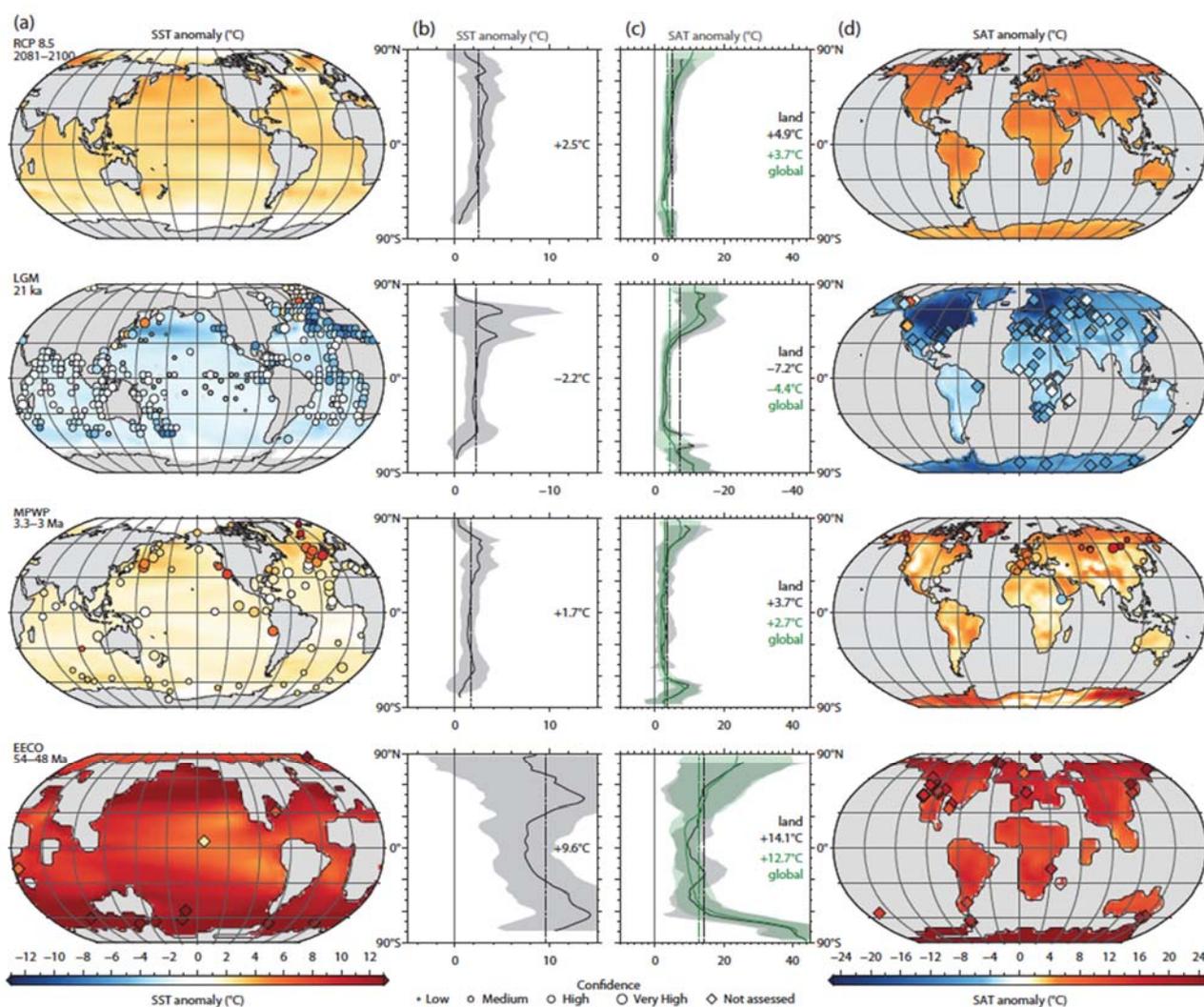


図 22 始新世(Eocene)、鮮新世(Pliocene)、最終氷期最盛期(LGM)の気温(SAT)と水温分布(SST)のデータ-モデル比較 (IPCC AR5 Box 5.1, Fig. 1, Comparison of data and multi-model mean (MMM) simulations, for four periods of time, showing (a) sea surface temperature (SST) anomalies, (b) zonally averaged SST anomalies, (c) zonally averaged global (green) and land (grey) surface air temperature (SAT) anomalies and (d) land SAT anomalies. The time periods are 2081-2100 for the Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 (top row), Last Glacial Maximum (LGM, second row), mid-Pliocene Warm Period (MPWP, third row) and Early Eocene Climatic Optimum (EECO, bottom row).)

⁸⁶ 北極海掘削計画: Arctic Coring Expedition(ACEX)

5500 万年前に遡る記録が得られた (Moran et al., 2006)。堆積物の有機化合物の分析により、北極海の水温が 5500 万年前の暁新世・始新世境界前後では 18°C であり、温室効果気体が短時間に放出された境界温暖極大期では 24°C に達したことが示された。この約 5000 万年前の始新世前期温暖期と、約 350 万年前の鮮新世中期温暖期の 2 つの時代では、日本を含む 5 つ以上の研究グループによって、モデルとデータの比較が行われた。その結果、低緯度では、モデルはデータに比べて気温を過大評価し、極域では逆に過小評価していることがわかってきた。特に、極域における不一致については、データとモデルの双方に課題があることがわかってきた。データについては、代理指標から海水面温度への較正曲線を季節によって変更する必要性が指摘されている。一方、モデルについては、極域の雲の放射過程や、海洋による熱輸送過程の妥当性を精査する必要がある。また、陸上植生についてもデータとモデルの整合性を精査する必要がある。

過去 100 万年間の氷期-間氷期サイクルの中の間氷期は、グリーンランド以外の北半球氷床が消失した時期である。最近 5 回の間氷期の中には、現在より温暖かつ 10~20m も海面が高い時期もあったが、CO₂ 濃度は 280±10 ppm 程度と同程度であり、放射強制の主な違いは軌道要素の変動による日射の分布の違いによる。

例えば、最終間氷期における北半球の夏至の日射量は 126,000 年前に最大となったが、その値は完新世の最大値より 1 割程度も大きかった。この時期には、特に北半球陸域で現在より気温が高く、森林が北上し、海面が現在より 5~10 m 高かった (氷床が縮小していた) ことを示す証拠が見つかった。また、中部北極海が季節氷域であった証拠があり、夏季気温が現在よりも高かったと推察される。日本が掘削と解析に参加した最新の国際氷床コア掘削プロジェクト (NEEM 計画) の成果によると、グリーンランド内陸北西部の年平均気温は現在より 8±4 °C も高かったと推定されている (NEEM project members, 2013)。

最終間氷期について、日本を含む 16 の気候モデルが参加した国際データ-モデル比較プロジェクトが行われ (IPCC AR5 の図 10.9)、日射と大気組成などの時間変化を考慮した実験も 7 つのモデルにより行われた。その結果、海面水温にはデータとモデルの結果に有意な差がないが、12 月~2 月の陸上気温には有意な差があるため、気候モデルの結果は高緯度の陸上における年平均気温の復元データを大幅に下回っていることが

明らかになった。このようなデータとモデルの食い違いの要因として、モデルの雲や海氷、植生などのプロセスの表現が不十分な点や、海水の縮小による水蒸気源の移動が氷床コア同位体による気温復元に考慮されていない点などが挙げられている。

現在の間氷期 (完新世) における北極域は、大陸氷床が最後まで残った北米大陸の一部地域を除いて前期に暖かかった。これは、夏季日射量が現在より大きく、海氷などの雪氷圏に影響したためであると考えられる。過去 2000 年間の北半球の気候変動は、西暦 950~1250 年頃の中世温暖期と、1450~1850 年頃の氷期で特徴づけられ、北極域の変動幅は北半球平均と比較して顕著に大きかった。過去 2000 年については、温室効果気体や太陽放射、火山といった主な放射強制力が時間的に密に復元されている。それらを入力データとして、大循環モデルによる時間発展型の数値実験が可能になっており、日本も参加中の古気候モデル比較プロジェクトが国際的に推進されている。北半球平均気温においては、気候モデルの結果は、復元データの不確実性の範囲に入っているが、北極域におけるモデル間やデータとモデル間の整合性は低い。また、放射強制力や気候復元データの不確実性も大きいと、北極における気候感度を強く制約することは現時点では難しく、今後の大きな課題とされている。

b. 今後の研究

堆積物やアイスコアにより、過去の気温や水温の復元が進められてきており、気候モデルによる再現実験も増加してきている。しかし、代理指標データから温度に換算する過程で生じる誤差や、気候モデルにおいては氷床・気候間の相互作用を考慮しないなど、発展途上の段階にある。また、古気候情報を用いた気候感度の推定研究は存在するが、北極に着目した研究例は少ない。極域気温増幅や、氷床による海水準変化について定量的復元と要因分析を行うため、古環境 (温室効果気体、エアロゾル、氷床、海洋海氷等) に関する代理指標データの取得と、地球システムモデリングによる古環境再現実験との連携が不可欠である。

これまで多くの古気候時代断面について、データとモデルの比較を行ってきており、それらを通じて見えて来た課題が多々ある。データについての課題は、代理指標から温度への較正曲線の季節依存性や気候依存性の考慮をしつつ、新生代の北極海海底コアやグリーンランド氷床コアのデータ不足期のサンプル取得と分析増

強である。一方、モデルについての課題は、特に極域の雲－エアロゾルの放射過程や、海洋－海氷による熱輸送過程や成層形成過程の妥当性、そして植生や陸面／氷床表面過程と言った素過程の精査と気候モデルへの反映である。これらのデータとモデル双方の改良と時代毎の比較を繰り返して行くことが不可欠である。

放射強制力と気候の関係を示す古気候データを解釈する際には、氷床を初めとする雪氷圏や植生による気温へのフィードバックを考慮することが、不可欠である。温暖化に対する氷床や植生の反応は、数百年、数千年と長期に及び、その北極気温増幅や全球平均気温への影響も長期間持続する。このような長時間スケールのフィードバックも含めた(CO₂濃度増加に対する)温度変化は、「地球システム気候感度」と呼ばれ、短い時間スケールの気候フィードバックのみを考慮した「気候感度」⁸⁷より大きな値を取る(図 21)。気候モデルと古気候データの比較に基づく研究によると、地球システム気

候感度が気候感度の 2 倍に達する時期もあり、その値は気候状態によって異なる (PALEOSENSE Project Members, 2012)。今後、長期の古気候情報を将来予測に定量的に役立てる際には、地球システム全体を考慮にいたした気候モデリングと古気候指標による統合的研究が必要である。特に、気候モデルのパラメータや構造、境界条件など全ての不確実性を考慮したモデル再現性の評価が重要となる。そのためには、過去の境界条件の精緻な把握や、多くの時代を対象として気候モデルによる再現実験、そのための計算資源の確保が不可欠である。多点かつ長期にわたる試料の取得(氷床・氷河コア、孔温度、海底堆積物、凍土試料など)や、プロキシ・分析手法開発、それらを駆使した大量かつ高分解能のデータ取得、プロキシデータ同化による解釈などが必要である。また、古環境と現在をつなげるために、西暦 2000 年代以降をカバーする環北極古環境アーカイブの取得も必要である。

Q2: 過去のグリーンランド及び大陸の氷床はどう変動し、その要因は何か？ 気候変動との関係と海面水位への寄与は？

a. 研究の重要性と現状

(1) 氷床変動メカニズムと将来予測

氷床の盛衰は、海水準や大気・海洋循環等の変化を通じて地球環境に大きな影響を与える(テーマ 4 参照)。気候変化に対する氷床の応答は、気温上昇と低下について異なる「しきい値」があり、それらを超えると大きく形状や体積が変化するヒステリシス構造を示す。氷期－間氷期サイクルの数値シミュレーションから、温暖化による急激な氷床後退の推定には、氷床ごとに異なるヒステリシス構造を解明し、モデルで再現することが極めて重要であると分かった (Abe-Ouchi et al., 2013)。また、氷床の応答時間スケールは非常に長いため、過去の気候変化が数百年以上にわたって影響を及ぼす懸念がある。実際、国際モデル比較 SeaRISE (Bindschadler et al., 2013)から、過去 13 万年の気候変動への氷床応答の履歴の考慮の有無が、今後 100 年の氷床体積変化の推定に 40%もの違いを生む可能性が示された。

将来の氷床変化を正確に制約するには、過去実際に起こった氷床変動の様相や駆動要因を明らかにし、

モデルによる再現を高度化することを通じて、外部強制力に対する氷床応答の不確実性を低減することが重要である。特に、過去から将来を通じて、氷床の消滅をもたらす気候や CO₂濃度のしきい値を正確に把握することが不可欠であり、そのためにはヒステリシス構造の把握につながる古気候の数値実験とデータが今後必要である。

(2) 過去の氷床分布の復元

陸上や海底に残された地形・地質学的証拠(氷河浸食地形など)や、氷床の痕跡の調査から、過去の氷床の縁辺位置と年代を特定することで、氷床の拡大範囲を復元できる。氷床が縮小していた間氷期については、海底堆積物コアと陸上地質分布との対応関係に基づいて氷床分布を推定できる。氷床体積の復元には、世界各地の相対海面高度データから氷河性地殻均衡モデル⁸⁸を用いてインバース法によって求める方法が主流である(テーマ 11 参照)。

また、北極海では、氷期の海面低下により大陸棚が露出し氷床で覆われていた時期もあり、水深 1000 m ま

⁸⁷ 気候感度: 海洋表層や雲、水蒸気の変化など、全体の応答が数十年程度で完結するフィードバックのみを考慮した温度変化。通常は、CO₂濃度を 2 倍にしたときの地球平均地上気温変化を指す。

⁸⁸ 氷河性地殻均衡モデル: Glacial Isostatic Adjustment (GIA) モデル

での海底に、過去の氷山による侵食痕や氷河性の線状構造、氷河運搬物質による堆積地形などが存在することが分かっている。ロモノソフ海嶺とチュクチ海周辺での調査により、氷塊が大陸から中部北極海に広がっていたことや、東シベリア海の大陸棚上に氷床が存在した可能性も指摘されているが、証拠は断片的である。これらの氷床分布を気候-氷床モデルにより再現し、氷床変動プロセスの理解につなげようとする研究が盛んに進められつつある。

(3) 過去のグリーンランド氷床

約 300 万年前に始まったグリーンランド氷床の拡大と CO₂ との関係や、氷期-間氷期における北半球氷床（北米やユーラシア西部、グリーンランドの氷床）の軌道要素や CO₂ に対する応答について調べられつつある。特に、現在より海面が 5~10m 高かった 12.5 万年前の最終間氷期や、2 万年前の最終氷期最盛期から現在にかけての氷床融解の時代は、氷床分布や体積、変動要因となる気候状態を復元するための記録が比較的多く得られ、気候-氷床結合モデルによる再現も始まっている。

日本も参加したグリーンランドのアイスコア掘削・解析や、南部の海底堆積物コアの解析によれば、最終間氷期の NEEM 地点(図 23 の"NE")の気温は、現在より 8±4℃も高く表面融解が多発していたが、氷床縮小量は海面換算でたかだか約 2m 以下と見積もられた (NEEM community members, 2013)。氷床モデルによる再現はモデル間の相違が大きく(図 23)、それら

の優劣を判定するためのデータも不足している。一方、約 40 万年前の間氷期には、夏の日射は弱かったにもかかわらず海面が現在より 10~20m 高く、グリーンランド氷床が大きく後退し植生が存在したことが、アイスコア解析から示唆されている。モデルでの再現は成功しておらず、氷床後退の要因は謎である。

最終氷期のグリーンランド氷床は大陸棚まで拡大したと考えられているが、海底探査による証拠は南部の一部に限られており、陸上の証拠も断片的である。氷床後退期の旧汀線高度データに大きな誤差が含まれている可能性が示されており、データとモデルで整合的な結果は得られていない。

b. 今後の研究

今後、モデルとデータの連携により解決すべき問題としては、下記が挙げられる。

- 過去のグリーンランド氷床の拡大と後退、しきい値決定メカニズムの把握。
- 約 100 万年前の北半球氷床の卓越周期の変化(10 万年周期から)の解明
- 北極海周辺の氷床はいつどのようなプロセスで存在したか。
- 40 万年前の間氷期の海面はなぜ著しく高く、グリーンランド氷床は大きく後退したか。
- 氷期サイクル、退氷期の北半球氷床およびグリーンランド氷床の詳細再現、しきい値把握。
- 氷期における氷山大規模流出イベントの発生条件と周期、規模の決定メカニズムの把握と再現。

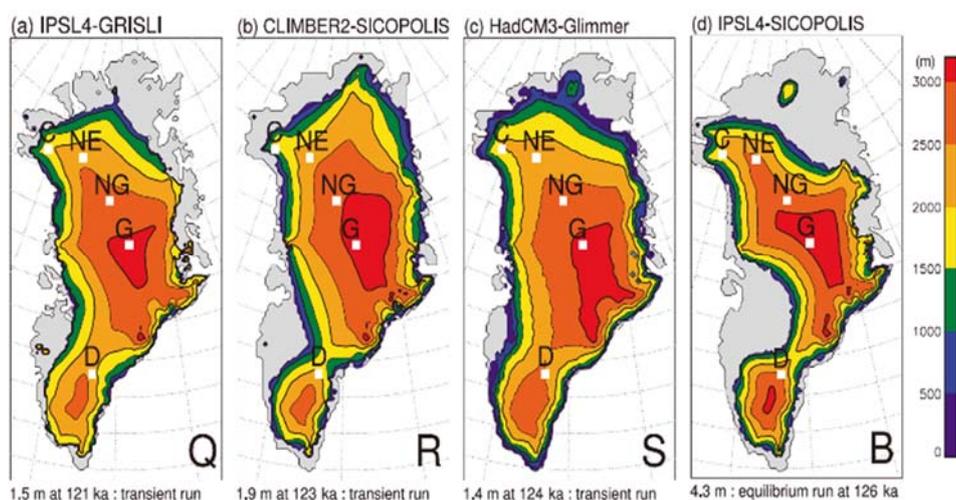


図 23 最新の氷床モデルで計算された最終間氷期のグリーンランド氷床の分布 (IPCC AR5, Figure 5.16, Simulated GIS elevation at the Last Interglacial (LIG) in transient (Q, R, S) and constant-forcing experiments (B).)

(1) 氷床－気候モデル

過去の氷床の謎を解き明かすには、日射や温室効果気体といった外部強制力に対する気候と氷床の非定常応答を、氷床－気候結合モデルによる数値実験で再現し、データとの比較検証を通じてメカニズムを理解する必要がある。モデルの高度化の課題は、(1)氷床と海洋との相互作用、(2)底面プロセス、(3)大気－表面質量収支プロセス、(4)氷床－固体地球相互作用の高度化、(5)モデルの高解像度化などである。また、氷床モデルを他のモデル(大気、海洋、GIA、植生等)と直接／間接に工夫して結合する必要がある。古気候データを活かした実験のため、膨大な計算機資源と基盤整備が必要である。

(2) 地形地質調査を軸とした氷床分布の復元

過去の間氷期の海底堆積物と陸上地質との対応関係を、氷床が存在したと考えられる地域(特にグリーンランド)の大陸棚において、多点で精査する必要がある。陸上に残された氷床縮小の痕跡を調査し、氷床末端位置や氷床底環境、隆起海浜地形などを広域かつ詳細に復元する必要がある。最近では、衛星観測による重力場の時間変化と GIA モデル計算による氷床変動が議論されており、現在の氷床変動の成分との分離が課題である。詳細な海水荷重の GIA モデル化には、海水準変動に対する地球回転変動の効果の導入、地球内部粘性構造の考慮、測地データと氷床モデルの密接な連携が不可欠である。

Q3: 過去の北極海の環境はどのようなものであったか。とくに海氷と生物生産について

a. 研究の現状

北極の気候を理解するうえで、海氷アルベド・フィードバックを評価することが重要であり、このためには、過去の海氷分布を正確に知ることが必要である。過去の氷床の分布が過去の北半球の大気循環に及ぼす影響は、気候モデルにより検討が行われてきたが、海氷が及ぼす影響については検討が少ない。これは、過去の海氷分布が詳細には明らかにされていないためである。海氷プロキシをさらに洗練し、多数の地点で冬季と夏季の海氷縁の分布を復元することにより、冬季と夏季の大気循環を規定している海面上の条件を明らかにすることが必要である。

海洋堆積物の漂流岩屑(IRD)、粒度分布、酸化鉄

さらに、長期の氷床縁位置と後退過程の復元には、シベリアの大陸棚および大陸斜面での砕氷船による海底調査とマルチビーム地形データ解析が重要である。また、氷河地形の形成時期を押さえるため、海底堆積物コアを採取し層序対比を行う必要がある。未だ知られていない氷床範囲など北半球氷床発達史の新知見をもたらし、古気候モデリングの検証にとっても価値が高いであろう。

(3) アイスコア

グリーンランド氷床の変動史を明らかにしていくためには、選ばれた地点における深層掘削および多点における浅層掘削の両方が必要である。特に、大規模かつ速い流れを持つ北東部の氷流や、最終間氷期から現在にかけての連続気候記録、氷床底部氷の解析による氷床被覆開始の年代同定などが重要であり、日本としてもこれまで同様に今後の国際掘削計画への積極的参加が必要である。

氷床と気温の変動をアイスコアから精度よく見積もるには、水同位体データの正確な解釈が欠かせず、そのためには氷床変動・流動変動の考慮が不可欠である。同時に、氷床変動の精度よい復元には、復元される古環境の情報が重要な要素であり、お互いに依存している。同化手法等を用いてそれぞれの最適な再現を目指すことが今後重要である。そのためにも、グリーンランド氷床や環北極氷帽・氷河の多点における浅層・中層掘削を展開して行く必要がある。

粒子、微化石(珪藻、渦鞭毛藻、底生有孔虫、珪質鞭毛藻)、バイオマーカー(特に、IP25)、カルサイト酸素同位体比、希ガス、水銀同位体比から海氷の広がりを復元することが試みられている。また、北極海の沿岸の堆積物、流木化石、鯨化石、貝化石、波による侵食地形も海氷の分布に関する情報を提供する。さらに、陸上堆積物から得られる陸上植生に関する記録や、アイスコア記録から海水分布を間接的に推測することも行われている。アイスコアは、高時間分解能の解析が可能であり、氷の酸素同位体比、ナトリウムイオン濃度、メタンスルホン酸濃度、ハロゲン濃度を用いた海氷プロキシが提案されている。

ロモノソフ海嶺で 2004 年に行われた深海底掘削

IODP ACEX により、北極点近傍において過去 5500 万年前に遡る海氷記録が得られた(図 24 にとりまとめ、Moran et al., 2006)。IRD の出現から、海氷の形成は 4700 万年前前後に始まったことが明らかになった。1600 万年前から 1300 万年前にかけて多年氷が形成された。300 万年前以降の寒冷化に同調して、北太平洋、北大西洋、ノルウェー海では海氷が広がった。12.5 万年前の最終間氷期では、中部北極海でも季節海氷域に生育する浮遊性有孔虫が見いだされた。グリーンランド海岸の流木記録や、カナダ北極諸島沿岸のホッキョククジラの骨化石、北西航路の堆積物コア中の IP25 から、約 1 万年前の前期完新世は、多年氷が現在よりも少なかったことが示唆された。他方、チュクチ海では、渦鞭毛藻シストの群集組成から、前期完新世で海氷が多いことが示され、北極海内での海氷の消長が一様ではないことが示唆された。

北太平洋の代表的な季節海氷域であるオホーツク海やベーリング海の陸棚域は、世界有数の高い生物生産の海域として知られる。完新世の初期から中期にかけて、ベーリング海とオホーツク海では円石藻が比較的多く、完新世の後期に珪藻が卓越するようになった。この変化に伴い、生物ポンプもダイナミックに変化したと推測される。しかし、その変化要因は不明である。

北極海の海氷の復元には、北極海掘削計画(ACEX)が大きな役割を果たした。この ACEX は日米が主導する国際統合掘削計画(IODP)の一環として、

欧州コンソーシアムが実施主体となり行われた。2009 年には九州大学の高橋孝三教授らにより IODP の一環でベーリング海の掘削が行われた。他方、北極海掘削に向けて、IODP に対して日米欧の研究者が掘削提案を提出中であるが、掘削に必要な事前情報が十分に得られていないため、提案は受理されていない。北極海古海洋学研究は従来、欧米の国々が推進してきたが、近年は中国と韓国が砕氷調査船による海底地形、構造調査、堆積物コア採取を進めている。我が国独自の調査としては 2000 年代に「みらい」により海底地形、堆積物調査が行われた。2010 年代に入ってから、韓国極地研究所と北海道大学の研究者間の共同研究として砕氷調査船「アラオン」を用いた調査が行われた。今後も継続的に北極海古海洋研究を進めてゆくためには我が国も砕氷調査船を建造し、活用してゆくことが不可欠である。

b. 今後の研究

北極海における将来の海氷分布を予測するため、現在よりも温暖な時代の海氷分布を復元することが急務である。具体的には、中世温暖期(1000年前)、前期完新世(1万年前)、最終間氷期(12.5万年前)、鮮新世(350万年前)が研究ターゲットとして挙げられる(表1)。

海氷分布を復元するには、海底堆積物コアを採取し、海氷プロキシを用いて、海氷の状態を復元する。中世温暖期の海氷については、ノルウェー海とカナダ北

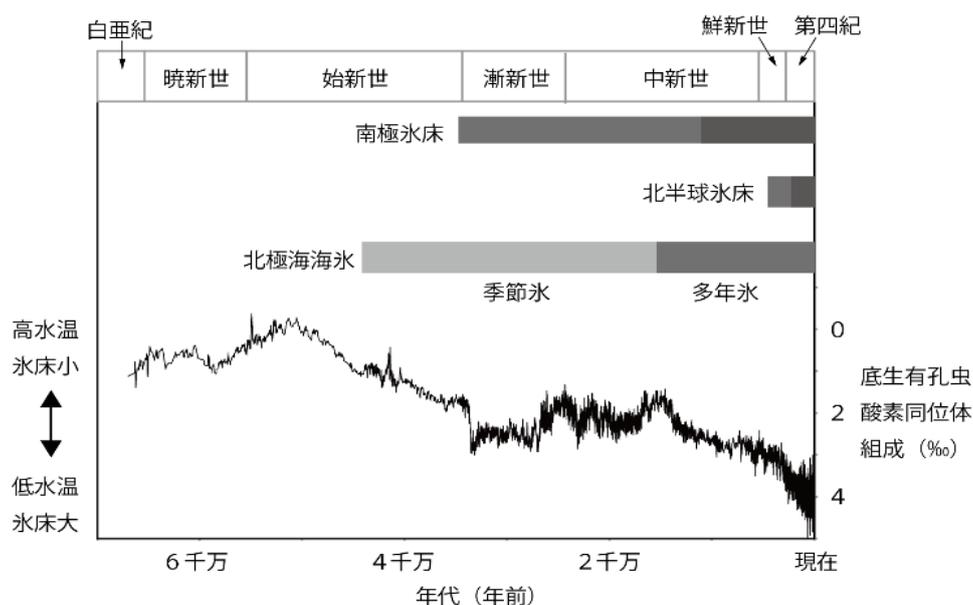


図 24 新生代における底生有孔虫酸素同位体組成の変化、南北両半球の氷床の形成、北極海海氷形成(酸素同位体データは Zachos et al., 2001 より)。

極諸島水路において海氷状況が復元されているが、他地域はまだであり、海氷の分布を描くことができない。空間的に記録を拡大する必要がある。堆積速度の速い縁辺海の窪地を狙い、堆積物コアを採取し、海氷プロキシを用いて海氷を復元してゆくことが必要である。

前期完新世については、北極海のかんりの地点で渦鞭毛藻化石を用いて海氷の復元が行われ(de Vernal et al., 2013)、対象とする4時代のうち、もっとも研究が進んでいる。渦鞭毛藻以外のプロキシを用いて、海氷復元の精密化を進めることが必要である。最終間氷期については、ノルウェー海と北極海大西洋セクターを主に、いくつかの海域で海氷復元が行われたが、共通プロキシを用いた系統的な分析が行われておらず、地点間の比較を行うことが現時点ではできない。共通のプロキシで系統的にデータを取得する必要がある。また、分布を把握するには堆積物コア数が不足しており、大陸斜面域から堆積速度の大きい地点を狙い、海底コアを採取し、年代を決め、プロキシ記録を得る必要がある。年代決定には、コア間対比が有用であるが、海域ごとの層序を確立するため、絨毯爆撃的にコアを採取し、分析してゆくことが重要である。鮮新世については、ACEX コアと偶然に鮮新世の地層が得られたコアについてしか情報が無い。ロモノソフ海嶺やメンデレーフ海嶺など鮮新統が分布しているような海域で数百メートルスケールの深海掘削を行い、鮮新世の層準を得ることが重要である。このような掘削は統合国際深海掘削計画(IODP)の一環として行われることが望ましいが、計画の実現には、有望な掘削地点の海底地形と海底構造の調査、ピストンコアの分析による予察的成果が不可欠

である。

過去の海氷分布には海氷プロキシを用いるが、新たなプロキシの開発、従来のプロキシの洗練が重要である。多数の地点で冬季と夏季の海氷縁の分布を復元することにより、冬季と夏季の大気循環を規定している海面上の条件を明らかにすることが期待される。

アイスコアは、海氷変動を高時間分解能で記録するアーカイブであるため、今後の活用が望まれる。既存のプロキシ記録を再解釈し、新規プロキシの開発とその適用が必要である。アイスコア記録から、生物生産量の復元を行うことができる可能性が指摘されており、今後の研究の進展が期待される。

ユーラシア大陸北東部に面したチャクチ海、東シベリア海、ラプテフ海などは、1990年代から2000年代にかけて特に海氷減少に伴う沈降粒子フラックスの増えている海域であり、今後の海氷激減に伴って生物生産の上昇が見込まれるホットスポットである。過去に遡った気候と生物生産ならびに物質循環の関係性について明らかにすることが期待される。

さらに、大気海洋海氷結合モデル(テーマ B)を用いた各時代のシミュレーションを実施し、古海洋データ(海氷や海洋生態系)の再現性を確認するとともに、それらの決定プロセスの理解を進めることが極めて重要である。各時代の海氷や生態系の再現実験には、大気と海洋の両方を緻密に計算する必要があり多大な計算コストがかかるため、まだ断片的にしか行われていない。古気候データの解釈を将来予測に活かすためにも、計算機資源と計算環境を整備し古気候実験を強力に進める必要がある。

Q4: 過去の北極陸域環境は現在とどれほど異なり、大気組成や気候とどう関係したのか?

a. 研究の重要性と現状

植生をはじめとした地表面状態(陸域環境)の過去の状況とその変動は、当時の気候状態を知る有力な手がかりになるうえ、気候モデルの境界条件や検証材料として用いることで気候モデルの正確さを向上させるためにも欠かせない。しかし、北極域で利用できる陸域古環境の記録は、温帯、熱帯と比較して乏しく、一部の湖沼堆積物の解析結果以外は、散点的な花粉記録や大型植物遺体記録、湖沼堆積物、あるいは氷河地形から得られる断片的・定性的な情報に留まっていた。しかし近年、永久凍土の地温プロファイル、あるいは氷と有機物

を多く含むエドマ層(テーマ 12 参照)を利用した同位体分析、マルチプロキシ分析などを用いた古環境復元の可能性が見出されている。永久凍土の消長は、気候変動への正のフィードバックをもたらすと考えられているが、永久凍土の規模や構成物質の含有量、その変化のスピードはよく理解されておらず、気候変動予測に大きな不確定性を与えている。しかし、永久凍土層を陸域環境のアーカイブとして捉え、凍土を取り巻く環境変化と気候変動との関わりを理解する試みは始まったばかりである。

アイスコアは北極域の情報をグローバルな情報と共

に保持しているため、エアロゾルや温室効果気体など、陸域に端を発した諸物質の変化を復元するのに優れ、北極域の古環境を復元する良い制約情報を与える。近年は、エアロゾルの金属同位体やブラックカーボン、有機エアロゾルなど、測定可能な項目が増えてきているうえ、従来から計測されてきたメタンや水溶性エアロゾル等も連続融解による高分解能解析が可能になってきた。アイスコアのエアロゾルやガス分析研究では日本は世界をリードしている。

数値実験による陸域古環境の再現は、近年では植生分布の変化による物理的・化学的フィードバックが導入された全球気候モデルを用いた実験が主流になってきており、古気候モデル間相互比較プロジェクト(PMIP)でとりまとめを行っている。図 25 に最終氷期最盛期⁸⁹における一例を示す。モデル結果は、観測と直接の比較ができないため、過去の植生分布が確定できていない場所も多く、また、“緑のサハラ”のように、現在の気候モデルでは再現できていない課題もある(PMIP、Joussaume et al.,1999)。しかし、植生フィードバックを導入することで、広域平均した気温変化を示す古環境指標の再現性が向上するなど、気候形成における植生変化の重要性が定量的にも示されつつある(O'ishi and Abe-Ouchi, 2011)。極域気温増幅の影響により、氷期-間氷期サイクル等の古気候変動に伴う北極域の陸域環境は大きく変化したはずであり、その正確な復元とメカニズムの理解が地球気候を考える上で極めて重要である。

b. 今後の研究

モデルによる過去の植生再現研究に関しては、平衡

状態の植生だけでなく、時間的な変遷についても検証対象として進めていく必要がある。そのためには、大気・海洋モデルと結合させるだけでなく、炭素や窒素、リンや硫黄といった植生生育の制約条件となる元素の循環とそれらとの相互影響も加味した地球システムモデルを用い、軌道要素や火山活動などを固定しない長期積分実験を進めていく必要がある。陸域環境のうち、植生分布、土壌水分、地表面風速は、ダストアロゾル発生に寄与するため、気候モデルにおけるこれらの再現性をアイスコアや海底コア等が示すダスト変化を制約条件として向上させることが期待されている(Lambert et al., 2013)。ダストの主要な発生源は、中低緯度の乾燥域であるが、高緯度は極域増幅によって気候変動幅が大きいため、過去と将来にどの程度のダスト発生源となり得るかも重要な問題である。また、永久凍土に関わるプロセスを地球システムモデルに組み込む必要もある。

氷河・氷床による情報が得られない北東シベリアやアラスカ陸域では、永久凍土による古環境復元を推進する必要がある。エドマ氷には雪氷学的な手法を、堆積物にはバイオマーカーなどを利用して永久凍土堆積層を分析する。例えば、地下水の年代測定と水安定同位体比から、更新世後期から完新世にかけての環境が復元されており(Meyer et al., 2010)、これを時空間的に広げる必要がある。永久凍土に関連した地形(周氷河地形)に基づく古環境復元は、復元精度が低く時間分解能が粗いことが問題であるが、地域的な分布に関する制約条件を増やす上で有用であり、今後再検討されるべきである。また、永久凍土の地温プロファイルに基づく地表面温度履歴の復元(Pollack et al., 2003)は、古環境データの少ないシベリアなどで意義が大きい。同

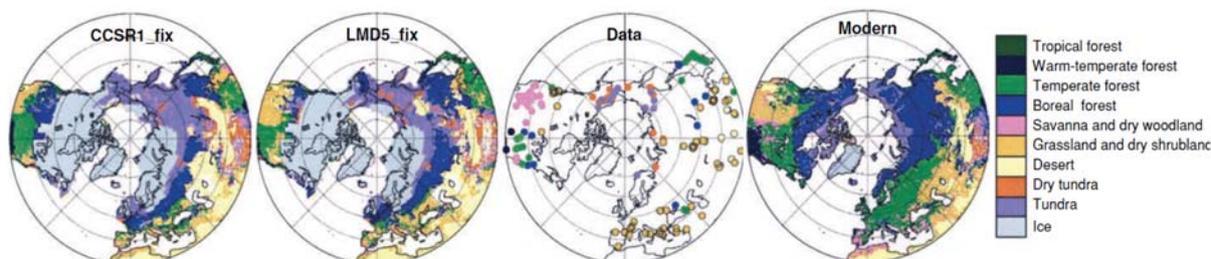


図 25 動的植生モデルによる LGM および現代気候の植生分布再現実験の例(Harrison and Prentice, 2003)。左から 3 つはそれぞれ日本とフランスのモデルそして古環境観測データに基づいて推定された LGM における土地被覆タイプを示し、右は現代気候における土地被覆タイプを示す。

⁸⁹ 最終氷期最盛期: Last Glacial Maximum(LGM:約 2 万年前)

様に、永久凍土の深さ情報からも過去の地表面温度復元に制約を与えることが可能と考えられる。永久凍土が存在する場所の多くは、ヘリコプターやスノーモービル以外ではアクセスできないため、凍土掘削や路頭調査は強力なロジスティクス支援を必要とする。

メタンの生成と消滅は、関与するプロセスが限定的であるため、モデルにおける炭素循環の制約条件として用いることができる見込みがある。アイスコアから得られるメタン濃度を制約条件として、特に高緯度における湿地帯と植生、土壌有機炭素の分布の再現性向上が期待できる。一方、エアロゾルの同位体比は、その起源や輸送過程を知る手がかりとなる。例えば、硫酸エアロゾルの硫黄同位体比は、石膏・火山・海洋生物などの起

源や輸送過程によって値が異なり、ダスト(シリカ鉱物など)のストロンチウム・ネオジウム同位体比はダストの起源となる大陸や地域で値が異なるため、起源推定に有効である。近年の分析技術の向上により、従来より高時間分解能・高精度での同位体比データが得られつつある。また、有機エアロゾルには起源が限定された化合物が多いため、アイスコア分析から、森林火災や土壌ダスト、生物、人間活動を起源とするエアロゾルの変遷を、分離して復元できる可能性がある。アイスコアに含まれる硫酸イオン濃度と硫黄同位体比、有機物組成とその炭素同位体比を組み合わせるなどのマルチプロキシ解析や、気体成分の同位体による放出源推定等もさらに進展の必要がある。

Q5: 過去の北極において、数年～数百年スケールにおける自然変動の強度や時空間パターンは現在と異なっていたか？ そのメカニズムは何か？

a. 研究の現状

現在、北極域での大気循環の経年変動では AO が卓越しているが(テーマ 5 参照)、海水輸送や太平洋から北極への暖水流入などには、その他の変動モードの重要性も指摘されている(テーマ 1、テーマ 2 参照)。将来の気候を考える上で、数年～数百年スケールの自然変動を理解することは非常に重要であるが、長期間にわたるその統計的特性や変動メカニズムはよくわかっていない。その一つとして、測器観測データの短さがある。また、観測データには温室効果気体の増加など人間活動による影響も含まれており、原因の特定は複雑である。過去数千年に遡る古気候復元や古気候モデリングはこうした問題を克服する手段を提供し、太陽活動や火山噴火に対する応答を含めた自然変動の理解につながる。その上で人間活動による影響を特定することによって、将来予測に役立つであろう。

北極振動(AO)は、本来約 10 日程度の時間スケールを持つ大気循環の内部変動(モード)であるが、数年～数十年といった長期的な変動も示す。たとえば、20 世紀末には数十年の冬のトレンドが見られ、21 世紀の将来予測では、正の AO トレンドが見られる。より長期の変動特性を調べるために、過去数百年にわたり代理指標を利用して復元を試みた研究がいくつかあり、北大西洋に特化した北大西洋振動(NAO)については比較的多くの時系列データが復元されているものの、北極域全体の AO としての復元は数が限られている。

気候モデルを用いた研究は、最近千年にほぼ限られる。これは、計算機資源の問題もあるが、気候モデルを駆動する太陽活動と火山噴火の外部強制力データの不確実性が大きいことも原因として挙げられる。IPCC 第 4 次評価報告書が出版された 2007 年には、比較的簡易な気候モデル(EMIC)が中心であったのに対して、第 5 次評価報告書では大気海洋結合大循環モデル(AOGCM)による結果が多く掲載され、複数モデルを用いた時空間変動パターンの解析も可能になってきた。その背景には、国際プロジェクトである第 3 期古気候モデリング相互比較プロジェクト(PMIP3)が強制力データを整備した上で実験設定を提案し、第 5 期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)がこれを後押ししたことがあった。日本の AOGCM も過去千年実験に参加し、CMIP5/PMIP3 に計算結果を提供・公開している(Sueyoshi et al., 2013)。単一モデルを用いた研究では、太陽活動と AO の関連性や火山噴火と AO や太平洋十年規模変動(PDO)との関連性が既に示唆されている。このような背景の下、マルチ(複数)モデルの解析が本格的に始まりつつある。

グリーンランドの気温変動が NAO に影響されることが知られており、古気候の分野でも、グリーンランドアイスコアの酸素同位体比が NAO の指標とよく一致することが報告されている。また、日本を中心とした研究チームにより、数十年から百年規模のグリーンランドの気温変動が、太陽活動によって引き起こされた NAO 様のパタ

ーンによって北半球傾向からずれていたことが提案されている(Kobashi et al., 2013)。

b. 今後の研究

気温などの気候変数は、全球的な気候変動と地域的な気候変動の両方の影響を受けるため、大気循環の変動など地域的な気候を復元するには、空間パターンを意識したうえで多地点から代理指標を取得することが望ましい。これまで代理指標データの取得は、主に北半球中緯度に限られ、北極域については十分に行われてこなかった。PAGES の下で行われている過去 2000 年を対象とした 2k プロジェクトなどに積極的に参加し、北極域をカバーする多地点統合データセットを構築することが重要である。

長期観測データが乏しい北極域においては、アイスコアから得られる古気候・古環境情報が非常に有用である。グリーンランドでは、これまでの氷期-間氷期サイクルのような長期変動の復元を目的とした深層コア研究に加え、数百年の環境復元を目的とした多点での浅層コア研究が、米国やドイツを中心に行われている。NAO とその影響については、グリーンランド、カナダ、スバルバル諸島などでアイスコアの掘削と解析を進め、数十年規模の NAO の地域的なパターンや原因を明らかにすることが重要である。

グリーンランドを除く環北極圏の氷河・氷帽については、ICAPP⁹⁰のもとで、1990 年代~2000 年代初頭に北極カナダ、北極ロシア、スバルバル諸島において日本を含む各国がアイスコア研究を行っていた。2000 年代以降に現れた急激な気候変動シグナルの復元、分析技術の発展によって測定可能になった新しい指標(ブラックカーボン、微量金属、有機物、 $\delta^{17}\text{O}$ など)による環境復元を念頭に、環北極圏の氷河・氷帽での再掘削が期待されている。高緯度山岳地域(カムチャツカ、北米(アラスカ、ユーコン、ブリティッシュコロンビア)、コーカサス、モンゴル、アルタイ)においては、日本を含めて各国が散発的にアイスコア研究を行ってきた。今後は、統合的なデータの理解、国際的な協力体制による戦略が必要となる。

アイスコア中で気温の指標として広く用いられている氷の酸素同位体比は、地域的な気温のみならず、水蒸気の輸送経路や起源の温度などにも影響される。水同

位体に代わる温度復元手法として、アルゴンと窒素の同位体比に基づく物理的な手法が開発されてきた(Kobashi et al., 2013)。この手法をさらに多くのコアに適応し、地域的な気候変動パターンを復元することが重要である。気体解析による気温データを、酸素同位体比データを同位体モデルによりデータ同化手法で解析する際の制約条件として用い、北極域の気温や大気循環の変動性を復元し考察を進める必要がある(Yoshimura et al., 2014)。気候モデル研究の解釈において大きな制約になっているものの一つに、モデルの入力データとなる太陽放射量や火山噴火エアロゾルの変動など、外部強制の不確か性が非常に大きいことが挙げられる。最近の気候シミュレーションでは、複数のデータセットが用いられているが、計算機資源の制約により必ずしも網羅的に実験が行われていない。気候モデル応答と観測データの有意義な比較をするには、外部強制データの精度向上が重要である。火山強制力は、南極の多数のアイスコアとグリーンランド NEEM コアを合わせた解析から、精度を大幅に向上させたデータセットが発表され(Sigl et al., 2014)、今後はさらなる定量的推定のためにグリーンランドのデータの拡充が待たれている。また、太陽活動や火山噴火は、成層圏の応答を通して対流圏の気候に影響を与えることが多くの研究から示唆されている。このため、成層圏を十分に解像するモデルでの実験が期待される。さらに、この時代は比較的外部強制が弱いと、有意な気候応答シグナルを抽出するには、多数の数値実験が必要であり、物理過程は共通しつつ、精緻な高解像度モデルと比較的計算機負荷の小さい中解像度モデルの併用などに向けた整備も必要である(テーマ B 参照)。さらに、数十年から数百年の変動に関しては、海洋深層(AMOC、北大西洋深層循環)が大きな役割を果たすと考えられ、国際的に研究が進められつつある。大気海洋結合モデルによる多数の実験と古気候データを活かした研究が必要であり、そのための計算環境の整備が不可欠である。

こうした研究により、過去において自然変動の強度や空間パターンが現在とどのように異なっていたのか、なぜ異なっていたのかを明らかにすることが期待される。

⁹⁰ ICAPP: Ice-Core Circum Arctic Paleoclimate Program

ボックス 1

古環境プロキシや年代推定手法の開発と解釈

古気候学者は、様々な古気候アーカイブから得られたプロキシ(代理指標)を用いて過去の気候を復元している。古気候アーカイブには、アイスコア、海底堆積物コア、湖底堆積物コア、石筍、レス堆積物、サンゴ年輪、樹木年輪などがある。例えば、海底堆積物に含まれる底生有孔虫の酸素同位体比は、陸上氷床体積のプロキシである。古気候アーカイブの年代測定も重要であり、堆積物の年層計数や、放射性元素の分析(半減期を利用)、過去の日射変動(天体計算で求まる)との対比など、様々な手法がある。

プロキシは古気候研究に中心的な役割を果たしているが、プロキシ記録は測定誤差とキャリブレーション誤差を伴い、誤差評価自体が困難な指標も多い。今後は、プロキシ解釈の高度化のため、これまで以上にモデルとの連携が重要となってくる。重要課題としては、①現在におけるプロキシ形成・保存過程の観測研究(水蒸気や降水の同位体、大気組成、エアロゾルなど)、②エアロゾル同位体比(硫黄、鉛等)による起源推定手法の開発、③新たな化学成分や気体成分、同位体比データを得るための分析方法の開発、④高時間分解能の試料解析、⑤年代推定手法の開発、等が挙げられる。

以下では代表的なプロキシについて解説する。

a. アイスコアの古気候プロキシ

アイスコアの気温プロキシとして、水の酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)が広く用いられる。しかし、 $\delta^{18}\text{O}$ は気温以外の要素(例:降雪量の季節性の変化)にも影響を及ぼすため、掘削孔温度や気体同位体比など別の手法によって校正する必要がある。つまり、 $\delta^{18}\text{O}$ による正確な気温推定には水循環システム全体の考慮を必要とする。最近では、酸素・水素同位体比と単純なモデルを用いて、アイスコア掘削点と水蒸気の起源の温度を同時に推定する試みも行われている上(Uemura et al., 2012)、同位体を組み込んだ大循環モデルで計算された降水の同位体比が観測データと合うように循環場の時空間分布を修正する、データ同化手法も有力視されている(Yoshimura et al., 2014)。

アイスコア中のエアロゾルは、固体微粒子や液滴など多様な化学形態をしている。通常のアイスコア分析では、氷を融解した溶液中のイオン濃度を測定するため、大気化学環境のプロキシとなる水溶性エアロゾルの化学形態が失われてしまう。近年、氷を昇華させエアロゾル粒子を直接分析する手法が開発され(lizuka et al., 2012)、グリーンランド NEEM コアにも応用され始めた。重金属や有機物、ブラックカーボンの各濃度、エアロゾルの同位体比による起源や輸送過程の復元など、新しい手法も開発されている。アイスコアの気体分析からは CH_4 や N_2O の濃度復元が活発に行われ(NEEM community members, 2013)、最近では同位体も分析されつつある。窒素や希ガスの濃度や同位体比からは、気温復元や表面融解の検出が可能になってきた(Kobashi et al., 2013; NEEM community members, 2013)。

これらのプロキシ研究の進展には、同位体モデルや輸送モデルの開発とともに、現在の北極域での水蒸気・降水・雪・エアロゾル等の観測や、諸物質の氷中への保存プロセスの理解、多点におけるアイスコア掘削・分析など多面的な研究展開が必要である。日本においてもアイスコア連続融解システムによる氷や気体の超高分解能分析が実用化しつつあるが、多数のコアについて多成分の分析を進めるため、さらなる開発が重要である。

b. 海底堆積物の海氷プロキシ

堆積物の海氷プロキシとしては、海洋堆積物の漂流岩屑(IRD)、酸化鉄粒子、微化石(珪藻、渦鞭毛藻、底生有孔虫、珪質鞭毛藻)、バイオマーカー(特に、IP25)がよく用いられる。IRD は海氷や氷山により運搬された堆積物のことで、砂($>63\ \mu\text{m}$)よりも大きい粒子を含むので、ふるいで $>63\ \mu\text{m}$ 粒子を分画し、その重さを量り、IRD 量とする場合が多い。酸化鉄粒子は北極海大陸棚に広く分布するが、場所によりその化学組成に特徴がある。酸化鉄粒子を磁石により選別し、その元素組成を分析することにより海氷の形成域を推測することが行われている。珪藻、渦鞭毛藻、珪質鞭毛藻などの植物プランクトンは海氷のないところで繁茂するので、その化石は季節的な海氷の消失を示す良い指標となりうる。底生有孔虫も海洋表層から沈降する有機物の多いところで繁殖するので、その化石は季節的な海氷の消失を示す指標である。IP25 は海氷下部に成長する微細藻類アイスアルジー(ice algae)に特徴的な脂質であり、その存在から海氷の融解が活発な海域を特定することができる。

要旨

本テーマの学術的 Questions として以下の 5 つを示す。

- Q1: 地球温暖化も含めた気候変動による影響は如何に？
- Q2: 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は如何に？
- Q3: 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響は如何に？
- Q4: 太陽活動と北極超高層大気の影響は如何に？
- Q5: 北極圏人間社会の対応は如何に？

北極域では前世紀から開発が進められて来たことに加えて、ますます顕著になりつつある地球温暖化のために、海氷減少、凍土融解から陸域植生や野生動物の変化まで、自然環境が急速に変化している。今後、経年変動が大きくなるとの指摘もあり、経験したことのない異常な気象に見舞われる可能性が高くなる。気候と気象の変動は地域によって異なるので、農業生産には栽培に適した品種を事前に選ぶことが有効となる。森林火災も含めて陸域植生と野生動物が打撃を受け、狩猟に生活基盤を置いている住民にとって大きな問題となる。太陽活動による攪乱は極域に比較的大きな通信障害などの影響を及ぼす。一方で、温室効果気体の放出を低減する方策をとることによって、環境と生活条件の保全を図る試みが必要である。

まえがき

本長期構想において、現在までの環境変化と、今世紀に予想される変化に関するほとんどの記述は、自然科学に基礎を置き、地球温暖化の進行のメカニズムと影響、そして他の開発なども含めた人為的变化による生態系への影響などに焦点を当てている。テーマ 7 の独自性は、さらに人間社会への影響と対策について、人文社会科学の知見も含めた研究の方向性を示していることである。現地住民の生活への影響も注視しつつ、悪影響・災害の低減方法としては、異常気象、森林火災、凍土融解、野生動植物相の変化、太陽活動を取り上げる。北極環境の変化が及ぼす産業活動への影響としては、北極海を通る航路開通、気候変化に伴う農業と水産業の将来について、可能性と問題点を指摘する(図 26)。さらに、現在起きつつある、あるいは将来起きる可能性を持つ影響に関する情報の、住民への有効な

海氷減少に伴い、基本的には現在の季節海氷域が北極海に拡大するが、北極海全体が半閉鎖海域であり、また、流入する河川水、深層や海底堆積物の影響があるので、栄養塩分布などの変化は複雑であるし、また酸性化が全海洋で最初に現れる。北極海に適した水産資源については、資源量の管理にも留意すべきであり、漁業や海獣狩猟に依存する住民には大きな影響が及ぶ。北極海で航路を運航するには、その安全確保について効果的な海氷予測が必須である。座礁などの事故による汚染に加えて、運航が生活基盤を変えるならば、住民への影響に配慮した開発が求められる。

地震と津波に対する我が国の警報システムも例にあげ、北極圏に生活基盤を持つ住民社会に受け入れられる環境問題への対処法を提示する。先進国の環境問題への取り組みをそのまま押し付けられれば済むものではなく、大多数を占める先住民との協働が重要である。人間社会への影響と対策について、人文社会科学の知見も含めた研究の方向性を示し、国際関係、国家、地方自治体の各レベルでとるべき施策を提示する。長期的にわたる方向性の基本は、自然科学と人文社会科学の連携を北極域にも展開することであり、環境研究コミュニティを越えた連携が必須である。

伝達については、地域住民との協働による取り組みが必須であることを示す。その上で、国際関係、国家、地方自治体の各レベルでとるべき施策を提示している。

社会が持つ関心に焦点を当てて、予想される課題をあげてみよう。気候が変わると気温が昇降し降水量が変わるが、その傾向は地域によって異なる。農業生産は気温と水資源に敏感であり、栽培に適した品種を事前に選んでおかなければならない。ある傾向で継続する気候変化に加えて、経年変動が大きくなると、陸域植生は打撃を受けるであろう。そこに生息する野生動物にも影響が出て、狩猟に生活基盤を置いている住民にとって大きな問題である。

北極海(本構想ではシベリア陸棚域、バレンツ海も含む)とその隣接海域(ベーリング海、グリーンランド海など)では、進行しつつある海氷の減少に伴い、海水に含

まれる栄養塩なども変わるであろう。現在も進行しているように季節海水域が北極海に拡大するが、北極海全体が半閉鎖海域であり、また、河川水の流入が海域に比べて多く、深層や海底堆積物の影響があるので、もっと複雑な変化も想定しておかねばならない。さらに、海洋酸性化は低温海域から顕著になる。その上で、温暖化した北極海に適した水産資源もありうるので、資源量の管理にも留意すべきである。漁業や海獣狩猟に依存する住民には大きな影響が及ぶであろう。近年の生態保全学的観点からは、人間活動が攪乱要因となるばかりでなく、生物多様性の維持に活用できる可能性を持つ。また、生物多様性は文化的多様性と相互依存する関係にあると指摘する意見もある。

海水減少に伴い、アジアと欧州を結ぶ北東航路を北極海で運航する時代が近づいている。その安全確保について効果的な海水予測が必須である。もし漂流氷山との衝突や座礁などの事故が発生すると、汚染が長引くであろう。カナダ側を通る北西航路も合わせた北極航

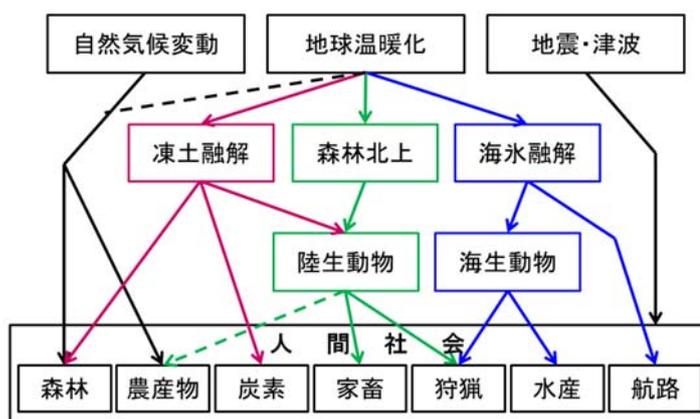


図 26 北極環境変化の人間社会への影響(概念図)

路については、汚染に加えて、運航が生活基盤を変えることも予想されるので、住民が受ける様々な影響にも配慮した開発が求められる。地震と津波に対する我が国の警報システムも例にあげ、北極圏の先住民に受け入れられる環境問題への対処法を提示する。先進国の環境問題への取り組みをそのまま押し付ければ済むものではなく、先住民との協働が重要であることを示していく。

Q1: 地球温暖化も含めた気候変動による影響は？

a. 異常気象

(1) 異常気象の状況

地球温暖化は地表面気温を上昇させるだけでなく、気象の季節変動に大きな変化をもたらすことが指摘されている(テーマ 1)。すなわち夏季は世界各地で観測史上最高となる気温の大幅な上昇をもたらし、熱中症による人身災害や干害・高温障害による農業被害を引き起こしている。一方、冬季には世界各地を未曾有の寒波が襲い近代化した都市化社会が大きな災害に見舞われている。この季節変動の拡大に付随し世界各地で大規模集中豪雨と水害、豪雪さらに竜巻の多発など、異常気象による大規模な自然災害が増加している。

(2) 社会への影響

身近な例として、2014年2月には普段雪の少ない関東地域に30~80cmの積雪があり、大雪警報が発令され、家屋の倒壊や交通網の寸断など大きな社会混乱を経験した。これは積雪の量的変動が地域により異なる閾値を超えることによる災害発生である。同年に同じような

雪氷災害が北米大陸でも起こり、最も近代化の進んだ航空路線でさえ壊滅的打撃を受けている。また、東シベリア内陸部では湿潤化による降雪量の増加がみられ、中央アジア、ヨーロッパでも寒波や大雪による災害が発生している。このような寒冷化・大雪による災害は近年の温暖化傾向のもと、ヨーロッパ、中央アジアを含め世界各地で頻繁に起こっている。

一方、温暖化が進んで平均的には雪氷の減少が見られるが、積雪が減る場合でも、それまでの環境に最適化を目指してきた社会は、やはり災害を受けることとなる。例えば、小麦は世界の主要食糧であるが、北米では冬小麦の被害が積雪の深さに依存している。良質の断熱材である積雪が少ないと地中の冬小麦は凍害で枯れてしまう。ある条件においては積雪1cmあたり約3億米ドルの損益の増減があると言われている(Steppuhn, 1981)。また、多くの都市では、山地積雪や氷河の融雪水を水源として住民の生活や産業を維持している。温暖化に伴って大多数の氷河の縮小が報告されており、特に内陸都市における近未来の深刻な水資源枯渇が

心配される。

多雪・少雪による災害を例としたが、異常気象による災害には豪雨・干ばつ、竜巻、台風・ハリケーン等の巨大化、高潮等による人身災害、農業・工業生産への直接被害、また、社会インフラへの被害が世界各地で多発している。

(3) 今後の研究

科学的に将来の温暖化や気候変動の傾向を予測し、そこで災害の起きる確率を推定すると共に、災害に対して強靱な生活基盤を築くことが必要である。そのためには、人類の歴史を顧みて、古環境再現の手法を用いた分析も選択肢のひとつとして確保すべきである。温暖化、寒冷化の繰り返しの中、歴史的転換と言われる事件は異常気象の影響を抜きにしては語れないことが多い。古くは水を支配し繁栄を極めたメソポタミアのウル王国は、温暖乾燥化の波で滅亡し、砂漠の廃墟となった。中世温暖期にヴァイキングの築いたグリーンランドやカナダ北西の入植地あるいは野営地は、小氷期の始まりの寒冷化により海氷に閉ざされて交易が不可能となり放棄されてしまった。

これらは、いずれも頻繁に生ずる小さな気候変動に対応して築いてきた文明が、ある閾値を超えた大きな変動、異常気象には対処しきれなかったか、あるいは居住の移動を選択したことを教えてくれる。環境決定論に与する必要はないが、環境の大きな変動が歴史の主要な

担い手となったことを真摯に研究する必要がある。

近年、研究の進展しているアイスコアや花粉分析など多くの気候変動記録の解読分析結果と、歴史的イベントの詳細な対比研究が期待される。すなわち、人類の営みは異常気象、豪雨・干ばつ、高温・低温、豪雪・少雪などからどのような影響を受け、それらに対処したのか敗退したのか、学問分野間の研究連携を進めることによって、定量的に研究する必要がある。この成果によって、北極および環北極域の将来の気候変動に対する社会的対応力を検討する根拠が形成される。

一方、現在まで極北環境に暮してきた先住民の気象に関わる在来知は、人類の無形文化遺産として価値があり、これを収集・記録化するとともに、将来の異常気象への対処の可能性を期し、その自然科学的評価も行う。

b. 森林火災

(1) 森林火災の現状とその研究

北方林(タイガ)は北米とユーラシア大陸の北側に分布し、世界の森林面積の約1/3(世界の陸地の約10%)を占め、陸地の炭素量の30~40%を有している。ここでの森林火災は、天然更新のプロセスでもあり、最大の攪乱要因で、永久凍土や林床の有機物とも深い関連がある。アラスカでの森林火災の近年の特徴は、雷により発生した森林火災の焼損面積を、大きい順から並べた図27より把握できる。焼損面積が6,500km²を越えるような大規模火災年は過去58年で11回観測され、

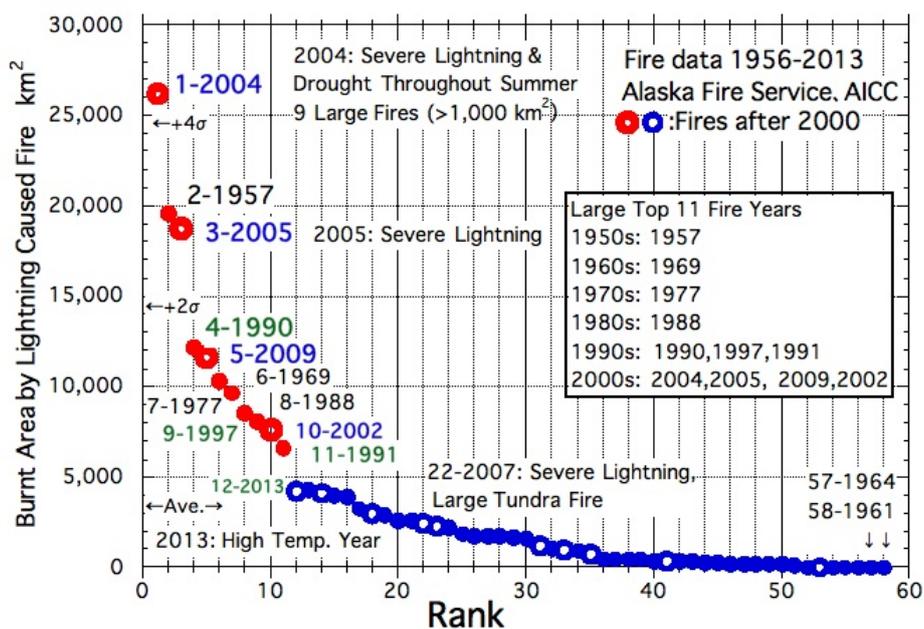


図27 アラスカでの雷で発生した森林火災の1956年からの焼損面積(大きい順)

1950、1960、1970、1980年代には10年に一回程度であったものが、1990年代頃からは年3回、2000年代は4回と頻発していることがわかる。2004と2005年の焼損面積の合計約46,000 km²は、アラスカの森林面積の約10%にも達する激しさである。一方、シベリアの森林火災も、開発に伴う人為火災が急増し、また、極端気象現象によって増加している。

アラスカ中央部での森林火災と植生に関する研究では、過去1万年での植生変化と火災挙動の分析がなされ、気候変動に伴う過去の植生変化と火災挙動を基に、近年の激しい森林火災は燃え方の限界を超えたとしているものの、火災は中世の温暖期(MWP)と同様に植生変化で収まる可能性を示唆した(Kelly et al., 2013)。しかし、MWPと同様に近年の“燃え方の限界を超えた”原因は明確ではない。

(2) 社会への影響

近年の急激な気候変動下で頻発する大規模森林火災は、植生の更新、炭素循環、永久凍土などに影響を及ぼすばかりでなく、二酸化炭素やメタンの排出による温暖化の加速効果を持ち、さらに熱火災雲(pyrocumulus)の形成は火山の噴火と同様に煙に含まれる炭素粒子による日傘効果、そして雪や氷面への沈着によるアルベド低下も考えられ、地球規模での環境問題を抱えている。また、各地域社会では、火災への備えと大気汚染の軽減、火災の影響評価、住民への情報伝達など、広範囲な観点からの研究を推し進める必要がある。

(3) 今後の研究

最近の研究は、アラスカの大規模森林火災の原因の一つに、カナダ方面からの乾燥し比較的強い東寄りの風にあることを示した。この背景には、北極海の海水の急激な減少現象に伴い、高緯度と低緯度の温度差が小さくなって、高緯度ジェット気流が弱まったことで、アラスカ上空での気圧の尾根とポーフォート海高気圧とが発達する現象が確認されている(テーマ5参照)。今後もMWPに見られた植生変化による対応とは異なった火災現象が起きることが危惧されており、詳細な解析を進める必要がある。また、森林火災に伴う二酸化炭素やメタンの排出の詳細なモニタリングを進め、温暖化の加

速効果を明確にする事も重要である。

2004、2005年の焼損面積2万km²級の大規模森林火災を予測し対策を講じれば、11大火災以外の平均年間焼損面積は約2千km²であるので、約1/10程度に二酸化炭素などの排出を抑制できる可能性がある。大規模森林火災による大気汚染は、計画的火災(prescribed fire、燃料すなわち植生の蓄積量が増加した森林などへの計画的な火入れ)による緩和が有効であり、衛星画像およびホットスポットデータを基にした予報も可能である。また、火災に強く関わるブロッキング高気圧などによる極端現象の予報は難しいものの、極端現象の発生は風向きにより判断できる。これらの情報伝達は、アラスカ省庁間調整センター⁹¹を介することで可能である。アラスカの火災研究は、アラスカ火災科学共同体⁹²が取り纏めを始めており、最新の研究成果を入手できる。

c. 農業生産

(1) 大気循環の変動

北極環境の変化により農業生産可能地域の拡大が期待されているが、一方で、気象条件の影響が懸念されている。気象条件は気圧分布に大きく依存するので、大気科学で広く用いられている大気圧の主成分解析の結果を示す。北半球500hPa(高度約5000m)の大気圧データに経験直交関数(EOF)を用いて解析すると、振幅の一番大きな第1主成分として北極振動が得られる(気圧場についてはテーマ1と5を参照)。この成分は北半球の様々な地域で異常気象との関連が指摘されている(田中博、2008)。第2主成分以降も振幅の大きい方から順に定められ、第2成分(双極モード、テーマ5を参照)に次いで、第3成分まで求めた。一方で、カナダのプレーリー地域を選び、春小麦の単位面積あたりの収量について、作付期から収穫期までの積算気温と積算降水量に注目した。冬季(12月から2月)にカナダの西海岸において、極低温現象⁹³(AOE)が発生すると低温で乾燥した状態となり、その年の収量は減ると思われる。AOEの回数が多い年を約30年のうち上から5年分とり、500hPaの気圧場偏差の平均値を求めた(図28)。同データの第3主成分と類似しており、カナダ西海岸で北風が強まって低温乾燥状態が起きると収

⁹¹ アラスカ省庁間調整センター: Alaska Interagency Coordination Center

⁹² アラスカ火災科学共同体: Alaska Fire Science Consortium

⁹³ 極低温現象: Arctic Outflow Event(AOE)

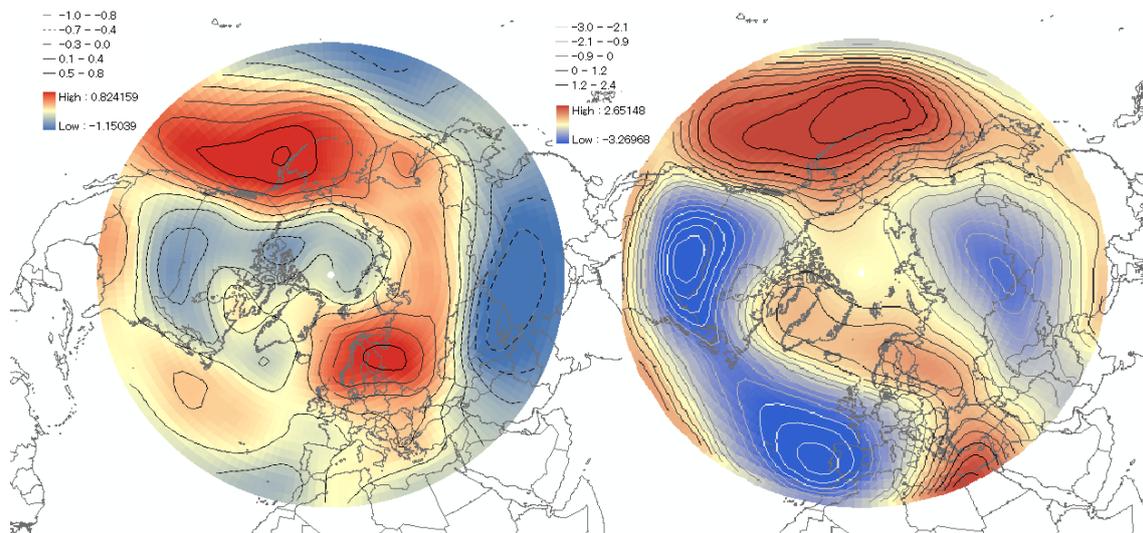


図 28 極低温現象が最も発生した上位 5 年の冬季の 500hPa 気圧場偏差の平均値(左)と同データに対する経験直交関数の第 3 主成分の空間パターン(右)。気圧場のデータについてはECMWFを使って解析を行なった。ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), 500hPa geopotential height, 2012, available at <http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-interim>

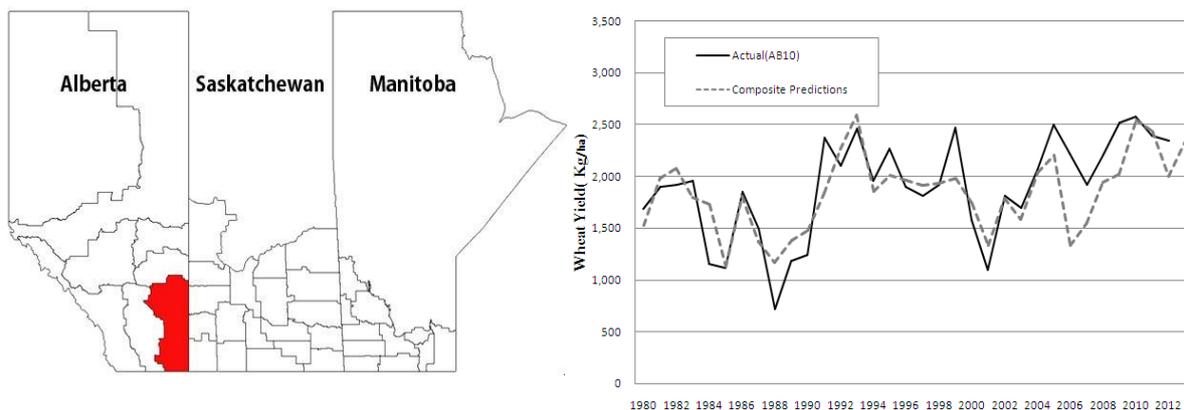


図 29 カナダのプレーリー地域(下左の赤色地)における春小麦の実測値と予測値
出典 Canadian Prairie Crop yield data (2012), Agricultural Division of Statistical Canada

量が減る可能性が示唆された。

(2) 農業生産への影響

気温、降水量、前年の収量に加えて、第 3 主成分も説明変数に入れて収量の変動を見ると、予測値が実際の収量に近づいた(図 29)。第 3 主成分はある程度の持続期間があるので、収穫期の数ヶ月前に予測して作付け品種の選択などに役立てることが可能である。

現在交渉中の環太平洋戦略的経済連携協定(TPP)において、遺伝子組み換え食品に対する世界的な安全性意識の高まりにより、遺伝子組み換え技術を使わない

穀物への需要が高まりつつあるが、非遺伝子組み換え品種は生産性が落ちるだけでなく、異常気象などへの対応力が弱まる可能性が指摘されている。飼料用大豆については、除草剤への耐性をもたせるため、その多くが遺伝子組み換えになってしまっており、非遺伝子組み換えを選択することは難しい状況になっている。

(3) 今後の研究

カナダのプレーリー地域で確立しつつある手法を、北半球の他の地域へも展開することで、収穫の数か月前の収量予測を行う仕組みを構築する必要がある。ロシア

極東アムール地区において北海道寒冷地農法が試行されているが、これらの地域において収量予測の情報提供を行うことで、北極域における農業生産の安定性に資することが期待できる。2014年3月に開催された第39回国際食品・飲料展(FOODEX Japan 2014)でのヒアリングによると、オーストラリアにおけるアーモンド

の2013年秋から2014年春にかけての収穫量は多いことが期待されている一方で、カリフォルニア州の収穫量は少ない傾向にある。北半球と南半球の顕著な農業生産の違いについても言及することで研究の対象と幅が広がると考えている。

Q2: 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は？

a. 凍土融解と炭素放出

(1) 凍土融解によって何が起きるか

凍土が融解しつつあることは確信を持って語られているし(テーマ4、12参照)、メタンと二酸化炭素が大気に放出される傾向は確かめられている(テーマ3参照)。しかし、その結果、どの温室効果気体がどの程度放出されるかについては十分に確認されていない。融解した凍土からの流水がさらに融解を進めて湖沼を拡大し、また、ツンドラとタイガの土壌面においてもフラックスを部分的に計測すると、メタンが大気に出ている。凍土融解はある地域では土壌水分を極度に増やして、森林劣化につながり二酸化炭素吸収を減らす。凍土融解が乾燥化を招く場合は、土壌から二酸化炭素が発生するはずである。二酸化炭素を放出する顕著なものは森林火災である。大気中の濃度を継続して計測すると、メタンが増加しており、また、二酸化炭素の放出も植生の活性化による吸収を半分程度打ち消すと推定されている。

陸域の凍土だけでなく、大陸棚海底下にある凍土層に含まれるメタンハイドレードも、気化することによって大気に放出するであろう。どのくらいの量が存在するのか、どの程度の速度で放出するようになるのかについては、大きな謎と言わざるをえない。

(2) 社会に与える影響

まず凍土融解そのものが与える物理的な影響として、建物の損壊、ガスパイプラインとオイルパイプラインの損傷がある。耕作可能な面積が拡大し、期間も延びることは、それだけ見ると好影響のように思える。しかし、融解水による水没や逆に土壌の乾燥化が起きることもあり、一概に良いこととは言えない。

もしメタンと二酸化炭素が、凍土融解に影響を受ける土壌から放出していくと仮定すると、何らかの措置をす

ることによって放出を抑えることができれば、REDD+⁹⁴の一例として、放出を抑えると同時に炭素クレジットを獲得できる。インドネシアでは統合的泥炭地管理を行う提案を出しており、決して夢物語ではない(SATREPSプロジェクト)。ただし、措置をとらない場合ととった場合の放出量をモニタリングし、定量的な推定が求められる。

(3) 今後の研究

REDD+獲得を実現するための研究として遂行すべきは、メタンと二酸化炭素の放出を定量的に測定し、それを低減する方策を提案することである。凍土融解による水環境の変化を打ち消すことにより、温室効果気体の放出を低減する技術的開発を提言する。火災による森林の更新では、過剰な森林火災を防ぐことができれば、それへの取り組みについても炭素放出削減量に換算することは可能である。

温室効果気体の放出低減に向けた社会の取り組みを可能にする施策の提言はできるであろう。しかし、科学的・工学的知見に基づいた提案を一方的に住民へ提示しても、実行に移せるものではない。生活基盤を奪われつつある住民にとって、さらに生活様式を変更する必要が出る場合があるろうし、さらに開発に同調することしか選択肢がない状況に置いて、提案に賛同させることは避けるべきである。炭素クレジットを糧に、従来の生活基盤を保持することも選択に加えられれば、住民の合意を得る一助となるであろう。その際にも、一方的な提案の押し付けではなく、価値観の違いは認識しつつも、先住民の知見を活かすことが不可欠であり、それに続いて先住民と近年の移住者の間に互助が生まれる。人文社会科学研究の取り組みとしては、経済的影響を記録し、支援のあり方を分析する社会政策論からのアプローチが求められる。

⁹⁴ REDD+: Reducing Emissions from Deforestation and Degradation

b. 植生変化・野生動物・家畜

(1) 植生と野生動物・家畜にみられる変化

温暖化やそれに伴う水循環の変化(乾燥化や湿潤化、降雪・降水量の変化など)は、生物に対して基本的に寒冷適応種の分布域縮小と南方種の北方・高標高域への進出を促し、それらに直接・間接の生物間相互作用(捕食や競合など)や多様なフィードバックが加わることで、群集・生態系・景観レベルの複雑な変化を生むと考えられる(テーマ 8Q1、Q2 参照)。そして実際にもすでに、温暖化や林野火災、土地利用変化等が主要因と考えられる植生変化が進み、その直接・間接の影響が個別の種の行動や生態、さらには生態系の構造や機能に変化をもたらしつつあると考えられる(Post et al., 2013ほか、テーマ 8Q3、ボックス4、ボックス5を参照)。

(2) 社会への影響

上記のような極域の野生生物の行動、個体数、分布域の変化は、先住民にとって伝統的な狩猟・漁労・採集活動(直接的資源利用)のコストを増加させ、ときに不可能にさえしている。北極圏における定着氷の離岸が先住民による伝統的海獣猟や漁労を困難にすることはよく知られるが、陸上の狩猟活動においても気候変動の影響は顕著になっている。特に、内陸部で主要蛋白源となる野生獣類や家畜(ウシ、ウマ、家畜トナカイなど)については、氷雨や氷板形成による大量死、増加したオオカミなどによる捕食、移動してきた野生トナカイによる食物競合や連れ去りなど、多様な問題が生じている。つまり、極北に暮らし伝統的にトナカイ遊牧・狩猟・漁労を生業としてきた北方先住民は、狩猟コスト増と遊牧コスト増という二重の負荷を受け、結果として気候変動は伝統的生活から都市生活への社会構造転換を加速している

と考えられる。

これらの問題への社会的対処は、現状では狩猟期間の延長や有害駆除の推進、ハイテク機器の導入、伝統的生活への経済的補助など対症療法的であり、その結果、生物多様性保全や資源動物の持続的利用という点で、問題は今後より深刻化すると予想される。

(3) 今後の研究

温暖化による北極圏の変容は、そこに国土を持たないわが国にも様々な形で影響を及ぼし、そして、その変容の責任の一端はわが国にもある。北極域の生物研究に参加する日本人研究者はまだ少ないが、わが国が秀でた分野での技術協力や教育支援など、国際的な責任を果たしうる場面は多々ある。今後は「研究推進体制」でも述べられている北極国と非北極国との連携や、現地国の研究者や政策担当者との協働を基本とし、生物生態と管理政策の両面から研究を進める必要がある。具体的には、衛星発信機等の高度技術を用いた生物多様性モニタリング、シミュレーションを取り入れたハビタット評価(テーマ 8Q3)、順応的管理概念などの導入による保護と利用(保護区・猟区等)の一体的管理などが考えられる。

また、渡り鳥や大型哺乳類(トナカイなど)は、異なる地域生態系(ビオトープ)間を物質的・機能的につなぐ役割を担っており、極域における個体数や種構成の変動は、日本をはじめ遠く離れた中継地・越冬地の生態系や社会・生態系サービスに影響を及ぼす。そのため、多国間での共同管理体制構築を前提とした移動性動物の生息実態・機能解明の共同研究は特に重要である。

Q3: 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響

a. 海水減少、水産業進出、生態系劣化

(1) 海水減少の海洋生態系への影響

北極海へのクジラを含む温暖種の移入、外洋表層と海底近くの間で物質循環に重要な役割を持つ生物ポンプの変化、サケなどの大型魚類の生物量や分布の変化が観測されている(テーマ 9 参照)。特に、夏季の海水面積の減少が、どのように基礎生産、植物プランクトン群集組成(多様性)の変化に影響をあたえるようになるか、ボトムアップの視点からの研究もまだ不十分である。

一方、トップダウンの視点から、クジラ類、サケなどの魚類などの生物量の増加などの影響についてもまだ解析は不十分である。

(2) 社会への影響

水産業への影響は、太平洋側と大西洋側ではその漁業形態により異なるものと思われる。たとえば、北極ダラを水産物として扱うか扱わないかで、北極海の魚類の生産量変動が水産業へ直接的に影響する場合(大西

洋)と間接的に影響する場合(太平洋)に分かれる。しかし、鍵種となる北極ダラ以外の、スケトウダラやマダラなどのタラ類の生産量と分布は、それらの輸入先への水産物供給の面からも影響を考慮せねばならない。そこには、生物学的な要素ばかりでなく経済学的な要素を加味した漁業者の行動、国際関係にも左右されている水産業の動向など複雑な系を理解していく必要がある。

(3) 今後の研究

地球温暖化が促進されることにより、サケ属魚類の分布域が北極海へ拡大することが予測されている(テーマ9 参照)。サケ属魚類が、海洋起源の栄養塩(MDN)を陸域生態系へ大量に輸送することはよく知られている(例えば、Kaeriyama et al., 2012; Koshino et al., 2013)が、北極海の環境変化に伴うその周辺海域と陸域生態系へのこのようなサケ属魚類によるMDN輸送メカニズムが待たれる。水産資源の北上によって、北極海と周辺域の利用は増加する傾向にある。水産資源をめぐる北極海域のグローバル化を分析すると共に、北極圏沿岸部社会の生態・社会経済に及ぼす影響を総合的に評価する。また、海運、エネルギー産業など水産業に影響を与える関連業界への提言も出せるように、他分野の専門家と協力していく。

b. 海氷減少、北極航路、海洋汚染の危険性

(1) 海氷減少と北極航路の実現性

今世紀に入ってからシベリア側は季節海氷域と呼ぶのが相応しい状態が続いているが、年によって開氷期間が異なり(テーマ2 参照)、北東航路(北極海航路とも言う)の貨物船航行が可能となる期間もそれに応じて決まる。カナダ側は依然として厚い多年氷が存在し、北西航路を現実的にするには革新的な手段が必要である。北極海を貨物船の航路として利用することが現実味を帯びてきたが、その実現のためには、海氷状態の把握と将来予測、氷海航行時に船体が受ける影響の把握、効果的な輸送計画の立案などが必要であり、理学、工学、経済学にまたがる分野横断的な連携が不可欠である(北川他、2000; Yamaguchi, 2013)。

もし北極航路が使われるようになれば、輸送時間とコストを削減できるばかりでなく、輸送に伴う温室効果気体の排出量も減らすことが可能である。その第一の条件は、海氷分布の予測手法を確立することである。海氷の分布、氷厚、融解度(7~8月)、結氷開始(9~10月)を

総合的に把握し、氷海航行支援システム(氷海ナビゲーション、航行安全指標)を構築する計画が進行中である。

(2) 解決すべき点と社会に与える影響

航路が航行可能であることに加え、いくつかの解決すべき点がある。海氷域が衰退すると波浪が発達する。荒れた海象の寒冷域では海水飛沫が即座に結氷し、船舶に固着する。着氷が増加すると、大型船でもレーダー等の航行支援機器に悪影響が出たり、甲板作業性の低下、荷役設備の支障等が起きる。さらに、漁船等の小型船では、重心が上がって転覆する危険性がある。海氷の移動を予測できないと、リッジングによって極端に厚くなった海氷が船体を損傷することもある。また、温暖化により漂流冰山、冰山片の数が増し、とりわけ遠方から発見することが難しい冰山片や海水氷片との衝突の危険が増す。たとえ人命救助を果たしても、燃料流出による環境汚染は生態系に打撃を与え、海産物に依存する住民に大きな影響を及ぼす。

順調な航路利用が進んでいても、それに伴う問題が起こりうる。航路の途中には寄港地が必要となる。航行する船は多くないが、その経済効果によって住民の生活様式は変わってしまうであろう。これまでも頻繁に見られてきた開発に伴う問題が発生することになる。

(3) 今後の研究

まず安全航行を確保し、経済的に成り立たせるために、海氷諸量の予測を信頼できるものにする。安全性には1週間スケールの短期予報、経済性には数ヶ月におよぶ中期予報と1年から数十年の長期予測が有用である。氷と船舶が接触した際の力学的影響、船体着氷の影響と防止技術について研究を進める。これらを基盤にして、北極航路利用の可否判断および効率的利用のための航行支援システムを作成する。また、タンカー、砕氷船等新しい船種の着氷量予測に加えて、北極海の豊富な水産資源を求めて今後増加が予想される漁船等中小型船舶の安全性を確立し、甲板作業の危険を払拭するため、総合的な船体着氷の予測モデルを構築する。

寄港地の選択に際しては、事故の可能性と環境影響を住民に説明することが必要であるが、科学的・工学的知見に基づいた説明を一方向的に示しても、同意を得るのは難しい。様々な生活基盤、言語、伝統などを持って

いる住民グループの間で、お互いの意思疎通を図れる関係を築くため、人文社会科学に基づいた研究が必要である。その成果が住民と開発側の相互理解を可能にするであろう。

航路の利用に関しては、世界的物流システムの経済

地理学的評価を本格的に進める必要がある。同時に、国際法や関係諸国の法体系の分析を踏まえて北極海のガバナンスのあり方を解明するアプローチが求められる。

Q4: 太陽活動と北極超高層大気の影響

a. 太陽活動によって何が起きるか

地球の超高層大気で発生する多くの物理現象は、太陽からのエネルギーの流出である太陽風・太陽放射の変化に起因する。特に、太陽から吹き出したプラズマ（太陽風）は地球の磁気圏と相互作用し、極域へのプラズマおよび電磁エネルギーの流入が起こる。この結果、超高層大気において、オーロラを伴う大電流、大気の膨張や擾乱、さらに電波伝搬の環境変化などが起こる。また、太陽系外から飛来する銀河宇宙線量も太陽活動によって変動するが、宇宙線は、大気を電離し、雲生成を増加させるため地球の気候に影響を及ぼす可能性がある。このように、太陽に端を発した擾乱は、地球大気に大きな影響をもたらすが、この一連の物理過程を体系的に理解するには未だ至っておらず、また、現象の発生を予測することも現段階では難しい(テーマ10を参照)。

b. 社会にどのような影響を与えるか

図30に示すように、太陽フレア等により加速された高

エネルギー粒子は、地球大気の成層圏下部から対流圏において空気シャワーを生じさせ、大量の放射線を生成する。最大級の放射線は、一度で航空機乗務員の年間管理目標値の線量に匹敵する被曝をもたらすことがある。このため、航空機乗務員・乗客の健康被害を最小化するための方策を検討する必要がある。

太陽から放出されたプラズマと地球磁場との相互作用や極域におけるオーロラ活動により発生する地磁気変動は、地上において誘導起電力を起し、送電線やパイプラインに誘導電流を生じさる。これにより、制御システムの障害や、金属腐食が促進される。1989年3月に発生した地磁気急変現象に伴って地上に誘導された電流によって、カナダ・ケベック州の送電線網の変電所トランスに許容限度を越す電流が流れ、600万人に影響する停電事故が起きたことは有名である。

また、近年、人工衛星や有人宇宙船による宇宙利用や、GPSをはじめとする衛星測位の飛躍的普及により、これらに対する超高層大気の影響の低減が必要とされている。現在、衛星測位の航空利用が国際的な方針と

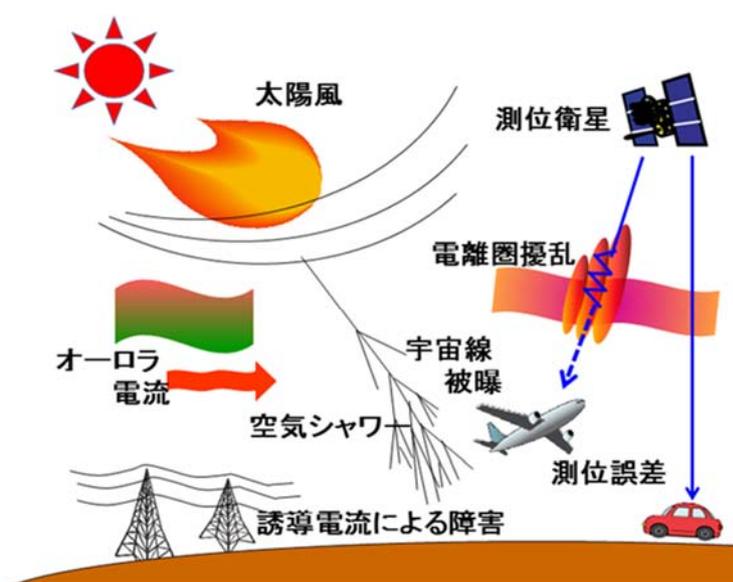


図30 太陽活動が社会に与える影響の例(地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来、2013年の図を一部改編)

して進められている。極めて高い安全性が要求される航空利用の分野においては、電離圏擾乱の特性を適切に反映した安全確保のための技術開発が求められている。一方、衛星通信を使って船舶の位置を把握する船舶長距離識別追跡⁹⁵システムにおいては、太陽や超高層大気変動の影響を軽減するために、光ファイバー網を用いるなどの対策が検討されている。

c. 今後の研究

人類社会を支える重要な知識基盤整備事業の一つとして、極域超高層大気のリモートセンシング、及び電離圏擾

乱現象の有効かつ確実な検出と予測につながる研究を工学分野と連携して進める。特に、人工衛星や、地上からのレーダーや分光機器・電磁場計測機器による超高層大気の観測、また、太陽高エネルギー粒子の地球到達を正確に予測するモデルの開発、磁気圏－電離圏－熱圏結合シミュレーションの高精度化、リアルタイム化を目指す必要がある。

上記の内容については、地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来(地球電磁気学・地球惑星圏学会、2013年1月)の第3章に詳しくまとめられている。

Q5: 北極圏人間社会の対応

a. 地震と津波の危機通報

(1) 地震・津波の状況と研究

太平洋プレートが沈み込むアラスカ州南部は過去から繰り返し大地震が発生し、それに伴った津波が発生している(例えば、1964年3月28日のアラスカ地震(マグニチュード9.2))。また、2002年にはアラスカ内陸部の活断層を震源としたデナリ地震(マグニチュード7.9)も発生している(Tsuboi et al., 2003)。北極海沿岸ではこれまで大きな津波が発生した記録はないが、2011年東北地方太平洋沖地震のように、従来大地震の発生が考えられていなかった地域でも地震とそれに伴う津波の発生があり得ることがわかっている。最近、グリーンランド氷床の融解が急速に進みグリーンランド下部のマントルが隆起することで地殻に歪みがたまり、数100年後には周辺で大地震を起こして津波が発生する可能性もある。

(2) 我が国における地震・津波への対策

日本では、沿岸域の災害を最小にするため、地震発生後直ちにその規模と位置から津波警報を発するための津波予報システムが開発されている。津波警報を迅速かつ正確に発するには、高精度の地震観測網と震源決定システムの整備が必要であるが、このようなシステム開発の技術は、既存の地震観測網を用いた津波予報システムにも生かすことが可能である。地震が発生してから津波が到来するまでには、地震の発生位置にも依るが10数分の猶予がある場合が多く、既存の地震観測システムを用いて津波警報が正しく発せられれば、そ

れにより避難することで被害を最小限にすることは可能である。

(3) 北極圏住民への提案

津波警報が発せられたときに、それに基づいて住民が避難を始めることができるためには、日常的に津波災害の評価により住民に注意を喚起しておくことが必要である。地震と津波についての知識を、科学的な基礎のない住民に受け入れられるように、啓蒙活動が必要なのは、日本における津波災害の歴史を見ても明らかである。正しい科学的知識の基に、地震が発生した場合に津波が起こる可能性があることを教育し、海岸で揺れを感じた場合には、また、揺れを感じなくとも津波警報が発せられたら一刻も早く高い場所に逃げることを日常的に啓蒙しておくことが極めて重要である。

さらに、住民が受け入れやすい災害情報伝達の方法を提示することも必要である。そのためには、地元自治体などとの協力により、津波高の想定、避難場所の選定、避難経路の確保を行うことから始める必要がある。これらの準備が整った後には、実際に現地住民と共に避難訓練を実施し、避難が現実的な時間で終了するかなどを確認することが必要である。このような実際の訓練を定期的に行い、津波災害に対する意識を住民に持ち続けてもらうことが重要であり、日本の災害研究者が持つ経験はこのような地域でも生かすことができると考えられる。

⁹⁵ 船舶長距離識別追跡: Long-Range Identification and Tracking of Ships(LRIT)

b. 先住民社会と都市部における持続可能な社会システム構築

(1) 北極圏の人間社会とは？

人類史と北極圏国家

北極圏の人間社会を理解する基盤は、先住民諸集団と北極海(社会科学では北極圏海域)を囲む諸国家(カナダ、デンマーク(グリーンランドおよびフェロー諸島を含む)、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、ロシア、スウェーデン、米国)との関係にある。

近代国家の国境概念が北極圏社会で本格化するのには、20世紀初頭以降である。国家支配が及ぶ以前からの住民である「先住民」は、言語・文化・民族的に多様な諸集団である。20世紀初頭の民族学的調査によれば、その経済は狩猟採集、漁業、トナカイ牧畜、海獣狩猟によって支えられ、地域間をまたぐ交易が活発に行われていた。

国家にとって、北極圏は資源埋蔵地であった。ロシアやカナダが北極圏に進出するのは、毛皮資源獲得のためであったし、19世紀、米国は捕鯨産業のためにベーリング海においても活動を広げた。先住民との関係は、戦争、交易、服属という形で進展したが、いずれの地域も類似する過程を経て近代国家の領土支配が確立した。

冷戦と資源問題

移住者は、動物資源・鉱物資源のための資源開発基地を形成し、それらがネットワークで結びつく社会を形成した。一方の先住民社会に対しては、1950年前後から国家による定住化政策や国民化教育政策が本格化した。

20世紀中葉以降、グリーンランド等の米軍基地や、ソ連の核実験場ノバヤゼムリヤに象徴されるように、北極圏は高度に軍事化された空間だった。同時に北極圏は科学研究のための空間でもあった。1957～58年の国際地球観測年(IGY)の成果である南極条約の理念と対照的に、北極は科学領域でも冷戦体制下にあった。この点で20世紀の北極圏人間社会は、先住民・移住者・軍人・科学者による分断的構造だった。

先住民と環境問題

これが変化するのは冷戦崩壊後である。1987年ソ連のゴルバチョフが北極圏の平和的利用を唱え、1989年にはフィンランドの牽引で北極圏環境保護を実現するために前記8カ国が集まり、それが後の北極評議会(AC)形成(1996年)につながった。従来、国家主権に基づき排他的な統治の対象だった空間に、先住民を含む北極圏住民の福祉、持続的発展、環境保護に関与

するための政府間協議を行う組織が形成されたのだ。

北極評議会の決定は加盟国8カ国によってなされるが、常時参加者として先住民組織の関与が保証されていることは重要である。先住民は、単に8カ国の国民としてだけでなく、先住民組織として国家に準じる立場で協議に関わることができる。これは、近年の国連等でみられる国際機関における意思決定制度を踏襲したものである。

近年、西欧諸国や東アジア、インドなどが経済的利害から北極圏への関心を強めている。これらの国々は、関係するNGO等とともに陪席者として北極評議会に参加している。この点で21世紀の北極圏人間社会は、従来の構成集団の統合と新たな参加者で構成されるようになった。

(2) 研究の現状

開発と健康問題

北極圏人間社会の探究を従来行ってきたのは人文科学で、その主要課題は先住民の歴史と文化だった。現代的課題の一つは資源開発の影響である。ソ連崩壊後本格化した西シベリアの石油・ガス開発と先住民社会への影響分析からは、先住民社会への否定的影響が報告されている。地域意向の無視、パイプラインによる放牧地の分断、廃棄物による環境劣化、強制的移住などが発生しているからである。一方で、先住民のトナカイ牧畜が開発地区の食糧供給に寄与し、活性化したという報告もある。開発と伝統的生業が共存する可能性も示唆されている。一方、中緯度・低緯度の環境汚染物質が北極海に流入・滞留することで、沿岸部の海に生きる哺乳類や魚類を主食とする先住民社会の健康被害についても調査が進められている。

アイデンティティと先住民運動

近代化、現代化の進展とともに、文化的アイデンティティは希薄となり、国民化が進行するとかつては見なされていた。しかし、先住民運動の組織化に見られるように、民族的・文化的象徴性は、状況に応じて多様な人間集団の主観的同一化を促している。特に近年、先住民概念は、地域・民族横断的となり、国際政治のアクターのひとつとなった。一方で、カムチャツカ半島のカムチャダール人形成に見られるように、移民の子孫が牽引するかたちで独自のアイデンティティを生み出す現象も発生している。北極圏人間社会のエスニシティは動的な過程にある。

気候変動の影響

自然資源に依存する地域社会に温暖化が正否いずれの影響を与えるのか、文理融合による研究プロジェクトが近年進められた結果、地域社会の在来知やその社会的役割が解明されるようになった。また、環境変化を吸収するレジリエンスの観点からの分析も行われている。その一方で、氷河・氷床の融解による水面上昇、そして積雪と凍土の融解および降水増加に伴う湿潤化による洪水増加が、都市部、村落部双方の浸水・浸食被害となっていることも判明している (Symon et al., 2005)。

(3) 今後の研究

方向性

北極圏人間社会研究において必要なのは、従来の先住民研究の視座を移住者にも適用し、さらに、従来国家毎に行われてきた政治・経済分析も総合化することで、北極圏人文社会科学を構築することである。次いで、日本を含む東アジア世界との視座のなかで北極人間社会分析を実施することである。

内容

① 北極海ガバナンスにおける先住民運動

北極評議会のような地域的ガバナンスのなかで、先住民運動がどのように組織化されるのか、その政治的主張や組織間連携や対国家政策が、どのように行われているのか分析する。

② 北極圏多文化主義とアイデンティティ

資源開発や観光等に従事する移住者と先住民は、相互に社会的、経済的、文化的にも関わりながら生活している。この点についての理解を深めるため、文化混交現象とアイデンティティの再編過程を分析する。

③ 文化遺産としての在来知と発展

数千年の歴史的過程のなかで、極北環境に暮らしてきた先住民の気象・生態等に関わる在来知は、人類の無形文化遺産として価値がある。これを収集・記録するとともに、その価値を自然科学的評価も踏まえ、次世代に発展させる応用実践を行う。

④ 温暖化による環境変化と北極圏自然災害

温暖化は海氷の減少にとどまらず、永久凍土を含む森林域にも作用している。そこで発生する災害を類型化し、これに地域社会・都市がどのように対応しうるのが評価する。

⑤ 北極海航路開発と漁業資源開発の沿岸部社会への環境評価分析

温暖化によって中低緯度地帯と北極圏を結ぶ海域の利用は、増加する傾向にある。このことが、北極圏沿岸部社会の生態、社会経済に及ぼす影響を総合的に評価する。

⑥ 東アジアとシベリア・北極海の社会動態分析

東アジア諸国は、資源開発、科学観測の観点で北極問題に取り組んでおり、同時に陸続きの東シベリアには、中国、韓国の移住者、資本が導入されている。これらを総合的にとらえることで、北極圏人間社会と東アジアの接合の地政学・社会経済的分析を行う。

方法

北極圏人間科学研究のための研究ネットワーク構築。先住民中心の人文科学、国家中心の社会科学、人間環境に関わる自然科学の相互交流と相互理解を促進する場を構築する。とりわけ、人類学と法学分野で検討されてきた先住民概念とその社会的実態に関わる知見を土台に、共有可能な北極圏人間社会モデルを構築し、個々の分析を総合化する。

6章 「生物多様性を中心とする環境変化を解き明かす」研究テーマ

生態系は地球温暖化に加え、さまざまな自然に起きる環境変化と開発による影響を受ける。生態系の仕組みと

影響を記述し、その上に立って多様性の状態と変化を述べる。

テーマ 8: 陸域生態系と生物多様性への影響

要旨

北極陸域生態系とその生物多様性は、地球温暖化などの強い人為的な影響にさらされ、いま重大な変化を遂げようとしている。熱帯や温帯など世界のその他の生態系と比較しても、北極陸域における環境変化は特に大きい（IPCC 第五次評価報告書）、その影響についての知見を増進し整理することで、将来予測につなげることは急務である。にもかかわらず、北極陸域生態系に関する研究は、他の生態系とくらべて特に遅れているため、今後の重点的な推進が求められている。

テーマ 8 では、北極陸域生態系、その特に重要な構成要素である生物多様性、さらに、これらの変化が地域社会や世界的な気候変動に及ぼす影響について考察する。北極陸域生態系は、気候変動のみならず外来種や農林業など人間の引き起こす深刻な変化に直面しており、これらを理解するためのフィールド観測や実験、そして、スポット的なフィールド研究を統合して、広域での将来予測を行うためのシミュレーション研究と、リモートセンシング研究の必要性について言及する。北極陸

域の生物多様性は、地域の広大さから研究と現状把握はあまり進んでいないが、さらなる調査の拡大と調査結果のネットワーク化、さらには、生物多様性を念頭に置いた環境変化への応答性についての研究などが必要となる。生態系の変化は、そこに暮らす哺乳類、鳥類といった動物の多様性にも多大な影響を及ぼす。また、広大な湿地に大量の有機炭素を蓄積する北極陸域生態系が全球の炭素循環に及ぼす影響も大きいため、これらに関するフィールド研究と、適切な将来予測を行うために必須である生態系プロセスを明示的に再現するシミュレーションモデル研究が重要となる。

このテーマで取り上げる Questions は以下の 3 つである。

- Q1: 人為的な要因で起こる環境変動は北極陸域生態系にどのような影響を及ぼすか？
- Q2: 生物多様性はどのような影響を受けるか？
- Q3: 北極陸域生態系の変化が動物や気候に与える影響はどうなるか？

まえがき

陸域生態系とその生物多様性は地球システムの重要な要素であり、ローカルには農林業の生産力と深く関係し、グローバルには炭素循環などを通して全球の気候へおよぼす影響も大きい。このように重要性の高い陸域生態系であるが、近年、人間のくらしや活動が直接、または間接に与える影響が深刻化しているため、現状を正しく把握し将来に備える必要がある。北極陸域における生態系と生物多様性に対する人間の影響は多岐に及ぶ（図 31）。直接的なものとしては、北極域の人間活動（土地利用変化と農林業・狩猟・鉱工業など）が与える影響があるが、間接的なものとしては、気候変動が引き起こす環境の変化（気温の上昇・降水量の変化・凍土の融解や林野火災など）などがある。本テーマで検討する内容は、北極域の人間社会への直接的な影響（テ

マ7参照）のみならず、物質循環の変動が引き起こす全球的な気候変動（テーマ 3 参照）を介してグローバルな人間社会に与える間接的な影響を考えるうえで欠かせないバックグラウンドとなるものであり、われわれ日本人をふくむ人類すべてにとって重要性と緊急性が高い。

本テーマの記述は、以下の 3 つの Questions に沿ってまとめられる。Q1 では、人為的な要因で起こる環境変動の影響が北極陸域生態系に及ぼす影響について概説する。Q2 では、そのなかでも特に生物多様性についての理解と求められる研究や対策について論じる。Q3 では、陸域植生の変化が生態系の高次消費者である動物に与える影響および植生変化による気候へのフィードバックについて述べ、本テーマから報告書全体へのアウトプットとする。

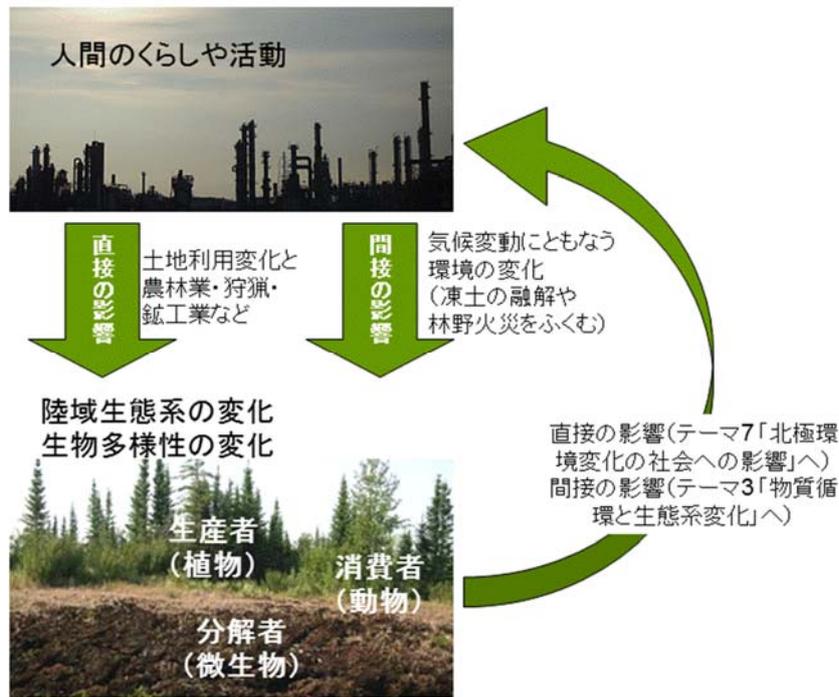


図 31 北極陸域生態系と生物多様性は、人間のくらしや活動と密接なかかわりを持っている。それは極域に暮らす人々だけの問題ではなく、気候変動を通して世界の人間社会との相互作用を持っている。

Q1: 人為的な要因で起こる環境変動は北極陸域生態系にどのような影響を及ぼすか？

a. 研究の重要性と現状

亜寒帯・寒帯の陸域生態系(以降、北極陸域生態系と呼ぶ)は、ほかの生態系と比較してさまざまな特徴を持っている。きびしい環境制限(低温、積雪、短い夏季など)に対応した、特有の生物種と生態系が特徴である。気温などの環境の季節変化が特に激しいため、季節的に群れで移動したり、一時的に北極陸域を利用する動物も数多い。また、北極陸域生態系は、森林であるタイガと、高木の存在しないツンドラというきわめて対照的なふたつの生態系によって構成されているため、科学的な理解を得るために必要な情報は多岐にわたる。北極陸域生態系は、その特異さゆえに環境のわずかな変化にも敏感であり、また、気候変動は特に北極陸域で激しくなると予想されていることから、生態系について理解しその知識を保全に活用するためにも、迅速かつ重点的な研究の推進が求められている。

地球温暖化をはじめとする人為的な環境変動は、北極陸域生態系に強い影響を及ぼしており、それは今後さらに強まっていくと考えられている。人為的な環境変動の要因は多岐に及ぶが、ここでは代表的なものを挙

げ、その影響の深刻さと現時点における科学的知見について考察する。まず、温室効果気体の排出に由来する気候変動は、気温や降水など北極陸域生態系が成立する基礎的な条件を大きく変化させつつある。また、鉱山、油田、水力発電など北極陸域に埋蔵される資源の開発が行われる際には、大気、水質、土壌などの汚染が深刻な問題となっている。人間活動は意図するかわりにかかわらず多くの外来種の流入を招き、在来種によって構成されていた生態系に影響を及ぼしている。気候変動によって南方生態系の種が侵入すること、たとえば森林限界の北上によるツンドラへの木本の侵入なども警戒されている。近年対策のめどが立ったとはいえ、極域における影響が特に大きくなるオゾン層の破壊による、有害な紫外線量の増加がもたらす生態系への影響も考えられる。

気候変動を介した影響と人間活動の直接の影響の両方がかかわる問題もある。林野火災は北極陸域生態系に甚大な影響を及ぼすが、その発生要因は多様なこともあり、メカニズムの総合的な解明はすすんでいない。林野火災は落雷などの自然着火のみならず、人間

活動が原因となることも多いことが、複雑性を高めているのも一因である。また、林野火災の深刻度は、気温、風速、土壌水分量などの物理条件によって大きく左右されるため、気候変動の影響を含めた林野火災発生のメカニズムの理解と将来予測が重要となる。さらに、林野火災が気候変動に与える影響は多岐におよび、現在の科学的知見では、それは総合的に温暖化を増幅する正のフィードバックになるか抑制する負のフィードバックになるかすら分かっていない(図 32)。

森林を構成する樹木などの植物は生態系の基礎生産を担うものであり、植生の変化は動物相や微生物相への影響をもたらす。植生の変化にも、気候変動を介するものと森林伐採など直接の人間活動によるものがある。これらは生物多様性のみならず、炭素蓄積など幅広い生態系サービスに影響を及ぼす。気候変動を介した動物への間接的な影響については Q3 で述べるが、直接的な影響としては、森林伐採や道路・鉄道などの建設による生息地分断化(habitat fragmentation)の影響も無視してはならない。北極陸域生態系には大型ほ乳類など広域を移動する動物が多く生息するため、生息地の総面積だけでなく、その形状にも注意を払う必要があるためである。また、伝染病や虫害についても、気候変動がもたらす感染地域の拡大に加えて、人間の移

動に伴う流入という要因も考慮しなければならない。

都市開発や農地開発にも注意が必要である。従来、北極陸域(特に、内陸部)は、人口密度が低く農業などの産業活動はあまり行われてこなかったのだが、温暖化によりその環境が産業活動に好適となることで、今後人間活動が高まることも考えられる。スカンジナビア半島などで見られる泥炭地を人工的に水抜きすることによる農地化などの今後についても、注意が必要である。このように北極陸域生態系の変化は多岐にわたり、その影響は甚大であると思われるが、これらについて観測し、現状を把握し、そのすべてを総合して予測するシステムの開発は遅々として進んでいない。そもそも生態系における生物プロセスは理論の一般化が難しいため、統合的かつ広域に適用可能なモデルの開発はあまり進んでおらず、そのようなモデルの必要性がやっと論じられ始めた段階にある(Purves 2013)。北極陸域では観測環境の厳しさから、そのようなモデルの妥当性を裏付けるデータ取得も他の地域に比べて困難であることが多く、モデリングおよび観測研究の両面での強力な研究推進が望まれている。

b. 今後の研究

北極陸域生態系の変動の理解と生物多様性の保全

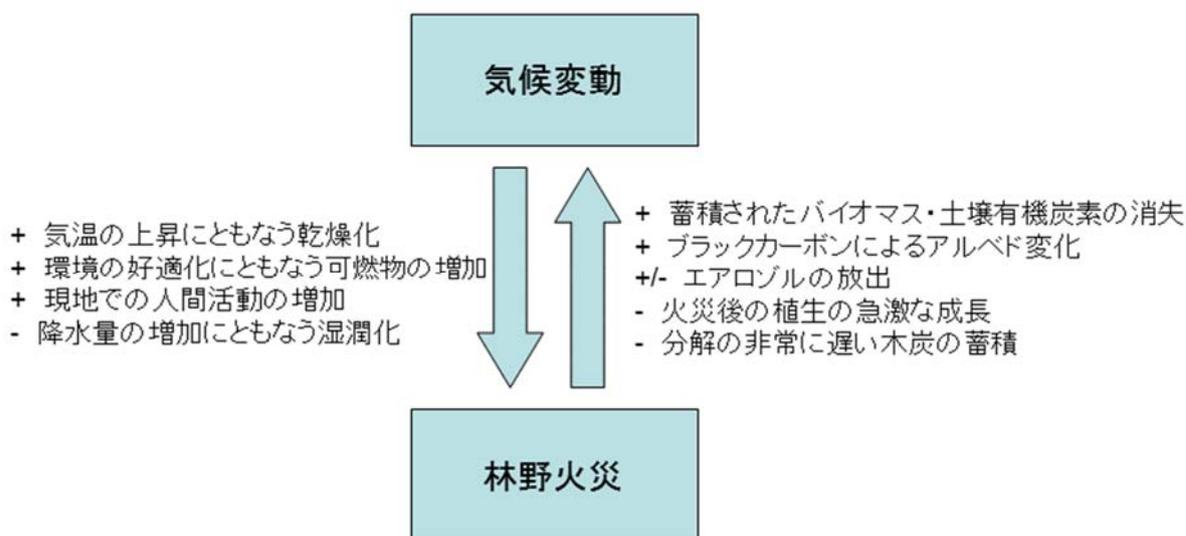


図 32 気候変動と林野火災は複雑なフィードバックを形成している。+が正のフィードバック、-が負のフィードバックを表している。気候変動によってどの程度林野火災の影響が増大するか、そして林野火災は気候変動を加速するか抑制するか、総合的な理解が求められている。

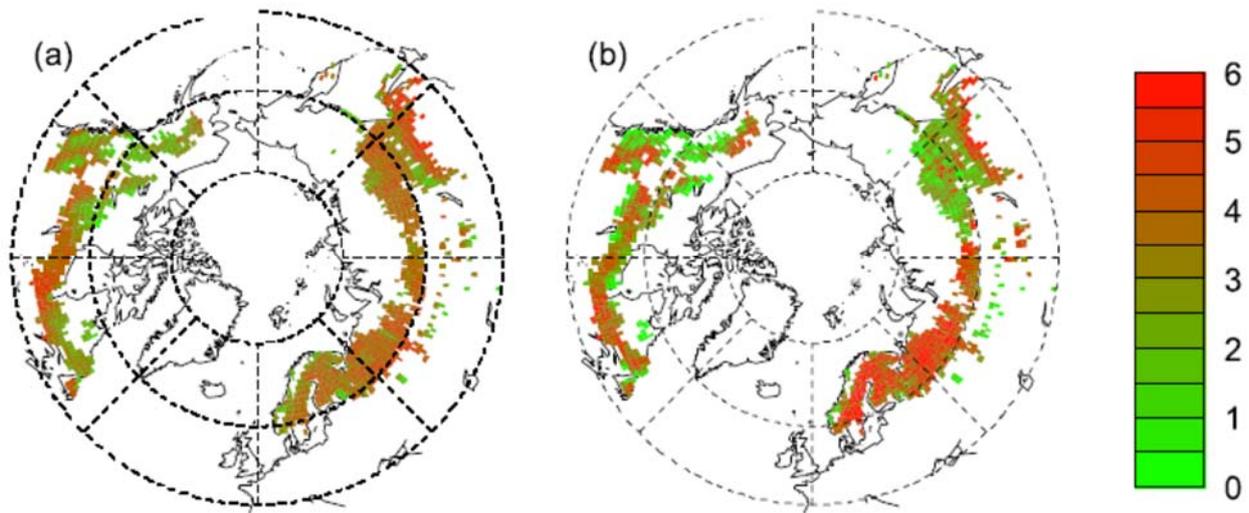


図 33 環北極陸域における葉面積指数。(a)MODIS による観測データからの推定値。(b)陸域生態系モデルによるシミュレーション (Ise and Sato 2008)。このように、植生のタイプとサイズの分布を適切に見積もる研究を推進することで、北極陸域生態系のメカニズムや生物多様性の理解が促進される。

のためには、まず植物・動物生理や環境変動への応答や適応など生態学的基礎研究が重要である。そのためにフィールドにおける継続的な観測が必要であると同時に、衛星リモートセンシングを活用した広域でのモニタリングと、シミュレーションによるメカニズム再現と将来予測が今後ますます重要となる。

中長期的には、観測システムの一層の安定化、広域化、低コスト化、リアルタイム化が望まれる。そのため、定点観測カメラなど自動観測機器の活用やネットワーク化に重点を置くべきであろう。フィールド観測によってリモートセンシングデータの解析を最適化することで、生態学的変数をより高精度に推定することが可能となる。また、図 33 が例示するように環北極陸域全域を対象としたシミュレーションモデルの高精度化、および観測とのデータ同化を行い、適切な将来予測研究の実施を進めていくことが肝要である。これまでに行われたアラスカやヨーロッパの北極陸域生態系に関するシミュレーションの先行研究をふまえ、環北極陸域全域での植物生理生態、個体群動態、群集動態、物質循環といった将来予測に必要な各要素のモデル開発と改良を推進していかなければならない。

生物多様性の保全については、さまざまな生物種や

生態系を総合的、客観的に評価したうえで、それぞれの保全についての優先度、緊急度を示すことが望ましい。これにより、鍵となる生物種 (keystone species、鍵種)、鍵となる生態系 (hotspots) を見極め重点的な保全を行ううえで、激変が予想される北極陸域生態系をより効果的に保護することが可能になる。また、日本の研究者としては、現地の研究者や研究機関と密接なコミュニケーションを保ち、互恵的な関係において研究をすすめていくことが今後さらに求められる。国際的な枠組みとして、IPBES⁹⁶や CAFF⁹⁷や GEO BON⁹⁸などに積極的に協力することも必要である。

アラスカにおいて、北方林では 2004 年に発生した大規模林野火災後の群集回復過程を調査中であり、ツンドラではツンドラ火災後の回復過程を同様に調査中である (Tsuyuzaki et al., 2009)。今後、これらの結果を踏まえ、野外観測に加え火災実験等を組み合わせることで、火災の短期的・長期的影響を明らかにする計画が立案されつつある。また、衛星リモートセンシングと地上観測を対応させた広域での高い精度での炭素収支の推定を行うことが必要である。

⁹⁶ IPBES: Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services

⁹⁷ CAFF: Conservation of Arctic Flora and Fauna

⁹⁸ GEO BON: Group on Earth Observations - Biodiversity Observation Network

Q2: 生物多様性はどのような影響を受けるか？

a. 研究の重要性と現状

生物多様性についての研究と情報の蓄積は、北極陸域生態系の変化を把握し将来予測を行うために欠かせないものである(ボックス 2)。しかし、中低緯度地域の生態系と比較して、北極陸域生態系の生物多様性に対する関心は低く、調査も不足している。特に、現時点での日本の研究者による研究は限定的であるが、今後の調査・研究の発展が切に望まれる分野である。以下に研究の現状を具体的に述べ、それらを考慮して今後の研究の方向性について議論する。

北極陸域生態系の植物の種多様性に対する脅威として、絶滅危惧種と外来種の二つの問題がある。地域の絶滅危惧種を網羅的にまとめたレッドリストは各国、各地域で作成されつつあるが、具体的な保全策を考えるためには、さらに国をまたぐより大きなスケールあるいは小地域のより小さなスケールなど、多面的なリスト作成が必要である。外来種のリスト(ブラックリスト)作成はまだ遅れているため、一刻も早いデータ統合がのぞまれている。

(1) 生物多様性について

北方林の種多様性は熱帯林や温帯林に比べ低いが、その生態系の多様性は、熱帯林や温帯林に匹敵するほどの高さを持つと考えられる。北方林が存在する環境の特徴は低温と乾燥であるが、そのような環境下では光ストレス(光合成で利用できない光エネルギーが過剰となり活性酸素が生成され、植物の組織に傷害を与えるようなストレス)が増幅され、植物の生存にとっては非常に厳しい環境となる。このような環境で生存し繁殖するため、植物は多様な戦略を用いている。すなわち、種

子繁殖する樹木とクローン繁殖する樹木、広葉樹と針葉樹、常緑樹と落葉樹という戦略であり、この意味において北方林の多様性は高いといえる。しかし、北方林は地球上の全森林面積の約 1/3 を占めるにもかかわらず、その生物多様性に関しては例外的に調査・研究のすすんだ場所(植物生態学に関しては、シベリアのヤクーツク周辺やカナダの BOREAS サイトなどの、いわゆる「スーパーサイト」)を除いては詳しい調査・研究はほとんど行われていないのが現状である。

(2) 泥炭湿地について

亜寒帯から冷温帯に分布する泥炭湿地は、有機炭素蓄積系として全球の炭素循環の中で重要な位置を占め、地球環境変動に大きなかかわりを有している(Clymo, 1983)。泥炭湿地は他の陸域生態系とは異なる生物相を有し、生物多様性の観点からも重要な生態系である。泥炭湿地生態系を個別に見ると、生態系が陸域と水圏の境界に成立しているため、これら両者の環境特性を併せ持つと同時に、水環境の変動に伴う時空間的に変動性の高い多様な環境が形成されているため、生物多様性が高い(Mäkilä et al., 2001)。泥炭湿地生態系における環境と生物多様性の関連を解析する研究は、多くの湿地で行われているが、空間的な不均質性が高い泥炭湿地生態系全域を網羅する研究や長期的な変動を解析した研究は、これまでほとんどなく、今後このような観点からの研究が必要である。

(3) 環境応答について

北極陸域で予期される環境変化の影響を適切に評価するには、生物の応答の多様性を検討する必要もあ

ボックス 2

生物多様性とは？

「生物多様性」とは、すべての生物(陸上生態系、海洋その他の水界生態系、これらが複合した生態系その他生態系又は生育の場のいかなを問わない)の間の変異性をいうものとし、①種内の多様性、②種間の多様性、③生態系の多様性という3つの異なるレベルでの多様性を含む概念である(1992年、リオデジャネイロ、「環境と開発に関する国際連合会議」(地球サミット)における「生物の多様性に関する条約」)。種内の多様性とは、同一種の生物集団内における遺伝的多様性のことである。種間の多様性とは、どれだけ多くの生物種がいるか、といった種多様性のことである。そして、生態系の多様性とは、生態系におけるそれぞれの生物種の機能や相互作用などの多様性のことである。「生物多様性」という言葉から多くの人々がイメージするのは種多様性であるが、種多様性だけでなく、遺伝的多様性、生活史や適応の多様性なども考慮しなくてはならない。

る。気候変動に対する生態系の維持において、生態的応答の多様性の重要性が指摘されている(Elmqvist et al., 2003; Mori et al., 2013)。気候変動や攪乱に対する生態的応答の多様性が高いと、場所や生物種によって多様な反応が生じるため、生態系が環境の変化を許容できる程度(resilience)は大きくなると考えられる。よって、気候変動に対する生態系や種に特異的な応答の評価が必要である。

b. 今後の研究

上に記述した生物多様性に関する研究の現状と問題点を解決するための共通の基礎として、①散逸しがちな調査・研究結果と知見をデータベース化して公開すること、②現在はスポット的である調査・研究の広域化の2点が重要である。加えて、国内外における自然保護教育の積極的な推進も必要であろう。また、分類学的観点からの学名の整理についても考える必要があるだろう(ボックス3参照)。

気候変動に起因する生物境界線の移動の調査研究は特筆すべきである。たとえば、温暖化によって北方林がツンドラに進出することは生態系の大きな変化のみならず、物質循環や地表面物理過程の激変をもたらすため、温暖化予測研究への貢献は大きくなるだろう。このようなダイナミックで過渡的な変動を、時系列に沿って定量的に予測することが重要な課題である。

気候変動に伴う生物多様性変化と生態系機能の応答についても、今後の発展がもめられる。地球規模で急速に進行する気候変動は、生物群集構造を変化させるだけでなく群集がもたらす生態系機能にも影響することが懸念されている(Loreau et al., 2001)。近年、生物多様性とその生態系機能の関係性についての研究が進み、生物多様性の急速な消失は生態系機能の低下

をもたらすと考えられている(Cardinale 2012)。気候変動に対する脆弱性が高い生態系の特徴として、低資源で種多様性の低い生態系が挙げられている。こういった生態系では、種や機能特性の多様性のわずかな増減でも生態系へのインパクトは大きいと予想される。また、北極域における気候変動の影響(たとえば気温上昇による生育期間の延長)は、厳しい環境により定着が制限されてきた異なる生活型の種や機能の新たな侵入を可能にする可能性があるため、今後のモニタリングが重要である。

また、今後北極域で特に重大な影響をおよぼすことが懸念される、気候変動にともなう種の移入についての生態系の応答を検証する必要があるだろう。それには、北方林への温帯の種の進出や、ツンドラでの樹木の繁殖など、劇的な生態系の変化をもたらす可能性のある事象がふくまれる。これらを理解するには、北極域に侵入するポテンシャル種を抽出することや、種の侵入を想定した実験などにより生態系機能の変化を明らかにする必要がある。さらに、生物多様性の高い生態系の重要性は認識されているが、生物多様性の低い生態系に特異的な生態系機能やその重要性を示す必要もあるだろう。

日本の研究者としては、北海道など日本にも存在する亜寒帯の生態系をケーススタディとして研究することにも、重点を置くべきである。北海道の高山帯は、千島列島、カムチャツカ、サハリンなどのかかわりが強く見られることから、国内の研究結果を広大な環北極域の生態系を理解するためにもちいることも視野に入れるべきであろう。陸域生態系は、地域特異性が高いことが特徴であるため極端な一般化には注意を払いつつ、例えば外来種の優占や侵入種管理についての日本での研究蓄積を生かすことなどは、可能かもしれない。

ボックス 3

学名の不一致問題

国際協力による野外調査は進展しているが、いまだ国際的な「学名の不一致問題」が種多様性研究における課題である。植物種の分布に国境はないが、学名にはしばしば国境がある。同一種に対して国により異なる学名が使われることは頻繁にある。原因は、種認識が国・研究者により一致していない(クランパーとスプリッター)、タイプ標本・新分類群記載文のデータベース化とデータ公表が不十分であることなどである。分類者以外の生態学者、環境学者なども理解できる国際的な「学名の共通化」が必要である。本来、学名はこのような目的のために考えられたはずだが、実際にはしばしばこのようには機能していない。このために古い文献、タイプを含めた標本情報の国際交流が必要である。GBIFなどのネットワークを通じた、各国の保有する学術標本の国際間での利用の促進が求められるであろう。

Q3: 北極陸域生態系の変化が動物や気候に与える影響はどうか？

a. 研究の重要性と現状

北極陸域には厳しい環境に適応して独自の進化を遂げた様々な種が生息し、特異な生物相を形成している。例えば、北極陸域生態系の保全のシンボル種 (flagship species) となっているホッキョクグマやホッキョクギツネは、寒冷地に適した形態や生活史を進化させた種であり、年間を通して北極に生息することが可能である。また、トナカイや水鳥は長距離の渡りという行動様式により、北極陸域生態系の短い夏に出現する豊かな餌資源を利用し他種との競合を避け繁殖する。Q1 および 2 で考察したように、北極陸域生態系では温暖化や林野火災、土地利用変化等が主要因と考えられる植生変化が進んでいる。これらの要因は、直接的に、また、植生変化を通して間接的に北極陸域生態系に生息する動物の多様性に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

たとえば、ジャコウウシ、トナカイやホッキョクグマなどの行動の不安定化や分布域の縮小が報告されている (ボックス 4 参照)。また一方では、森林性の植食動物 (リス類、シカ類など) や肉食動物 (オオカミ、ヒグマなど) の北上、極域で繁殖するガン・カモ・ハクチョウ類の個体数増加や分布域拡大 (ボックス 5 参照)、タイガでの病虫害の大発生等も知られる (Post et al., 2013)。今後は、温暖化進行によるさらなる植生変化、競合や捕食圧の増加、渡り・移動の時期と餌食物の消長や融雪のタイミングのずれ、伝染病や外来種の拡大等が懸念される。このように北極陸域生態系は重大な変動にさらされているにもかかわらず、その程度や応答については未解明な部分が多い。動物の変化は人間社会に大き

な影響を与えるため (テーマ 7 参照)、北極陸域の生態系—動物の相互関係を明らかにする必要がある。

北極陸域生態系の植生変化は動物に影響を与えるだけでなく、炭素循環などのプロセスを介してグローバルの気候にも影響を与えている (テーマ 3 と関連: 大気へのフィードバック)。このようなフィードバックメカニズムを明らかにするため、陸域生態系モデル (生態系における炭素動態を扱う炭素循環モデルや、それに加えて生態系を構成する植物機能タイプの時空間変化も予測可能な植生動態モデルなど) を気候モデルに組み込んだ地球システムモデルがこれまでに開発され、予測に用いられている。しかし、主として物理学的な要因で説明される陸面過程モデルと比較して、生物学的な要因と関連する炭素循環モデル、植生動態モデルは不確実性が高いと言われている。温暖化は北極域で顕著であることがこれらのモデルにより予測されているが、温暖化が生物多様性に関連する植物種や植生分布にどのように影響し、さらにこれが陸域の炭素循環や水・エネルギー収支を介してどのように気候にフィードバックしていくのかという点については未解明な部分が多い。

また、北極陸域における永久凍土地帯では、閾値 (0°C 付近) で水の物理的特性 (流動性や熱慣性など) が大幅に変化する。このため、気候、凍土、積雪と深く結びついているこれら地域の植生が、気候変動にともなう急激に崩壊したり、不可逆的な状態へ遷移してしまうことが危惧されているものの、そのメカニズム解明や数値計算による予測は不十分である。また、フィールドベースの研究においても、北極陸域生態系の植生につい

ボックス 4

トナカイの生息変化

数千kmの季節移動で知られるツンドラトナカイは、周極地域に広く分布するが、各地で個体数減少や分布域縮小が報告され、東シベリアでも著しく縮小していることがわかった (例: タイミル個体群約100万頭→数万頭)。そこで、衛星テレメトリ法で約20個体を追跡したところ、初冬の氷雨やROS (rain on snow) による氷板形成、初春の河川解氷の早期化など、温暖化に起因する様々な行動阻害を受ける姿が浮かび上がった。これらの個体は、夏は温暖化の進行が最も遅いオレニョク川上流部 (シベリア高地東端) に集合していたが、移動ルートや越冬場所は定まらず、そして新生仔の割合は30年前の半分以下に落ち込んでいた。エヴェン、エヴェンキなど先住民狩猟者の協力で実施されたこの日露共同研究は、サハ共和国政府による保護区・猟区の見直しにつながり、新たなモニタリング手法として東シベリア各地の自治体に採用されている。

ては、バイオマスや物質循環レベルの研究に比して、生物相や生活史レベルの応答に関する研究が遅れており、気候変動への応答は未解明な点が多い。さらに、動物相から気候変動への正負のフィードバックについても未解明な点が多い。

b. 今後の研究

広域スケールで動物の生息状況の実態を把握するには、データベースの整備と、そのためのモニタリング体制の構築が必要である(Q1、Q2、テーマ7 Q2bと関連)。フィールド調査が困難な北極陸域生態系で効率的なモニタリングを行うためには、重点的に調査を行うべき種(指標種、鍵種)、生態系、地域の選定(Q1と関連)や、現存するモニタリング地点・データ(例:CAFFサイトや水鳥のモニタリングサイト)の一元化と調査空白域の抽出、現地調査のみならず衛星追跡、航空機等による広域調査、人的ネットワークの構築(テーマ7Q2bと関連)、移動性動物の長期個体数トレンドの解析(ボックス4参照)等が必要である。さらに、データベースを用いて、動物の広域的な分布と生息環境との関連性を分析する必要がある。例えば、統計学的手法で、気候・植生条件等を説明変数とし、動物の潜在的な生息適地を広域スケールで推定することが可能である。このように作成した生息適地図は新たな調査地の選定にも役立つ。また、例えば、植生動態モデルを用いたシミュレーションを行えば、温暖化シナリオ下での生息地変化を推定することも可能であろう(Q1、テーマ3と関連)。ただし、温暖化による生態系変化には未解明な点が多いため、文献調査による総合的なレビューを行い、気候-植生

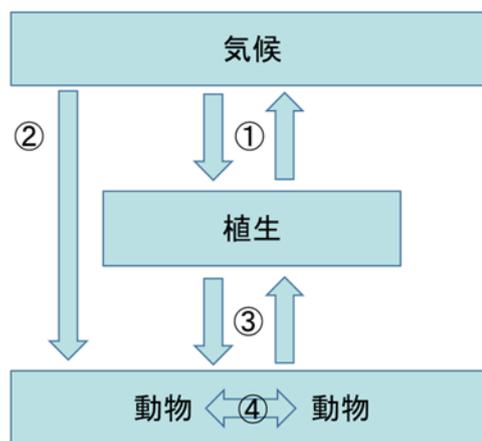


図 34 気候、植生、動物間の相互作用の概念図

間(図 34-①)、気候-動物間(図 34-②)、植生-動物間(図 34-③)、動物-動物間(図 34-④)等の関係について未解明プロセスの抽出を行い、これらの関係性を明らかにするためのフィールドベースの研究を数多く行っていく必要がある。

大気へのフィードバック(図 34-①)を明らかにするには、炭素動態モデルおよび植生動態モデルの高精度化が必要である。例えば、モデルのパラメータを調整するには、植生の観測データ(現地調査データや衛星画像データ)の取得とこれを用いたデータ同化手法の開発が必要である(Q1と関連)。また、フィールドベースの研究により、未解明プロセスの解明を進め、モデルの改良を行っていく必要がある。生物相から気候変動への正負のフィードバックの実態についても明らかにしていく必要がある(例:トナカイの強い採食圧と積雪によるアルベド変化、図 34-③①、昆虫の大発生による植生への影響、図 34-③)。

ボックス 5

水鳥のモニタリング

水鳥の多くは北極陸域生態系で繁殖し、低緯度地帯で越冬するため、世界的なモニタリングが行われ、個体数変動の実態が明らかにされてきている。日本でも環境省や NGO による長期モニタリングが行われてきており、その結果シギ・チドリ類の多くは個体数が減少してきていること、ガン・カモ・ハクチョウ類は種によって増減傾向が異なり、そのうち北極陸域生態系で繁殖する種のいくつかは、個体数が増加してきていることなどが明らかとなってきた。温暖化により、一時的には繁殖環境が向上する場合もあるが、長期的には植生変化、渡りのタイミングと餌食物の発生時期や融雪のタイミングのずれ、捕食者・病気・寄生者・競合種等の北上によって繁殖地の環境は大きな影響を受けると言われており(Ganter and Gaston, 2013)、今後の個体数変動に注視していく必要がある。

要旨

北極海はその表面が海氷に広く覆われるため、海洋生物はその特殊な環境に適応して棲息・活動し、海氷を基盤とする独特の生態系を築いてきた。しかし、近年の温暖化により海氷が急激に減少し、北極海氷生態系の基盤が失われつつある。ここでは、北極海が季節海水化することによる生態系と生物多様性の変化に焦点を当て、以下の 4 つの Questions を挙げ、長期的な研究の展望を述べる。

- Q1: 大気・陸域の物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？
- Q2: 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？
- Q3: 北極海食物連鎖と生態系変化・多様性はどうか関係しているか？
- Q4: 海洋酸性化と脱窒は北極海の生態系・多様性にどのような影響を及ぼすのか？

北極海の劇的な環境変化は、北極海の生物生産を変えると同時に、生物の消失と新たな生物の移入を引

き起こし、食物連鎖や競争関係を通じて物質の輸送や種の多様性に影響することが懸念される。一方で、種の多様性の変化が、生態系の生産力と分解に与える影響も大きい。そのため、北極海氷生態系を取り巻く環境と、生態系における各プロセスとメカニズムの定量的説明は、将来の北極海氷生態系と生物多様性への影響を評価する上で重要である。

しかし、これまでに明らかとなった事実の多くは、調査船が北極海を安全に航行できる夏季の開放水面域における結果が中心であるため、時空間的に断片的である。さらに、海氷生態系は物理、化学、生物過程が複雑に関与しているため、ほとんど解明されていない部分もある。そのため、砕氷船や係留系などを利用し、一年を通じた広域の多角的観測を行うとともに、プロセス実験や数値実験および他の分野と連携した学際的研究を実施することで、北極海の生態系と生物多様性への影響を明らかにすることが、長期的な課題である。

まえがき

北極海に生息する海洋生物は、海氷、または海氷の周辺環境に適応し、海氷生態系と呼ばれる独特の生態系を作り出している。しかし、その特殊な生態系の基盤となる海氷の減少や海洋酸性化など、北極海はこれまで経験したことのない急激な環境変化に直面している。その変化は、北極海氷生態系を構成していた生物の消失と新規生物の移入を招き、北極における海洋生態系は大きく変化すると考えられる。また、それは同時に北極海における生物多様性が失われる(あるいは増加することでもある)。生物の多様性を保全することは、生態系を保全し、人類の生存を支える観点からも重要であるという考えから、1992年に生物多様性条約⁹⁹が締結された。北極海においては、第一期(2000~2010年) Census of Marine Life (CoML) のプロジェクトである Arctic Ocean Diversity (ArcOD) によって生物多様性に関する数多くの知見が集積された。ArcOD は

7千以上の種を目録に記載し、無脊椎動物と魚類の生息域が北方へ拡大していることや、冷水種に対する暖水種の割合の増加を報告した。また、緯度 50~70 度の海域においては、生物多様性が増加することを予測している (CoML, 2010)。しかし、今後も継続すると考えられる海氷減少と海洋環境の変化に対して、北極生態系と生物多様性が今後どのように変化するのか、また、その変化の早さも不確実である (Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF), 2013)。

ここでは、北極域における環境変化が北極の海洋生態系と生物多様性に与える影響を評価するために、今後必要とされる研究内容を記す。なお、CBD で生物多様性は、「生態系の多様性」、「種の多様性」、「遺伝子の多様性」の 3 つが定義 (テーマ 8 のボックス 2 参照) されているが、ここでは、主に「種の多様性」について記している。

⁹⁹ 生物多様性条約: Convention on Biological Diversity (CBD)

Q1: 陸域・大気からの物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？

a. 研究の重要性と現状

北極海には、全球河川から海洋に供給される溶存有機炭素の10%以上が流入しているが、そのほとんどが難分解性であり、北極生態系への影響は小さいと考えられていた。しかし、近年の研究により、バクテリアや光酸化によって分解されやすい易分解性の溶存有機炭素が多く流入していることが明らかになるなど、陸起源物質の流入による北極海の生態系、多様性への影響は、その重要性が改めて認識されている(例えば、McClelland et al., 2012)。光合成に必要な窒素やリンなどの溶存無機栄養塩は、河川からの直接の流入量は少ないが、陸起源有機物の分解に由来する栄養塩類による海洋の一次生産へ与える影響は無視できない。また、氷床の融解による鉄などの微量金属等の流入についても近年その重要性が指摘されている。したがって、陸域から輸送される物質は、海洋、特に生物多様性の高い沿岸域のバクテリアや植物プランクトンの生物量・多様性に影響を与える。さらに、これらを摂餌する動物プランクトンやより高次の生物にも影響を及ぼす可能性がある。また、沿岸部の海底にいったん沈降堆積した陸起源物質が、陸棚域から輸送された後、外洋の生物生産に利用されることも指摘されているが、関連する生

物・物理・化学過程の複雑さのため、定量的には明らかになっていない。

大気を経由した物質の輸送も、温暖化に伴ってその生態系への影響が変化するだろう。例えば、中・低緯度で放出される人為起源の汚染物質が、大気を通じて北極圏まで輸送されているが(AMAP, 2009)、海氷の有無は、これらの汚染物質の海洋生物への供給過程や海水中での光反応などの変質過程を変える可能性がある。大気由来の栄養塩の寄与も増加する可能性がある。微量栄養塩である鉄は、一般的に陸から離れると不足しがちであるが、大気を経由して、沿岸から離れた海洋表層へと供給されている。温暖化に伴う陸上の雪氷の消失による土壌面積の増加や嵐の増加などにより、鉄の供給が増加する可能性がある。

b. 今後の研究(図 35 参照)

陸および大気起源物質による海洋生態系への影響と、温暖化に伴うその影響の変化を予測する研究が早急に必要である。今後、永久凍土や氷床の融解などによる陸域からの有機物流入量の増加、大気由来物質流入量の増加、水温上昇による微生物活性の増加、海氷減少による光透過率の強化などが、海洋の低次生態系

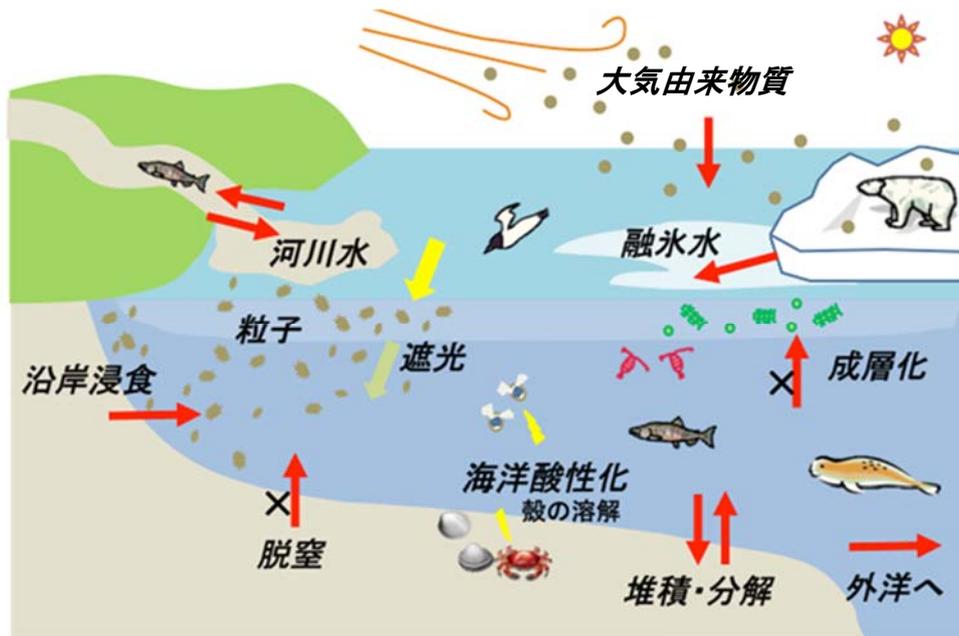


図 35 陸や大気からの物質流入と海洋内部での各種プロセスが生物に与える影響を表した模式図。温暖化により、河川や大気、沿岸浸食、氷河融解などによる、栄養物質や汚染物質の海洋への流入が増加する一方、海洋内部でも、海洋酸性化や成層化、堆積物中での窒素栄養塩除去(脱窒: Q4 参照)の促進などが起き、海洋生物に様々な直接・間接的影響を及ぼすと予想される。赤い矢印は、栄養物質や汚染物質の出入りをあらわす。

への陸起源の炭素や栄養塩などの供給量を増やす可能性がある。しかし同時に、陸起源有機物分解が増加することは海洋の酸性化を促進し、底生生物に負の影響を与える(テーマ3およびテーマ9、Q4参照)。一方、陸からの淡水流入量の増加は(テーマ4参照)、海洋表層の成層を強化し、表層の植物プランクトンへの栄養塩供給を制限することで、生物量の低下や種の変遷などを引き起こす可能性がある。さらに、沿岸域の海水を低密度化させるため、陸棚域から外洋への物質輸送の経路を変え、外洋での生物生産にも影響を及ぼす可能性がある。また、陸起源物質の流入量の増加により、海水中の光透過率が減少し、光合成を抑制するかもしれない。このように、陸・大気起源物質は海洋の生態系、多様性に多面的かつ重要な影響を与えるため、その解明には沿岸域の集中観測、外洋域を含む広域観測、培養および数値実験などの総合的な研究の展開が必要

である。

まず、河口域や沿岸侵食域、その他海域毎に生物の存在種や量を明らかにし、陸起源物質の量や質との関係を調べることで、全体的な影響の傾向を把握することが重要である。さらに、陸起源物質の分解による栄養塩の再生や酸性化を通じた生態系への影響を明らかにするには、影響の顕著な海域を特定し、その海域において物理・生物・化学の時系列観測を実施し、物質循環と生物種・量の季節変化をとらえることが必要である。

また、大気や陸を起源とする物質の添加実験により、微生物、植物プランクトンの応答を調べ、今後の予測につなげることも重要である。さらに、大気・陸起源物質の流入量や質の変化は遠隔地での変化に由来するため、これらによる生態系への影響を評価するには、海洋学、気象学、雪氷学、生態学等による学際的研究が必要である。

Q2: 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？

a. この研究の重要性と現状

生態系は海洋の物質を変換し輸送する役割を担っている。低次生物生産による物質は鉛直方向(下層)に輸送され、低次生物自身の移流や高次捕食者への転送により、水平方向に輸送されると考えられている。現状では、主に低次生物生産とその鉛直輸送の研究に限られた季節について行われているため、北極海の各海域における年間を通じた生物と物質輸送の関係に対する理解が未だ不十分である。また、動物プランクトンから魚類、鳥類への物質の輸送については、初夏に限定された知見である上、移動性の高い海棲哺乳類や海鳥のような高次捕食者が、物質輸送に果たす役割も良くわかっていない。種の多様性や生態系の多様性と物質輸送との関係については現状把握が部分的であるため、今後も進行すると見られる北極海の様々な環境変化に対して、これまでに育まれてきた生態系がどのように応答し、生物相と海洋物質循環との相互作用がどのように変化するのか、予測と見解はまだ定まっていない状況にある。

(1) 低次生態系を介した物質輸送

北極海の水塊環境と低次生物の種多様性、物質循環との関係は、海氷の少ない夏の時期を中心に、特にチャクチ海、ボーフォート海の沿岸、アムンゼン湾、ラプテフ海などの陸棚域において知見が得られてきた(例え

ば、Bluhm et al., 2011; Wassmann, 2011)。水中に溶存する二酸化炭素と栄養塩は、多くが光合成によって有機物へ変換される。陸棚域では、植物プランクトンとアイスアルジーによって生産された多量の粒状有機物が動物プランクトンや底生動物などの低次消費者と、魚類、鳥類から海棲哺乳類まで至る高次消費者の活発な生産活動を支えている。この海域は有光層に供給された硝酸塩のほとんどが生物に取り込まれ輸送されるため、夏季は基本的に窒素制限の状況になりやすい(Tremblay and Gagnon, 2009)。高次消費者に消費されずに残った動植物プランクトンは、動物プランクトン自身の移動や、死骸や糞粒・凝集体の重力沈降として下層に輸送され、一部は堆積物に埋没する。北極海における微生物群集は、水柱や陸域から供給される有機物を分解して栄養塩を再生し、嫌気性環境では、脱窒を通じて物質循環の駆動に強く関与する。海盆地では、生物を介した物質鉛直輸送に次のような違いが見られる。シベリア河川水とともに供給された栄養塩によって珪藻類の生産が比較的高いアムンゼン・ナンセン海盆地では、海氷減少に伴い珪藻類群体の海底への沈降量が増加してきており、底生動物の重要な餌となっている(Boetius et al., 2013)。

一方、高気圧性のボーフォート循環の影響下にあるカナダ海盆では、ピコサイズの植物プランクトンを主体とした基礎生産がみられるが、珪藻類や円石藻類のよう

な粒状有機物の沈降バラストになる植物プランクトンとそれらを捕食する動物プランクトンが少ないため、海洋表層で生産された粒状有機物の大半が垂表層で分解され、深層へはほとんど輸送されていない (Honjo et al., 2010)。しかし、今後の海氷減少がカナダ海盆における生態系を介した物質輸送にどのように影響するのか、まだよく分かっていない。物質循環に関するこれまでの研究の多くは、植物プランクトンやアイスアルジー等の基礎生産者の働き(例えば、基礎生産量や栄養塩取り込み量等)に重点が置かれており、物質循環をコントロールする動物プランクトンの働きに関しては、知見が著しく不足している (Wassmann 1998)。

(2) 魚類や鳥類による物質輸送

北極域では海鳥は海から繁殖地へと、羽毛、糞、卵や雛の死体などを通じて様々な物質を多量に運ぶことはわかっている (Michelutti et al., 2009)。しかし、魚類や鳥類による物質輸送への寄与についてはその詳細な過程ならびに定量的理解はまだ十分ではない。さらに、夏季間様々な海鳥が北極海を利用し、また、冬季間ポリニアにも多くの海鳥やカモ類が集まることが知られているが (Cooper et al., 2013)、この時期の海鳥の移動が物質循環にどういった役割を果たすのかよく分かっていない。

b. 今後の研究

(1) 低次生態系の物質循環における役割

基礎生産者の動態把握のほか、動物プランクトンの摂餌、排出や再生産等との関わりに着目したプロセス研究、さらには、Q3 に後述する表層-底層生態系 (pelagic-benthic coupling、ボックス6) のように3次元的なつながりも考慮することが重要である。そのために、植物の生産が高くなる春季やその準備期間となる冬季も含めて、砕氷観測船を用いたサンプリング、動物プランクトン船上飼育実験、セディメントトラップをはじめとする観測機器類の係留系実験等を組み合わせて、多角的に研究を遂行する必要がある。また、一度に広範囲を捉えることができる衛星観測や生態系モデルとの共同研究も進めていく必要がある。これまで、国内からは主に海洋研究開発機構の研究船「みらい」や北海道大学「おしよる丸」が太平洋側北極海の観測に貢献してきたが、これらの研究船は砕氷船ではないため観測できる北極海の海域や季節が限られている。これまでカナダの Institute of Ocean Sciences (IOS) など海外研究

機関との連携により砕氷船による海氷域での観測も行われてきたが、今後も IOS や Arctic Net など海外の研究組織と連携した観測を積極的に進めていく必要がある。

(2) 微生物群集が駆動する物質循環機構

微生物群集が駆動する物質循環機構を明らかにするには、微生物諸変数の時空間変化の定量的な記述と、その要因の特定が重要である。近年の各国の精力的な研究の展開により、北極海における微生物諸変数が、多様な有機炭素供給源(基礎生産、淡水、堆積物)と物理環境(水塊分布、水温)を反映して時空間的に大規模に変化していることが明らかとなってきた (Uchimiya et al., 2011)。これらのことは、近年、北極海で急激に進行する海洋環境変化の影響が、微生物群集を介した物質循環へ鋭敏に波及する可能性を示唆している。これらを踏まえ、今後取り組むべき課題として、(1) 気候変化が微生物生態系に及ぼす影響の中・長期的な評価、およびその海域間差異の解明、(2) 今後さらに顕在化すると予想されるプロセスの微生物生態系への影響評価(例えば、海氷消失に伴う気象擾乱が、微生物生態系へ及ぼす影響の解明)、(3) 近年急速に技術革新が進む分子生物学的手法の導入による、時空間変動解析の多角化、が挙げられる。

(3) サケ属魚類および海鳥を含む高次捕食者による海・陸域生態系への物質輸送

海鳥・海棲哺乳類の移動をバイオロギング手法で追跡し、羽根を交換する(換羽、換毛)ため一定期間とどまる海域やよく利用する海域を特定する。そのうえで換羽・換毛量や排泄物量の時空間変化を推定し、これらによる有機物供給量を推定する。さらに捕食量の空間変化を推定し、海鳥、海棲哺乳類が物質循環に果たす役割を考察する。

地球温暖化が促進されることにより、サケ属魚類の分布域が北極海へ拡大することが予測されている(例えば、Kaeriyama, 2008; Kaeriyama et al., 2014; Abdul-Aziz et al., 2011)。サケ属魚類が海洋起源の栄養塩(MDN)を陸域生態系へ大量に輸送することはよく知られている(例えば、Kaeriyama et al., 2012; Koshino et al., 2013)が、北極海の環境変化に伴うその周辺海域と陸域生態系へのこのようなサケ属魚類による MDN 輸送メカニズムの解明が待たれる(図 35)。

Q3: 北極海の食物連鎖と生態系変化・多様性はどう関係しているか？

a. この研究の重要性と現状

温暖化・海氷減少により分布が北に拡大した動物が何種かいる。光環境の改善によって基礎生産は上昇傾向にある(Pabi et al., 2008)。海氷が減ると主たる食物連鎖が表層(生産)－底層(消費)生態系から表層(生産)－表層(消費)生態系(pelagic-pelagic coupling)へと変化すると予測がある(ボックス 6)。その結果として、生物の種多様性への影響も懸念される。その影響は海鳥による陸への物質輸送やシロクマへの影響を通じて陸上生態系にも及ぶだろう。

(1) 微生物・動物プランクトンの分布・種組成・生産

植物プランクトン、微生物の分布と種組成の季節・空間変化はこれらの種多様性ばかりでなく、消費者の種多様性にも影響するだろう。北極海では冬、春季の海氷下の生物生産も無視できないがその時期の調査は少なく、微生物の情報はさらに少ない。動物プランクトンの知見は大西洋側北極海で多く、太平洋側北極海では少ない。温帯性動物プランクトンが北極圏に分布を拡大し(Matsuno et al., 2011)、再生産しはじめたとする報告もある(Buchholz et al., 2012)が、これが動物プランクトン全体の種多様性にどう影響するかわかっていない。

(2) 低次から高次生物までを含むバイオロジカル・ホットスポットの形成

生物生産が高かつ高次捕食者群集へのエネルギー一なが特異的に高い場所(「バイオロジカル・ホットスポット」ボックス 7)がある。北極海ではその位置や動態は、その時空間スケールも含め明確には把握されていない。鯨類を含む温暖種の移入、表層(生産)－底層(消費)生態系の維持に重要な生物ポンプ(海洋表層で植物プランクトンにより生産された有機物を底層生物や深層の生物に輸送する働き)の変化、大型魚類の生物量や分布の変化が、ホットスポットにおける食物連鎖など生態系の変化を介して、種多様性をどのように変化させるかは未知である。大気・河川輸送、油田開発による汚染(Mallory & Braune 2012)や輸送船が運ぶ移入種による影響も懸念される。

b. 今後の研究

温暖化・海氷減少が低次生産・食物連鎖を通してどう生物の種多様性に影響するか、バイオロジカル・ホットスポットに着目する必要があるだろう。生物の分布変化とプロセス研究を、海氷が存在する時期(冬季や春季)をふくめて実施し、より正確な現状把握、将来予想につなげる必要がある。

(1) 海洋構造変化と微生物・動物プランクトン群集および生産プロセス解明

海氷融解のタイミング、氷下および氷縁の植物プランクトンブルーム(群集が一斉に増殖、生産を起こすさま)と動物プランクトンによる捕食、動物プランクトンの再生産や発育のタイミングといったプロセス研究により、温暖化・海氷減少が微生物を含む低次生産構造・多様性に影響するメカニズムを解明する必要がある。

そのため、アイスアルジーをふくむ植物プランクトンの分布、組成、サイズ、優占種の変化をしらべ、テーマ 3 のアウトプットを利用し、海氷変化と植物プランクトン群集の関係を明らかにする。動物プランクトン多様性の変化や摂餌、再生産と発育タイミングの変化を、植物プランクトン生産、サイズ組成の季節、空間変化および太平洋産種の輸送から説明する。これらプランクトン群集の季節・空間変化と生物ポンプの担い手である生物起源沈降粒子の組成、形態、沈降フラックスの関係を明らかにする。過去の調査点を参考に、海氷下を含み、通年のサンプリングを砕氷船および係留系より実施する。

(2) バイオロジカル・ホットスポットと成立要因の理解

プランクトンから高次生物(魚類、鳥類、哺乳類)、ベントスも含め各栄養段階の分布と密度からバイオロジカル・ホットスポットを把握し、栄養塩供給量、生物生産量、消費量、食物連鎖長、種組成(種多様性)との関係を調べる。物理海洋環境を独立変数としたハビタットモデリングをおこなうとともに、食物網に関するデータをつかった生態系モデリングにより、ホットスポットの成立要因を解明する必要がある。重要な漁業資源となりうるサケ属魚類については、環境収容力、成長、個体群動態、摂餌栄養生態学をもとにした分布とその変化に関する研究を行う。これらにもとづき総合的にホットスポット成立メカニズムを理解する必要がある。

ボックス 6

表層-底層生態系のカップリング

南東および北部ベーリング海における研究では、海氷の後退が遅い年には、春先に十分な太陽光の元で海氷縁において、光環境が良くなると同時に大型ケイ藻のブルームが起きる。大型動物プランクトンがこれを摂餌するが、水温が上がっていないのでその増殖は弱く、消費されなかった大型ケイ藻が沈降する。これが豊富な底棲生物類の生活を支え、さらにカレイやカジカなど大型捕食性魚類がこれらを捕食するという底層食物連鎖へのエネルギー流が大きくなる。一方、温暖で海氷の後退が早い年には、後退時にはまだ太陽光が弱くさらに冬の季節風によって表層がかき乱されるので、大型ケイ藻のブルームは起きない。季節が進んで海水温が上昇し成層化がはじまると、小型藻類のブルームが起きる。このとき水温は上昇しているので、これを食べる小型動物プランクトンの増殖が盛んになる。そのためケイ藻はほぼすべて食べ尽くされてしまう。増殖した小型動物プランクトンは、そのまま表層性の魚類に食べられる。このように、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いう仮説がある(Grebmeier et al., 2006 など、図 36)。

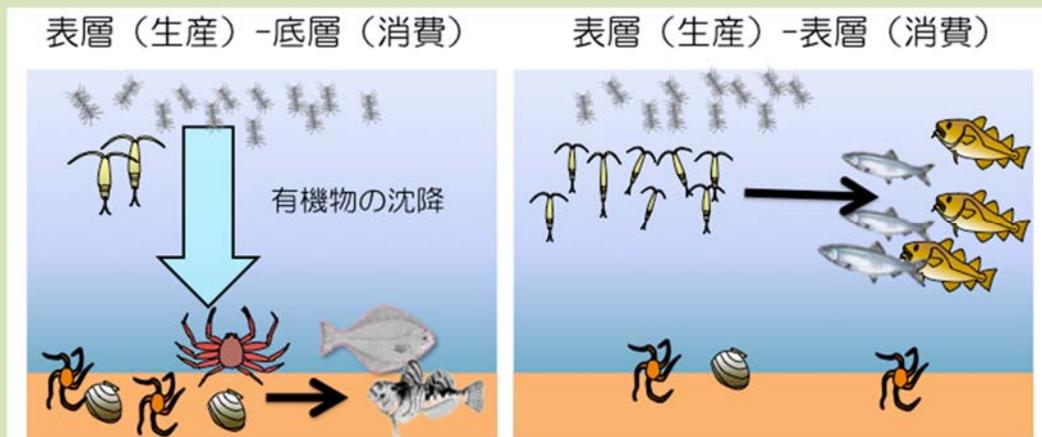


図 36 表層-底層生態系から表層-表層生態系への変化

ボックス 7

バイオロジカル・ホットスポット

バイオロジカル・ホットスポット (Biological hotspots) とは、周辺海域と比較して低次生物生産力が高く、底生生物も豊富で、多くの海鳥類や海棲哺乳類が生息、または、集結するのが目撃される海域のことを指す。上記の低次生物とは、極域海洋の基礎生産者である植物プランクトンやアイスアルジー、およびそれらを捕食してより高次の生物に対して物質を転送する等、重要な役割を担う動物プランクトンである。また、これら低次生物の生産力が、水柱中において高い結果、周辺海域と比較して一般的に底生生物も豊富である。これまでの研究結果より、北極圏海域のバフィン湾北部のノースウオータポリニア海域、アムンゼン湾のケーブバサーストポリニア海域等は、バイオロジカル・ホットスポットであるとされている。

そのため、ハビタットモデルをつかって、海洋環境将来予測にもとづく各種の分布変化予測、さらに、温暖化や輸送による温暖性種の移入、餌生物と大型鯨類の分布拡大によるボトムアップ、トップダウン効果、サケ属魚類の孵化放流事業、汚染の潜在的影響など種間関係を考慮した予測を行う。底棲生物(ベントス)、海鳥、海

棲哺乳類の分布を船によるサンプリング、目視観測で調べる。海鳥、海棲哺乳類については装着型小型機器によるトラッキングも併用する。餌分析(標本の目視・安定同位体比・脂肪酸組成など)から食物網を調べる。人為的影響監視の1つとして泥と生物の汚染物質測定を行う。

Q4: 成層化、脱窒、および海洋酸性化は北極海の生態系・多様性にどのような影響を及ぼすのか?

a. この研究の重要性と現状(図 35 参照)

全ての海洋生物の生産は、一部の海域を除くと表層の植物プランクトン生産に支えられていると言っても過言ではない。北極海においては、その生産を制限する要因として、光や温度に加え、窒素栄養塩の不足があげられる。温暖化と海水融解により、光と温度の条件は好転すると考えられるため、今後の北極海の生物生産にとって、窒素栄養塩の供給がより重要な因子となるだろう。窒素供給量を左右する過程として、大陸棚上で窒素栄養塩を除去する脱窒過程、混合による下層からの栄養塩供給過程が挙げられる。これらの過程の変化により、北極海の生態系・多様性が大きな影響を受ける可能性がある。

一方、人間活動により放出された二酸化炭素の一部が海洋に溶け込むことにより、海水の二酸化炭素濃度の増加、水素イオン濃度の上昇(狭義の酸性化)、炭酸カルシウム飽和度の低下が全球で進行している(Orr et al., 2005)。これらを総称して「海洋酸性化問題」として議論されている。海洋酸性化は、ほとんど全ての海洋生物の増殖や成長に何らかの影響を及ぼす可能性がある。しかし、北極海に棲む生物に対する、海洋酸性化の影響について十分な研究が行われておらず、喫緊の課題として認識されている(AMAP, 2013)。

(1) 成層化の影響

高い生物生産を支えている生物群は、湧昇や冬季の鉛直混合による深層からの栄養塩供給を十分に受けてきた植物プランクトンである。彼らは現在までの栄養豊かな海洋環境に適応した大型サイズの種(珪藻類)により構成され、長い間独特の生態系を維持してきたと言われている。温暖化と陸からの淡水や海水融解水による淡水化は、海洋の成層化を促進し、湧昇による深層から表層への栄養塩供給を妨げる物理・化学的な働きを

持つ。深層からの栄養塩供給を弱める成層化は表層に分布する植物プランクトンによる光合成(基礎生産)を低下させ、生態系を不安定にする生物学的な影響力を持つことになる。同時に、表層での基礎生産を担ってきた大型植物プランクトン(珪藻類)から、少ない栄養環境で増殖可能な小型の藻類(円石藻類、パルマ類等)に移るといった種の内れ替わりを促すであろう。

また、温暖化による表層の成層化は、表層混合層の厚さを薄くするため、混合層内に分布する植物プランクトンに対して、これまで以上の強光ストレスがかかると推定できる。極域に分布する植物プランクトン光保護機構に関する知見は少ないが、成層化の生物的影響は、極域や亜寒帯海域でより顕著に現れるであろう。

(2) 脱窒の影響

窒素不足は、特に太平洋側の海域で顕著である。これは、ベーリング海からチャクチ海の大陸棚堆積物中で、硝酸塩や亜硝酸塩などの窒素栄養塩を不活性ガスに変える「脱窒」と呼ばれる微生物の代謝が活発におき、海洋から窒素を除去しているからである。これらの海域における脱窒は、全球海洋の窒素循環においても重要な役割を担っている。水温上昇や底層への有機物フラックスの増加などにより、脱窒により除去される窒素が増え、海洋の一次生産を制限する可能性がある。しかし、定量的知見やその影響に関する見解が不足している。

(3) 海洋酸性化の影響

海洋酸性化による炭酸カルシウム飽和度の低下は、炭酸カルシウムの殻や骨格を作りにくくするため、例えば植物プランクトンの円石藻類、動物プランクトンの浮遊性有孔虫、翼足類、貝類などへ負の影響を与えることが懸念されている。これらは北極海や亜寒帯域の生態

系においても重要な生物であり、捕食者であるより高次の生物、例えば魚類や鳥類や哺乳類などへの影響も危惧される。炭酸カルシウムを作らない生物についても、種によっては海洋酸性化が有利にも不利にも働くことなどが、室内実験や現場実験で明らかになってきたが、その知見のほとんどは低中緯度域での研究結果に基づいているため、北極生態系に対する海洋酸性化の影響は不明である。しかし、北極海はもともと酸性化を緩和する能力が低い海域であるため、酸性化の影響を受けやすい。その上、水温の上昇や水温上昇にともなう中・低緯度域の生物種の移入などの他のストレスが、酸性化と同時に進行することが予想される。

b. 今後の研究

海洋の表層の動植物プランクトンの現存量と種組成の現状把握は、生態学的研究の常套手段であり、これまで多くの研究者により成果が発表されてきた。しかし、その多くは大型の珪藻類やカイアシ類に対するものであり、酸性化の影響が懸念される円石藻類や浮遊性有孔虫、翼足類に関しては知見の充実がはかられていない。将来の表層の成層化による下層からの栄養塩供給量の低下により植物プランクトンサイズが小型化するという予想のもとで、影響の深刻な海域において長期間にわたって監視観測することにより、円石藻類および粒子食性動物プランクトンの浮遊性有孔虫、翼足類の分布動態を十分把握することは、極域生物の多様性の特色を明らかにする上で意義がある。また、成層化によって表層混合層の厚さが薄くなることで、表層混合層内に分布する植物プランクトンが強光にさらされる時間が長くなると考えられる。このことは、これまで弱い光に適応して来た極域のプランクトンの強光ストレスが増大することに繋がると予想できる。そのため、植物プランクトンの生産に対する直接的な酸性化実験とともに、光保護機構の研究も必要となってくる。

チャクチ海やベーリング海における現在の脱窒量の見積もりはなされてきたが、シベリア側の広大な大陸棚での脱窒量は不明である。さらに、今後の北極海における温暖化、陸起源や海洋生物由来の有機物沈降量の増加により、脱窒を行う微生物がどのように応答するかについての定量的見解はまだない。例えば、微生物の種類によって、水温上昇に対する脱窒量変化は異なることが知られている。各海域に海底モニタリング・プラットフォームを設置し、有機物沈降量や水温変化、堆積

物の酸化還元状況、脱窒量、微生物のサンプリングなどを総合的に行い、季節変化や経年変化を明らかにすることができれば、今後の北極海の一次生産量変化の予測に大きく資することができるだろう。また、数値モデルに脱窒量の変化を加え、海洋の生態系や多様性に与える影響を評価することが必要である。

また、将来の酸性化が及ぼす海産生物への影響の実験研究は、これまで中低緯度の生物で進んでいるが、北極域の動植物プランクトン群集や高次生態系への影響の実験研究は極めて少なく、わずかに一部の海域や生物種、群集などに対して始まっているものの、ほとんどの生物種については実験室での予測実験すら行われていない。北極海には広大な大陸棚が存在し、底棲生物が生態系の中で重要な役割を果たしているため、動植物プランクトンに加え、貝類をはじめとする多様な底棲生物に海洋酸性化が与える影響を調べる必要がある。

そのためには、北極圏の多様な海域に生息する生物と酸性化の実態の調査、鍵種を用いた室内実験や現場における二酸化炭素の通気による酸性化シフト実験を行わなければならない。北極沿岸国と協力した国際プロジェクトを進めることが必須である。北極海の酸性化は世界の他の海に先んじて深刻な状態に達しているため、長期のモニタリングによって生態系や多様性の応答を明らかにすることで、今後の他の海域における酸性化の影響を予測するための貴重な情報を提供できるだろう。生態系予測モデルや、極域のプランクトンや生態系に関する日本の知識は、海洋酸性化に対する北極生態系および多様性の変化の評価研究に大きく貢献できると考えられる。

テーマ 10: ジオスペース環境

要旨

ジオスペース(人間の活動領域の一部となる地球周辺の宇宙空間)からの電磁波の伝搬や荷電粒子の降り込みにより、北極域の超高層大気及び下層大気の変動を受けることが、近年指摘されている。特に、中層・超高層大気の微量成分変動の下方伝播とオゾン濃度への影響や、北極振動の下方伝播に代表される成層圏-対流圏結合などの、上層大気から下層大気への影響が、最近多くの関心を集めている。一方、下層大気で励起された大気波動が、中層・超高層大気の熱的・力学的構造に大きな影響を与えることも明らかになってきている。また、温室効果気体の増大に伴う、中層・超高層大気の寒冷化の顕著な進行を示唆する結果も出始めている。これらの下層大気から超高層大気までの間の様々な上下結合過程の理解は、北極環境の全容を把握する上で重要であると考えられる。しかし、その定量的な影響評価はほとんど進んでいない。

太陽風、磁気圏から極域に侵入した電磁・粒子エネルギーは、中低緯度の超高層大気の変動(磁気嵐のような大規模変動を含む)を引き起こす。また、下層大気から発生した大気波動は、全球的な子午面循環の駆動

に貢献することが明らかとなっている。しかし、全球規模で起こるこのような変化の全容は未解明である。その他に、人類社会を支える重要な情報基盤整備事業の1つとして、極域超高層大気のモニタリング、電離圏擾乱現象の有効かつ確実な検出と予測に繋がる研究が必要とされている。今後数年の間には、新しい飛翔体観測や大型レーダー観測など、中層・超高層大気を含むジオスペース探査の充実が図られる予定である。この機会を逃さず、ジオスペースから超高層大気、下層大気への影響及び、それらの相互作用を評価・予測する研究体制を整備する必要がある。これらのジオスペース環境が北極環境に及ぼす影響や、両者の繋がり(プロセス)に関するキークエスションは、以下の4つにまとめられる。

- Q1: ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？
- Q2: 超高層大気は下層・中層大気に与える影響は？
- Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？
- Q4: 超高層大気を通じた極域から中低緯度へのエネルギー流入は？

まえがき

ジオスペース(Geospace)とは、多くの人工衛星や、国際宇宙ステーション、惑星探査機などが飛翔する、人間の活動領域の一部となる地球周辺の宇宙空間を表す用語である。人間の手の届かない遠方の宇宙とは区別をして、このジオスペースの環境をより深く理解するための研究や観測がなされてきている。

最近の研究によって、太陽活動や地球周辺の宇宙空間の変化が、地球の環境にも影響を与えていることが明らかにされつつある。特に、極域は太陽風や惑星間空間磁場¹⁰⁰の影響を受けやすく、様々なエネルギーが

上部から流入する領域であるため、その物理及び化学過程の詳細な理解が求められている。また、ジオスペース環境の中でも超高層大気は、下層大気で励起された大気波動¹⁰¹によるエネルギーや運動量の輸送、温室効果気体の増加等の様々な要因により、短期的、長期的な変動を示すことが明らかになりつつある。これらの上方からと下方からの影響及び、全大気圏の間の相互作用を理解することを目的とする「大気上下結合過程」の研究が、北極環境研究においてひとつの重要な課題となっている。太陽黒点の無い状態が1年以上継続する

¹⁰⁰ 惑星間空間磁場: 太陽風に伴って太陽の磁場が惑星間空間(太陽系内の惑星軌道が存在する空間)に引き出されたもの。太陽の自転により、惑星間空間磁場の磁力線は太陽から螺旋状に広がっていく。

¹⁰¹ 大気波動: 種々の大気擾乱に伴い発生する大気の波動。より局所的な大気重力波、グローバルな大気潮汐波、プラネタリー波などがあり、重力による大気の密度成層や、地球の自転に伴う角運動量の保存が復元力となり発生する。下層で発生した大気波動は、上方へ伝搬し、中間圏・熱圏領域では振幅が増大し砕波してエネルギー、運動量を放出することで、中層大気上部の子午面循環や東西風が駆動される。

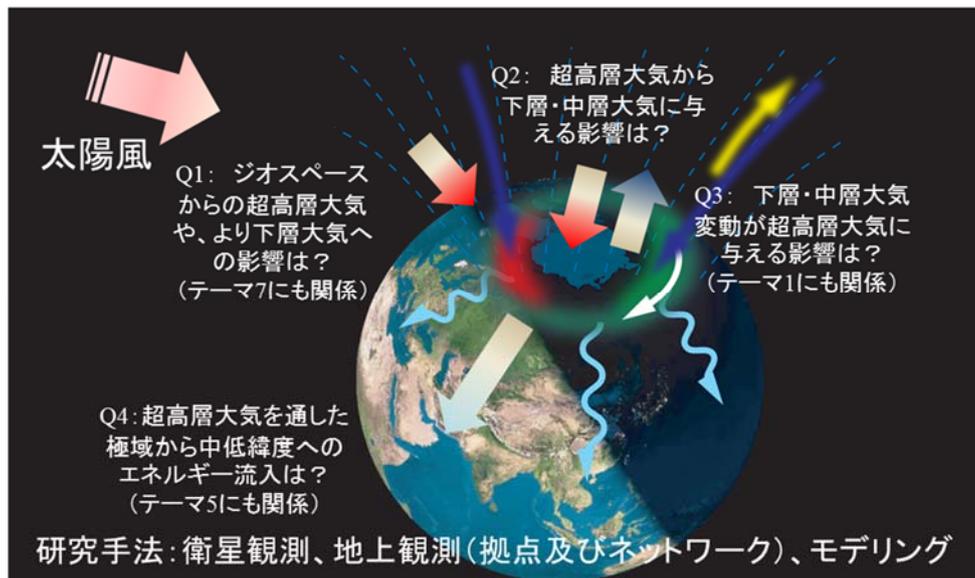


図 37 テーマ 10 の 4 つの Key Questions の関係

などの、近年報告されている太陽活動の様々な変動は、この大気上下結合過程を通じて北極環境に影響を及ぼすことが懸念され、分野を横断する融合的な研究が求められている。

また、ジオスペース環境の研究は、測位衛星に代表されるような人類の宇宙利用の発展に伴い、人工衛星の運用に必要な宇宙天気¹⁰²予報の精度向上に活用されてきている。それにより、北極域における(通信、電力、測位などの)社会基盤に対するリスクを軽減させるための実用科学としても重要になりつつある。特に、北極域の国々(例えば、ノルウェー)においては、ジオスペース環境の変化がもたらす各種の宇宙天気現象が社会的な関心事として認識されている。具体的な社会的影響については、テーマ 7「北極環境変化の社会への影響」の Q4 に記述する。

これらの太陽地球系分野の研究の多くは、国際共同研究プロジェクトとして、日本が牽引する形で進められてきている。今後数年の間には、新しい飛行体観測や大型レーダー観測など、中層・超高層大気を含むジオスペース探査の充実が、日本を中心とした国際協力の

枠組みの中で図られる予定である。この機会を逃さず、ジオスペースから超高層大気/下層大気への影響、さらに、それらの相互作用を評価、予測する研究体制を整備する必要がある。

本テーマでは、ジオスペース環境が北極環境に及ぼす影響や、両者の繋がり(プロセス)を、4つのキークエストIONに分けて説明する。まず、「Q1: ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？」では、「宇宙天気研究」をキーワードとして、太陽活動や地球周辺の宇宙空間の変化が地球環境に与える影響を中心に記述する。次に「Q2: 超高層大気の下層・中層大気に与える影響は？」では、大気微量成分の下方伝搬などを含む「大気上下結合過程」の研究を具体的に説明する。「Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？」では、温暖化に伴う中層・超高層大気の寒冷化を含む、下層から上方への影響についてまとめる。最後に「Q4: 超高層大気を通じた極域から中低緯度へのエネルギー流入は？」では、緯度間結合の研究の重要性を述べる。

¹⁰² 宇宙天気: 人間の活動領域が宇宙空間に広がったことから、人間生活に影響を与える天気を模して、宇宙環境またはそこで起きる変動現象を宇宙天気と呼ぶ。電磁場、放射線帯粒子、宇宙線が主な宇宙天気の現象要素である。宇宙天気変動現象に伴うエネルギーは地球磁力線に沿って極域電離圏に入り込み、超高層大気の熱構造や化学組成に影響を与える。

Q1: ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？

a. 研究の重要性と現状

太陽や銀河から飛来する高エネルギー粒子及び、地球磁場に捕捉されている放射線帯の高エネルギー粒子は、超高層大気に侵入し、中間圏以下の高度帯の電離を引き起こすなどの影響を与えることが知られている(Rishbeth and Garriott, 1969)。例えば、大規模な磁気嵐¹⁰³や太陽粒子イベント(Solar Energetic Particles: SEP)発生時には、極域において中間圏・成層圏上部オゾン減少等が起きていることが確認されている(例えば、Jackman et al., 2001)。また、近年、放射線帯電子の降り込みによっても中間圏オゾンの減少が起こる可能性が示唆されている(Rozanov et al., 2005)。しかし、これらのプロセスが中層大気に与える影響に関する定量的な評価は充分に行われていない。これらの高エネルギー粒子による空気シャワーは、特に極域周りでの航空機高度で被ばくを引き起こすため、この変動の予測と影響評価は宇宙天気研究でも重要な課題である。

ジオスペースから地球大気に流入したエネルギーは、極域超高層大気に様々な変動を引き起こすが、その過程の理解はまだ不十分である(例えば、Gray et al., 2010)。高緯度域では、オーロラ活動に伴って電離圏高度を流れる強い電流が地上において誘導電流を作りだし、送電線網やパイプライン等に障害を起こす。太陽紫外線の急増に伴う熱圏大気膨張によって、衛星の姿勢擾乱が発生し、衛星が運用停止に陥った事例も報告されている。また、電離圏における擾乱現象(電離圏嵐、プラズマバブルなど)は、近年利用が飛躍的に増大している衛星測位や、それを利用した航空機航法システムの精度と信頼性に大きな影響を与える。特に、極端宇宙天気現象と呼ばれる発生頻度が低いが規模が極端に大きい現象については、観測事例が少なく定量的な評価は難しいものの、その影響がきわめて大きいこと予想される。

さらに、太陽活動の様々な変調が近年報告されている(例えば、Shiota et al., 2012)。特に、極小期が通常

よりも長く続き、また極大期にも黒点数があまり増えないという状況は、マウンダー極小期¹⁰⁴と類似しており、当時と同様の地球大気の寒冷化が起こるのではないかという推測もある。一方で、マウンダー極小期の寒冷化は太陽定数の変動だけでは説明できないため、その要因として中層・超高層大気を介したメカニズムがいくつか提案されている。しかし、これらのプロセスの定量的検証は、観測、モデルのいずれの面からも未だに不十分な状況である。

b. 今後の研究

ジオスペースからの高エネルギー粒子による大気(特に、極域)への影響を評価するために、超高層大気の高精度な観測と、人工衛星や地上からのレーダー、分光機器、電磁場計測機器による磁気圏、電離圏の比較観測が重要である。特に、数年後に打ち上げが予定されているジオスペース探査衛星(ERG)計画や、北欧に国際共同の枠組みによって設置される予定の次世代非干渉散乱レーダー(EISCAT_3D)計画等の新しい大型ネットワーク観測及び大型拠点観測を有効に活用することがポイントとなる。また、太陽・太陽圏・ジオスペース科学コミュニティと超高層・中層大気科学コミュニティが密に連携して、研究を進める体制を構築する必要もある。

太陽の電磁波および、高エネルギー粒子が極域の中層・超高層大気に及ぼす影響の定量的な評価とその変動予測のために、紫外線やジオスペースの高エネルギー粒子を入力とし、各高度における影響の評価を行うモデルの構築が必要である。また、極端宇宙現象と呼ばれる発生頻度は低いが大規模な現象については、過去の事例解析による影響の評価、また、物理モデルによる極端宇宙現象の再現と予測が重要となる。このように、人類社会を支える重要な情報基盤整備事業の一つとして、極域超高層大気モニタリング、電離圏擾乱現象の有効かつ確実な検出と予測につながる研究を通信工学、航空工学などの工学分野と連携して進める必要があると考えられる。

¹⁰³ 磁気嵐: 太陽での大規模擾乱現象によって引き起こされるジオスペース最大の擾乱現象。最近では、Geospace storm(宇宙嵐、ジオスペース嵐)とも呼ばれる。このとき地球周辺の宇宙空間には大きな電流が流れ、また、宇宙放射線の量が増加する。さらに、電離圏、熱圏等の地球大気へも著しい影響が起こり、宇宙から地球へのエネルギー流入が急増する。

¹⁰⁴ マウンダー極小期: 17世紀後半に、数十年にわたって太陽に黒点がほとんど現れなかった期間。この期間、太陽活動は著しく弱く、一方、地球大気は寒冷化していたと考えられている。このため、太陽活動が地球の気候に影響を与えている可能性が示唆されている。

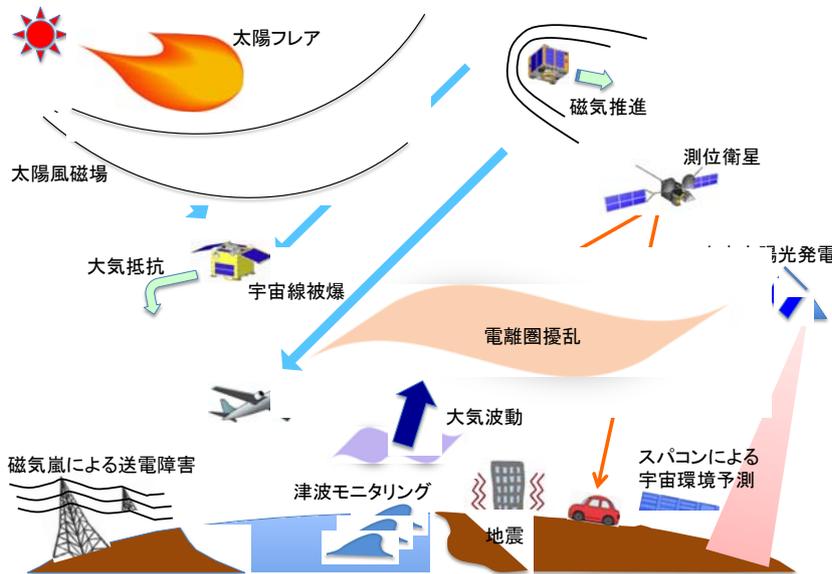
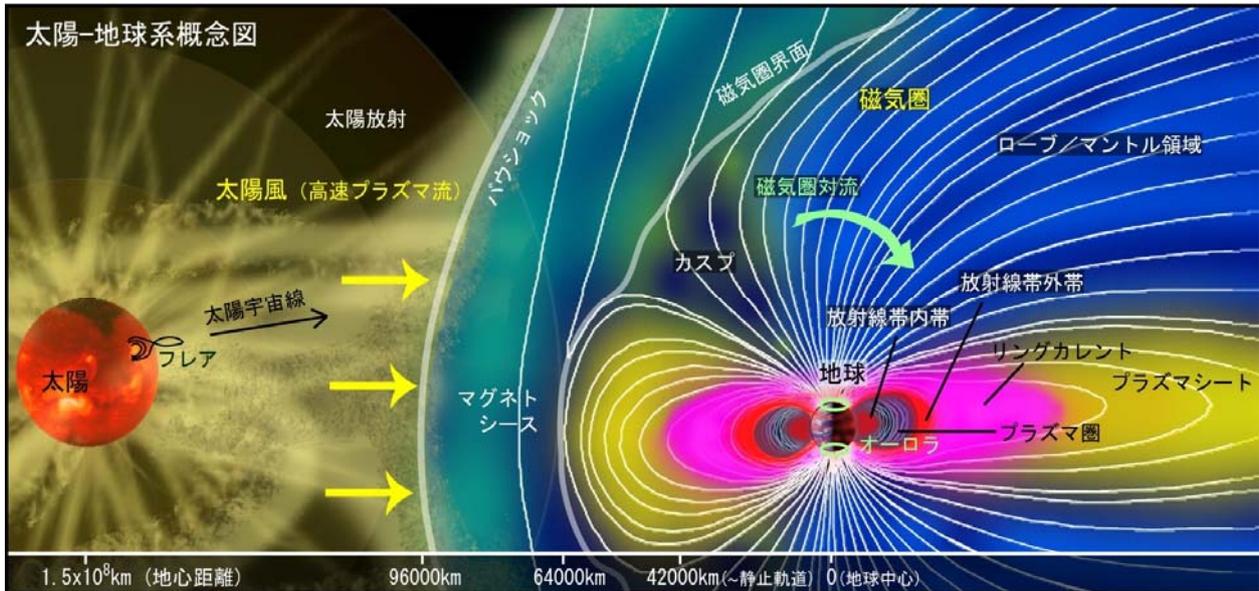


図 38
太陽-地球圏の領域とそこで発生する現象(上図)と、ジオスペース環境の乱れが社会に与える影響(下図)。図は共に、地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来(SGEPSS学会、2013年1月)より抜粋。

太陽地球系科学分野の研究者が中心となって推進している国際共同研究プロジェクト(CAWSES-II(2009～2013、太陽地球系の気候と天気)や VarSITI¹⁰⁵(2014～2018、太陽活動変動と地球への影響))では、日本がリーダーを輩出するなどしてプロジェクトを牽引している。また、日本には太陽地球系科学の世界的な研

究拠点があり、さらに北極を含む海外に観測拠点を展開中である。このような日本の優位性を活かし、今後の太陽活動の変動に対して地球大気がどのような応答を示すのかを知るために、太陽地球系科学分野からの積極的なアプローチが期待される。

Q2: 超高層大気が下層・中層大気に与える影響は？

a. 研究の重要性と現状

下層から上層へ影響が及ぶという地球大気的基本的な性質は、高度と共に密度が減少する地球大気の成層

構造に由来している。一方で、北極振動の下方伝播に代表される成層圏-対流圏結合など、上層から下層への影響が近年多くの関心を集めている(例えば、

¹⁰⁵ VarSITI: Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact (VarSITI、太陽活動変動とその地球への影響)は、ICSU(国際科学会議)傘下の国際組織 SCOSTEP(太陽地球系物理学科学委員会)が2014-2018年の5年間推進する太陽地球系科学に関する国際協同研究プログラム。関連ホームページ:<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/varsiti/>

Baldwin and Dunkerton, 1999)。極域は、太陽活動に伴う電離圏、熱圏へのエネルギー注入があることから、超高層大気から下層・中層大気への影響が現れやすい領域であると考えられる。そのため、上層から下層への影響を示す観測事実を積み上げ、数値モデルを用いた研究を組み合わせることでそのメカニズムを明らかにしていくことは、特に極域下層大気の中長期時間スケールの変動を理解し、予測するために必須である。

高エネルギー降下粒子や太陽紫外線量に起因する一酸化窒素(NO)などの大気微量成分の変動が下方伝播し、成層圏でのオゾン濃度などに影響を与えることが次第に明らかになりつつある(例えば、Randall et al., 2007)。しかし、この超高層大気の変動を起源とする成層圏オゾン濃度の変動が、成層圏大気大循環、ひいては対流圏大気大循環にどの程度影響を及ぼすかについての定量的な評価は未だに行われていない。高エネルギー降下粒子や太陽紫外線量は、太陽活動度と密接に関連している。したがって、太陽活動が大気微量成分の変化を通じて成層圏や対流圏の大気大循環¹⁰⁶にどの程度影響を及ぼしているかについての定量的評価も今後の課題である。

一方で、対流圏起源のプラネタリー波が成層圏に伝搬し、成層圏大気大循環を変化させ、その変化がさらに対流圏大気大循環に影響を及ぼすことが明らかになりつつある(Plumb and Semeniuk, 2003)。しかし、対流圏起源の各種波動に伴う中間圏や熱圏での変動が、大気上下結合過程を通じて対流圏にどのような影響を及ぼすかについてはよく理解されていない。また、前述の高エネルギー降下粒子等に起因する成層圏オゾン変動が、成層圏大気大循環の変化をもたらし、対流圏大気にどのような影響を与えるかについても今後研究する必要がある。

関連して、成層圏でのオゾン濃度の減少は地表紫外線量を増加させるため、北極域在住の人々の生活にも影響を及ぼす可能性がある。オゾン減少は、成層圏におけるプラネタリー波の活動度と密接に関連しているため、対流圏—成層圏結合過程の枠組みの中で考えなければならない事象である。例えば、2011年の春には北極でもオゾンホールが発生したが、今後も同様のオゾン減少が発生するかについての予測は不十分である(例えば、Manney et al., 2011)。

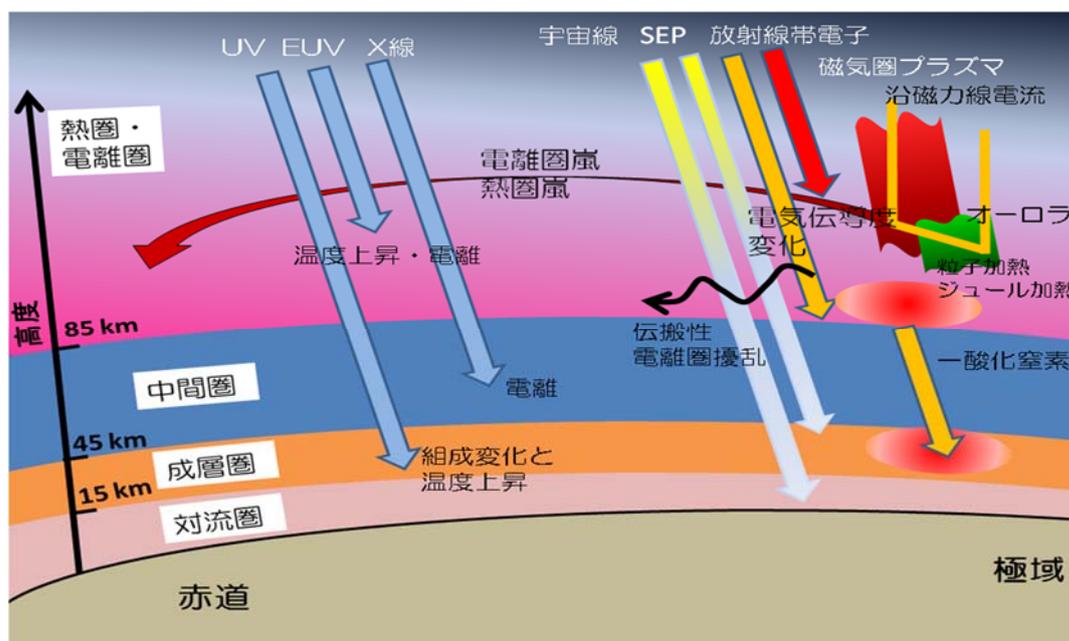


図 39 太陽から地球電離圏・大気圏への影響。地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来 (SGEPSS 学会、2013 年)の図を一部改編。

¹⁰⁶ 大気大循環: 大気大循環とは、地球規模の大気の流れのことである。赤道域と極域間の受け取る太陽放射エネルギーの差により生じる温度差を解消するために起こる循環である。加えて、中層大気や超高層大気領域では、鉛直方向に伝播する大気波動の影響によっても、地球規模の循環が生じる。

b. 今後の研究

高緯度域における高エネルギー粒子降下に伴う大気微量成分の変動を調べるには、高緯度域での大型レーダーによる拠点観測や、中層・超高層大気の大気組成、温度、風速などの測定が可能な各種測器による地上ネットワーク観測が重要である。特に、EISCAT_3Dレーダーの様な大型の観測機器を用いた精密な観測や、グローバルな大気変動を調べるための地上多点観測ネットワークの拡充が、定量的な理解を深める上で必須である。さらにこれらの地上観測と、中層大気から熱圏・電離圏高度における大気、プラズマの衛星観測とを組み合わせることが、個々の観測機器に由来する仮定を減らし、本質の理解に到達するために必須となってくる。

超高層大気は下層・中層大気に与える影響を調べるためには、数値モデルによる定量的理解が重要であ

る。また、超高層大気は、下層・中層大気のどの領域まで、どの程度の影響を与えるのかを理解するには、熱圏、電離圏を含まないモデル、中間圏以上を含まないモデル、逆に熱圏、電離圏までを含むモデルなど、高度領域の異なる様々なモデルによる総合的な検証、理解が必要である。モデルの高度領域の高高度化は世界的な流れであり、国内でも対流圏から熱圏・電離圏を含むモデル(GAIA モデル)(例えば、Jin et al., 2011)が開発されているが、今後はその更なる高精度化が重要となる。また、オゾン減少をはじめとする光化学過程を考慮するには、対流圏から中間圏、熱圏までを高度範囲とする光化学反応過程を含んだモデルを開発し、かつその高精度化を行う必要がある。日本の太陽地球系科学の研究コミュニティは、下層大気と超高層大気との結合過程に大きな関心を持っており、前述の観測およびモデル研究を積極的に進めつつある状況である。

Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？

a. 研究の重要性と現状

温室効果気体の増大に伴い対流圏では温暖化が進んでいるが、中層・超高層大気では地上・衛星観測やモデル計算などから寒冷化の進行を示す結果が得られている(例えば、Roble and Dickinson, 1989)。温暖化に伴う中層・超高層大気の寒冷化は、大気密度の小さいこの領域においてより顕著に表れる。例えば、二酸化炭素の増大に伴う赤外放射冷却の増加(寒冷化)とメタンの増加に伴う中間圏界面付近での水蒸気の増加は、北極域における極中間圏雲やこれに伴う中間圏の特徴的なレーダーエコー(PMSE、MSE)の発生頻度増加や、極域からより低い緯度への中間圏雲の発生領域の拡大(図 40 参照)をもたらしており、下層大気温暖化の指標と考えられている。したがって、これらの現象を観測することで、温暖化による中層・超高層大気の変化がどの程度まで進んでいるかを調べる事が可能である。しかし、中層・超高層大気分野では長期にわたって取得されているデータが極めて限られていることから、数10年スケールの長期変動の研究はまさに始まったばかりの状態である。特に、人類活動の活発な北極域と、

その真逆である南極域との両極比較研究を実施することは、温暖化に伴う寒冷化のプロセスを理解及び特定する上で非常に重要であると言える。

北極域では2000年以降、北極温暖化の増幅によって海面、地表面気温の上昇が大きくなっている。これは北極振動指数¹⁰⁷が負になった場合、その空間パターンを強化する可能性があり、冬季には、成層圏突然昇温¹⁰⁸に代表されるような擾乱の増加にも繋がる可能性がある(例えば、Turner et al., 2007)。また、この成層圏突然昇温の兆候は、成層圏での変動に先立って中間圏から下部熱圏の大気循環に顕著に現れることが、近年の観測・数値シミュレーションから明らかになりつつある。成層圏突然昇温による中層大気の変動は、下層大気から伝搬してくる大気波動を変調し、低緯度の熱圏、電離圏にも変動をもたらしていることが観測されている(例えば、Chau et al., 2012)。これらの原因としては、プラネタリー波、大気重力波など全球規模で起こる大気波動の変動が考えられているが、その全容は未解明のままである。このため、気象学が対象とする下層大気から超高層大気を含む全ての大気領域を結んだ地球大気の

¹⁰⁷ AO index: 北半球(通常は20° N以北)対流圏(1000hPaや500hPa)高度場の主成分分析から求めた第1主成分ベクトルを、指数を求めたい日や月の高度場に射影して得られる値。正負の指数はそれぞれ北極域低圧部の強化・弱さを表す。詳しくはURL: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao_index.html 参照。

¹⁰⁸ 成層圏突然昇温: 冬季極域成層圏において、短時間で急激に温度上昇が起こる現象。北極域では非常にポピュラーな現象であるが、南極域ではめったに発生しない。世界気象機関(WMO)の定義では、1週間以内に25K以上温度が上昇し、10hPaあるいはそれ以下の高度領域で帯状平均した温度が緯度60度より極側に向かって増大する現象を指す。

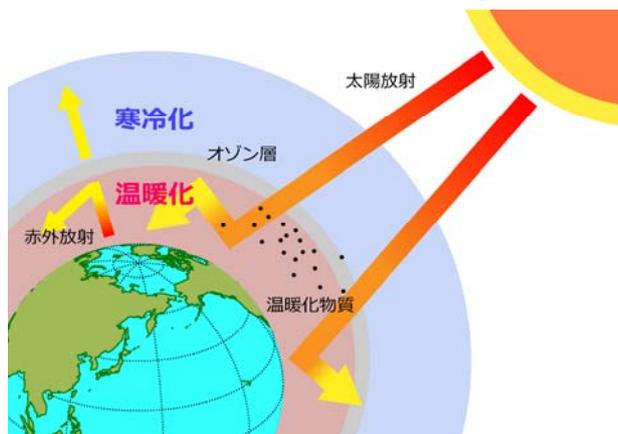


図 40 超高層大気と地球温暖化や気候変動との関わり(左図。地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来 (SGEPSS 学会、2013 年 1 月)より)と、パリ上空で撮影された中間圏雲(右図。http://www.spaceweather.com/nlcs/gallery2009_page12.htm より。)

全体像の理解という新たな視点での研究が必要となってきた。そのような研究を進展させることより、例えば、北極域で頻発する成層圏突然昇温の発生を予測することも将来可能になるものと期待される。

さらに、近年の GPS 観測網の発達により、地震後に発生した津波や台風、ハリケーンなどによって励起された大気波動が電離圏にまで伝わり、電離圏のプラズマ密度を変調することが明らかになってきた(Tsugawa et al., 2011)。この結果は、地表面・海面変動が超高層大気に影響を与え得ることを示すものであり、ダイナミックに変動する地球の姿を映し出すとともに、電離圏研究が津波の到来予測など防災科学として発展する可能性を新たに示している。

b. 今後の研究

地球温暖化に伴う中層・超高層大気変動は、鉛直方向の大気温度構造の変化、北極域での擾乱、下層からの大気波動伝搬の変調などを通して全球に影響を及ぼす。長期的なデータ取得が始まったばかりのこの領域では、まず地上・衛星観測、モデル計算を今後も継続的に進めていくことが最も重要である。北極域では経度方向に広がるネットワーク観測の充実が切望されており、現在観測機器が設置されているアラスカ、カナダ、北欧の観測拠点を継続的に運用し、EISCAT_3D レーダーや SuperDARN レーダー、AMISR など大型観測拠点との連携をさらに強めていくことが必須である。特に、観測点がほとんどないロシアとの連携を検討することが必要と考えられる。また、観測方法の限られる中層・超高層大気研究においては、モデル計算をさらに充実

させていくことも重要である。

研究の方向性としては、大気領域間を結びつける重要なプロセスとして、様々な大気波動を理解することがこれまで以上に求められている。下層大気で励起された大気波動がどのように伝搬し、どこで散逸するか、また、大気波動の散逸に伴って発生すると考えられる乱流や二次的に励起される大気波動の特性について、全球規模で理解する必要がある。特に中層大気の乱流は、上層に位置する熱圏の構造にも強く影響する可能性があることから、重要な研究課題である。また、地球大気に満ち満ちている大気波動がどのように電離圏プラズマの構造を変調するか、さらに、どのように電離圏擾乱を誘起するかという点も今後解明を進めるべき課題である。電離圏擾乱の特性を理解し、その発生を予測することは、衛星測位や通信などの、電離圏を伝播路とする電波を利用する社会基盤にとっても大きな意義を持つ。

大気大循環の変動や全球規模の変動を捉える上で、中低緯度、南極との連携も強めていく必要がある。特に、大型大気レーダー(PANSY)、ライダー、MF レーダー等の観測機器が充実している南極昭和基地と、日本の有する北極域の各拠点観測との継続的な連携および、両極比較に重点をおいた研究は、地球温暖化に伴う中層・超高層大気寒冷化のプロセスを理解・特定し、予測を行っていく上で非常に重要である。

日本はそのような研究を進めるための基盤(拠点及びネットワーク観測)を計画・整備しつつあり、研究の発展に対する国際的な期待が大きい。

Q4: 超高層大気を通じた極域から中低緯度へのエネルギー流入は？

a. 研究の重要性と現状

太陽風から地球磁気圏を介して超高層大気へ侵入するプラズマや電磁場変動のエネルギーは、地球の磁力線が集まる極域に主に侵入する。この侵入したプラズマ・電磁エネルギーは、ジュール加熱やローレンツ力を通じて超高層大気を加熱し変動させる。これらの力学変動は、大気波動として中低緯度に伝搬していく。また、加熱に伴う大気組成の変化は物質輸送として中低緯度に広がっていく。さらに、極域に侵入した電磁場変動は、電離圏内をダクト伝搬する地磁気脈動や電離圏-地上の間をダクト伝搬する電場変動として低緯度に伝わる。これらの諸過程を通して、太陽風、磁気圏から極域に侵入した電磁エネルギーは、中低緯度の超高層大気の変動を引き起こしている。その代表例として、電離圏での電子密度が異常に増大、減少する正相、負相の電離圏嵐や、電場の侵入によって誘起される赤道域の電離圏不安定などが挙げられる。これらの現象は、衛星-地上間の通信や GNSS 衛星を用いた測位に大きな影響を与えるために重要である。しかし、これらのエネルギー、物質の中低緯度への伝搬過程の全体像を観測的に把握することは現状では難しく、また、モデル化においても電磁場変動と中性大気の力学変動を下層、

上層の境界条件も含めて解くことは難しい(例えば、Schunk and Nagy, 2000)。

一方で、下層大気において発生した大気波動は、中間圏界面付近で散逸して運動量を放出することにより、全球的な子午面循環を駆動することが明らかになっているが、その効果の正確な定量化(パラメータ化)が将来予測の精度を上げるための課題になっている。また、この運動量放出によって発生する二次的な波動や、中間圏で散逸しなかった波動が熱圏に侵入し、電離圏の変動を地球規模で引き起こしていることが最近の研究から明らかになっている(例えば、Vadas and Crowley, 2010)。これらの過程は、数時間スケールの大気重力波から数日スケールのプラネタリー波まで、広く発生していることが分かってきている。また、これらのプロセスは極域をその駆動源として、中低緯度にその影響が伝わっていくことが知られている。Q3 でも触れたように、近年の観測では、北極域成層圏で冬季に起こる突然昇温の影響が、北極上空だけでなく、遠く離れた赤道域電離圏や南半球の中間圏に現れることが明らかになっている。この原因として、大気波動の伝搬と運動量輸送が有力とされており、その全容解明に向けて多くの研究者が取り組んでいる。また、電離圏で頻繁に観測される伝

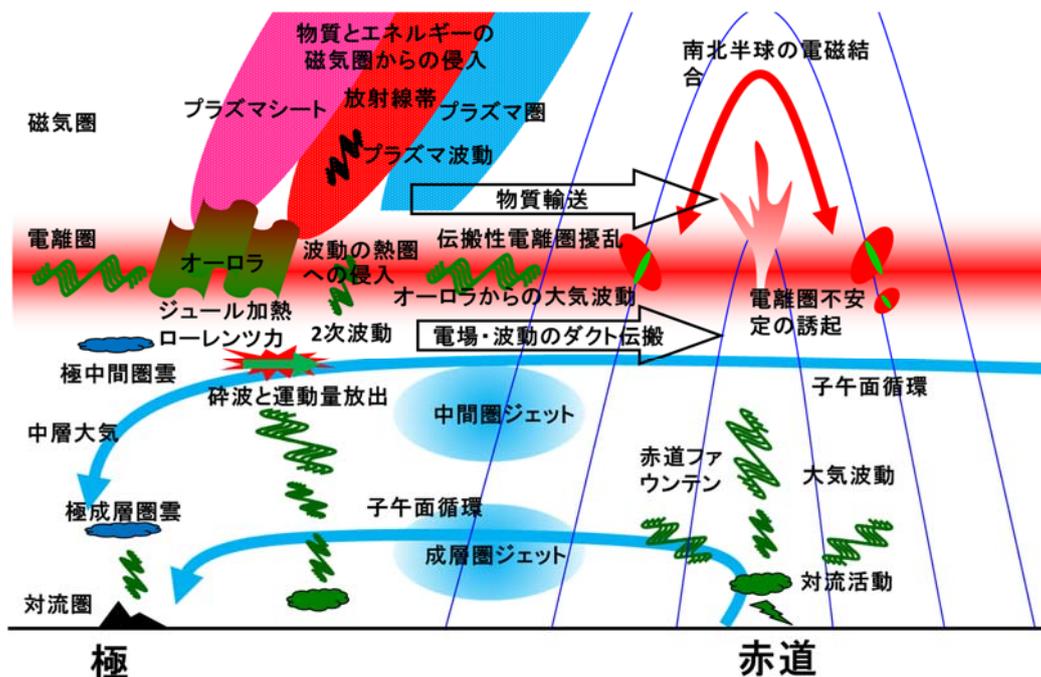


図 41 超高層大気を通じた極域から中低緯度へのエネルギー流入と関連現象の模式図

搬性電離圏擾乱は、下層大気やオーロラ帯からやってきた大気波動と、電磁場変動に左右される電離圏のプラズマ不安定の両者が成因と考えられており、両者を切り分ける研究が必要である（例えば、Makela and Otsuka, 2012）。

b. 今後の研究

中性大気変動と電磁場変動が複雑に絡み合った超高層大気における緯度間結合を理解していくためには、まず、この領域を駆動する上で鍵となる極域と赤道域において大気の上下結合を計測する大型大気レーダーなどの拠点観測と、アジア、アフリカ、アメリカの主要な3つの子午面において緯度方向に展開されている地上多点ネットワーク観測を活用することが重要である。特に極域では、プラズマ大気の複雑な時空間変動を観測するために、高時間分解能で3次元の観測が行えるEISCAT_3Dなどの大型レーダーによる拠点観測が必須になる。また、子午面方向の地上多点ネットワーク観測では、高感度大気光カメラ、GNSS受信器群、フアブリ・ペロー干渉計、流星レーダー、大型短波レーダー、磁力計等を組み合わせ、複数高度における電磁場変動と中性大気変動を同時に多点で観測することが必要である。また、大気潮汐やプラネタリー波は経度方向に構造を持つため、極域を中心として経度方向にリング上に観測点を展開することも重要である。これらの地上からのリモートセンシング観測を、電離圏高度の人工衛星による大気・プラズマの直接観測や広範囲をカバーできる人工衛星からの撮像観測と組み合わせて、グローバルな大気結合を測定することが必須である。日本の研究コミュニティは、地上多点ネットワーク観測や拠点観測、人工衛星観測の経験を豊富に有しており、将来の観測整備や拡張を通じて、緯度間結合の研究を、国際協力の枠組みの中で中心となって推進する役割を担っている。

モデル開発においては、地表面から熱圏、電離圏までを統一して解くことができる全大気圏モデルが、日本で先導して開発されてきた（例えば、Jin et al., 2011）。しかし、大気大循環の重要な駆動源である大気重力波を陽に¹⁰⁹生成できる空間解像度は有しない。また、太陽

風や磁気圏から侵入する電磁エネルギーとの電気的な結合過程も十分には含まれていない。これらの物理過程を今後、全大気圏モデルに含めていく必要がある。これらに加え、上記の地上・衛星観測のデータをモデルに取り込むために、データ同化の手法を取り入れていくことも検討しなければならない。また、長期かつ稠密な観測網が存在する地上磁場観測データを有効に活かすために、地上磁場観測と熱圏電離圏モデリングから計算された磁場変動の比較研究を実施する必要がある。

¹⁰⁹ モデリングの分野ではある過程(変数の時間変化)をモデル方程式の中で直接、明示的に書き表すことを「陽に」と表現することが多い。

テーマ 11: 表層環境変動と固体地球の相互作用

要旨

固体地球内部の熱対流活動により、海洋底の拡大や沈み込み等の大規模な地球表層活動が生じ、新たな海洋の形成や大陸の衝突等の現象を引き起こす。このような固体地球内部の熱対流活動に伴う、地球表層の海洋と大陸の配置変化は、大気・海洋循環の変化をはじめ、氷床の発達といった地球表層環境変動の転換をもたらす大きな要因となる。一方、気候変動を原因とする地球表層における氷床と海水量の体積や地理的変動は、海水準の変動にとどまらず固体地球の変形も引き起こし、地殻の変動や地球内部のマントル流動を引き起こす。このように両者は、様々な時間と空間スケールで相互に影響を与えていると考えられてきたが、そのメカニズムはまだ十分に明らかにされておらず、地球システムを総合的に理解する上で必要不可欠な課題となっている。特に、氷床荷重変動に伴う現在の地殻変動現象や、大陸の成長・離合集散といった数十億年スケールの現象まで様々なスケールの相互作用が現れている北極域は、この課題を理解する上で鍵となる重要なフィールドである。そこで、本テーマでは、様々な時間と空間スケールでの固体地球と表層環境変動の相互作用を理解するため、今後実施すべき、北極域での異なる時空間スケールを有する固体地球の変動に関する研究について以下の四つの Questions を設けた。

Q1: 現在活動する北極海海嶺熱水系と海洋環境との相互作用は？

Q2: 氷床変動に伴い固体地球はどのように変形してきたか？

Q3: 北極海が形成されていく過程で、大気－氷床－海洋の相互作用がどのように変化していったか？

Q4: 数千万年～数十億年といった時間スケールでの地球表層環境変動に北極海と周辺大陸の発達過程はどのように影響を与えたか？

一つ目の設問 Q1 は、海氷下に存在し、現在活動している中央海嶺の一つで、未だ研究が進んでいないガッセル海嶺の熱水系を対象とする。この研究は、

ガッセル海嶺熱水系の探査により、その成因、熱水系の生物相、および海洋循環の影響等を明らかにするものである。

二つ目の Q2 は、時間スケールで数万年、空間スケールで数千 km に及ぶ極域固有の現象で、氷床荷重変動に伴う現在の地殻変動現象に関する研究観測が対象である。この研究では、グリーンランド氷床やカナダ等の地域、およびその周辺海域での、地形地質および測地学的調査を軸とし、これにモデル計算を組み合わせることで、氷床変動メカニズムの解明や地球内部の粘性構造を明らかにすることを目指している。

三つ目の設問 Q3 は、数億年スケールでの北極海形成発達史の解明と、これに伴う大気－氷床－海洋の相互作用の変遷を対象としたものである。大部分が海氷に覆われている北極海の海底は、調査が困難な事から、未調査の海域が多く残されている。そのため、固体地球物理・地質学的調査等により北極海の海底拡大史を解明することに主眼を置き、さらに、堆積物採取による古環境、古気候の復元、北極海発達過程に伴う氷床拡大時期の推定等、北極海の発達史と大気－氷床－海洋の相互作用の関連を明らかにする事を目指すものである。

最後の設問 Q4 は、数十億年スケールでの固体地球

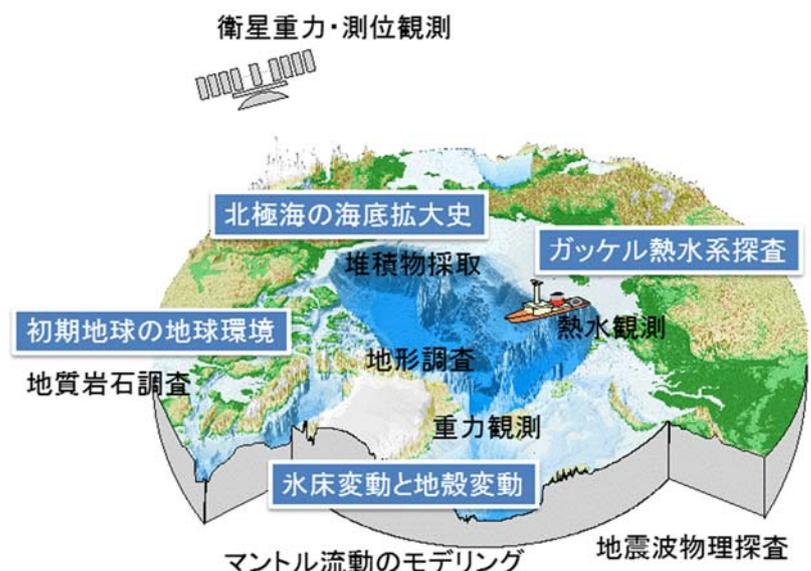


図 42 表層環境変動と固体地球の相互作用に関する重点研究課題

の変動に関するもので、北極域の大陸を中心とした地質学的調査を軸とした地殻研究により、30～40 億年という時間スケールでの地球表層環境変動の解析を主眼とするものである。カナダ北極圏やグリーンランド西岸等

には、40～38 億年前の地球初期の記録を持つ地層が分布しており、主に地質学的調査により、地球初期から現在までの長い地質学的時間スケールでの地球環境変動史の研究推進を提案している。

まえがき

固体地球では、大気、海洋等の流体圏の変動にともなう固体地球の表面の荷重変化により引き起こされる変動や、超大陸の形成や分裂といった変動等、様々な時間・空間スケール変動が複合的に生じている。大陸分裂による海洋の形成や超大陸の形成といった、数億年から数十億年スケールの地球表層の大陸と海洋の配置の変化は、海洋循環や大気循環等の転換をもたらし、表層環境を大きく変動させた。一方で、氷床荷重変動に伴う固体地球の変動のように、表層環境の変動に対する固体地球の応答現象も存在する。北極域には、プレート境界である中央海嶺での現在の活動から、極域固有の数万年スケールの氷床荷重変動に伴う地殻変動現象から、大陸の成長・離合集散といった数十億

年スケールの現象まで、様々な時間、空間での固体地球と表層環境変動の相互作用を理解する上で絶好のフィールドである。本テーマでは、様々な時間と空間スケールでの固体地球と表層環境変動の相互作用を理解する上で不可欠であり、今後北極域で重点的に展開していくべき、異なる時空間スケールの固体地球の変動に関わる四つの設問に対する研究観測の展望について、以下に記載する。これらの四つの設問をもとに研究を推進し、結果を統合する事により、様々な時間・空間スケールの総和としての固体地球変動と表層環境変動との関係を明らかにし、地球システムにおける固体地球圏サブシステムと大気・海洋圏サブシステム等との相互作用の解明を目指す。

Q1: 現在活動する北極海海嶺熱水系と海洋環境との相互作用は？

a. 研究の重要性と現状

中央海嶺や背弧拡大系は、活動的な火山の連なりであり、これらに沿ってこれまでに多くの海底熱水系が発見されている。海底熱水系は、地球内部のエネルギーや硫化水素、メタン、水素等の還元性ガスを放出する場であり、熱水鉱床の形成等、地球の熱や物質の循環を考える上で重要であり、そこで噴出する熱水の化学組成はその場の海底の岩石種や熱源等によって異なり、それぞれ異なるタイプの生態系を支えていることが明らかになっている。

ガッケル海嶺は、北極海のほぼ中央に位置する北米プレートとユーラシアプレートの境界を成す現在活動している中央海嶺系の一つであり、北極海の海氷下に存在し、調査の難しい地域である(図 43)。ガッケル海嶺は、超低速拡大(<12 mm/年)に分類され、その拡大速度、地理的な位置、構造等から、世界の中央海嶺系の中でもユニークなエンドメンバーとされている。

ガッケル海嶺では、これまでも観測船、航空機、潜水艦等による調査がいくつか行われている。2001 年に

実施された米国とドイツとの共同計画である AMORE¹¹⁰での観測船による調査の結果、超低速拡大であるガッケル海嶺の海嶺軸上に多数の熱水活動が高密度に分布している事が推定されている(Edmonds et al., 2003、図 44)。一般には、低速拡大の海嶺軸では、マグマ活動も低く熱放出量も小さいと考えられており、同様の超低速拡大の海嶺軸である南西インド洋海嶺では、ガッケル海嶺のような高密度の熱水活動は見つかっておらず、低速拡大である大西洋中央海嶺ですら、これほど高密度の熱水活動は確認されていない。南西インド洋海嶺や大西洋中央海嶺では、断層が熱水活動に大きく関与していると考えられているが、ガッケル海嶺の熱水活動はそれだけでは説明できず、熱水系周辺の岩石の種類にも関係している可能性が示唆される(Michael et al., 2003)。また、生物学的には、高密度の熱水活動が存在する特異なガッケル海嶺の熱水系で、新しい化学合成生物群集の発見も期待されている。

2007 年には、米国主導のもと、AGAVE¹¹¹航海として、スウェーデン、ドイツ、日本の 4 ヶ国共同の AUV¹¹²

¹¹⁰ AMORE: Arctic Mid Ocean Ridge Expedition

¹¹¹ AGAVE: Arctic Gakkel Vents Expedition

¹¹² AUV: Autonomous Underwater Vehicle、自律型無人潜水機

を利用したガッケル海嶺の熱水系調査が行われたが、残念ながら熱水噴出孔を発見するに至らなかった。しかし、85° E の約 4000mの非常に深い海嶺軸周辺の調査から、爆発的な火山活動を示唆するデータや (Sohn et al., 2008)、低温域で生育する黄色のふわふわしたバクテリア・マットの存在等が明らかになっている (Shank et al., 2007)。またその後、ガッケル海嶺の南のモーンス海嶺で初めてブラック・スモーカーを伴う熱水系が発見されており、さらに熱水系に伴う生物相が、これより南の大西洋中央海嶺の生物相とは異なる事が確認されている (Pedersen et al., 2010)。AMORE 航海においては、ガッケル海嶺で多数の熱水活動の高密度分布が推定されているだけであり、世界の海嶺系の中でもユニークなこの海嶺の未だ実際に確認されていない熱水噴出孔の分布と熱水活動の成因や、それに伴う生物群集等を探るためには、より詳細な海嶺軸上の探査が必要である。さらに、ガッケル海嶺の熱水活動による熱フラックスの海洋循環への影響は、熱水活動が高密度であると推定されているがスポット的な寄与であるので、それほど大きくないと推定されるが、これらも実際の観測データによる検証が必要である。

b. 今後の研究

ガッケル海嶺の熱水噴出孔の特定には、ROV¹¹³や AUV 等の海中ロボットを使用した調査が必要である。ガッケル海嶺が海水下に存在する事から、海中ロボットを使用するには、砕氷船は必要不可欠であり、海中ロボット探査には、砕氷観測船による事前の船上での海底地形や海洋観測等が必須である。また、海中ロボットによる海水下の探査においては、未だ実際の探査事例も少ない事

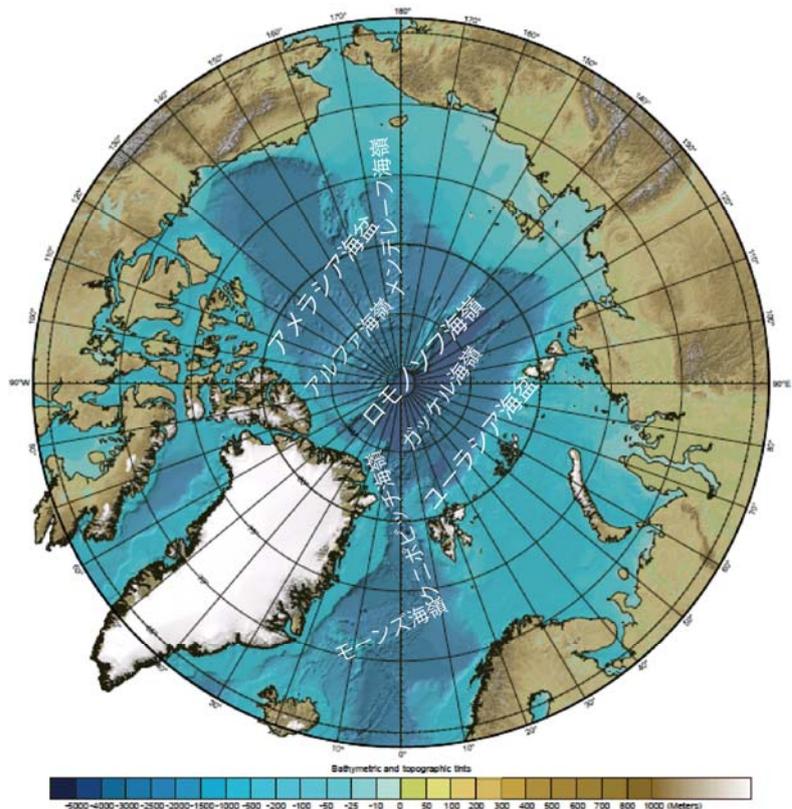


図 43 北極海の海底地形図。Jakobsson et al., (2008)に加筆。

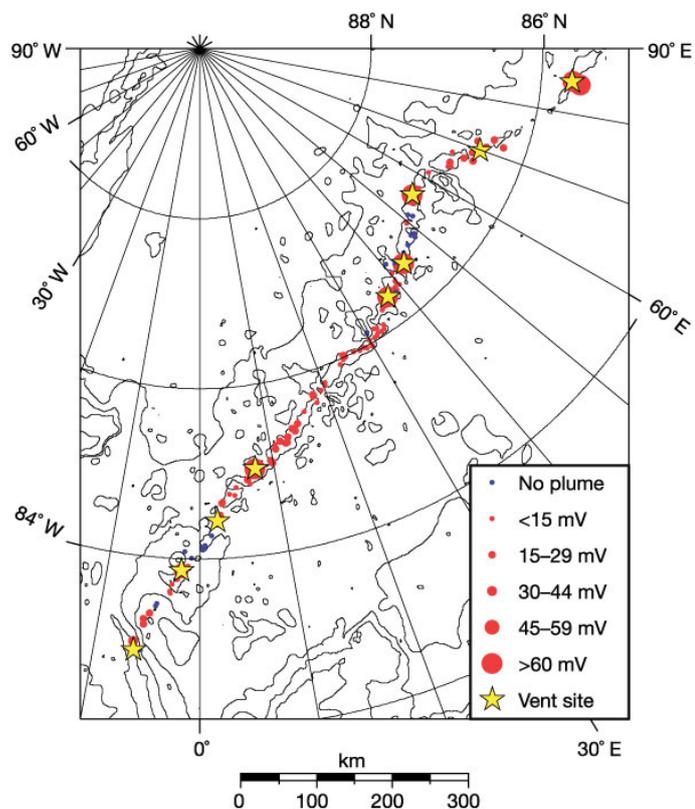


図 44 ガッケル海嶺で熱水活動が示唆される地域 (Edmonds, et al., 2003)

¹¹³ ROV: Remotely Operated Vehicle、遠隔操作無人探査機

から仕様や運用形態等の検討も必要である。熱水噴出孔の特定は、観測船による海底地形等の音響探査から調査対象範囲を絞り込み、詳細な物理・化学的計測により熱水の兆候を捉え、熱水域の存在とおおよその位置を推定し、最終的に海底観察、調査を行うという方法で行う。熱水活動の成因や、それに伴う生物群集等の探査では、熱水噴出孔の特定後、ROV 等による熱水

噴出孔およびその周辺の観察と、岩石や生物の観察を実施する。さらに、熱水活動の成因を探るには、熱水噴出孔周辺の地震探査、電磁気探査や地磁気探査等を実施し、海底下の構造等を明らかにする必要がある。また、熱水域の熱や物質フラックスの変動等の推定には、熱水域の海洋物理・化学的調査の長期変動モニタリング計測も必要となる。

Q2: 氷床変動に伴い固体地球はどのように変形してきたか？

a. 研究の重要性と現状

本 Question では、数年から数万年スケールにおよぶ氷床の変動が引き起こす固体地球の変形現象を対象とする。氷床の荷重は地球表面に圧力として働く表面力（表面荷重）の一つであり、氷床の変動は、氷床質量と、例えば氷床が融解し海中に流入した場合には海水の質量変化を伴い、海水準の変化をもたらす。これによって生じる表面荷重の変化は固体地球の変形を生じさせる。このような現象を氷河性地殻均衡¹¹⁴ (GIA) と呼び、その様子は、荷重変化の時間的・空間的スケールにより異なる。地球は、短い時間スケールの荷重変化には、『弾性的』に応答し、数千年を超える時間スケールの荷重変化には『粘性的』に応答することが知られている。本 Question で対象とする氷床変動は、長いものは数万年に及ぶ時間スケールの現象で、空間スケールも数 1000km に及ぶため、固体地球に対してグローバルで、かつ粘性的な変形と弾性的な変形の両方をもたらす。

北極域における GIA 研究は主に、地形地質調査、測地観測、数値モデル計算の 3 つのアプローチで進められている。これらは、最終氷期終了後の地殻隆起、すなわち、後氷期地殻隆起¹¹⁵ (PGR) を対象としている（例えば、Peltier, 2004）。PGR とは、最終氷期最盛期¹¹⁶ (LGM) に北米や北欧を覆っていた大陸氷床のほとんどが約 6 千年前に融解消滅し、その後も継続して地殻が浮力でゆっくり隆起しているという粘性的な変形現象である。また近年、現在進行中の地球温暖化の影響として、グリーンランド氷床やカナダ北極群島の氷河の急激な減少が報告されているが、これらの氷床変動によっても固体地球の弾性的な変形が生じていることが明らかになってきた。

氷床変動に伴う地球変形研究で最重要課題は、LGM 以降の氷床の分布の拡大縮小や増減の歴史（氷床融解史）を明らかにすることである。この氷床融解史が高精度で求められると、氷床融解に伴う地球変形が海水準変動に与える影響についても精度よく求めることができ、現在進行中の地球温暖化に伴う海面上昇を予測する精度を向上させる上で重要な貢献となる。過去から現在に至る固体地球の変形の大きさや分布が詳細にわかれば、それから逆に LGM 以降の氷床融解史を復元することが可能となることから、氷床変動に伴う固体地球の変形を調べるという本 Question の重要性をご理解いただけたらと思う。

地形地質学的アプローチとしては、貝化石やサンゴ礁の分布、海浜地形や氷河地形地質調査、海底堆積物調査などによって、過去の相対的海水準高度を明らかにすることで、過去数万年にわたる海水量（氷床量）の変化と地殻の隆起・沈降の歴史が推定されている。それをもとに、地球の粘弾性変形を考慮した GIA モデルの計算値と比較することで、過去の両極の氷床分布変動が復元されている（例えば、Peltier, 2004）。しかし、地域毎の氷床分布については、まだ提案されている各モデル間の違いは大きい。例えば、約 1 万 4 千年前の急激な気候変化に伴う氷床融解イベントに対する各氷床の寄与については、まだ決定的な結論は出ていない。

測地観測に関しては、過去 100 年以上にわたる潮位観測から、PGR が進行している地域での地殻の隆起が平均潮位の下降という形で観測され（例えば、Barnett, 1984）、スウェーデンでは長距離の水準路線において高さや重力の変化が測定されており（図 45）、マントル粘性についての推定も行われている（例えば、

¹¹⁴ 氷河性地殻均衡: Glacial Isostatic Adjustment (GIA)

¹¹⁵ 後氷期地殻隆起: Post Glacial Rebound (PGR)

¹¹⁶ 最終氷期最盛期: Last Glacial Maximum (LGM)、約 2 万年前

Ekman and Mäkinen, 1996)。Global Navigation Satellite System (GNSS)などの宇宙測地技術による地上観測が普及した 1990 年代後半になると、極域の数多くの点で宇宙測地技術を利用した地殻変動の連続観測が行われるようになり、現在では北米やグリーンランドなどではかなりの高密度で GNSS による地殻変動のモニタリング観測が実施されている(例えば, Sella et al., 2007, 図 46)。また、2000 年代に入ると、衛星重力ミッションや衛星高度計を利用した氷床量の変動観測が行われ、PGR による変動量も推定されるようになった (Barletta and Bordonni, 2009)。近年の衛星測地観測は高解像度、高時間分解能での観測を可能にしたが、一方でマントルの粘性構造を反映した現象は、その変動速度が遅く、変位量が小さいという特徴があるため、GIA に伴う地殻変動速度の正確な検出には、現在の最先端の観測技術をもってしても 10 年程度の観測値の蓄積が必要である。そして、これらの観測値には上述のように、過去の氷床変動に伴う地殻変動(粘性的な変動)と現在の氷床変動に伴う地殻変動(弾性的な変動)が含まれており、氷床融解史の復元やマントル粘性率の推定には主に前者が必要であることから、これらの分離も大きな課題の一つである。

マントルの粘性率は、プレートテクトニクスに関連した地球内部の動きを決める重要なパラメータであるが、マントルの粘弾性構造を現象に基づいて推定する方法は少ない。高解像度、高時間分解能の地上および衛星による観測値と様々なマントルの粘性構造を考慮した数値モデル計算との比較研究より、マントルの粘性率や分

布をより正確に推定することが可能になれば、地球内部物理学の研究分野にも重要な貢献となりうる。

極域の GIA 研究に対する日本のコミュニティの貢献としては、まず南極域では、日本南極地域観測隊により昭和基地および周辺露岩域において、地殻変動観測や重力測定、地形地質調査が組織的に実施されている。その結果、昭和基地およびその周辺では現在 2~3mm/年の割合で地殻が隆起し、それに相当する重力変化も生じていることや、LGM を含む 4.5 万年前以降、昭和基地近傍では氷床に覆われておらず、北半球の氷床拡大とは必ずしも同期していなかったことを明らか

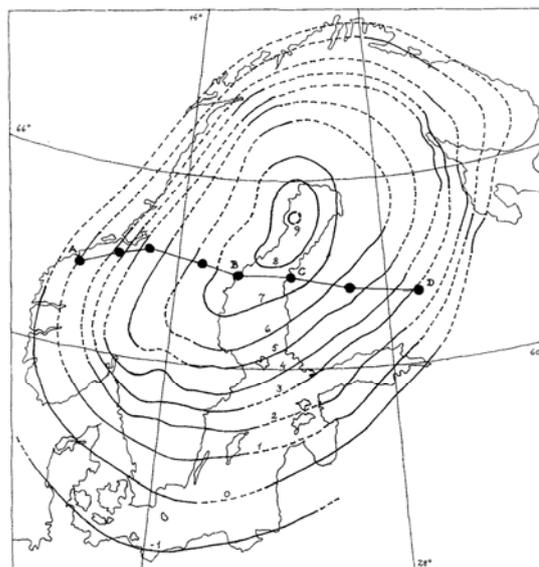


図 45 1892 年~1991 年にかけて観測されたスカンジナビア地方の後氷期隆起(単位は mm)と重力測定線 (Ekman and Mäkinen, 1996)。

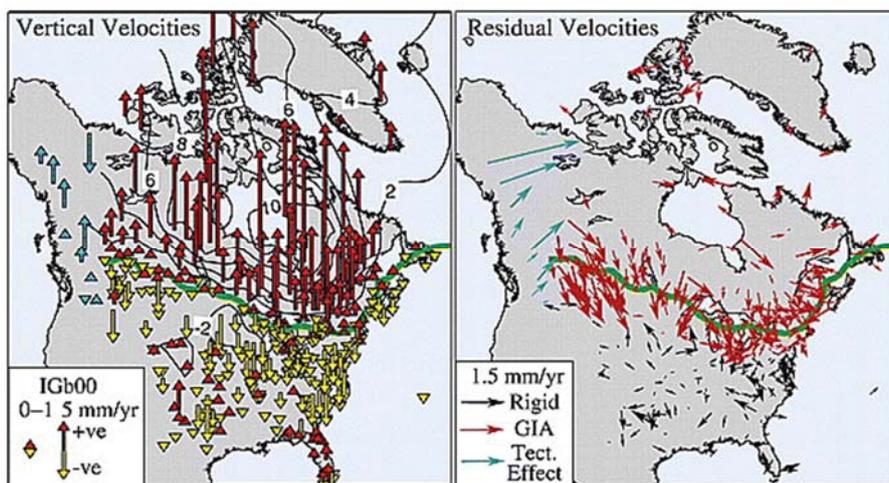


図 46 GPS で観測された地殻変動。(左)上下方向、(右)水平方向 (Sella et al. 2007)。

にしている。一方、北極域では、組織的ではないものの、ノルウェーのニーオルスンや、アラスカにおいて地殻変動観測や重力測定が実施されており、ニーオルスンでは年間 5~7mm の隆起が観測されている。

b. 今後の研究

本 Question に対する解明をさらに進めるためには、観測空白域における観測研究を展開していくことが急務である。例えば、これまで調査地域は主に陸上に限られており、海底はほとんど観測空白域として残っている。当然のことながら、変動は大陸棚などの海底でも起こっており、大陸棚の詳細な地形観測は、氷床拡大域の拘束に貢献することが期待される。さらに氷床荷重域から離れた海底での地殻変動観測なども氷床モデルや粘性構造を拘束する上でも重要である。

まず、地形地質調査では、観測空白域としての北部グリーンランドやカナダ北極群島などの地域における現地地形調査や試料採取、堆積物掘削といった従来からの調査を行う必要がある。特に、グリーンランド沿岸部の過去の海水準高度データは、量、質ともに不足している地域があり、グリーンランド氷床融解史の復元の不確定性の要因となっている。このような観測を可能にするには、砕氷船を基地として、搭載ヘリコプターで対象となる地域の沿岸観測点まで移動可能とし、現地調査の利便性を図るとともに、地上レーザースキャナーの利用など新たな地形調査技術の導入が不可欠である。一方、大陸棚も含めた海底の調査では、ROV や AUV を用いて海底地形地質の調査や試料採取を行うとともに、海底堆

積物のコア採取技術の開発も進める必要がある。

次に測地観測であるが、陸上での観測はすでにかかなりの高密度で行われており、10~20 年先の方向性としては、海底での観測をめざすべきであろう。そのためには、北極域でも運用可能な海上 GPS と音響測距、海底観測装置を組み合わせた海底地殻変動観測システムを開発導入し、海底において 1cm の精度で地殻変動を検出できるようなネットワーク観測網の構築を推進すべきである。さらに、広域の氷床変動や地殻変動を求めするために、これまで以上に、衛星重力ミッションや衛星高度計、合成開口レーダーなどの衛星測地データを活用すべきであることは言うまでもない。

地球温暖化の将来予測の精度を上げるためには、モデルの不確定性を低減させることが不可欠である。このためには、さまざまな複雑性やプロセスを考慮したモデル開発も重要になる。例えば、地球内部の粘性率の水平不均質の影響や、氷床流動モデルとの結合などを、現在のモデルに組み込んでいくことが挙げられる。また、これらのモデル構築のためには、計算技術の開発や高解像度のデータ解析手法の開発も必要となってくるだろう。

観測・研究体制に関しては、この分野での北極域の観測は、少数の研究者による個人ベースの研究や観測にとどまっており、組織的な研究観測活動の取り組みが必要である。また、モデル開発研究でも同様な状況であり、古気候モデル分野等の他分野との連携を進め、携わる研究者の育成も含めて更なる枠組みの構築が急がれる。

Q3: 北極海が形成されていく過程で、大気-氷床-海洋の相互作用がどのように変化していったか？

a. 研究の重要性と現状

海洋底の拡大と沈み込み、それに伴う大陸の形成や分裂といった、地球内部の熱対流の活動により、地球表層の大陸と海洋の配置は変化し、海洋循環や大気循環等の地球表層環境に大きな影響を与えている。特に、海洋底の形成は海洋循環を大きく変動させる要因となる事から、現在の深層循環の出発点となる北極海の海洋底の発達史と古気候・古環境復元を組み合わせた研究は、北極海形成過程における海洋循環の変動史や大陸氷床の発達史等を明らかにし、大気-氷床-海洋の相互作用の時間的変化の解明に大きく寄与する。北極海は、海氷に覆われており、海底の調査が困難な事

から、海底下の地質構造等については未だ不明点が多く残されている。北極海は、ロモノソフ海嶺を境に、ユーラシア海盆とアメラシア海盆の二つに大きく区分される。ユーラシア海盆は、現在も続く北極海ガッセル海嶺の活動により新生代に形成された海盆であり、海底の年代同定に用いられる地磁気異常縞模様等からその発達史は比較的良好にわかっている。一方、アメラシア海盆は、中生代以降に形成されたと考えられているが、地磁気異常縞模様もカナダ海盆の一部で同定されているだけで (Vogt et al., 1982)、その発達史はほとんどわかっていない。特に、アメラシア海盆内のアルファ海嶺、メンデレーフ海嶺の成因については、1)大陸起源で、2)過去の

海底拡大軸、3) プルーム起源、または、4) 沈み込み、など未だ様々な説があり論争中の問題である。これまでの研究として、数は少ないものの地震探査等が行われており、アルファ海嶺は海洋地殻である事が示唆されており(Jokat, 2003)、一方、メンデレーフ海嶺には大陸地殻が含まれている可能性が示されている(Lebedeva-Ivanova et al., 2006)。その他にも、重力データ等を用いた研究による、アメラシア海盆下の構造を推定した研究も行われている(Alvey et al., 2008)。しかし、未だ調査が少なく、ユーラシア海盆を含む北極海の発達史の解明が望まれる。

一方、2004年にロモノソフ海嶺で実施された ACEX (Arctic Coring Expedition-IODP Leg 302) (Backman et al., 2006) では過去5500万年前に遡る記録が得られ、従来と異なり北半球高緯度も南極域と同調して始新世中期には寒冷化を開始したことが明らかになった(Moran et al., 2006)。このことは、ドレーク海峡の成立などのテクトニックなイベントによる地域的な気候変動よりも、北極海の成立などによる海底堆積物への固定有機物を通じた大気CO₂濃度の

低下の方が、新生代における全球的寒冷化の主要原因であることを示唆する。しかし、北極海の発達過程と表層環境変動の関係、特に温暖化ガスの吸収と有機物やハイドレートとしての固定や、海洋循環の変遷と大陸氷床の発達史等との関係を解明するには、北極海のテクト

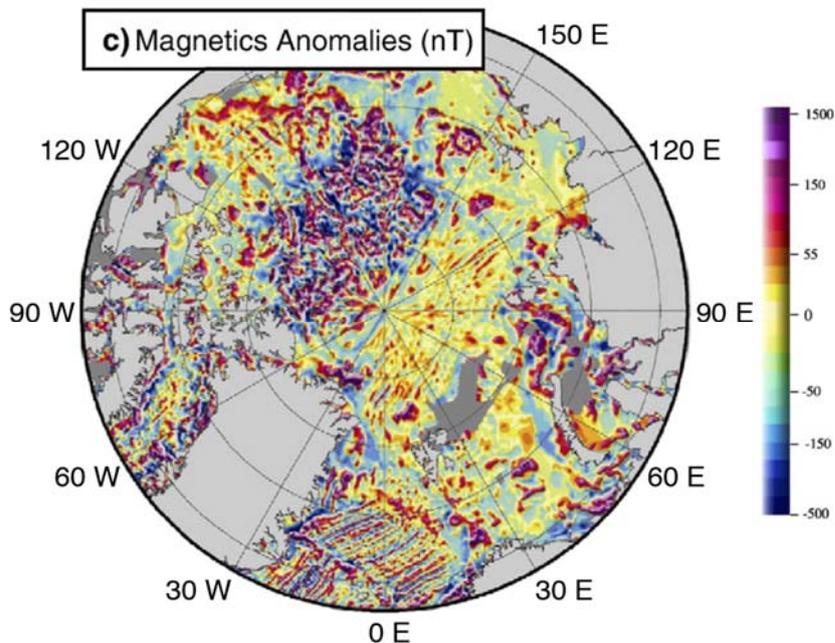


図 47 北極海の地磁気異常データのカラーイメージ (Verhoef et al., 1996 and Glebovsky et al., 1998)。

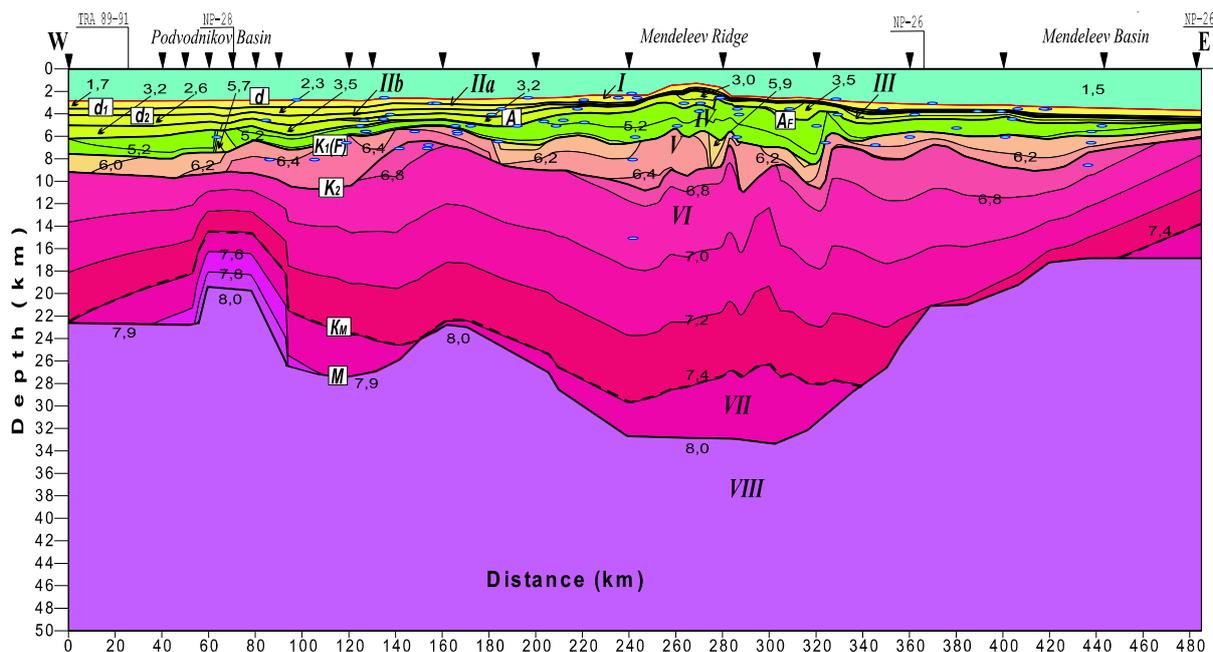


図 48 メンデレーフ海嶺付近の地震波速度構造 (Lebedeva-Ivanova, et al., 2006)。

ニクス研究とともに堆積物等を用いた詳細な古環境復元とその解析が必要とされる。

b. 今後の研究

北極海の発達史、特に、アメラシア海盆のテクトニクスを解明する鍵となるのは、アルファおよびメンデレーフ海嶺である。これらの成因等を明らかにするには、これらの海嶺とその周辺海域を対象とした、地震探査を含む可能な限り広域の固体地球物理探査および岩石採取等の地質学的調査を実施することが重要である。海洋底形成前の地質構造の復元および整合性等の検証を行うため、この海域周辺の大陸地質構造等の把握も必要となる。これらを基に、アルファおよびメンデレーフ海嶺、およびその周辺海域の発達史およびその成因を明らかにし、北極海全体のテクトニクスの解明を目指す。また、これらの発達過程に伴う表層環境変動を解明するために、堆積物採取による古環境、古気候の復元を行う。加えて、新生代以降の海洋循環等の変遷や氷

床発達史等を理解するために、ユーラシア海盆においても堆積物採取を実施する。最終的には、北極海全体のテクトニクスと、海洋循環の変遷や大陸氷床発達史等の古気候・古環境変動解析を組み合わせる事により、北極海形成過程に伴う大気－氷床－海洋の相互作用の変遷を明らかにする。

上記の観測等は、国際的な IODP 等の北極海域での将来の深海掘削計画へと繋がっていくものである。北極海域の深海掘削では、2004 年にロモノソフ海嶺で実施された ACEX に、日本人研究者が参加し大きな貢献を果たしている。しかし、現在検討されている IODP 等による北極海域での深海掘削計画に日本の研究コミュニティは組織的には加わっていない状態である。このような北極海域での国際的な掘削計画への、日本の参加および貢献が望まれるとともに、北極海域での固体地球科学に関する研究観測活動を活発にする事により、日本の研究コミュニティを育成していく事も必要である。

Q4: 数千万年～数十億年といった時間スケールでの地球表層環境変動に北極海と周辺大陸の発達過程はどのように影響を与えたか？

a. 研究の重要性と現状

数千万年～数十億年といった比較的長い地質学的時間スケールでの地球環境変動の解明は地球科学の大きな研究テーマの一つである。北極海の形成発達は今から約 1～2 億年前に遡り、北極海の海洋底探査からこうした時間スケールでの情報がこれまで得られている(図 49)。

また、北極海周辺の大陸域には先カンブリア時代(> 5 億年前)に遡る複雑な地殻発達の地質情報が記録されている。大陸の地質情報と海洋域の地殻物理探査を組み合わせた解析によって、北極海の形成プロセスと北極域の大陸と海洋の配置(古地理)の研究がこれまですすめられてきている(図 50)。

このように、大陸域と海洋域の両方の情報を組み合わせることで解析をおこなうことによってはじめて、北極域の過去の海洋と大陸の発達過程の復元が可能となり、また、数千万年から数十億年という時間スケールでの環境変動を考察する上で基盤となる情報が得られる。

さらに北極域の重要性の一つは、カナダ北極圏やグリーンランド西岸などに見られる地球創生期の 40～38 億年前の地層の存在である(例えば、Bowring et al., 1989; Nutman et al., 2007)。こうした時間スケールで

は、「北極域」という地理的制約はあまり意味を持たない。ここ Q4 で掲げる研究テーマは、上述の Q1～Q3 で記載したような「北極環境」研究を主眼とするものではなく、むしろ「北極域」に分布する地質情報を用いて「地球史」という時間スケールでの環境変動研究を目的とするものである。

こうした北極域に分布する地層の持つ重要性から、これまで多くの地質学的研究がおこなわれてきている。しかし、アクセスの容易な他の地域と比較すると、北極域から得られている地質データはまだ質・量ともに十分とは言い難い。過去の大陸の地質対比や形成発達過程についても、様々なモデルが提案されてきている(図 51)。

上述したように、これまでの研究の蓄積によって、北極域には様々な時代の地層が分布することが明らかになっている。その中でも特にカナダ北極圏の約 40 億年前の地球最古の岩石(アカスタ片麻岩)や、グリーンランド西岸イスア地域から見つかっている約 38 億年前の岩石の存在は、北極域が地球初期から現在までの非常に長い地質学的時間スケールでの地球環境変動の研究に適したフィールドであることを証左している。また、北極域に分布する大陸地域には、露出した深部地殻に相

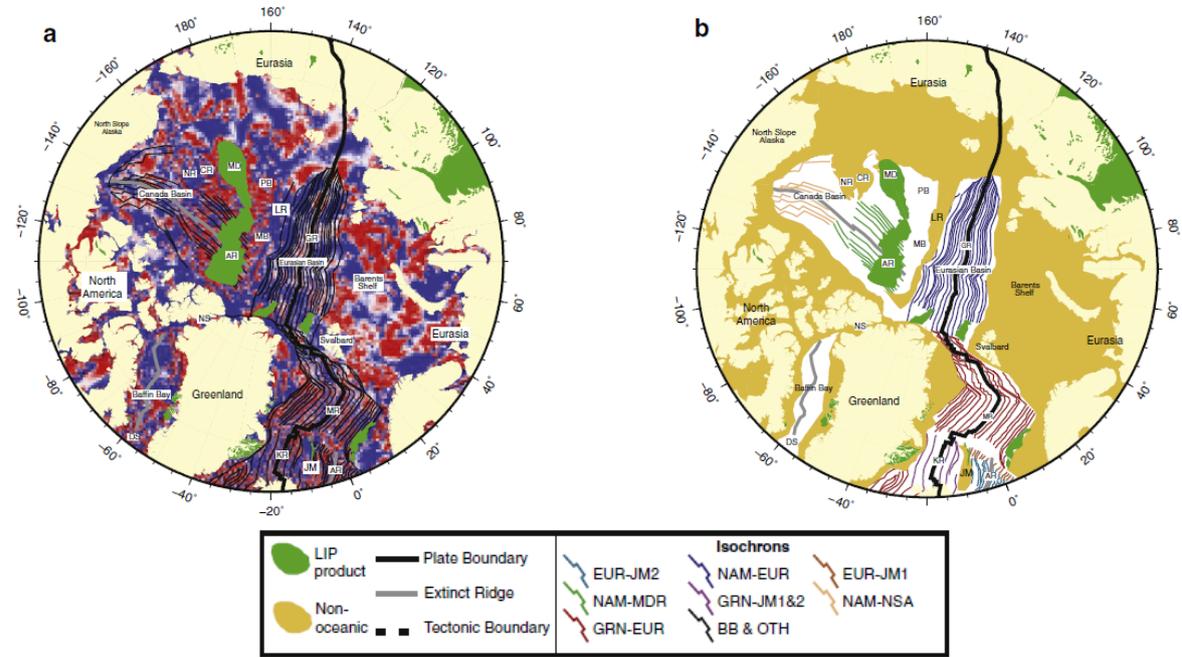


図 49 北極域の海洋底の地球物理および地質情報 (Seton et al., 2012)

当する高度の変成作用を受けた岩石や、変成作用をほとんど受けていない地殻浅所に由来する低変成度の岩石も分布する。特に後者は、こうした地球史の時間スケールでの地球の表層の環境復元に適した研究対象となり得る。すなわち、北極域の地殻研究を通して 30~40 億年という時間スケールでの地球表層環境変動の解析が可能である。また、同時期の露出した深部地殻(高度変成岩)との対照研究によって、地球表層環境変動と大陸地殻深部での現象との相互作用という視点での研究が推進可能である。

b. 今後の研究

ここで挙げた Question を解明するための方法として、陸上での地質調査と海洋域における地球物理探査によるデータを統合的に組み合わせることが必要である。具体的には、海洋底物理探査によって過去 1~2 億年前に遡る海洋底の発達史を明らかにする。近年の北極域の夏季の海氷の減少によって観測船のアクセスできるエリアが広がるとともに、無人探査船を用いた海中物理探査などによっても新たな情報を得ることが可能で

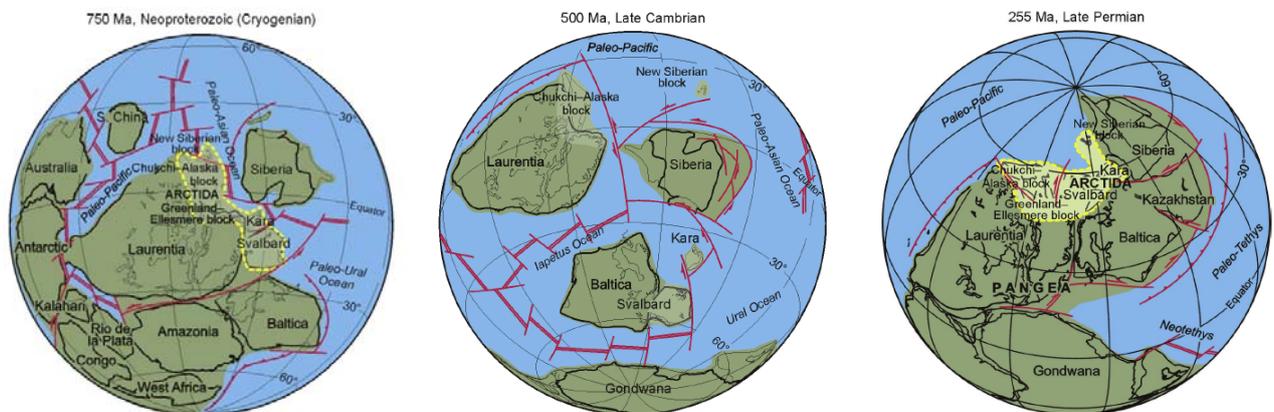


図 50 北極域の過去(750-250Ma)の大陸配置の変遷 (Vernikovsky et al., 2013)

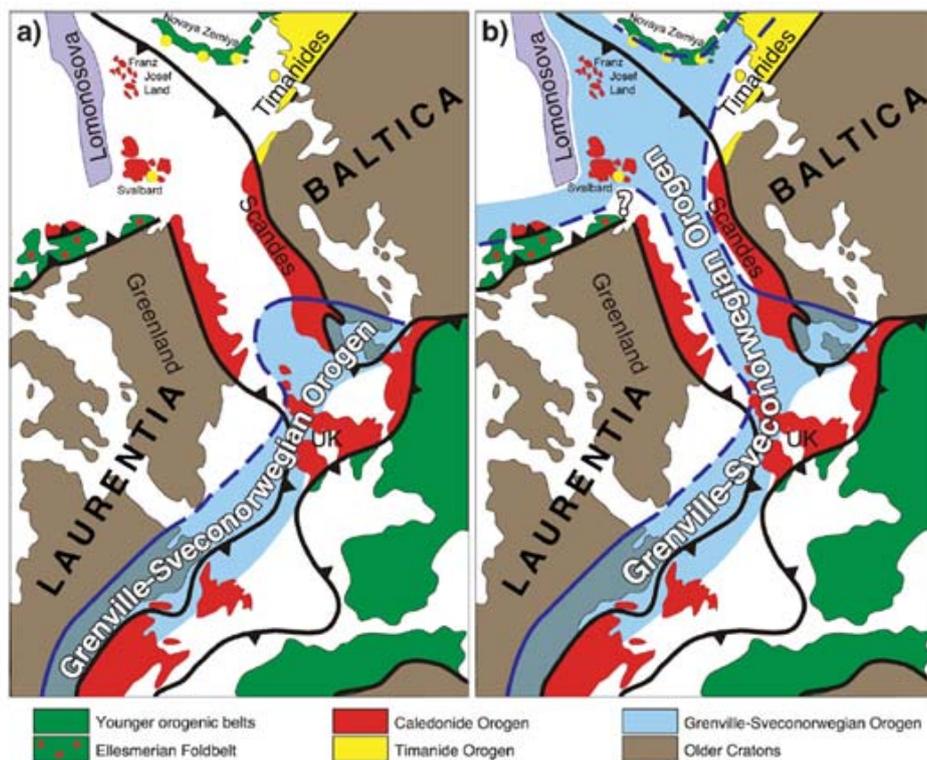


図 51 北大西洋域における過去の大陸配置の復元図 (Lorenz et al., 2012)

ある。また、陸域の野外地質調査によって、北極域の地殻を構成する物質の岩石学的、地球化学的、年代学的研究によって、地殻深部と表層地殻の地質学的時間スケールでの物質循環の解析が可能である。また、海洋域から得られた海洋底の発達史を陸域の地質対比によって、過去の大陸配置のより高精度の復元をおこなうことが可能となる。このような地質学的時間スケールでのプロセスを明らかにするには、高い精度で年代決定をおこなう分析手法や、過去の環境変動の指標となるような同位体(地球化学的トレーサー)に着目した同位体分析を組み合わせた解析が必須である。国立極地研究所に導入されている 2 台の二次イオン質量分析計はこうした物質科学的解析の柱となる。

また、地殻構成物質の研究をベースに、直接計測の難しい氷床下の大陸地殻ヒートフローの見積りなどの解析も可能である(例えば、Carson et al., 2014)。氷床下の地殻情報は地球物理探査(重力、地磁気)による解析が不可欠である。こうした物理情報と氷床縁辺に露出する岩石の情報を組み合わせることで、氷床下の地質を推定する試みがなされる。また、その際に、岩石の地球化学的情報や熱源となりうる放射性元素含有量を精密に見積ることで、氷床下地殻の熱流量の推定が

可能と考えている。このように、地殻構造推定データを地球物理探査データの解析と密接にリンクさせることで、北極域の固体地球圏の数千万年から数十億年という時間スケールでの特質を明らかにすることが可能となる。

研究の基礎データを得るための地質調査は、特別な装置や事前準備などは特に必要なく、機動的に現地調査を実施することが可能である。北極圏はアクセスならびに設営面の困難さから、南極とならんで野外調査データの蓄積の乏しい地域となっている。グリーンランドでの地質調査や、その地質延長と考えられるスコットランドやカナダ北極圏の地質研究などでは、これまで日本の研究コミュニティも少なからず貢献している。今後も 5~10 年内のタイムスパンで機動的に野外調査隊を組織して、さらに精力的に北極域での現地地質調査を含めた研究に取り組む必要がある。南極の調査で蓄積したノウハウをベースとして北極域での機動的な現地地質調査をおこなうことによって、Question の解明に必要な基盤地質データを取得する。

要旨

永久凍土は、北半球陸地の約 1/4 という広範な面積を占め、その表層の融解による温室効果気体放出の可能性や、大気、植生などとの複雑な熱と物質のフィードバックなどを通じて、北極環境の変動を左右する主要な因子である。一方で、広範囲に分布する永久凍土の現況に関して、科学的な知見が不足しており、変動の将来予測においては不確実性の幅が非常に大きい。この理由は、永久凍土の特性として、空間的な不均一性が大きく観測点の代表性が狭く限定されることと、衛星からの観測が困難であることが主に挙げられる。そのため今後は、新たな凍土観測手法の開発および既存手法の改良と同時に、国際連携も交えた現地観測の拡充と多点観測の実施が必要となる。それによって、永久凍土の分布と、構成物質の不均一性をより正確に把握するとともに、永久凍土の地温変化や固定されている氷や有機炭素

の量や状態についても情報を増やしていくことが重要となる。これら「場」の情報に基づいて凍土の状態変化プロセスを定量化し、合わせて永久凍土を含む陸域システムのモデル化と挙動の把握、北極システムの変動研究へと国内外の知見を統合していく必要がある。

このテーマで取り上げる Questions は以下の 4 つである。

- Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか？
- Q2: 永久凍土はどのような物質から構成され、どの程度の不均一性があるか？
- Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？
- Q4: 永久凍土—大気—積雪—植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？

まえがき

a. はじめに

永久凍土 (以下、下線の用語は p127、ボックス8の解説を参照のこと) は環北極陸域のほぼ全域に分布し (図 52a)、北半球の陸地面積に対する比では約 24% を占めるとされる (Brown, 1997)。面積的に地球上最大規模の雪氷現象であるのみならず、大気や植生などとも複雑に熱と物質をやりとりしており、北極環境の変動を考える上で極めて重要な要素の一つである。また、地下水の融解に伴う温室効果気体の放出や海底永久凍土の不安定化によるメタンハイドレート放出の将来気候への影響など、グローバルな影響も懸念されている。温暖化の影響により不可逆性の強い変化が生じる可能性が高いことも、永久凍土の特徴である。例えば、サーモカルスト は、永久凍土の融解に起因してローカルな水循環や物質循環および生態系に連鎖的な変化をもたらす。東シベリアでは、針葉樹林帯の地下に分布していた含氷率の高い永久凍土が融解し、地盤沈下を伴って凹地に湿地や湖沼が形成されている。こうした変化には、数十から数百年を要するが、その過程でこれまで万年単位の期間固定化されていた有機炭素が流動化する。これら生態系・水文過程へのインパクトも地域社会的に大きな問題となるが、地盤沈下による建物・パイプ

ライン・道路・線路など社会基盤の損傷は既に顕在化している。北極海の沿岸や島嶼では、波による海岸侵食が凍結地盤の融解を伴って激化し、移住を余儀なくされた地域社会も存在する。

これまで、永久凍土の存在に起因する様々な現象、問題については、典型的、特徴的ないくつかの地点を対象として多くの研究がなされ、知見が蓄積されてきた (例えば、Harris et al., 2009; 松岡・池田, 2012)。しかし、広域を対象として永久凍土の融解が水循環・植生・気候や人間社会に及ぼす影響を定量的に予測するには、永久凍土に関する基礎的な情報 (例えば、物性値や貯留炭素量、地下水などの空間的な分布情報) や、フィードバックプロセスの理解 (例えば、永久凍土変動による植生変化と、その結果生じる気候への影響など) が、現時点では不十分と言わざるをえない。永久凍土は基本的に地表に存在しないため、遠隔から非接触で観測する手法 (リモートセンシング) が確立されておらず、直接的な観測にも掘削という労を伴う。そのため、広域的な永久凍土の現状や変動を理解するための観測やモニタリング事例は限定されている。他の雪氷要素 (海氷、積雪、氷河) に比較して、永久凍土の空間分布や変動パターンの理解が大きく立ち遅れており、温暖

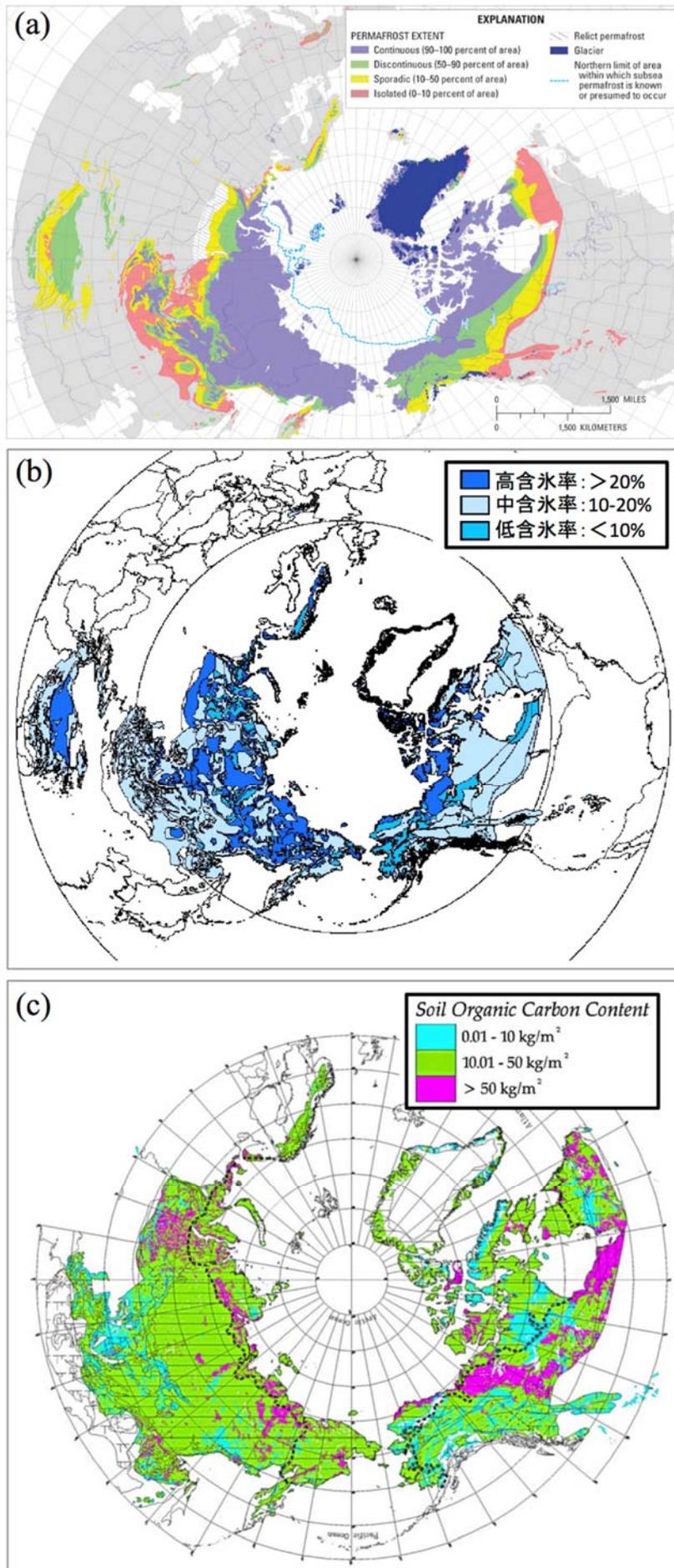


図 52

(a)地温に基づく永久凍土分布図 (USGS Professional Paper 1386-A に収録)。IPA Circum-Arctic Map (Brown et al., 1997) に基づき、Dmitri Sergeev (UAF) が作図。

<http://pubs.usgs.gov/pp/p1386a/gallery5-fig03.html>

(b)含水率分布。IPA Circum-Arctic Map を改変。石川・斉藤、雪氷(2006)

(c)永久凍土中の有機炭素量の分布。Tarnocai et al. (2009)

化に対する応答についての予測も不確実性の幅が大きくなっている。

その一方で、本報告書の中でも生態系の変化(テーマ 3)、雪氷要素の変化に伴う水循環への影響(テーマ 4)、古環境復元情報源としての重要性(テーマ 6)などと深く関連し、また、永久凍土の融解が北極域の地域社会に与える影響についても言及される(テーマ 7)など、様々な研究テーマにおいて理解の進展が求められている。地球環境変化の将来予測の中に永久凍土の影響を定量的に反映させる必要から、国際的にもデータの集積を行う動きがあり、観測データとモデルを連携させるプロジェクトも始まっている。本テーマにおいては、広域(北極域)の永久凍土に関して理解が不十分である点を整理し、今後生じうる変化と気候・環境への影響を明らかにするために取り組むべき研究課題を挙げることにする。

b. 永久凍土の特徴的な性質

永久凍土の特徴的な性質は、そこに含まれる水の動態によるものが多い。例えば、湿潤な地盤の透水性は凍結によって大きく低下するため、永久凍土層は難透水層として作用し、その上の植生の生育環境を決定する。また、土壌間隙水の凍結・融解時に放出、吸収される潜熱の効果で、永久凍土の地温変化は特に 0°C 付近では抑制される傾向にある。サーモカルストや、凍上に伴う地盤の沈下や上昇によるインフラへの被害については前述した通り、地下水の消長に起因する。このように、永久凍土変動とそれに起因する諸現象を理解するには、地中水の動態(量、相)もあわせて評価していくことが重要である。Zhang et al. (1999) は、北半球全体の地下 20m までに含まれる地下水の総量を、海水準面変動相当で 3~10cm と見積もっているが、分布の不均一性は非常に大きく、推定値の信頼度は高くない(図 52(b))。

永久凍土中に含まれる有機炭素の動態も、気候変動との関連で注目される。これまでに全球規模での土壌データベースから、永久凍土中に貯蔵されている有機炭素の総量を、Zimov et al. (2006) は約 1,000Gt、Tarnocai et al. (2009) は 1,700Gt と見積もっている(図 52(c))。これらは陸上の有機炭素の約半分、大気中の炭素量の約 2 倍に相当する。仮にこれら有機炭素を含む永久凍土が全て融解すると、この炭素が二酸化炭

素、または、メタンの形で大気中に温室効果気体として放出され(Permafrost carbon feedback)、温暖化をさらに加速する可能性が指摘されている(Schuur et al., 2011)。ただし、このプロセスには数千から数万年を要し、また、現状では多くの仮定をおいた上で限られた現地調査結果に基づく算出であるため、大きな推定誤差を含む。

c. 永久凍土の分布と変動の時間スケール

永久凍土の地温変動は、近似的に地表面からの熱伝導に支配されると見なすことができ、地表面温度の変動が減衰・遅延して伝播した結果としてほぼ説明できる(Lachenbruch and Marshall, 1986)。そのため、永久凍土地温変化の応答時間は浅部で短く、深くなるほど長くなる。

シベリアに分布する地下数百メートルに達する厚い永久凍土には、過去の数万年スケールでの気候変動の履歴が残されている。これは、地表面の温度変化は数千から数万年の時間をかけて数百メートルの地温に影響を与えるからである。その一方で、浅い深度の永久凍土温度には現在の気候環境が反映されるため、永久凍土表層の平面的な分布境界は、現在の気候条件に追従してほぼ決定される。

d. 本テーマで取り上げる Key Questions

永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解を進めるため、ここ 5~10 年で埋めるべきギャップ、問われるべき課題として以下の 4 つを挙げる。

- Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりや深さをもって存在しているのか?
- Q2: 永久凍土はどのような物質から構成され、どの程度の不均一性があるか?
- Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか?
- Q4: 永久凍土—大気—積雪—植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか?

これらの課題は相互に密接な関連がある。すなわち Q1 と Q2 で問題となるのは、永久凍土とその上の活動層の温度(Q1)あるいは構成物質(Q2)の、水平および垂直方向の違いを、これまでの見積もりよりも分解能を上げて評価することであり、直接観測できない部分の推定の確度を向上させることである。Q1 と Q2 への解答

ボックス 8

永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解

永久凍土: 連続した2年間以上0°C以下の温度状態にある土地(氷や有機物を含めた堆積物や岩盤)と定義される。永久凍土は気候変動や人為的な操作によって融解する可能性があり、字義通り“永久に”凍結している土地を意味しない。永久凍土の温度変化・消長を表現するために多年凍土という用語も提唱されている。永久凍土を含む地域としての永久凍土帯は高緯度地域と高標高地域に分布し、後者は特に地形によって複雑な分布を持つ。図53は高緯度地域の永久凍土の3次元分布と、水平分布による区分を模式的に表している。地表面の面積に対しその何割を永久凍土が占めているかの割合によって連続的・不連続的・点的的永久凍土に区分する。

活動層: 永久凍土の表層部で夏期に融解し冬期に凍結することを繰り返す層。土壌水分の移動や植物活動、微生物活動の主要な場となる。

サーモカルスト: 氷に富む永久凍土の融解により凹凸のある地形を形成するプロセス。融解による地盤沈下のほか、氷脈に沿った侵食や、沿岸や傾斜地での大規模な斜面崩壊をもたらす。サーモカルストにより生じた凹地に形成される湖をサーモカルスト湖(融解湖)と呼ぶ。シベリアのヤクーツク周辺に多いアラスと呼ばれる凹地もサーモカルストによる地形である。

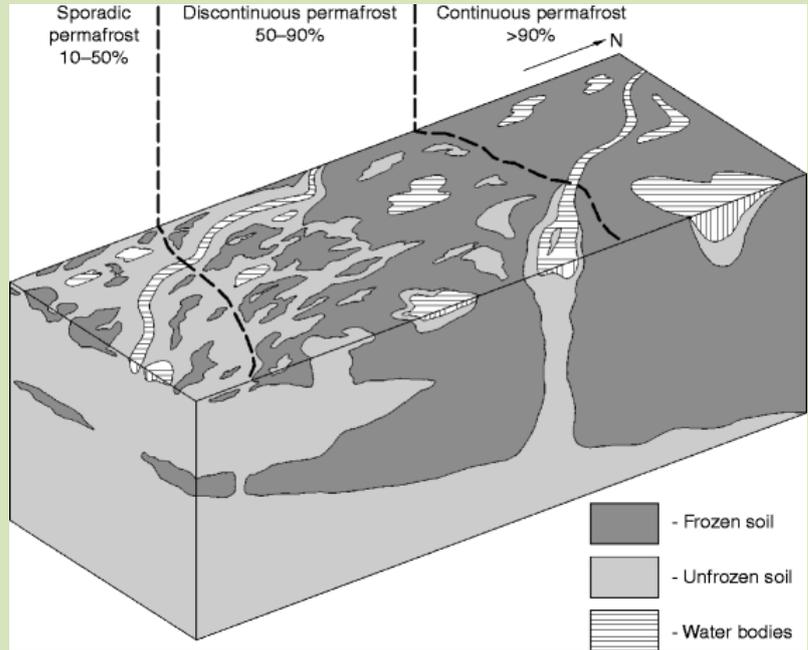


図53 永久凍土の3次元的な広がり方と、連続的・不連続的・点的的永久凍土の区分を示す模式図(Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers)。

タリク: 永久凍土中の融解部。永久凍土に囲まれているものの、通年融解したままである部分を指す。

エドマ層: 65~90%という高い体積含氷率を持ち、大量の有機炭素を貯留している永久凍土層。名称はシベリア北東部の現地語に由来し、アイスコンプレックスと呼ばれることもある。東シベリア北東部および中央部、またアラスカ北中部やカナダ北西部に分布し、数mから数十m以上の層厚を持つ。

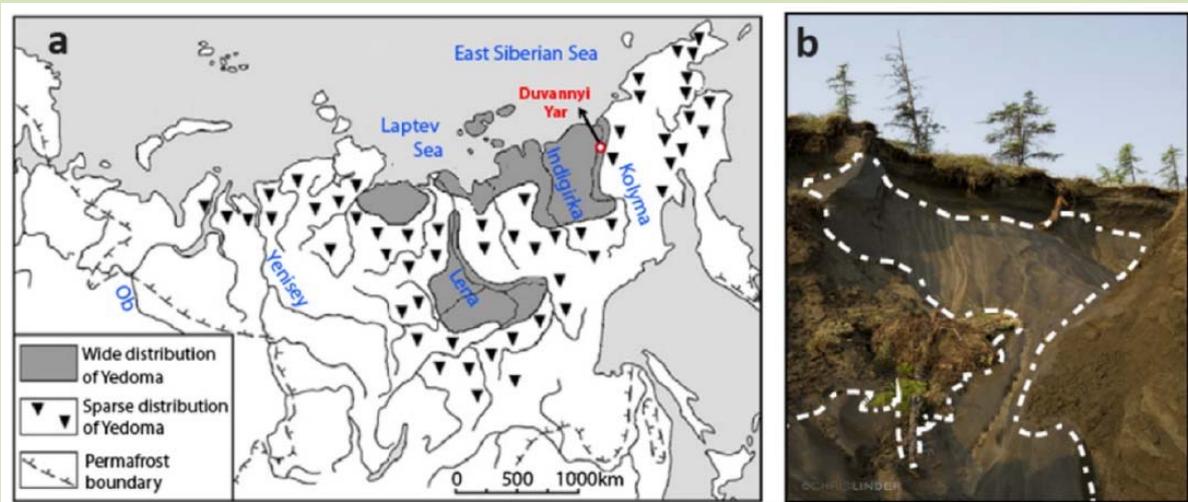


図54 (a)シベリアにおけるエドマ層の分布。(b)コリマ川岸のDuvannyi Yarサイトにおける侵食されるエドマ層の露頭(破線で囲んだ部分が氷体)。Vonk et al. (2013) による。

が、Q3 で問題とする変化の空間的な規模、あるいは変化の早さ等の評価を左右する。活動層の変化(Q3(1))やサーモカルスト(Q3(2))といった比較的短い期間で発現しうる状態変化に注目する一方、百年以上の時間スケールでの変化の履歴や今後の変動予測のための

情報となり、気候学的に重要な永久凍土深部の地温変化(Q3(3))についても取り上げる。Q4 では、永久凍土が植生、積雪、大気と持つ相互作用に注目し、この凍土を含む気候・生態系システム自体の理解と挙動解明が必要である点を強調する。

Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか? _____

a. 研究の重要性と現状

分布は、永久凍土の最も基本的な情報である。先行研究をベースに国際永久凍土協会¹¹⁷(IPA)によって永久凍土分布図がまとめられてきた(図 52(a))。現在も、IPA が進める GTN-P¹¹⁸という国際的な観測ネットワークの中で、地温変化¹¹⁹および活動層厚の変化¹²⁰に関する観測結果が集約されつつある。しかし、永久凍土が温度によって定義されるために、以下の理由から現状では正確な分布は「観測不能」である。①直接観測としては、ボアホール(掘削孔)による地温の測定が唯一の手法であるが、個々のデータの空間的な代表性には限界がある。②特に凍土の深さについては、十分な深さのボアホールが限られるため、垂直分布の推定精度は低くならざるを得ない。③衛星観測などの遠隔観測によって、確定的な同定ができない。これらの結果として、現在我々が知る永久凍土分布は、地理上の広がりや深さの分布の両者について、限られた観測点から内挿して推定したものである。

一方で、永久凍土の分布は、大きな不均一性に特徴付けられる。永久凍土の分布を模式的に表す図 53(ボックス 8)を見ると、例えば湖や大きな河川の下ではタリクが形成され、また、分布の境界付近では様々な条件を反映して空間的に複雑な構造になることなどが示されている。現在の分布図で用いられる連続的・不連続的・点状的永久凍土という区分は、連続的な分布からまだら状、島状の分布へと変化する凍土環境を表現することに一定レベルでは成功している。しかし、図中には区分境界が線で記入されているが、実際にどこに境界線を引くべきかが、永久凍土の分布比率を算出するための範囲の取り方で変わってしまう。また、永久凍土分布の連続性が悪くなるにしたがい、活動層が場所によって非常に厚かったり、過去の寒冷期に形成され融解途上に

ある永久凍土(化石永久凍土)が深部に存在したりするため、永久凍土境界の空間パターンは図のように複雑になる。同様に、急峻な山岳地域の永久凍土は、斜面方位や積雪分布などによって地表面条件が大きく異なるため、それらの条件に規定されて分布の不均一性が高くなる。そのようなばらつき具合は現状の広域分布図には情報としては含まれていない。

このような現状の理解では、気候変動に応答した分布の変化を検出することは困難である。さらに観測点が限られるという条件が加わるため、気温変化に応答し進行する永久凍土分布の変化を、気温以外の要因による分布の不均一さから分離して検出することは容易ではない。分布図に示された大掴みの理解から一歩進めて、この不均一性を把握し、その情報を含んだ形で凍土分布を理解することが広域的な凍土の変化に関わるあらゆる議論の出発点として重要である。

b. 今後の研究

より良い永久凍土の分布の把握のため、以下の方向性が考えられる:

(1) 観測・検出技術の開発

新しい原理に基づく観測手法の新規開発、あるいは衛星データから永久凍土分布と相関の高い情報を抽出できるアルゴリズムの開発、改良を検討する。現状では地盤の構造を衛星データから明らかにすることに原理的な困難があり、何かしらのブレイクスルーが必要であるが、可能性の模索は常に必要である。

(2) 既存技術の改良・組み合わせ

分布の変化の検出などを可能にするには、既存の観測に関しても手法の改良が求められる。これまでに行われ、GTN-P に集約されてきたボアホールによる地温の

¹¹⁷ 国際永久凍土協会: International Permafrost Association(IPA)

¹¹⁸ GTN-P: Global Terrestrial Network for Permafrost

¹¹⁹ 地温変化: Thermal State of Permafrost(TSP)

¹²⁰ 活動層厚の変化: Circumpolar Active Layer Monitoring(CALM)

直接観測を継続・拡充するだけでなく、例えば以下のような方向性での開発が考えられる。

(3) 衛星データの活用、あるいは気候モデルと組み合わせたデータ解析

面的な情報を扱うために、衛星データの活用は今後必要である。例えば地表面分類・地表の輝度温度・積雪に関する情報を衛星から求め、これらの組み合わせから凍土の状況を推定する。また、これらの情報を陸面モデルに入力することでモデル出力として地温分布を得ることも考えられる。

(4) 複数の観測手法を組み合わせた推定手法の開発

上記の衛星データに加えて、物理探査データ、地表面温度観測など、複数の指標となるデータを組み合わせて永久凍土分布を推定する統合的な手法を開発する。

(5) 永久凍土分布の表現方法の改良

これまでの一面的な分布表現に加えて、例えば想定

しているグリッドサイズ以下のスケールの分布情報を確率分布関数的に取り扱う、あるいは幅を持った分布境界を定義するなど、分布表現を改良する。永久凍土分布をモデル出力と対応させる時、あるいは衛星観測から得られた物理量と対応させる時など、必要に応じたデータの表現形式を準備し、多様な表現を可能にする。

(6) 不均一性の評価

地温、活動層厚、熱物性値、積雪など、地表面状態には様々なレベルでの不均一性があると考えられるが、測定点が一点ではその不均一性を評価できない。前述した CALM (脚注 120)の観測サイトは活動層厚に関して 100m×100m といったグリッドを設定して多点観測を行っているが、他の大半の観測点では一点ないし限られた数点の観測にとどまっている。簡易な観測手法であっても、サイトごとに空間的な広がりを考慮した多点観測を展開し、不均一性(値のばらつき)を評価する。

Q2: 永久凍土を構成する物質はどのような分布を持ち、どの程度の不均一性があるか？ ——

a. 研究の重要性と現状

永久凍土はその地中温度の状態で定義される一方、母材(土粒子、基盤岩)、水(氷、不凍水)、有機炭素といった物質を様々な比率で含有する混合物でもある。これらの含有比は、土壌の力学特性や熱物性を決定し、気温や降水といった外的因子とあわせて、Q3 で論じる永久凍土の状態変化を制御することになる。一方で、永久凍土の融解はこれらの物質を流動化させ、地形の変容、土壌の湿潤化、温室効果気体の放出などの形態で陸面や大気組成を介して気候へのフィードバックを持つ。永久凍土を構成する物質群、特に炭素と氷の含有比を解明することは北極圏陸面での炭素動態、水循環過程およびその将来像を理解する上で必須であり、グローバルな気候変動予測にも貢献する。

このような問題意識は、古くから様々な分野で共有されてきたにも関わらず、広域を対象とした理解はあまり進んでいない。先に示した有機物や地下水の見積もり(図 52(b)、(c))には、大きな不確実性が含まれている(Zhang et al., 1999; Zimov et al., 2006; Tarnocai et al., 2009)。定量的なデータが決定的に足りないこと

がその要因である。加えて、これらの見積もりは、総量値であることにも留意が必要である。これは、永久凍土が全て消失した際のポテンシャルとしての影響を評価するには有益であるが、実際の永久凍土の変動およびその影響は時間的にも空間的にも多様になる。このような相互作用動態の遷移過程(Q3)を理解するには、凍土を構成する物質群の含有比とその分布を空間的な不均一性も考慮して解明していく必要がある。

数値モデルを用いた研究では、永久凍土中の地下水の分布や炭素循環を扱ったものはまだ少なく、あっても単純化されたものに限られる。炭素循環モデルを含む地球システムモデルは既に存在するが、永久凍土環境を上記の目的に合うようにシミュレートするには、計算を最終氷期から開始してその変化を追う必要がある。高度な気候モデルと結合してそのような長期間の実験を行うのは、現状の計算機の能力とモデルの再現能力、そして境界条件となるデータ不足の面から、実現は極めて難しい。現状では、このような物質循環の解析において地質・地形的制約条件の不均一性を考慮するには至っていない。

b. 今後の研究

現状では炭素と氷に限って見ても分布の情報は不足しており、存在量について推定の不確実性の幅を把握することから始めなければならない。母材についての情報も、かなり解像度が粗いのが現状である。先行研究は限られた情報を駆使して氷や有機炭素の存在量を推定しているが、この情報はまだ不十分であることを確認し、それぞれの手法がどの程度の誤差を含むか定量的な議論が必要である。

今後の方向として観測の拡充と、過去に得られた情報の集約によって推定精度を向上させることは、地道だが必須である。衛星データから得られる地表面区分を利用した観測地点の選択など、効率よく観測を展開していく工夫が求められる。また、分布情報の表現の仕方についても改善の余地がある。一般に、永久凍土の温度や構成物質の含有比は、Q1でも論じられたように空間的に不均一性が高く、スケールに依存するが、観測で得られている情報を失わないような表現方法が必要である。ある地点の地下氷の含有量には、そこでの母材の風化度、気候、地形、植生などの現在の状態と、過去の履歴が反映されている。これらの情報を活かし、地域ごとに支配要因を見出すことができれば不確実性の幅を狭めることが期待できる。

一つの方向性として、サブグリッド(グリッドサイズ以下)の地理的情報を含んだデータの作成が考えられる。一般的なデータ表現では、各グリッド内での状態値(地形、植生、積雪、気温、土壌熱物性・粒度特性)を暗黙のうちに均一と仮定するが、グリッド内での不均一性が顕著になる山岳域や不連続永久凍土帯などのデータが扱いづらい。この問題に対し、さらにグリッドを小さくしていく微分的手法は現実的ではない。そこでグリッドサイズはそのまま、グリッド内での各状態量の組み合わせにより、不均一性を含めた統計的表現(確率分布、分散、最大、最小など)として永久凍土の構成物質比を示

す枠組みを構築することが望まれる。これは世界的にもまだ十分に行われていないので、以下のように日本が先行する可能性が大いにある。

現在進んでいる研究の一例として、中緯度高山域や不連続永久凍土帯(アラスカのフェアバンクス周辺、西シベリア、モンゴル・日本の高山帯)では、上述した永久凍土組成を表現する様々なアプローチを試行するのに適している。ここでは、永久凍土の分布や組成が気候によって一義的に決まるのではなく、ローカルな地形・水文・生態条件にも強く規制され、大きなバリエーションを持っている(例えば、Ishikawa et al., 2012)ため、説明変数(状態値)と目的変数(永久凍土組成)とを比較検討しやすい。

これまで様々な方法でなされてきた現地でのポイント観測から、多点観測への展開、航空機や衛星観測による広域評価へと、系統的かつシームレスなスケールアップへと繋げる観測デザインとモデルの精緻化、汎用化が求められる。さらに、過去の履歴として氷期サイクルに伴う数万年以上の時間スケールでの永久凍土発達過程の理解も、並進していく必要がある(テーマ3のQ2、テーマ6; テーマ12のQ4)。

永久凍土中に貯留される炭素量の上限をおおまかに押さえる意味で、炭素循環モデルを用いて、永久凍土中の炭素貯留量を推定するアプローチも有効であろう。長い時間スケールの計算を行うため、現状ではシンプルなモデルを用いた研究に限定されるが、定量的な議論から得られる示唆はあると思われる。ただし、永久凍土の炭素循環を適正に表現したモデルの開発と、適切な境界条件の与え方を工夫することが求められる。将来的には計算機能力の向上により、気候モデル・物質循環モデルを結合した地球システム結合モデルを用いたアプローチが可能になると期待できる。観測データの蓄積により、複雑なモデルの性能を活かせるだけの情報をそれまでに手にしていることが望ましい。

Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？

a. 研究の重要性と現状

Q3では、生じうる永久凍土の状態変化として、活動層の変化(Q3(1))、サーモカルスト(Q3(2))、永久凍土の深度地温(Q3(3))に分けて議論する。なお、Q3(2)とQ3(3)については、永久凍土の近年の変化を考えるうえ

でも、長い時間スケールの永久凍土発達史を念頭に置く必要がある。最近1万年間のような温暖な時期(間氷期)をはさんで、数万年間続く氷期という寒冷期が繰り返し訪れた古環境のもと、形成された永久凍土が現存するためである。

(1) 活動層の変化

活動層融解部の時空間的な広がりの変化は、比較的短期間に地表面の生態系と水文過程に影響を及ぼす。これは、活動層融解部の広がり永久凍土地域における植物の根系や土壌微生物などの生物活動の場であり、地域の水文動態を規定するからである。活動層の変化は、最大融解深(活動層厚)の変化だけではなく、地表面からの融解開始および凍結開始時期の変化として表れる。温暖化による活動層の時間的な変化は、融解開始時が早まることと凍結開始時が遅くなることである。さらに、地表面熱・水収支の変化に伴って地中に入る熱量が増加し、活動層厚が増加する。こうした季節的な広がりの変化は、長期平均的な温暖化が無い場合でも、降水の量、タイミングや消雪時期の変化によってもたらされる場合がある。活動層の動態は空間的な非一様性が高いため、変化傾向とその原因を捉えるためには、永久凍土上部を含んだ地表層の地温と土壌水分量の変化を、高い時空間密度で測定する必要があるが、CALMのように空間分布の観測に特化した観測点を除くと、スーパーサイトの一点の観測でモニターされているのが現状である。

(2) サーマカルスト

まえがきでも述べたように、地形変化を伴う永久凍土の融解であるサーモカルストは、地表面の生態系と水文環境を大きく変化させるため、その現状と変化の把握が急務である。特に、以下に述べるエドマ層の安定性、空間的な分布および融解速度を評価することは重要である(Schirrmeister et al., 2013 など)。東シベリア北東部および北西部に分布するエドマ層は、極端に多くの氷を含んだ(体積含水率で 65~90%)永久凍土層であり、有機炭素を大量に含有する堆積層である。体積の半分以上を氷が占め、広い範囲に分布しているため、エドマ層の融解は大規模なサーモカルストを引き起こす。これは、現間氷期の温暖な気候によって、あるいは人間活動による地表面攪乱や地球温暖化のために、主に氷期に蓄積され、凍土中に固定されてきた大量の炭素が再び循環し始めることを意味しており、そのインパクトを定量的に評価することは重要である。しかしこうした永久凍土層は遠隔地であることから、地理的あるいは鉛直方向の分布状況とその変化の実態は詳しく理解されていない。サーモカルストを伴う永久凍土の変化は、北

極域の変化と気候変動の予測に大きな不確定要素をもたらす原因となっている。

サーモカルストは活動層の深化や永久凍土の昇温だけでなく、河川や波浪による側方侵食によっても引き起こされる。すなわち、先に述べた CALM や GTN-P のプロトコルに従っていただけでは動態を十分に理解できない現象であり、その意味で新たな観測体制を構築していく必要がある。(→テーマ A:モニタリング)

(3) 永久凍土層における地温の変化

先に述べた国際的な観測ネットワーク GTN-P の中で、地温変化(TSP)および活動層厚の変化(CALM)に関する観測結果が集約されてきた。北極地域においては、近年の温暖化傾向を反映して永久凍土の地温上昇やタリクの形成が報告されている。例えば、Romanovsky et al. (2010)は、ロシアの永久凍土について、地温年振幅がなくなる深度における地温が、最近 20~30 年間の間に 0.5~2°C 上昇し、特に、不連続的永久凍土地帯において最終氷期に発達した永久凍土の融解が観察されており、連続的永久凍土の南限が北上していると結論付けている。活動層厚の変化については、観測サイトによって増加傾向を示す場所がある一方、明確な変化傾向が見られないサイトも多い。

これら TSP および CALM の観測活動は、サイト毎に異なる研究グループ、プロジェクトによって実施されており、研究資金や人材確保の制限から長期的な観測例はまだ少ない。モニタリング活動は、ネットワーク内で標準化されておらず、研究組織によって測定の実施様式はさまざまである。例えば、永久凍土の変化に重要な影響を及ぼす要素である気温や積雪深は、すべての観測サイトではモニタリングされていない。また、観測サイトはアクセスがよくインフラが整っている地域に集中している。GTN-P に携わる研究組織によって、これまでに多くの永久凍土モニタリングが実施されてきたが、上記のような観測サイトによる実施様式の違いと偏った測定ポイントの分布のために、永久凍土の変化速度に関する実測値に基づく広域的な評価は難しいのが現状である(Schaefer et al., 2012)。

将来の永久凍土変化については、数値計算による予測がいくつかの研究グループによって報告されている。図 55 は気候将来予測の結果を用いて、永久凍土面積の変化を求めたものである(Slater and Lawrence,

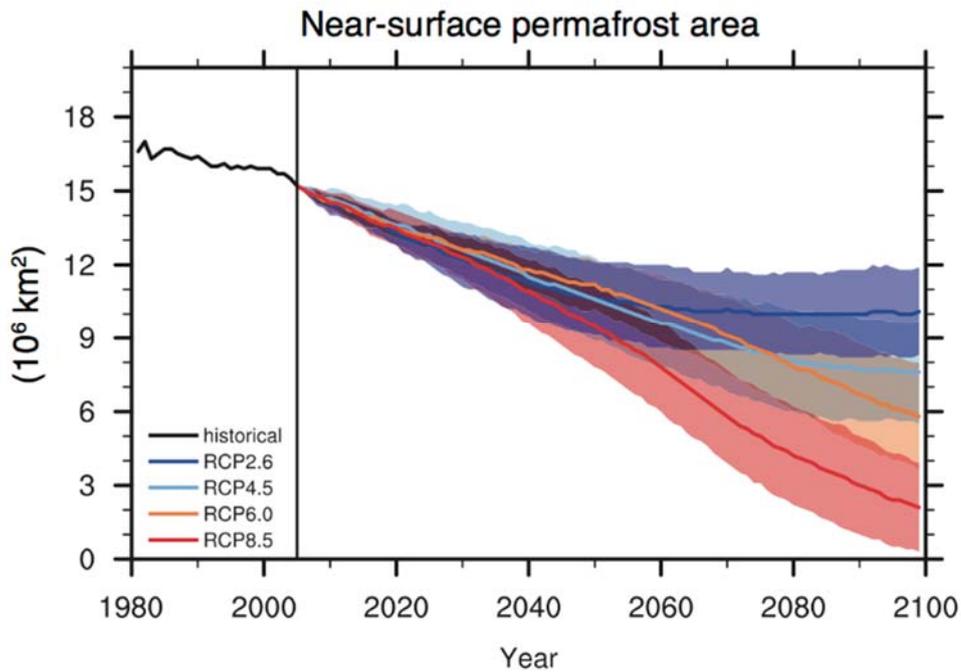


図 55 今世紀末までの永久凍土面積予測 (Slater and Lawrence, 2013; IPCC AR5)。CMIP5 で公開されている気候将来予測の結果を用いて、バイアス補正された月平均気温と積雪量を入力として診断的に求めたもの。代表的濃度パス (RCP シナリオ) によって色分けされており、太線がモデル平均を、帯がモデル間のバラつきを表す。

2013; IPCC AR5)。太線がモデル平均を表し、帯状の部分でモデル間のバラつきを表す。傾向は一致するものの、温室効果気体濃度のシナリオ (RCP) の違いまで含めると、予測の不確実性の幅は非常に大きく、今世紀末の永久凍土面積の予測値は、2 割減からほぼ消失までのバラつきがある。同様に表 2 は、社会経済シナリオ A1B に基づいて計算された西暦 2100 年までに起こ

る地表面付近の永久凍土分布域の減少割合と、活動層厚の増加量についてまとめたものである (Schaefer et al., 2012)。それぞれのモデルによって陸面物理過程の表現が異なり、二酸化炭素の増加による気温上昇予測にも差があるため、予測結果に大きな幅があることがこの結果でも示されている (Koven et al., 2011; IPCC, 2013)。

表 2

西暦 2100 年までの地表面付近の永久凍土分布域の減少率と活動層厚増加量の予測 (Schaefer et al., 2012)

Study	Decrease in Permafrost Area (%)	Increase in Active Layer (cm)
Marchenko et al. [2008]	7 ^a	162 ^b
Schaefer et al. [2011]	20-39	56-92
Euskirchen et al. [2006]	27 ^a	-
Saito et al. [2007]	40-57	50-300
Eliseev et al. [2009]	65-80 ^a	100-200
Lawrence and Slater [2010]	73-88	-
Lawrence et al. [2008]	80-85	50-300
Zhang et al. [2008a]	16-20 ^a	30-70
Schneider von Deimling et al. [2011]	16-46	-
Zhang et al. [2008]	21-24	30-80
Koven et al. [2011]	30	30-60 ^a
Lawrence and Slater [2005]	60-90	50-300

^a calculated from numbers or tables in text

^b calculated from estimated trends

b. 今後の研究

永久凍土の状態の変化に関しては、今のところ状況把握が不十分で、確固たる変化傾向が広域的に捉えられているとは言い難い。変化速度の決定要因としては、影響の大きいものだけでも初期条件としての地温プロファイル、氷の存在量分布、外部境界条件としての気温変化、積雪変化、地表面擾乱が挙げられるが、気温変化以外では観測が不足している。目下の課題は現状把握にあると考え、以下に挙げる方針のもとモニタリング研究を進めるとともに予測モデルの開発を通じて、将来予測につなげる必要がある。

(1) 現地モニタリングの強化

活動層の地温変化のモニタリングは、遷移層(テーマ4: 雪氷圏、Q2 参照)と今後 100 年程度では融解しない深い永久凍土層の上部を含む深度まで高密度に行い、活動層厚の変化に留まらず、その融解期の季節的な広がりをつまえる観測を増やす。また、永久凍土の変化を決定する微気象要素も併せて測定する観測デザインを確立する。永久凍土の温度変化のモニタリングも含めて、GTN-P の方針を押し進める形で研究を進めるとともに、観測様式の国際的な標準化を早急に進める必要がある。アクセスとインフラ設備の制限に影響を受けないよう、観測サポート体制強化と測定機器の開発を進め、大規模なサーモカルストが予測される永久凍土地域をカバーするように観測サイトを展開する。サーモカルストによる地盤沈下・地形変化の現地測量観測例はほとんどなく、早急な実施検討が望まれる。

Q4: 永久凍土—大気—積雪—植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？

a. 研究の重要性と現状

テーマ3(Q2、Q3)、テーマ4(Q2)、また、本テーマのQ1~Q3ですでに指摘されているように、永久凍土、季節凍土の動態(つまり、その生成、成長、維持、衰退)は、その時の大気からはもとより積雪、水文、植生、地形といった周囲の環境条件から大きな影響を受ける(図56、Saito et al., 2013)。例えば、大気のある程度以上低くなければ凍土は形成されないが、一度成立した凍土は、積雪や地表層上部の有機物層、その上の植生層の断熱効果により、大気温暖化に対してある程度の頑健さを保つことができる(Shur and Jorgenson, 2007)。一方で、永久凍土の存在により地

(2) 衛星リモートセンシングによる永久凍土監視方法の確立

永久凍土の変化が主に地下部の現象で、また、対象の空間的スケールがメートルオーダーであるため、衛星による広域的なモニタリング研究は困難である。しかし、サーモカルストに伴う地表面状態の変化は、今後提供される予定の高空間分解能の衛星プロダクツの利用を通じて研究が大きく発展する可能性がある。例えば、衛星からのレーダーによって、永久凍土の融解による地盤沈下が観測された研究の報告や、地表面の凍結・融解情報を与えるプロダクツも提供されつつあり、今後の活用が期待される。こうした衛星データを効率よく利用できるように、現地観測デザインと実施期間は研究目的に対応した衛星の運用期間と測定内容と併せるように設定するべきである。

(3) 永久凍土層を古環境復元に利用する

過去の永久凍土変化の履歴は、ある程度永久凍土自体に保存されていることが分かってきた(テーマ6参照)。過去の変動を調べることで、将来の永久凍土の変化についても有用な情報が得られると考えられる。永久凍土帯の地表面上層部を活動層/永久凍土層という2層構造で捉える従来の認識から離れ、活動層/遷移層/永久凍土層という3層構造として捉え(テーマ4、Q2参照)、過去の活動層変化幅を把握する作業が必要である。さらに、永久凍土の深層掘削を行う際には、地温測定に加えて、不攪乱のコア試料を採取し、成分分析を行って古環境復元に利用できるようにする。

表層中の生物活動や水文過程は活動層(季節融解層)に限られ、これは地上部の植生状況を左右する。また、表層付近の温度が低く保たれるため、有機炭素の分解は遅く泥炭として土壤中に堆積することで過去の有機炭素が保存される。

しかし、大気温度上昇があるレベルを超えて持続したときには、鉛直方向および水平方向に凍土の縮退(活動層厚の増加、地下水の融解など)が起こり、地形、植生の変化など周囲の環境に対して影響を及ぼすとともに、土壌有機物の分解促進に伴う温室効果気体の放出やアルベドの変化、地下水の貯蓄や河川への栄養塩類(無機炭素や窒素、燐、カリウムなど)の輸送の変

動を通して北極域以外の地域へも影響をおよぼすことが懸念される(テーマ3:物質循環、テーマ4:水文)。すなわち、凍土を取巻く現象は、凍土自体を一要素として含む環境因子群が上記のような相互作用を持つ(すなわち、システムを構成している)ということであり(Francis et al., 2009)、現在の凍土の状況を理解して今後の動態の予測を行うには、凍土のみを考えるのではなく、総体をシステムとして捉えることが必要だということを示している。

永久凍土-大気-積雪-植生サブシステムに関して、個々の要素間での相互作用やフィードバック(fb)については、これまでの研究で認識されているものもある(例えば、積雪-放射fb、積雪-植生(灌木)fb、温室効果気体-気温fb、火災などの攪乱による地表層変化-積雪・水文・凍土間の相互作用、降水量-森林fbなど:図56参照)。しかし、システム総体として各要素間の相互作用の強さや向き、システムとしての安定性とその範囲(すなわち、それぞれの要素がどのような条件のと

きにどのような強さや向きの相互作用、フィードバックを持つのか、どのようなときに安定であり、また、その安定性に関して閾値、分岐が存在するのか)、また、タイムスケールによって卓越するfbの違いなど、基礎的な動態特性については検討、理解が不十分である。

特に、氷期-間氷期スケールに代表されるような大きな時定数の現象については、泥炭層などの有機炭素層の堆積、保存、分解など、物質循環や温室効果気体収支と密接に関わっているものの、これらの過程をシステム間の相互作用として一貫して取扱った研究は非常に限られ、現段階ではその生成から衰退までを記述することにどまるものが多い。

各国の研究コミュニティにおいても、同様の現状認識を持っているようで、ほぼ時を同じくして永久凍土に関した多角的な研究プロジェクトがスタートしている。欧州ではPAGE21¹²¹、米国では、RCN Permafrost¹²²がそれにあたり、どちらも永久凍土環境の脆弱性(vulnerability)を定量化することに目的をおく点で共

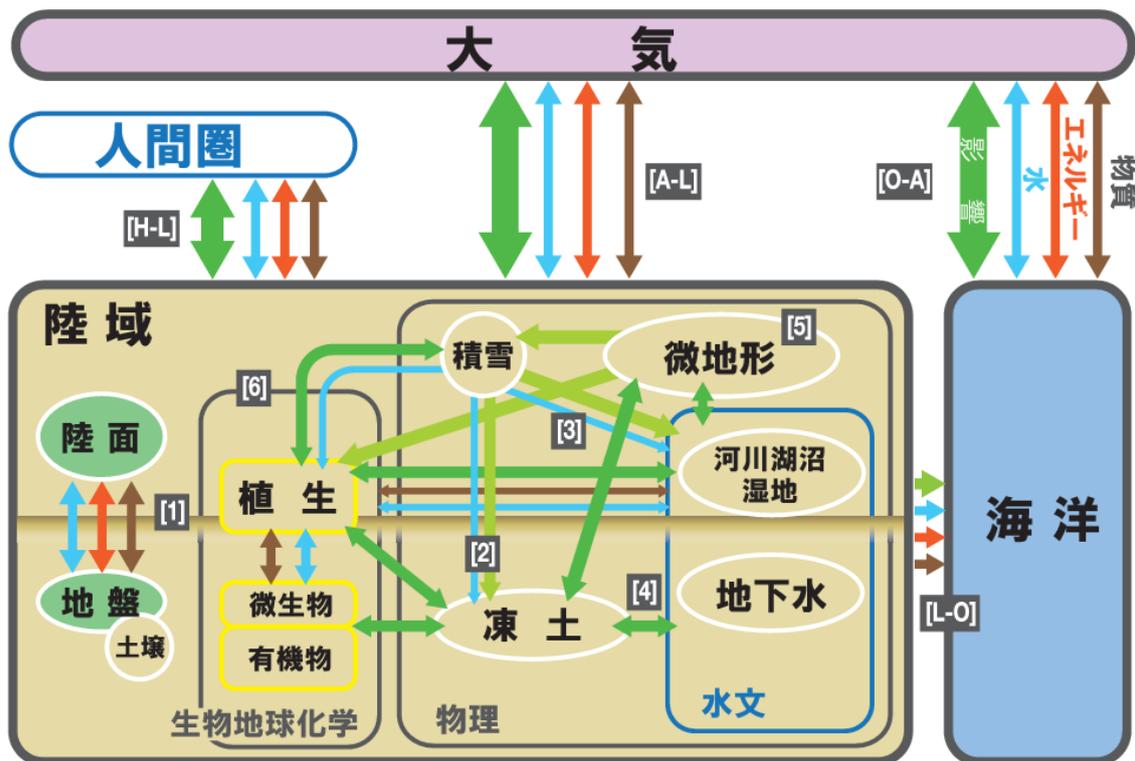


図 56 北極陸域(大気-積雪-水文-植生-地形)システム概念図(Saito et al. 2013 より)。^[1] 地表面-地下間の熱・水・物質移動、^[2]-^[4] はそれぞれ積雪-凍土間、積雪-水文間、凍土-水文間での相互作用、^[5] 微地形のこれら 3 要素への影響、^[6] 生態系と物理系の連関を示す。また、陸域システムは大気([A-L])、海洋([L-O])、人間圏(H-L)とも相互作用を持つ。「O-A」は大気-海洋の相互作用を示す。

¹²¹ PAGE21: Changing permafrost in the Arctic and its Global Effects in the 21st Century

¹²² RCN Permafrost: Vulnerability of Permafrost Carbon Research Coordination Network

通している。日本においても GRENE 北極気候変動研究事業の一環として、観測とモデル研究の連携により陸域変動の気候へのインパクトの定量化を目指しており、各プロジェクトの間で相互に研究交流を行っている。

b. 今後の研究

異なるタイムスケールにわたって、相互作用、フィードバックによって結ばれた北極陸域のシステム(大気-積雪-凍土-土壌-植生)は、個々の要素を単体で見ているだけでは、あるいは個々の要素間の相互作用を見ているだけでは、全体の動態の特性(変動の大きさや影響の範囲、また、その原因)について知り得ず、総合的理解のためには動的システム解析(力学系解析)的なアプローチが必要となる。ただし、対象とする時間・空間規模に伴って主要となる要素(及び要素間の相互作用)の重みや範囲が変わるという意味で開放的で仮説的なシステムであるため、Q1~Q3 で提議された観測の充実、表現の方法、モデルの開発などの結果を十分に利用するとともに、それら観測やモデル構築(数値モデル、プロセスモデル、あるいは概念的理解のための数理モデルなど)を連関させて、対象とするシステムの大きさと複雑さや時空間規模に関して段階的に、適宜最適な方法を模索しつつ把握を進めていく手順になる。具体的な対象としては、例えば以下のような現象及びタイムスケールが考えられよう。

- ・森林火災などの「攪乱」による変遷過程(10~100年規模)。大気条件(積雪、気温など)と風景規模(10km以下程度)の植生および地表層上層の変化や回復。
- ・中世温暖期、小氷期、「人為的温暖期」での変動過程(~1000年規模)。気候の変動に伴う「凍土-水文-植生」の地域規模での共変動。
- ・最終氷期最盛期からの氷床後退、海水準変動に伴う海岸線の前進(海進)、完新世の変化(2万年規模)。大規模な気候変化(温暖化)下における、「氷床後退-地表層露出-凍土成長-地表層形成・泥炭蓄積」サイクルや「海進-永久凍土の海没-海底永久凍土の形成・保存」の北半球規模での変遷。

また、10~100年規模の部分では陽には含めなかったが、人間活動、社会活動(経済、社会基盤の構築と維持、農業)からの、または、それへの影響や、(植生のみではなく)広く動物も含む生物圏との相互作用についても同様のアプローチが必要である。総体をシステムとし

て捉える視野で考えるとき、従来は異なる学問領域で取り扱われていた様々な因子が関連しているために、システムの同定や中心となる過程の抽出、観測・モデル化戦略の策定、その実施など、多分野にまたがった研究体制(凍土学、気候学、土壌学、地形学、生態学、生物学、数学、情報学など)が必要となる。現在、欧州や米国で進む永久凍土変動研究についても、現時点では「凍土-炭素」部分への着目が主ではあるものの、今後はこのようなシステム全体を見据えた方向性に進んでいく可能性は高い。観測サイトやデータの共有、モデル比較や共通プロジェクトの参加など情報収集から共同研究に至るまで国際連携の一層の推進も重要となろう。

先駆的なブレークスルー研究には、観測とモデリングの手法の革新的な展開がきっかけとなる。プロセス研究と相互啓発するモニタリング、システムモデリング、データ同化が重要である。現状のギャップを特定し、効率的

に研究を進めると共に、研究基盤の必要性につなげる。北極圏の複雑さとデータ取得の難しさによるハンディキャップを乗り越え、全球規模研究に貢献する。

テーマ A: 持続するシームレスなモニタリング

要旨

北極環境研究に関わるモニタリングは、現場観測と人工衛星をはじめとするリモートセンシングを両輪として行われている。北極域の環境変化は地球規模での影響が大きく重要であるが、現場観測は北極圏の環境の厳しさゆえに、様々な分野で観測密度の小ささ、空白域の多さが指摘される。人工衛星によるモニタリングは、近年の進展により従来はわからなかった情報の取得が可能になってきたものの、現場観測が必要な項目も依然として多い。モニタリングで最も重要なことは、代表性のあるデータを継続して集めることである。そのためには国際的な協力体制を敷くことが肝要である。その中で日本も役割を果たし、さらに独自性を発揮していくことが求められる。

モニタリングの対象を、便宜的に海洋圏、雪氷圏、大気圏、陸域圏に分けると、日本がこれから長期的に取り組んでいくべき重点課題として、それぞれ以下のようなものが挙げられる。海洋圏では、衛星および自国砕氷

船を用いた通年の海氷変動、海洋生態系、物質循環のモニタリング。雪氷圏では、グリーンランド氷床、環北極圏の山岳氷河の質量収支とそれに関わる諸量、凍土の掘削孔管理と融解に伴うサーモカルストや海岸浸食。大気圏では、気候に関わる大気微量成分、雲・降水量の高精度な長期観測とそれによる時空間変動の把握。陸域圏では、植生変動、陸域生態系のモニタリングと熱・水・炭素フラックスを含む気象・水文観測を行う総合的な観測点(スーパーサイト)の整備と維持。これらの課題に関して、現場観測、リモートセンシングを両輪とするモニタリングが期待される。

ここでは、海洋圏、雪氷圏、大気圏、陸域圏に区分してモニタリング構想を述べる。

- Q1: 海洋圏モニタリング
- Q2: 雪氷圏モニタリング
- Q3: 大気圏モニタリング
- Q4: 陸域圏モニタリング

まえがき

長期的な高精度の観測の継続、モニタリングが重要である。対象とする現象を具体的に定めず、モニタリングを行うのは研究の動機として説得力を欠くとの意見もあるが、短期的な観測では観測された現象、状況の普遍性がわからない場合も多い。10年、20年にわたって観測することによって、はじめてその現象、状況の位置づけが明確になってくる。よく知られる大気中二酸化炭素濃度の増加についても、1958年にキーリングがハワイで始めた精密な観測データが長期間蓄積されたことにより、科学的に議論できるようになった (Keeling et al., 1976)。近年の北極海氷の激減は、30年以上にわたって行ってきた衛星観測によって、定量的に明らかにされたものである。現象の変化の時間スケールが長い

ほど、モニタリングを続けるべき時間も長くなるのは必然である。北方針葉樹林帯や凍土の変動などは数10年以上の連続観測が必要になってくる。

北極域において長期にわたりモニタリングが必要な項目は、多岐にわたる。そこで、海洋圏、雪氷圏、大気圏、陸域圏に分け、各モニタリングについて、まず、国際的なネットワークの現状や問題点を述べる。続いて、今後必要なモニタリングについて、詳しく述べる。北極域、特に雪氷に関わるモニタリングについては、雪氷圏に関する統合地球観測戦略 (IGOS-P Cryosphere) によって、現状認識と提言が述べられている (Key et al., 2007)。これらもふまえ、ここでは日本が取り組むべきモニタリングに関わる研究構想を記す。

a. 衛星リモートセンシングによる海氷のモニタリング

人工衛星から観測される一番基本的な海氷の物理量は、氷量の水平分布(密接度)である。衛星による観測がはじまる以前は、現地での情報を収集して海氷分布が推定されてきたが、人工衛星による観測、特に 1970 年代から始まったマイクロ波放射計による観測は、全球の海氷域の連続的なモニタリングを可能にした。それにより、北極域における海氷面積の減少の様子などが明らかになった(Comiso and Nishio, 2008) (図 57)。マイクロ波放射計の現在の主力は日本の AMSR シリーズである。これは、それまでの主力だった SSM/I の約 2 倍の分解能を持つ世界最高性能のセンサであり、海氷モニタリングのために広く利用されている。

一方、現在もっとも必要とされているのは海氷の厚さのモニタリングである。厚さ変化を伴う海氷の変動過程は現在でもきちんと理解されておらず、気候モデルの中での海氷変動の表現も不十分なままである。海氷変動の基本的な量である海氷域の熱収支や海氷生成融解量の推定、海氷の力学的変形が海氷の厚さ変化におよぼす影響の把握のためには、海氷の厚さの空間分布と時間変化の観測が不可欠である。そのための空間解像度は、数十キロメートル以下であることが期待され、時間間隔は数日、可能であれば毎日の厚さ変化が把握できることが望ましい。現在、米国(NASA)や欧州(ESA)ではそれぞれレーザーとレーダーの高度計により、海氷の

表面の高さを計測し厚さを推定している。これらの観測が将来有用になると考えられるが、精度や頻度の点でまだ十分とは言えず、推定に必要な積雪深や積雪や海氷の密度など不確定な要素があるなど、今後の改良の余地が大きい。

この他にも、合成開口レーダーや高分解能の可視観測衛星など多くの地球観測衛星が現在も観測を行っている。これらの高解像度なデータは、マイクロ波放射計では捉えきれない氷盤の大きさ分布や細かいスケールでの海氷の力学的変形、さらにそれらが広域規模の海氷変動に及ぼす影響を知る上できわめて有用であり、今後さらに有用に活用してゆく必要がある。

マイクロ波放射計について今後もっとも必要なのは、観測を継続し、長期の安定したモニタリング体制を作ることである。観測の維持を最優先とした上で、高解像度化も期待される。観測解像度が 1 から 2km 程度になれば、沿岸の薄氷域(沿岸ポリニヤ)や氷縁の海氷分布の詳細なモニタリング、変化の激しい海氷表面状態(メルトポンドなど)の把握、数十キロメートルスケールの渦など海氷変動に関わる細かい現象を全天候で観測することが可能になり、データの有用性を大幅に高めることができる。海氷厚測定のための高度計については、現在は直下しか測定できない海氷表面高を軌道と直交する方向にも観測するなどして、観測頻度を大幅に増やすことが期待される。そして、気候変動への海氷の応答を把

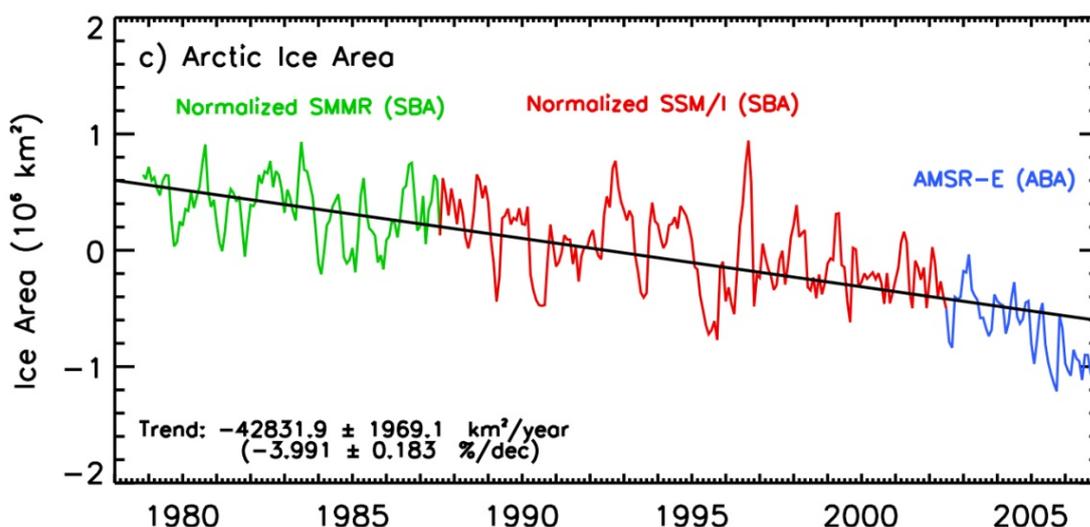


図 57 マイクロ波放射計によって観測された北半球の海氷域面積偏差の変化(Comiso and Nishio, 2008 より)

握するには、そのような観測を持続していくことが必要である。さらに、高解像度画像等の既存のデータを有効利用することは、新しい観測を行うのと同様に意味のあることである。運用機関やフォーマットの異なるそれらの衛星データを統合する機関を作りデータセットを管理・整備するとともに、衛星データを利用する研究者・技術者を増やすことで、衛星データを用いた北極域の研究が急速に進展すると考えられる。

b. 海氷下の海洋のモニタリング

気候システムを理解する上で、大気－海洋間の熱収支を変化させる北極海の海氷変動メカニズムは、解決すべき喫緊の課題である。これまで海氷激減は、太平洋水による海洋温暖化が著しい太平洋側北極海のノースウインド海嶺付近で主に観測されてきた。しかし現在では、ノースウインド海嶺付近だけでなく、太平洋水が分布しない海域にまで季節海氷域化が進行している。季節海氷域化の進行は、海洋が大気と接する面積の増加とその期間の拡大を意味する。その結果、短波放射、大気擾乱が海洋表層の流れや鉛直混合に、そして海洋からの熱フラックスが大気場に変化をもたらす。したがって、現在から今後の大気－海氷－海洋間の熱収支は、海氷がまだ現在のように薄くなく、夏季の面積も小さくなかった 1990 年代後半とは大きく異なることが予想される。つまり、北極海の海氷変動と気候システムへの影響の将来予測を精度よく行うには、融解期だけではなく結氷期～冬季における大気境界層から海洋表層混合層の各物理素過程と、それらの海氷変動に対する寄与を定量的に明らかにすることが必須である。しかし、これまでの日本の北極海観測は自国耐氷船か他国砕氷船にて行われてきたが、それぞれに観測時期、海域、人員、予算等の制約の中で実施してきたのが現状である。一方、海氷設置型漂流ブイによる観測が通年で展開されてきたが、分厚い海氷にのみ設置することや観測域が海氷移動に依存することから、データ頻度の空間分布に偏りがあり、一定期間で同一の海域を観測することができない。また、係留系観測では、多年氷を避けて観測をするように設計されるため、海面～深度 50m 程度までは測器を設置できず、流速以外は測定が困難である。

そこで、ここでは耐氷船や他国砕氷船で観測が困難な「結氷期～冬季の大気－海氷－海洋間の熱収支観

測」を自国砕氷船により実施することを提案する。具体的には、すでに季節海氷域化した太平洋側北極海のノースウインド海嶺～マカロフ海盆において、砕氷船による現場観測(氷上も含む)、有人観測ステーションの展開を行い、結氷期の大気－海氷－海洋間熱収支を広域で捉える。また、定点を海氷激減域に設定し、砕氷船越冬観測による大気－海氷－海洋の熱収支観測を実施する。これらにより、大気－海氷－海洋の熱収支過程における海氷運動、海洋潮汐(内部波)、大気擾乱による熱輸送およびそれらの結氷・融解過程への寄与を定量的に明らかにする。また、融解期には既存の耐氷船による広域観測、無人観測ステーション(係留系、漂流ブイ等)の展開を行い、開放水面における海洋表層の貯熱量、海洋混合層の時間変化、結氷前のプレコンデーションを明らかにする。このように砕氷船と耐氷船の時間差観測によって、通年の大気－海氷－海洋間の熱収支に関する素過程を明らかにする。

c. 海洋生態系および物質循環のモニタリング

北極海における海洋生態系は、低温と海氷環境に適応した種により構成される独特の生態系である。1990 年代より観測されている夏季の海氷の激減と水温上昇は、北極海生態系と、それに深く関与する物質循環を大きく変化させる可能性が指摘されている。また、100 年スケールでの地球温暖化は海氷だけでなく、陸域の凍土や氷床の融解を引き起こすため、北極海への淡水流入を増加させ、それに伴って物質循環と沿岸生態系を大きく変化させるであろう。したがって、北極海を取り巻く生態系と物質循環を効率的にモニタリングし、その変化をいち早く明らかにすることは非常に重要な課題である。しかし、これまで北極海の生態系・物質循環研究で明らかになった事実の多くは、夏季の開放水面域における観測データに基づくものである。従って、冬季の生態系や物質循環に関してほとんど明らかにされておらず、海洋生態系・物質循環の変動・変化の過程を捉えられていないのが現状である。また、観測はアクセスが比較的容易な沿岸域を中心とした一部海域に偏っており、全域をカバーする研究はほとんどなされていない。

北極海生態系と物質循環の全体像を把握し、変化とそのプロセスを明らかにするには、地域的、季節的差異を考慮しなくてはならない。単一国のみで複数地域かつ異なる季節の観測を行うことは、物理的、経済的にほ

ば不可能である。日本はこれまでチャクチ海及びカナダ海盆域で、「みらい」や「おしよろ丸」を用いて数多くの夏季観測を実施し、生態系から物質循環変化を明らかにしてきた。しかし、北極海の生態系及び物質循環像を把握するには、より広い地域での観測が必要であり、それには国際連携が必須である。現在、国際共同観測である DBO¹²³の観測を日本も担当して成果を上げている(Grebmeier et al., 2010)。今後は、ロシア、カナダとも関係強化し、ポーフォート海、カナダ海盆、チャクチ海、東シベリア海観測を戦略的に行うことが重要である(図 58)。国際連携のもと、北極海においても、例えば、10 年に一度のスケールで行われる WOCE¹²⁴のような高精度かつ多項目の海洋モニタリング観測を実施することも重要であろう。また、データの効率的運用のためには World Data System (WDS)などの国際データ機関とも連携し、積極的なメタデータの集約と公開を行うことが必要不可欠である。

また、これまで日本の北極海観測は夏季の開放水面域に限られてきた。これだけでは物質循環像と生態系変化の把握には不十分である。国際連携の一環において日本もしかるべき場所(例えば、観測の空白域であるカナダ海盆域やチャクチ海)において越冬観測が可能となるような研究砕氷船を将来的には整備し、季節変動を含めた物質循環及び生態系の観測を行うことが重要である。また、近年は係留系、音響機器や水中グライダーといった遠隔観測技術が急速に進歩しており、アクセスが容易でない北極海においてはこれらを最大限に活用すべきである。中でも係留系は、生物の通年観測には強力なツールであるため、国際連携のもと、適切な海域に複数の係留系を設置することが必要不可欠である。人工衛星データも生態系や物質変動を時空間的に把握するために、重要なツールである。可能な限り高分解能な海氷、雪氷、海色の長期モニタリングを行う。AMSR2 の後継機や、Sentinel-3A・PACE(両者ともに打ち上げ予定)は、生態系関連パラメータの時空間変動の把握にとって非常に重要な観測基盤となることから、多くの研究者が簡便に利用できる体制が構築されることを強く希望する。

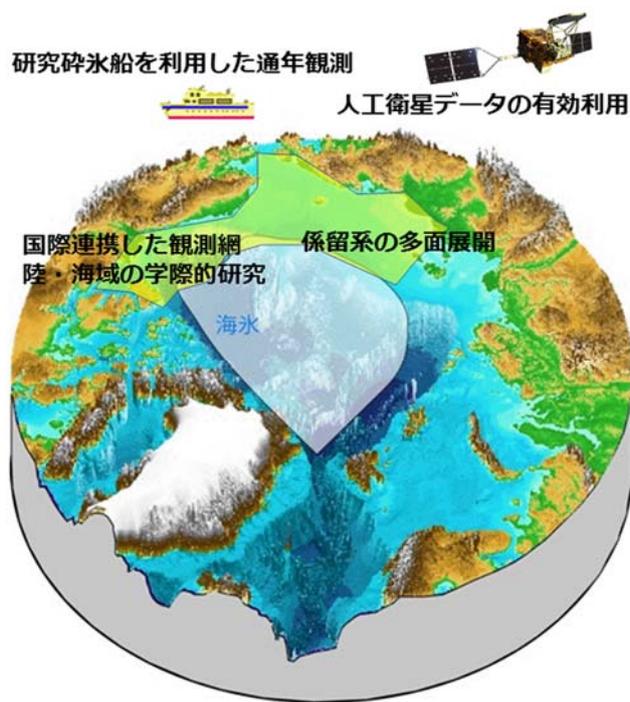


図 58 今後の海洋生態のモニタリングに必要な要素(概念図)

さらに、海洋生態系と物質循環の変化には陸上からの淡水及び物質供給が深く関与している。大型哺乳類から底生生物まで、多くの生物が棲息する沿岸域は北極海生態系のホットスポットと言える。沿岸域の環境変化を知るためには、学際的な連携を強化し、河川から海洋までシームレスなモニタリング観測を展開する体制を構築する必要がある。

d. 海氷域の放射フラックスのモニタリング

北極域の熱収支において、短波・長波放射フラックスは大変重要な役割を果たしている。北緯 70 度以北の北極域の大気全体の熱収支を、大気上端における正味短波・長波放射フラックス、中緯度からの極域へ輸送される熱フラックス、海氷の結氷などに伴う表面からの熱フラックスの流入の総和として見積もると、年間を通して絶対値として最も寄与するのは正味長波放射フラックスであり、特に、短波放射が消失する冬季においては正味長波放射フラックスが支配要因となる。夏季においては短波放射と長波放射は同程度の寄与があり、ともに北極域の熱収支を考える上で要と言える。

一方、海氷の成長、融解に直接関わる地球表面にお

¹²³ DBO: Distributed Biological Observatory

¹²⁴ WOCE: World Ocean Circulation Experiment

ける熱収支に着目すると、基本的には表面における正味放射フラックスで生じた過不足分を、乱流フラックス（顕熱フラックス+潜熱フラックス）と雪や海氷を通しての熱伝導フラックス、あるいは、表面の雪や海氷の融解潜熱とで補填するというバランスとなっており、海氷の成長・融解量を知る上で短波・長波放射フラックスを正しく見積もることの重要性が伺える（Serreze et al., 2007）。しかし、極域ゆえに長期的なモニタリング観測の困難さを伴い、データは非常に限られている。現在、WCRP¹²⁵傘下のBSRN¹²⁶の一環として北極域では1992年以来、比較的広域を覆うバロー（北緯71度）、ニーオルソン（同79度）、ティクシ（同72度）の3箇所放射フラ

ックスの観測が実施されているが、今後はこれを継続および補強する観測体制が強く期待される。

また、表面における正味長波放射フラックスは、年間を通してマイナス値（上向き、 $-20 \sim -40 \text{ W m}^{-2}$ ）を取るが、変動に寄与するのは下向き長波放射フラックス、特に雲の有無が 70 W m^{-2} 以上もの差異を生み非常に重要な要因であることが北極海表面熱収支観測プロジェクト（SHEBA、脚注15参照）等の観測から指摘されている。このように雲（特に、下層に出現する層雲）は、北極域の熱収支に重要な役割を果たしているため、短波・長波放射フラックスと併せて北極域での今後の長期モニタリングが必要と考えられる。

雪氷圏モニタリング

a. グリーンランド氷床上の気象・雪氷観測と雪氷中の光吸収性エアロゾル・雪氷微生物のモニタリング

グリーンランド氷床全体の質量収支は、涵養量、表面融解量、氷河からの流出量の結果として決まる。これに氷河の流動が加わった結果、氷床表面高度が決まる。氷床表面高度は近年、衛星からのレーザー高度計観測によって精度よく見積もられるようになってきた。また、氷床の質量変化も重力場を測定する衛星から見積もることができるようになり、近年における氷床質量減少の実体が明らかになってきた。しかし、氷河流動や氷の流出については衛星観測が可能なものの、氷河の内部構造については現地観測が必要であり、また、涵養量や表面融解量の変化は現地観測に頼らざるを得ない。このため、氷床上に設置された自動気象観測装置（例えば、Steffen and Box, 2001）による観測が非常に重要と言える。氷床全体の質量収支変動監視の精度を上げるためには、衛星観測の充実と現場観測、そして自動気象観測装置の地点数を増やし、空白域を埋める努力や長期の施設維持が必要である。

一方、表面融解に最も重要な要素の一つとして雪氷面のアルベドが挙げられる。氷床表面のアルベドは涵養域では、積雪粒径と雪に含まれる光吸収性エアロゾル（ブラックカーボンやダスト）に依存し、消耗域では雪氷微生物の濃度にも大きく依存している（Wientjes et al., 2007）。このため、涵養域における積雪中光吸収性不純物測定、積雪断面観測による積雪粒径測定、消耗

域における雪氷微生物サンプリングやクリオコナイト観測を、アルベド観測と同期して実施する必要がある。また、浅層コア掘削を様々な場所で行い、季節変化を含む高時間分解能で、過去における光吸収性不純物濃度及び雪氷微生物濃度変動を復元する必要がある。

b. 環北極圏の山岳氷河における質量収支および気象の長期的観測

北極域の氷河の研究を進める上で、質量収支変動の把握は重要なテーマの一つである。北極域は、近年の温暖化傾向の影響が強く現れている地域であるにもかかわらず、世界の氷河と比較すると質量収支データのある氷河は少ない（Vaughan et al., 2013）。今後、衛星画像等によるデータ、現地観測による長期データの収集が必要であり、各国と協力して進めていく必要がある（テーマ4 および次節「グリーンランド氷床と周縁の氷河氷帽における質量収支の継続的観測」参照）。

今後、日本が実施する方法として以下が考えられる。
①これまでに観測のない氷河で空白域を埋めるべく新たに観測を開始する、
②わずかに過去のデータがある氷河のモニタリングを再開する、
③他国が実施しているモニタリングに協力する。以下に、北極域で氷河が存在し、今後の観測が必要な主な国や地域（カナダ、アラスカ、ロシア）での現状と可能性について記述する。アラスカ、カナダは、海水準変動への影響が大きい上、特にブルックス山脈等アクセスの悪い氷河で観測が欠落し

¹²⁵ WCRP: World Climate Research Programme

¹²⁶ BSRN: Baseline Surface Radiation Network

ている。エルズミア島、バフィン島等のカナダ北極域の島では、観測開始年が早い、質量収支の長期データは不足している。ロシアは、過去に質量収支観測のあった氷河でも長期データが欠落しており、近年の観測が必要とされる。また、気象データも旧ソ連時代には充実していたが、近年は急激に少なくなった。

質量収支観測と同時に、質量収支を決定する気象要素の観測を行う必要がある。気象観測に関しては、NOAA などの整備されたデータベースが利用できる。再解析データは、北極域では観測値との差が大きいため今後のさらなる整備が重要となる。観測では低温な環境での測器の不具合が考えられるため、研究計画と同時に測器の開発や動作確認を行うことが重要である。観測効率を上げるには北極域での気象観測に関するワークショップで議論するなど、他国と協力して行うことが必要である。

c. グリーンランド氷床と周縁の氷河氷帽における質量収支の継続的観測

氷河・氷床の質量変動において、表面質量収支は最も重要な観測項目のひとつである(テーマ 4 参照)。近年では、人工衛星での観測が進歩しているものの、降雪量や融解量を衛星データから測定することは難しい。衛星観測で得られる標高変化の検証やメカニズム解明のためにも、現地での質量収支測定が重要となる。質量収支をつかさどる降雪量と融解量は、年々の気象条件によって大きく変化する。したがって、短期間、または隔年での観測では意味を成さず、長期間にわたって連続的に測定を行うことが重要である。現在のところ、グリーンランドにおける質量収支の連続データは限られているが、組織だった取組として、デンマークが主導する PROMICE¹²⁷による観測ネットワークが挙げられる。

今後、広大なグリーンランド氷床や、広い範囲に分布する山岳氷河、氷帽において質量収支データを増やすためには、世界各国の協力が必要である。日本が担当する地域を設定してデータを提供することで、世界の北極研究コミュニティに貢献することが重要である。具体的なモニタリング対象地としては、GRENE プロジェクトで観測を開始したグリーンランド北西部が挙げられる。沿岸のカービング氷河から氷床内陸まで、また、独立した氷帽を含めた多様なデータが集まりつつあり、今後の

継続と発展が期待できる。長期間にわたって質量収支を測定するには、遠隔地で毎年のフィールドワークが必要であり、人員と予算の継続的な確保が必要となる。長期的な観測実現のためには、現地の協力者の養成も検討すべきであろう。

d. 人工衛星による氷河氷床変動の長期的な観測

近年の衛星観測技術の発展によって、末端位置や面積分布といった基本的な情報に加えて、様々な氷河変動観測が可能となっている。具体的には、①可視やマイクロ波画像による氷河末端位置と面積の測定、②可視画像の実体視や高度計データによる氷体積変化の測定(例えば、Bolch et al., 2013)、③画像相関法や干渉合成開口レーダー(InSAR)による流動速度の測定(例えば、Moon et al., 2012)、④重力測定による氷質量変化の測定、などが重要な観測として挙げられる。今後の北極域における氷河・氷床モニタリングでは、これらのデータと技術を活用し、発展させることが重要である。

①に関しては、より高い分解能の画像がより高い時間分解能で入手できるようになった。今後は、氷河周縁部の自動抽出などの技術を使って、より広い範囲で大量の画像を処理することが求められる。

②の手法は従来から存在する技術であるが、高分解能の画像が得られるようになって精度が上昇し、その重要性が増している。可視画像の実体視による手法では、コンピュータによるDEM自動生成アルゴリズムの改良でさらなる成果が期待できる。また、NASA のICESat に代表される高度計観測によって、広域で正確なモニタリングの継続が求められている。

③に関しては、流動が氷河変動に大きな役割を果たすグリーンランドのカービング氷河末端部で、これまでに大きな成果が挙げられている。今後は次世代の人工衛星や解析手法の進歩によって、より高い時間・空間分解能での測定が期待できる。

④は、GRACE 衛星による過去 10 年の観測で可能となった新しい技術であり、特に氷床質量変動に大きな力を発揮している。グリーンランド氷床のモニタリングはもとより、山岳氷河・氷帽スケールでの質量変化を広域で正確に監視するための解析技術開発が期待されている。以上どの観測においても、衛星搭載センサと解析

¹²⁷ PROMICE: Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet

手法の両面で著しい技術革新が進んでいる。新技術を利用するばかりでなく、将来の衛星観測と技術改良にアイデアを出して協力することで、北極圏の氷河・氷床研究に必要な衛星観測を発展させるよう努力すべきである。衛星観測の整備やセンサ開発に関しては、9章の記述も参照のこと。

e. 人工衛星による雪氷分布、雲分布、雪氷微生物分布など雪氷の量的変化と積雪粒径・アルベド等質的变化の監視

d.で述べた人工衛星を利用しての観測に加えて、グリーンランド氷床の消耗域では雪氷微生物で覆われた暗色域(Wientjes et al., 2007)が近年拡大していることから、この監視が重要である。さらに、表面が雪で覆われていたとしても、その質的变化、すなわち、積雪粒径や光吸収性不純物濃度といったアルベドに関係する積雪物理量や温度、アルベドそのものの変化を衛星で監視することは、アルベド・フィードバックを解明し、モデル開発及び将来予測を行うという視点から重要である。このために可視・近赤外域のチャンネルを有する多波長イメージャー衛星からそれら積雪物理量を高精度で抽出する技術開発が重要である(Hori et al., 2007)。また、北極域における雲の存在は、放射収支にとって重要な要素であるため、衛星による雲分布、雲粒径、高度、厚さなどの情報を長期監視することが必要である。

f. 凍土の融解に伴うサーモカルストの分布の把握と長期モニタリング

永久凍土地帯においては、凍土の融解によって地表面が陥没してサーモカルスト地形が形成される(サーモカルストの進行に関してはテーマ 12 を参照)。このような凍土の融解は、気候変動と共に、局所的に発生する

林野火災による植生の消失などの地表面状態の擾乱によっても引き起こされ、急激な永久凍土の活動層厚の増加を招き(Viereck et al., 2008)、急激なサーモカルストの形成と発達を引き起こす。サーモカルストの形成は、周辺の水環境にも変化を生じる可能性があるため、その分布と変動を長期間にわたってモニタリングする必要がある。

このことから、アラスカ、シベリアを中心とした連続・不連続永久凍土地帯において、現地観測と衛星データを用いて、現在のサーモカルストの分布の把握を行う必要がある。サーモカルストは凍土の融解が(観察可能な)現象として現れるものであり、このデータは将来的な変動の掌握のための基礎データとなる。地域ごとの凍土融解の原因を掌握し、局所的な周辺環境の変動を理解することにより、長期的な環境変動予測に資するものとなる。

g. 北極海の海岸浸食と地下水の変動に関するモニタリング

北極海沿岸の地表面近くには多量の地下水(エドマ;テーマ 12 のボックス 8 参照)が存在する。海岸浸食によって表土が流出し、地下水が露出することによって融解が開始、進行するプロセスが現在も生じているが、気温上昇と海水準上昇はこのプロセスを加速すると予想される。このエドマ氷中にはメタンを多量に含むことが指摘されており(例えば、Fukuda, 1993)、また、融解は永久凍土中に固定されていた炭素の放出をもたらすため、温室効果気体の増加に寄与する可能性がある。一方、地下水の融解は地表面の陥没を引き起こし、建築物の崩落、海岸線の後退など人間生活に直接の影響を与えている。地域によっては、コミュニティの全体移動を招いている例(アラスカ州シシュマレフ)もある。しか

ボックス 9

氷河質量収支の観測

氷河の質量収支の観測手法には、現地観測(質量収支、末端など)、衛星画像解析(質量変化、面積変化)等がある。正確に把握するには、現地観測により直接測定する方法が望ましいが、広域な氷河や遠隔地では、衛星画像等を用いた複合的な方法が有効である。なかでも GRACE 衛星の活用が期待されているが、小さな氷河や誤差が大きいと判断される場所では面積変化や標高変化から質量変化を抽出する ICESat や ASTER などが活用できる。現地観測についても、直接観測に加えて末端位置の変化なども活用されることが期待される。末端位置の観測は世界の約 500 の氷河で行われている (Vaughan et al., 2013)。

し、エドマそのものの温度測定をした例はない。

このような背景から、海岸浸食の進行と海岸線の変動、地下水変動のモニタリングの重要性は高い。そこで、これまでほとんど実施されていないエドマの温度測定をはじめとする現地調査と合わせて、航空機による空中写真と人工衛星を用いて海岸線の変動を定期的にモニタリングする必要がある。特に、地下水の多く分布する地域において、その進行速度を評価する必要がある。なお、エドマ氷は古環境復元に利用できる可能性がある(テーマ 6 を参照)。

h. 掘削孔観測による凍土温度状態のモニタリング

地温は、永久凍土環境の最も基本的な情報である。掘削孔による深部までの地温観測は、北極域の各国において様々な目的で様々な深度に対して行われてきているが、その維持環境は現在も利用可能なものから、放棄され場所すら不明となったものまで様々である。長期にわたる温度測定が可能な掘削孔を設置して維持することは、北極域における凍土の温度状態の長期モニタリングを可能とし、気候変動に対する凍土の応答を考察する上で重要となる。また、地温変動は、測定深度が深

いほど時間スケールの長い変動が(時間差を伴って)現れるため、気候変動における人為影響を評価する上でも深い掘削孔観測を維持することが重要となる。このような背景から、アラスカ、カナダ、シベリアを中心とした北極域で長期間維持可能な掘削孔を設置することが必要である。近年では観測ネットワークとして、国際永久凍土協会が主導する GTN-P¹²⁸が挙げられる(このネットワークと測定値の変動に関してはテーマ 12 の Q3 の記述も参照のこと)。本プロジェクトにおいては、現存のネットワークの空白地域を優先的に選択し、観測地点とする。目標とする追加観測点は 100 点とする。

このような地域での掘削孔の設置・維持をするには、現地研究機関との協力関係は不可欠であり、既存の協力関係の維持発展、新たな協力関係の構築が必須である。一例として、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)では、長期にわたり日本との協力関係を築いている。また、IARC には日本人研究者はもちろん、カナダ、ロシアの研究者も多く、両国との共同研究を行う上でも重要な位置を占めている。この IARC を拠点として掘削孔観測を準備、設置、維持することは、長期地温観測を可能とするうえで有効であろう。

大気圏モニタリング

a. 重要性と現状

温室効果気体、エアロゾルについて、北極域で広域代表性のある長期連続モニタリングを実施しているのは、アラスカ・バロー、カナダ・アラート、それにスバルバル・ニーオルスンであり、グローバルな観測網の一端として輸送機構や発生源、吸収源の推定に貢献している。しかし、北極海に面して広大なシベリア沿岸にはその観測点はなく、偏った配置になっている。さらに、観測のほとんどが地上基地で行われている。航空機などの飛行体を用いた観測は、アラスカやスバルバル周辺で実施されたことはあるものの、依然として対流圏中上部の観測データは非常に限られている。温室効果気体モニタリングは、特に高精度の観測を長期間継続することが求められ、国際的な協力で支えていく必要がある。

気象現象や大気微量成分(温室効果気体、短寿命気体、エアロゾル)の変化は、とりまく環境の変化に応答するだけでなく、放射過程を介して、気候に影響を及

ぼす(短寿命気体については、脚注 54 参照)。北極域は、北極海のほとんどを占める海氷域、莫大な生物生産量を有する海洋域、広大な永久凍土帯や森林帯が分布する陸域に区分され、北極圏内にも工業地域が分布し、大気微量成分のソース、シンク両方のプロセスが存在する。20 世紀初頭から気温の経年変化は観測されているものの、その変動要因については、海氷分布やアイスコアデータなどと比較し、検討されている(例えば、Yamanouchi, 2011)。

降水量の経年変化は地域により傾向が異なり、単純な増加、減少ではない。現在の北極域に関する降水量データは、まばらな雨量計データに基づくものである。近年、北極海にそそぐ大河川の水量は増加傾向にあるといわれ、流量の変化は降水量変化による可能性が高い。しかし、降水量のデータは観測点密度の低さと降雪の雨量計捕捉率の問題により、流量増加を定量的に説明できない状況にある。面的な降水量を知る上では人工衛星の活用が最も期待される。これまで、低緯度に関

¹²⁸ GTN-P: Global Terrestrial Network for Permafrost

しては TRMM により貴重なデータが取得されてきた。一方、中高緯度については、これまで継続的な降水量観測はなく、2014 年に全球降水観測計画(GPM)主衛星が打ち上げられ、大いに期待されている。しかし、降雪に関しては高精度の観測は難しいとされている。

温室効果気体(CO₂、CH₄、N₂O など)については、年々の増加傾向、増加率の経年変化が確認されており、地球規模の人間活動の影響に加え、湿地地帯からの CH₄ 放出の影響も示唆されている(例えば、Morimoto et al., 2006)。エアロゾル中の nss-SO₄²⁻、ブラックカーボン(BC)については、80 年代以降の排出量の削減により、年々の減少傾向が観測されているが、一部のエアロゾル成分(NO₃⁻)や散乱係数などについては、減少傾向は観測されない、あるいは近年増加傾向が観測されていることから(Quinn et al., 2007)、低中緯度域からの長距離輸送の可能性も指摘されている(BC については、脚注 53 参照)。放射収支に大きく影響を与え得る雲の分布とその経年変化については、衛星データなどから増加傾向が指摘されているが、未だ不確実性が大きい(例えば、Wang and Key, 2005)(エアロゾルと雲の関係については、脚注 57 参照)。これらの経年変化は、北半球～全球規模の諸過程、北極圏内の人間活動や陸域、海洋の環境変化などの複雑

な要素が相互に関係している。長期にわたる北極域の環境変化を検出するには、気象、大気微量成分の主要要素の長期観測と観測体制維持が必須となる。しかし、現状では、観測の制約、困難さゆえに、観測データの空白時期、空白地域が依然として多く存在している。これまでに得られている科学的な知見だけでは、北極域の環境変化の理解には遠く及んでいない。

b. 今後の研究

これまでの長期的な観測や研究の多くは、観測拠点での地上近傍の観測や気象定常観測に基づいている。北極域の環境の長期変動を検出し、その過程を検証するには、各基本パラメータの長期観測に加え、その時空間変動とその実態を把握することが重要となる。基本パラメータとしては、気温、水蒸気量、降水量、温室効果気体、短寿命気体、雲、エアロゾルなどが挙げられる。これらの大気中での寿命は、秒～年のスケールで大きく幅があるため、注目する現象、過程に応じて観測頻度や計測分解能を変える必要がある。北極圏の環境変化、気候変動と大気中の物質動態の変化と関係を検討するには、数年～数十年スケールの変動を捉える必要がある、また、環境変化に伴う大気中の各成分のソース、シンクなどの短い時間スケールの素過程とその長期

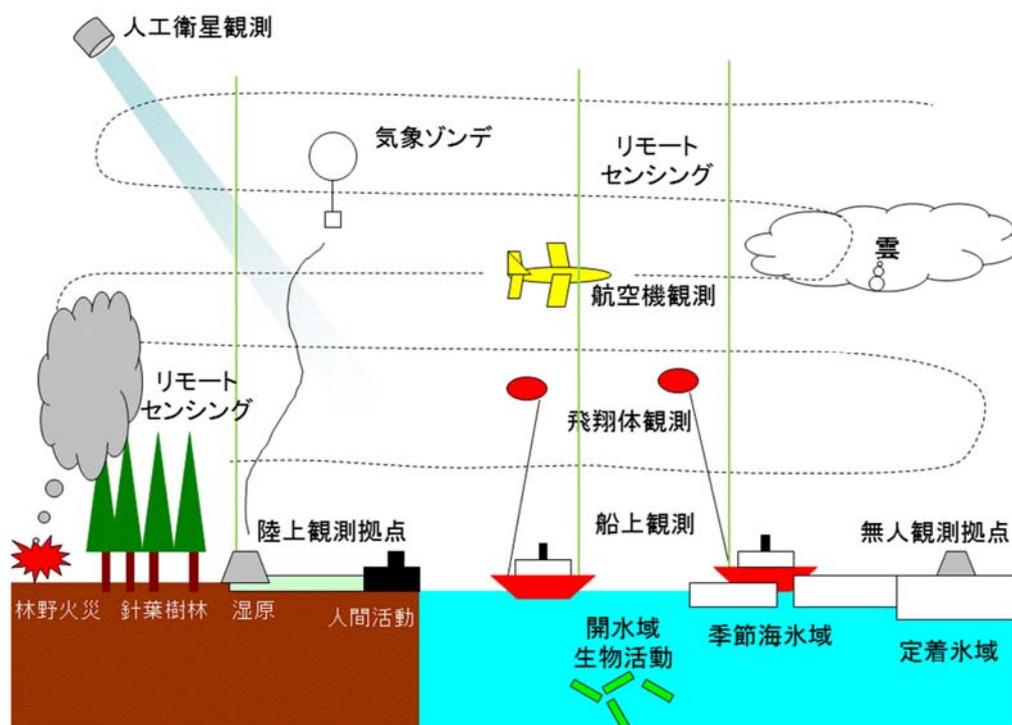


図 59 大気微量成分のモニタリングの概略

的な変化を捉えるためには、長期的な変動だけではなく、分～日～季節スケールの変化を議論していくことも重要である。

観測拠点が非常に限られている地域(北極海上やシベリア地域など)に、気象観測拠点を設置し、観測網として長期的な運用を目指す。特に、上空における基本的な気象要素(気温、水蒸気量など)の長期的な変動を把握するための高層気象観測網の整備と維持が望まれる。降水量は水収支の基本となる量であり、長期の時空間変動実態を把握する必要がある。地上観測だけではなく、全球衛星降水レーダーデータの取得、活用と、データ同化技術を駆使し、降水量データの高度化を行う。これにはリモートセンシング、レーダー、データ同化などの専門家との協力関係を構築する必要がある。地上観測に関しては、冬季の降雪観測技術の向上を図るとともに、観測地点数の維持、増加を目指す。

温室効果気体については、現在のモニタリング観測体制を維持し、新しい観測点を加えつつ、長期的な濃度変化を捉える。また、温室効果気体の放出源・吸収

消滅源に関する情報を持つ同位体比の高精度観測も、引き続き維持・発展させる必要がある。急激な北極圏内での人間活動の拡大による放出量増加に加え、北極環境変化に伴うフラックスの変化も予想されることから、陸域・海洋域での温室効果気体のフラックスを把握することは重要である。また、地上近傍のデータに加え、航空機観測や衛星観測データを活用し、温室効果気体の三次元的時空間変動を把握する。

短寿命気体、雲、エアロゾルの観測は、長期的な観測が行われている拠点に加え、長期的な観測データが得られていない地域(北極海上、シベリア域)にも観測拠点を設け、継続的な観測を維持することが望まれる。短寿命気体、雲やエアロゾルは時空間変動が激しいため、船舶、航空機や飛行体を使用した観測を定期的に展開し、各領域での雲、エアロゾルの物理的・化学的特性(光学特性、数濃度、粒径分布、組成など)、短寿命気体の時空間変動とそのトレンドを検証することも重要である。さらに衛星データも使用し、雲、エアロゾルの分布の空間変動を追跡する。

陸域圏モニタリング

a. 同一の衛星による数10年以上の地表面の連続観測

現在、広域の地表面観測の衛星としては、NOAA 衛星の AVHRR センサに代表される過去 30 年以上のデータの蓄積があり、これらを用いた気候変動に伴う植生成長期間の伸長や植生量の変動に関する解析が進んでいる(鈴木、2013)。これらの衛星に関しては、センサの交替、軌道ドリフトの問題や、大気補正の問題などもあり、多くの不確実性があるとされている(鈴木、2013)。一方で、1998 年より観測が続けられている SPOT/VEGETATION データや、2000 年以降観測が続けられている Terra/MODIS データに代表される近年の中空間分解能衛星においては、大気補正の高精度化や観測波長帯の改良などによって、NOAA AVHRR に比較して精度の高い観測、アルベドの推定などが可能になっている。これらの観測データは約 10 年～15 年程度の蓄積があり、今後の観測が継続されることにより、植生量や植生活性度などの変動・トレンド検出が可能となる。

以上のような衛星搭載光学センサによる観測のほか、最近では ALOS PALSAR といった衛星搭載 L バ

ンドマイクロ波合成開口レーダー(SAR)による植生観測も盛んになってきた。亜寒帯林は熱帯林と比べれば地上部の材積量(バイオマス)が格段に小さく、SAR からの後方散乱強度が飽和しないため、そのバイオマスの推定に威力を発揮し、森林地上部バイオマスの推定研究に応用されてきた。今後も L バンドマイクロ波 SAR による長期にわたる観測が期待される。

衛星観測においては、陸域モニタリングの観点、長期変動抽出の重要性の観点から、最低でも 10 年以上の長期観測を目指した衛星観測網の構築が重要である。例えば、我が国で計画されている観測衛星についても、後継機の計画を含めた長期観測の視点が重要である。

近年においては、衛星プロジェクトとしての地表面物理量プロダクトの構築に留まらず、各研究グループレベルにおいても様々な物理量プロダクトを提供することが可能になってきている。さらに、複数の衛星観測データを組み合わせることによる物理量プロダクトについても個々の衛星の利点、欠点を補完しながら、より高精度のプロダクトを構築できる可能性がある。衛星観測に加えて、これらの物理量プロダクトを構築するための基盤作

り、衛星開発プロジェクトに入らずともデータが構築、提供できる環境作りも重要である。

b. 気象、フラックス、植生フェノロジーの長期連続観測

これまでも様々な気象観測点が展開されており、それらを利用した広域のグリッドデータの整備もいくつかの研究機関で進められている(例: CRU データや APHRODITE 降水量データセット)。ただし、気象データなどが多く利用できる地域は限られており、例えば、シベリアにおいては、観測網が他の地域に比較して疎となっている。これらの地域における気象観測網や観測データの整備は重要である。

熱・水・炭素フラックスの地上タワーによる観測は、熱・水・炭素収支の時空間変動の最も直接的なモニタリング項目である。全球の水・熱・炭素フラックスを測定する目的で、1990年代から FLUXNET と呼ばれる地上観測ネットワークが展開されている。現在、世界で 500 地点以上が FLUXNET に登録されているが、北極域ではアラスカと北欧にそれぞれ 10 地点弱、広大な面積を占めるシベリアには 5 地点ほどしか存在しない。北極域は地球の炭素循環、熱収支にとって重要な地域であるにもかかわらず、自然条件の厳しさ、人口密度の低さなどから観測点がまばらなのが現状である。東シベリアのヤクーツク近郊にある観測サイトは、1997 年に GAME 計画の一環として開始され、日本、ロシア、オランダの共同で維持されている数少ないサイトである。フラックスデータは、陸面過程モデルの検証に必要不可欠で、その観点では気象、雪氷、水文、植生、土壌の観測が同一地点で行われるいわゆるスーパーサイト的な地上観測が重要である。また、水収支の重要な検証項目として、観測点を含む流域の流量観測も欠くことはできない。陸面・植生環境の長期的な変動には地温・土壌水分が強く影響していると考えられ、これらの継続的な観測も重要である。スーパーサイトとなりうる観測点は北極域ではヤクーツク、フェアバンクスなど数えるほどしかないのが現状であり、長期にわたる総合的な観測地点の整備・維持が課題である(テーマ 4 も参照)。

フラックスの観測については、これまでの研究では、季節変動から経年変動などの比較的短期の変動を検出することに比重がおかれていたが、近年においては 10 年以上の観測期間を持つサイトが増えてきたことによ

り、10 年程度もしくはそれ以上の期間におけるトレンドの検出が試みられるようになってきた。これらの長期観測によって、気候変動に伴う炭素収支などの変動が検出されるようになってきた(Ueyama et al., 2014)。今後は、現在の観測を継続することにより長期観測が可能となる観測サイトの数も増えることが予想され、トレンド検出の信頼性を向上させる必要がある。さらには、変動の傾向が加速されるなど、将来の気候変動によって、大きな炭素収支の変動が予想される地域において、これらの変動を早期に検出するための観測網の整備が必要となる。

植生フェノロジーについては、魚眼レンズ付きカメラによる森林景観の定点写真撮影を行う PEN¹²⁹に代表されるような観測網が展開されつつあるが、現状では観測サイトの数が非常に少ないことにより、より広範囲におけるサイトの展開が必要である。また、展葉などの時期の変動に関するトレンド解析を実施することにより、より多くのサイトで変動のシグナルを検出することが重要である。また、衛星観測データと融合することによって、広域のフェノロジー情報へとスケールアップされることが強く期待される。

c. 生態系・毎木調査森林プロットの増加と 100 年間を目指した長期維持

気候の変化に伴い、植生の変化の兆候が報告されている。アラスカのノーススロープでは、1950 年頃の写真を最近の写真と比べることで、ツンドラに低木が増加していることが指摘されている(Tape et al., 2006)。また、全球植生動態モデルでは、現在東シベリアに存在する落葉樹林が 2300 年には消失し、その代わりに常緑樹林の分布域が北上してくることが予測されている(Kawamiya et al., 2012)。このような、10 年スケール、さらには 100 年スケールの植生の変化を捉えるには、各地の植生調査プロットで、例えば、樹種構成、立木の数、その胸高直径と樹高などが数年間隔で 100 年以上測定され続けることが期待される。それには、植生調査プロットが 100 年スケールで維持される人的な確固たる仕組みを作ることが必須となる。さらに、そういったプロットが国内の JaLTER や国際的な iLTER といった長期生態系研究のネットワークに参加し、調査データが世界の資産として活かされることが望まれる。衛星観

¹²⁹ PEN: Phenological Eyes Network

測に対する地上検証サイトとしての役割も大きいだろう。

d. 植生遷移帯を中心とする植生状況の長期モニタリング

タイガとツンドラは植生状態の大きな違いにより、地表面のアルベド、粗度、土壌状態、積雪・着雪の状態が対照的であるほか、主役となる温室効果気体がタイガでは二酸化炭素、ツンドラではメタンという違いを見せる。このため、熱・水・炭素収支が異なり、タイガとツンドラの分布は気候に大きく影響を与える。植生の状態、水循環の解明などにとって、水、炭素、窒素などの安定同位体比の情報が大変有効である。タイガ・ツンドラ遷移帯の移行は重要であるにもかかわらず、情報が極めて不足している状態である。遷移帯の移行について、同位体を含めた現地観測および衛星観測によつて的確に監視していく必要がある。

e. 蓄積炭素量(バイオマス、土壌有機物)

フラックスの計測と同時に炭素蓄積量のモニタリングも重要である。特に、土壌中に含まれる炭素量は、将来の気候変動とともに放出が進む可能性が高く、これが潜在的にどの程度の大きさの炭素放出となり得るかを推定するためにも、現存量のより信頼性の高い見積もりが必要である。「雪氷圏モニタリング」で指摘したように、凍土の融解はメタンの放出などに強く関与している。凍土の変化は地域によって大きく異なるため、きめの細かい監視が求められる。また、メタンの放出は微地形による土壌水分の違いの影響も受ける。狭い地域内での空間的な相違も継続的に見ていく必要があり、自動観測のみならず、現場に入つての長期的な観測も重要である。

要旨

多様な過程が複雑に相互作用する北極域の理解のためには、複雑な系を複雑なままに扱える地球システムモデルの活用が欠かせない。ここでは、大気、海洋、陸面の各領域別の視点と、それらの領域が統合されたシステムモデルとしての視点の両方から、モデルの現状と課題について議論した。鍵となる Questions は以下の通りである。

Q1: 地球システムモデルについて開発課題は何か？

Q2: 大気モデルについての開発課題は何か？

Q3: 海洋・海氷モデルについての開発課題は何か？

Q4: 陸面・雪氷モデルについての開発課題は何か？

システムモデルを用いた研究では、扱う問題の継続時間に応じて異なった性質のモデルを用いると効率がよい。数年以下の問題を対象としたモデルでは、緻密で信頼できる予測を実現することが重要である。そのために、領域モデルなどを用いた高解像度化に取り組むことが特に必要である。より長い時間継続する問題のためのモデルでは、古環境実験から将来予測まで様々な実験で安定した再現性を示せることが重要である。そのために、熱・水収支をよりよい再現や、物質循環、生態系、氷床・氷河、植生などの幅広い素過程を高い精度

で表現するモデルの開発が特に望まれる。どちらのモデルでも重要な取り組みとしては、目的に応じたパラメータ化の使い分けや、モデル内である要素に生じた誤差が他の要素にどう影響するかを評価することが挙げられる。

システムモデルを形作る個々の領域にも課題がある。大気モデルでは、雲のふるまいを陽に¹³⁰表した高解像度非静力学モデル、および雲をパラメータ化し通常の解像度を持つ静力学モデルを、雲データによって検証することを中心的課題とする。海洋モデルでは、北極海への水塊流入および鉛直混合などで変質する過程の改善と生態系プロセスのパラメータ化、海氷モデルでは、氷盤スケールの海氷力学・熱力学過程および海氷下の混合層過程の改善がそれぞれ中心的課題となる。陸面モデルでは、古環境指標を用いた検証、同化技術の導入、相互作用の再現の改良、長期積分に向けたオフライン実験のための統合モデルの枠組みの整備が中心的課題である。以上のような取り組みを通じて、地球システムモデルが北極域の多様な学問領域を結びつける基盤としての役割を果たしていくことが望ましい。

まえがき

地球の気候系は、大気、海洋、陸面などで生じる様々な現象(「素過程」)が相互作用する複雑系である。特に北極域は、地球上の他領域と比べて極めて複雑な系が形成されている。極域以外の領域でも共通に存在する大気、海洋、陸面、各種生態系などの関わる素過程に加えて、雪氷・氷床過程も関わるからである。複雑な北極域で生じるさまざまな現象を理解するには、あるいは急激に変動する北極域の将来の姿を不確実性まで含めて精緻に予測するには、複雑な気候系を複雑なままに扱うことのできる実験装置の開発と利用が必要である。しかし、現実の空間でこのような装置を用意することはとても難しい。その代わりとして使われるのが、科学原理と自然現象への洞察を基にして計算機の中に作られた模型、すなわち数値モデルである。気候・環境系を

再現するための数値モデルである「地球システムモデル」は、気候や環境の研究で極めて重要な役割を果たしている。ここでは、北極域研究の視点から見た、地球システムモデルの現状、開発課題、検証方法について述べる。

研究装置としての数値モデルは、気候の研究に限らず地球科学全体において幅広く利用されている。ここでは、その中でも地球表層の気候学的な変動を知ることを主な目的とした数値モデルについて述べる。このようなモデルが対象とする素過程は、主として大気(対流圏と成層圏の物理、化学、物質循環)、海洋・海氷(海洋と海氷の物理、化学、物質循環、生態系)、陸面・雪氷(陸氷、積雪、土壌、河川、植生、生態系)といったいくつかの領域に分布している。ここでは、まずこれらを統

¹³⁰ モデリングの分野ではある過程(変数の時間変化)をモデル方程式の中で直接、明示的に書き表すことを「陽に」と表現することが多い。

合した「地球システムモデル」の現状と課題について述べ(Q1)、その後には大気、海洋・海氷、陸面・雪氷のそれ

ぞれの領域についてより個別的に述べる(Q2~4)。

Q1: 地球システムモデルについて開発課題は何か？

a. 序論

ここでは、数値モデルの中でも「地球システムモデル」の、北極域研究の視点から見た開発課題を述べる。一般に、地球システムモデルとは「炭素循環とそれに関連する素過程を含む結合モデル」を指す言葉である(IPCC AR5)が、ここでは「複数の素過程を統合し」「全球を対象とする、あるいは領域を対象としていても自然な発展として全球を対象とできる」モデルを指す言葉と定義する。したがって、たとえば物理モデルに特化した話題もここで扱う。単一の素過程のみを扱うモデルについては、本テーマの他節あるいは他テーマを参照されたい。

地球システムモデルは計算機を利用するが、モデルを使って実験するために使える計算機の演算能力(計算

機資源)は有限である。空間的に細かな現象まで厳密に扱うようなモデル(「解像度が高い」という)で数千年ものシミュレーションはできないし、数千年~数万年におよぶ気候変動を知りたいければ、空間的には粗い表現(「解像度が低い」という)で妥協するしかない。そのため、扱いたい現象や問題に適したモデルを選ぶ必要がある。図60に、ここで述べる代表的なモデルが扱う問題の時間スケールと、北極域に関わる主要な素過程の時間スケールの対応を示した。ここで「時間スケール」とは、問題や現象がおよぶ時間の長さの大まかな目安のことを意味する。ここでは以降、時間スケール別のモデル毎に現状と将来の開発課題を示し、その後には不確実性の評価を中心にモデルの周縁の課題について述べる。

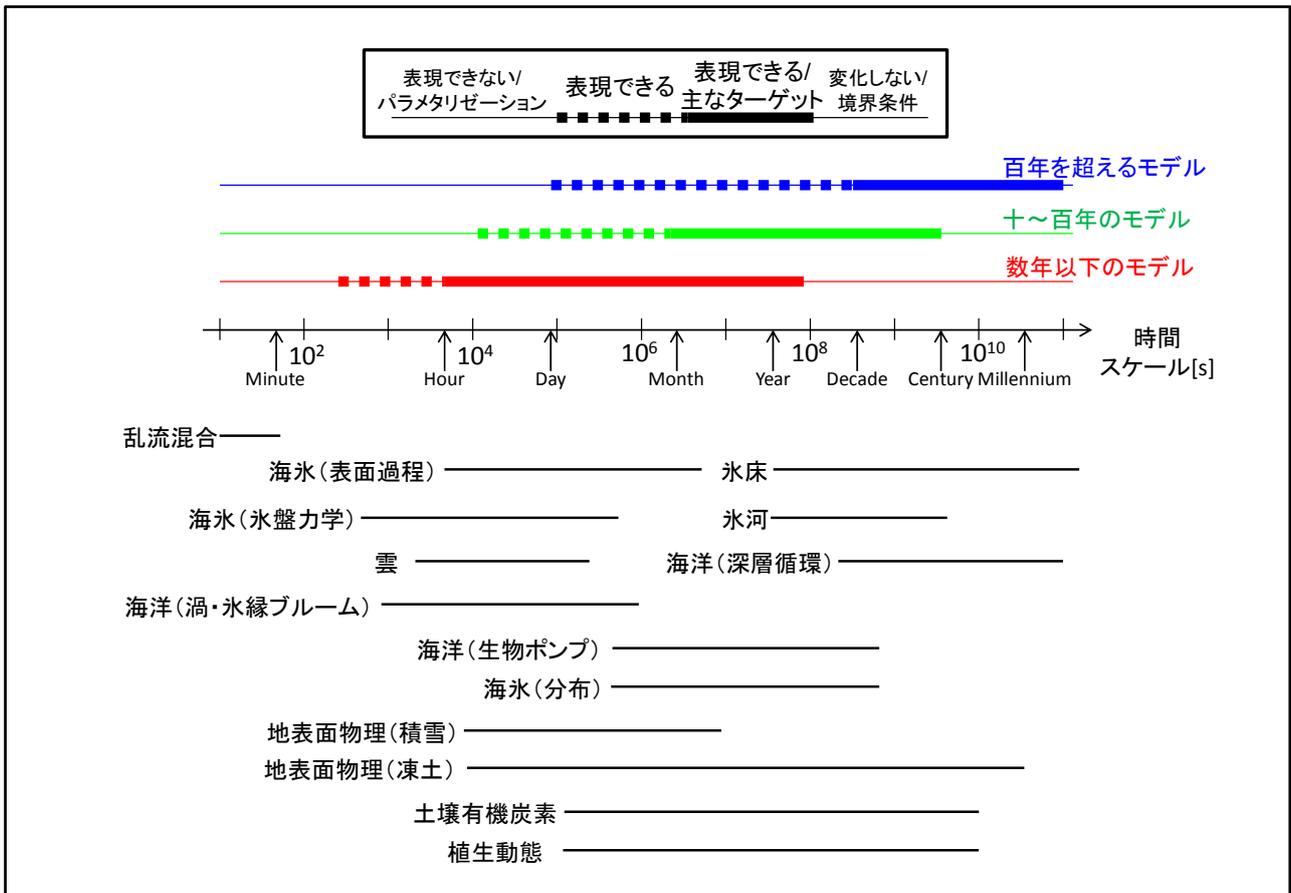


図 60 代表的なモデルの時間スケール(上部)と、北極に関わる主要な素過程の持つ時間スケール。モデルと素過程の時間スケールの一致が大きいほど、そのモデルはその素過程を扱うのに適している。

b. 数年以下の時間スケールにおける地球システムモデルの課題

この時間スケールの問題には、その時々利用可能な計算機資源で実現できる限りの高い解像度を持つモデルが適している。解像度を高めることで、傾斜の急な地形、渦や対流といった現象などをモデルで自然に表現できるようになる。また、同種の実験を繰り返し行うことも有効な手法である。ランダムな誤差と常に得られる結果を区別して、より確実な将来予測をすることができる。モデルを用いて取り組む問題の例として、北極域の季節～数年先までの予報や、気象などの極端現象の発生にどれほど人間活動の影響があるかを定量的に把握する試みが挙げられる。特に、北極域に特有の問題として、近年の急激な海氷減少に伴い、より多くの利用が期待される北極航路の航行可能性の予測が挙げられる。もし1年先までの航行を予測するならば、大気変動の予測可能性を高める必要があり、自然変動の振幅と位相を予測する試みに挑戦すべきである。このためには、観測データをモデルと統合するデータ同化の手法を用いて(テーマC参照)、モデルに整合する初期条件から予測計算を始めることも重要である。さらに、得られた予測を海況予報などの形で社会的に活用するために、工学的な手法との協働を進めることが望ましい。また、解像度の高いモデルの結果は観測と比較しやすい。地形や空間構造が精密に表現されているので、観測と空間的な対応をつけやすいからである。この意味で、観測現場と同じ目線に立った多様な研究のための基盤としても役に立つモデルである。

解像度の高いモデルは、実験や結果解析に必要な計算機資源量が大きい。特に、高い解像度が必要な問題では、北極域のみに計算機資源を集中することを考慮すべきである。具体的には、北極域のみを計算対象とする領域システムモデルや、全球には相対的に低い解像度のモデルを使い、北極域のみに高解像度のモデルを埋め込むネスティング手法が有効である。既に米国では複数の研究機関が協働して、基本構造として気象、海洋、海氷、陸域水文の各素過程を含んだ領域モデル RASM¹³¹の開発および改良が進められている。日本では北極域領域モデル開発の動きは無い。ネスティングについても、大気モデルや海洋モデル単独での実装はあるが、システムモデルでの適用についてはごく初

期の段階である。これらの開発研究にコミュニティとして注力すべきである。

システムモデル内での個別の課題を以下に挙げる。北極航路予測に関連して、氷縁域の力学過程を精緻に表現する海氷モデルの開発が促進されるべきである。また、物質循環、生態系モデルを解像度の高いモデルに組み込み、局地的な現象とより広範囲の気候場に及ぼす影響の双方について理解することが求められる。ただし、計算機資源には制約があるため、目的と必要な資源を考慮したモデル選択と、それを可能にするための素過程の着脱が容易な構造を持つモデル開発が必要であろう。

c. 十年～百年程度の時間スケールにおける地球システムモデルの課題

この時間スケールの問題を扱うモデルは、近年及び将来の北極域における気候変動を様々な側面から研究する際の主な選択肢となる。一般に、数年以下の時間スケールの問題を扱うモデルより解像度は低く、また多くの場合北極域だけでなく全球を同等に扱う。実験装置として見た場合、数年以下の時間スケール向けのモデルに比べてより少ない計算機資源で使用できる。そのため、物質循環や生態系を含む多くの系の間での相互作用を議論する際にも使いやすい。さらに、全球モデルとして扱えば、北極域と他の領域間の相互作用、例えば北極域での海氷や陸域の変化が日本の気候に与える影響などの議論にも用いることができる。具体的な問題例として IPCC 評価報告書に代表される将来予測が挙げられる。日本においてはこれまでの IPCC 評価報告書に対して、2002年からの「人・自然・地球共生プロジェクト」、2007年からの「21世紀気候変動予測革新プログラム」を通じてそれぞれ第4次・第5次報告書に大きく貢献した。その中でこの時間スケールを扱う全球モデルが大きな役割を果たした。現在も「気候変動リスク情報創生プログラム」(2012年～)などで、北極域を含む全球モデルの開発が進められている。しかし、気候変動が他の領域以上に急速かつ大きい北極域を扱うモデルとして見ると、単に現状の再現ができるだけでは十分ではない。起こりうる様々な状況を安定して再現できるように、以下に述べるような点でモデル開発を継続していかなければならない(モデルの再現性の評価について

¹³¹ RASM: Regional Arctic System Model

は e. で改めて述べる)。

システムモデルで気候変動を表現するための重要な要素の一つとして、熱・水収支が挙げられる。北極域では、海水、陸氷、凍土、積雪など海洋及び陸面の雪氷に関する過程が特に重要である。これらの過程は、アルベド変化などを通じて熱・水収支に大きな影響を与え、十年程度の時間スケールを持った変動を引き起こす原因となる可能性がある。ダストや微生物等による雪や氷のアルベド低下効果、氷の上面での融解で生じた水たまりによる熱力学的影響など、現状のシステムモデルで十分に表現されていない効果を取り入れることで、気候変動予測の精度を高めることができる。それとともに、別々の要素モデルとして開発されてきたこれらの素過程に、地球システムモデルの中で整合性をもたせることが重要である。海洋、陸面など異なる分野の研究者間が協力して理解を深めていくことが求められる。

この時間スケールに用いるような比較的低解像度のシステムモデルでは、解像度不足で表現することが難しいが、果たす役割は重要、という素過程が増えてくる。たとえば熱・水収支の問題であれば、大気や海洋の渦・鉛直混合などが挙げられる。それらの素過程の本質的な役割を見抜き、その効果をモデルに表現可能な形で取り込むこと(「パラメタリゼーション」)も再現性向上に欠かすことができない。素過程のモデリングや b. で述べた高解像度モデリングなどとも密接な連携をとってパラメタリゼーションの開発を促進する必要がある。

この時間スケールのモデルで考慮すべきもう一つ重要な要素として、物質循環や生態系の変動とその気候変動への影響が挙げられる。植生や生態系の気候変動への応答を地球システムモデルで表現することが重要である。林野火災の頻度変化とそれへの植生応答、永久凍土の融解などに伴う土壌条件の変化がもたらす土壌有機炭素の急速な分解と二酸化炭素やメタンの放出などは、北極域で顕著な現象として特に力を注ぐべきである。また、炭素循環などにより引き起こされるフィードバックを表現するため、光合成と呼吸によって地表面の炭素収支をつかさどる陸面生態系プロセスモデルを発展させることで、気候変動下における光合成量、呼吸量(炭素フロー)および植物バイオマスおよび土壌有機炭素量(炭素ストック)を正確に見積もることが必要である。このような植生の変動は、アルベドなどを大きく変化させるという意味でも重要と言える。日本では諸外国に

比べ、こういった物質循環や生態系モデリングに対する重要性の認識や開発の動きが相対的に不足している。北極域研究にとって好ましくない。地球システムモデルに直結した北極域物質循環、生態系モデルの整備が望まれる。

d. 百年を超える時間スケールにおける地球システムモデルの課題

この時間スケールの問題を扱う際には、c. で述べたモデルと同様の構造をしているが、より少ない計算機資源で使うことのできるシステムモデルを用いる。具体的には、解像度をさらに低くしたり、各素過程をパラメタリゼーションの利用も含めてより単純に表現したりする。これにより、長い期間に及ぶ実験ができるようになる。問題の例としては、古気候シミュレーションや、長い時間スケールを持つ氷床や深層海洋等の理解のための実験などがある。また、一つ一つの実験を少ない計算機資源でできる利点を生かして、モデルの設定を変えて複数回実験を行い結果への影響を見る研究(「感度実験」)のような、多くの実験を行いたい場合にも役にたつ。以上のような用途に利用できるように、この時間スケールの問題に用いられるモデルは、多くの素過程モデルやパラメタリゼーションを含みつつ、それらを容易に着脱できるモデルとして開発することが望ましい。

この種のシステムモデル開発における一つの目標は、これまで述べてきた物理、物質循環、生態系などで構成されているモデルに、さらに氷床、植生動態、アイソスタシーなどを加えた「全部入り」モデルの構築である。他の地域と比較して関わる過程の多い北極域の研究にとって、より多くの過程を含むモデルが使えることの意義は非常に大きい。また、新たに加えられる過程の多くは既にモデル中にある過程と比べて時間スケールや空間的な広がりなどで異なる。限られた場所に存在しながら千年以上の時間スケールを持つ氷床モデル、森林限界の北上など気候変動と相互作用する植生タイプやサイズの数十年から数百年スケールでの変化を扱う植生動態モデルなどがその例である。これらの特徴の異なる素過程モデルの統合は、それ自体が大きな科学的チャレンジでもある。新たな素過程をシステムモデルに組み込む取り組みに積極的に貢献すべきである。

このようにして構築されたシステムモデルでできることの例として、陸域生態系特有の大規模な遷移、たとえば

温暖化によるツンドラへのタイガ林の進出や、北極陸域に大量に蓄積されている泥炭などの土壌有機炭素のレジームシフト(Ise et al., 2008)などの表現がある。タイムラグの大きな過程を再現するモデルの開発が、物質循環を介した気候との相互作用を考えるうえで重要となる。

百年を超える時間スケールの実験結果を、観測結果と直接比較して検証することは難しい。百年を超える長さの連続観測結果はほとんど存在しないからである。そのため、特に古環境を再現する実験の結果検証は、海底の堆積物や氷床から掘り出した試料中に存在する過去の環境のある側面を反映すると考えられる代替指標(プロキシ)のデータ、あるいは、それらから作成された気温や降水量等の復元データとの比較でなされることが多い。このような古気候学的データを取得できる様々な時代について、システムモデルで古環境の再現を試みることは、モデルの再現性向上にとって重要な取り組みである。さらに、代替指標データをモデル内で直接計算し比較できれば、北極域を含めた地球システムモデルの信頼性向上につながる。そのためには、海氷の分布、植生分布の変化、ダストや微生物の発生過程、大気中の各種微粒子の輸送、大気中同位体比変化、海水中の同位体比や酸性度などの各種化学指標、北極域近辺の深層水形成を含む海洋循環場といった様々な面でのモデルの改良が不可欠である。観測研究者との協力も含め、さまざまな分野の研究者が協力して取り組むことが望ましい。

e. モデルの周縁における課題: 不確実性の評価とモニタリングとの協力

これまで、地球システムモデルの現状と開発課題について、いくつかの時間スケールに分けて述べてきた。一方で、モデルの計算結果を観測データと比較し、結果に含まれる誤差や科学的理解の不足(不確実性)を検証し評価する取り組みもまた、重要である。ここでは、地球システムモデルの北極域における不確実性の検証に関して課題と提案を述べる。

地球システムモデルの不確実性を議論する際に重要な点は、システムモデルの不確実性は、個々の素過程モデルの不確実性を単に重ね合わせるだけでは理解

できないということである。多くの場合、システムモデルを構成する個別の素過程モデルの不確実性は、「正しい」境界条件の下で行われる実験により検証される。しかし、システムモデルに組み込まれた素過程モデルは、他の素過程からの誤差を含んだ情報で駆動され、誤差を含んだ情報を他の素過程モデルへ伝える。これらの誤差は、素過程間の相互作用によりしばしば増幅する。逆に、誤差が伝わっても伝播先に大きな影響を与えない場合もある。実際どのような相互作用が生じるかは、個別の素過程の研究だけでは明らかにならない。このような特徴のあるシステムモデルの不確実性を減らすためには、素過程ごとの理解とモデル開発を進めることで「足をひっぱる」過程をなくす取り組みは当然必要である。同時に、各素過程を統合したシステムモデルを全体として検証し、各要素の相対的な誤差の大小や理解度の高低を知ることも極めて重要である。

不確実性の評価・検証に取り組むための手法については、既存のモデル比較プロジェクトが参考になるであろう。たとえば IPCC AR5 での予測研究を推進する母体の一つでもある CMIP5¹³² や、北極海モデルに特化した相互比較プロジェクト AOMIP¹³³が挙げられる。また、日本のコミュニティとして積極的にこのような取り組みに参加し、情報を発信すると共に他のシステムモデルとの比較を通じて自らのモデルの不確実性をよりよく理解することも重要である。さらにそれに加えて、以下では3つの点を指摘したい。

一つ目は、北極域に特化したモニタリング、評価基準の必要性である。システムモデルのように北極域全体や全球を対象とするモデルでは、面的な広がりを持つ観測からの情報が特に重要である。北極域では、観測の困難さなどにより観測データは他の地域に比べ不足している。モニタリングが今後さらに充実することが期待される(モニタリングに関して詳しくはテーマ A を参照)。一方で、モデル中のある過程の不確実性を評価するために、評価基準を作成することも求められる。前述の AOMIP の中で定義された、北極海の陸棚縁に沿う海流の強さの指標はその一例である。また、例えば海氷場では、広く使われる海氷存在域の面積だけでなく、海氷流速場などをもとにした力学場の情報を集約できる基準が今後重要であろう。

¹³² CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project phase 5(Taylor et al., 2012)

¹³³ AOMIP: Arctic Ocean Model Intercomparison Project(Proshutinsky and Kowalik, 2007)

二つ目は、システムモデルの視点からの、モデリングとモニタリングの相互啓発の提案である。モニタリングでは、特定の素過程を直接測定することは困難である。また、モデルでパラメタリゼーションを使う時には表現する過程がどの程度強く働くかを定めるが、その強さの指標である「パラメータ」を直接観測することも難しい。そこで以下のような比較を試みる。モデル側では、システムモデルを用いた感度実験やデータ同化(テーマ C を参照)により、素過程の扱いやパラメータを変えることで変数(水温、塩分、速度など)がどの程度の影響を受けるかを調べる。モニタリング側からは、それらの量の観測精度の高低を示す。この場合、観測誤差と比較してモデル誤差が相対的に大きい部分でモデルの理解度が不足している、あるいは不確実性が大きいと解釈される。このような手法は、システムモデルの不確実性検証に役立つとともに、モニタリングに対し観測対象等の提案につながるという意味でも意義深い。

三つ目は、気候変動要因に対する地球システムモデル全体としての応答の評価方法を提案することである。例えば、気温について評価するなら、エネルギー収支を評価の基準として、個々の過程がどの程度寄与しているかを比較できる(具体的な手法はテーマ 1 の Q5 を参照)。こうした手法を考案して用いることで、システムモデルの中で各過程が果たす役割を相対的に評価でき

Q2: 大気モデルについての開発課題は何か?

a. 研究の現状と課題

まず、大気モデルの中で、北極域に特有の問題に関する大気モデル開発の経緯を概観する。モデル構築の黎明期においては、極域に関心を払うよりも、全球に共通したグリッドおよびプロセスのパラメータ化を使うことが始められた。パラメータ化の代表的なものは、水平スケールの非常に小さな雲の形成である。数値モデルでは座標軸方向のグリッドに分割した格子点において諸量を代表するのが通常であるが、大気モデルでは水平方向のフーリエ関数を用いモード展開を導入したスペクトルモデルによって、数値計算に起因する誤差を除く数値計算が可能になった。しかし、従来の緯度経度格子系のグリッドモデルでは、解像度を上げるに従って、北極域

る。得られた評価をモデル間で比較したり、パラメタリゼーションと関連付けたりすることにより、不確実性の幅を減らすことにも役立つと考えられる。また、データ同化と組み合わせると、現実の応答を理解する助けともなるだろう。

ここまで、地球システムモデルの不確実性に関する課題とそれへの取り組みの提案について述べた。課題と提案の大部分はどの地域でも当てはまることだが、北極域ではこれらに絡むことが、特に重要である。北極域では、関係する過程が多く相互作用が複雑であること、北極域での近年の急速な変化に伴って社会からの様々な要請が寄せられていること、他地域に比べて北極域でのモデル誤差は大きいことが理由として挙げられる。逆に言えば、北極域に焦点を絞った地球システムモデルの開発と不確実性低減の課題に取り組んで得られるものは、単にモデルの北極域での再現性、信頼性向上にとどまらない。全球での再現性、信頼性の向上にもつながり、また、多様な学問領域を結びつけて社会に貢献する道にも通じるだろう。幸いにして、我が国にはモデル、観測ともに色々な分野に研究者が存在する。多様な分野の多様な手法に通じた研究者が協力して、地球システムモデルの開発と検証を継続的に行うことが望まれる。

では非常に小さい経度方向スケールを持つ現象まで解像するために、時間ステップを微小にする必要性が発生した(極問題)。一方、スペクトルモデルでは、多数のモード間での計算機上の通信に多くの計算時間を費やすことが障害となった。高解像度大気モデリングとしては、正 20面体を基礎とした全球非静力学モデル¹³⁴NICAMによってこの問題を解決する方法が提唱されている(Satoh et al., 2008)。

もちろん、ある地域の詳細な天気予報を目指す試みと同様に、北極域を表す領域モデルを開発し、それをある経度において全球モデルにネスティングする方法も試みられてきた。MM5¹³⁵を用いた取り組み、および、それを継承する WRF¹³⁶の利用がその例であり、国際的な

¹³⁴ 全球非静力学モデル: NICAM(Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model)

¹³⁵ MM5: Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model

¹³⁶ WRF: Weather Research and Forecasting Model

共同研究によって進められてきた。日本で開発されている JMA-NHM¹³⁷ や CReSS¹³⁸ 等も極域の領域モデル研究として利用可能であろう。領域モデルにおいては、その領域に特有なパラメータ化を用いることも容易となった。近年増加している低気圧擾乱に注目し、そのストームトラック(通り道)を予測し、実際の現象と比較・検証する作業が進められている。

北極圏では、通常、夏季に雲が多く、冬季には少ない。春季、秋季には、開水面の有無によって雲量の多寡が変わり、海面エネルギー・バランスも大きく影響される(テーマ 2 参照)。全球大気モデル、および、それらのモデルに観測データを同化した再解析データに基づいて、雲分布の再現を検証した研究が特記される(de Bore et al., 2014)。データの多い夏季を選んでいるものの、再現性の高い気温、風に較べると、雲分布と海面エネルギー・バランスの再現は難しいことが示唆された。

b. 今後の方向性

全球モデルから領域モデル、従来型の粗い格子のモデルから高解像度 LES (Large Eddy Simulation、乱流場を扱える数値計算手法) までの、様々な階層の数値モデルを有効に利用して極域の気候再現性を向上させねばならない。そのためには、特に数値モデルで表現される極域の雲を適切に表すため、観測による検証とモデル改良が必要である。関与するプロセスは、エアロゾル・雲微物理過程、境界層混合、および放射過程であり、精度の高い観測による検証とスキーム(数値モデルの諸量を求める計算機上の様々な計算方法)の改良が必要である。

物理現象の解明に関しては、パラメータ化よりも現象を陽に精度よく表すことが根本的解決である。高解像度の LES を用いて、境界層乱流(地表面近くの擾乱の多

い流れ)を陽に解像するとともに、ビン法などの雲微物理過程によって、雲のより精緻な再現性をめざすべきである。特に、氷晶、混相の雲物理を現実的に再現することは挑戦的な課題である。また、混合層の高度、雲底、雲の厚さ等の現実的な表現には、境界層過程と雲微物理過程の改良はもちろん、大規模場の再現性にも留意する必要がある。広域の総観場(高気圧・低気圧スケール)と極域の雲や気象場との関係を理解するには、従来型の全球静力学大循環モデルだけでなく、領域モデル(WRF、JMA-NHM 等)・全球非静力学モデル(NICAM 等)の利用が今後有用になるであろう。NICAM は雲物理過程を陽に表す特徴も持っており、非静力学過程を介した雲形成を再現することを期待して、低中緯度域においては台風などの比較的小さい水平スケールの現象の研究に応用されている。北極域への応用に関しては、北極低気圧の解析やストームトラックの検証に着手したところであるが、雲形成についても検証が有意義であると考えられる。

全球モデルと再解析データに基づく複数メンバーを用いた客観的な検証を参考にすると、異なるモデル表現による数個のメンバーを集め、同一の諸量についてそれらの結果を比較する作業を提唱する。重要だが再現の難しい雲分布に焦点を当て、このような相互比較をぜひ実施すべきである。モデル構成に関しては、領域モデルを全球モデルにネスティングしたものと全球非静力学モデルの両者をメンバーに含むこと、力学に関しては非静力学モデルと比較するため、雲形成パラメータ化を持つ静力学モデルもメンバーに含めることが必須であろう。数個のモデルを使用する場合は、数名の研究者あるいはいくつかの組織が共同研究の体制を組むことが必要である。

Q3: 海洋・海水モデルについての開発課題は何か?

a. 海洋モデルの現状と課題

大西洋水はフラム海峡とバレンツ海から北極海へ流入し、フラム海峡分枝水とバレンツ海分枝水となり、さらにバレンツ海分枝水はバレンツ海での海面冷却によって高密度化し、フラム海峡分枝水の下部に貫入する(図 61)。これらの水塊はシベリア陸棚斜面に沿う低気圧性

(反時計回り)の境界流となり、陸棚-海盆間の相互作用を介して海盆域の成層構造に影響を与えている。一方、ベーリング海峡から流入する太平洋水は、シベリア陸棚水、大西洋水、海氷形成時に排出された高塩分水との相互作用を介して、カナダ海盆内部の複雑な成層構造に寄与している。また、渦による混合層の再成層化

¹³⁷ JMA-NHM: Japan Meteorological Agency Nonhydrostatic Model

¹³⁸ CReSS: Cloud Resolving Storm Simulator

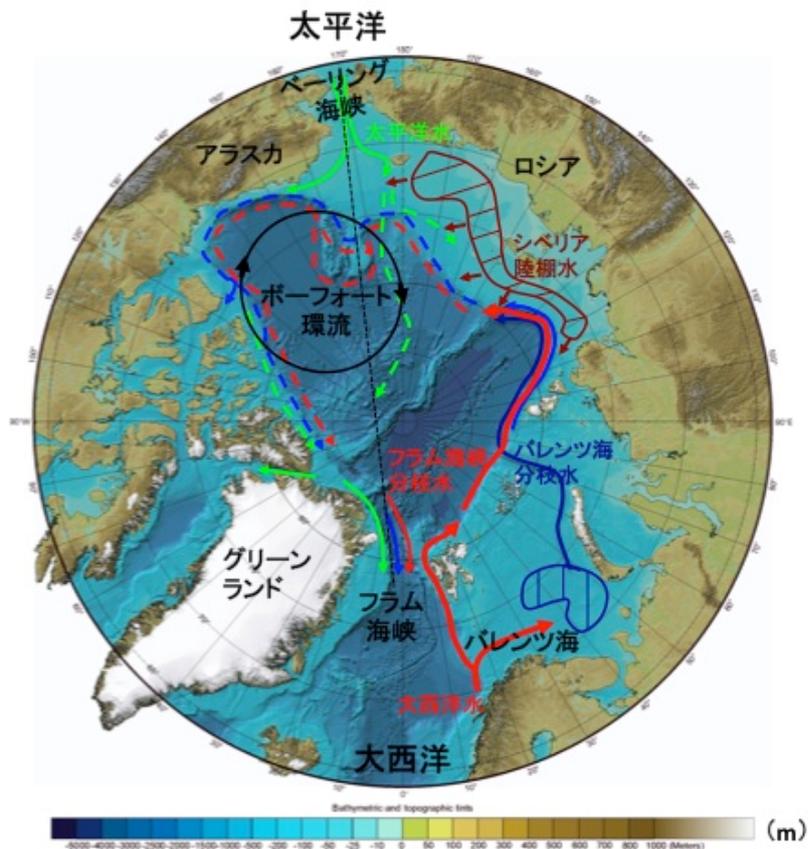


図 61 北極海の表層循環像(実線:明らかになっている流れ場、破線:推定されている流れ場)。黒色点線で示したベーリング海峡とフラム海峡を結ぶ鉛直断面を図 62 に示す。地形は IBCAO より引用。

や陸棚斜面域から海盆地への水塊輸送は、海洋上層及び海盆地の循環場を海洋モデルで再現する上で重要なプロセスである。

はじめに、気候研究に利用されている CCSM4¹³⁹による北極域の結果(Jahn et al., 2012)を例に、地球システムモデルにおける北極海の再現性について現状を述べる。Jahn et al. (2012)で使用された CCSM4 に実装されている海洋モデル(POP2¹⁴⁰)は、水平解像度 1 度及び鉛直 60 層を持ち、渦の効果は等密度層の厚さに応じた水温・塩分フラックス及び混合層渦のパラメタリゼーションによって表現している。

CCSM4 は、北極海を特徴づける代表的な海洋構造を再現しているが、ボーフォート環流の位置と強度、大西洋水層の水温極大水深、フラム海峡からの流量・熱フラックス、深層水温などの再現性に課題を残している。これらの要因の一部は、水平解像度の低さと鉛直混

合による深層水供給の再現性不足である。従って、水平解像度に関しては、主要な海峡や海底地形をより現実的に表現できるように水平解像度を部分的に高くする、あるいは海峡で観測されている流量・熱フラックスになるように地形を調整するなどの工夫が必要になる。また、鉛直混合に関しては、CCSM4 で使用されている内部波の碎波に伴う深層での鉛直混合や深層密度流の効果を表現するパラメタリゼーションが北極海で妥当なものであるかを再考する必要がある。さらに、観測データによる定量的な議論が十分ではないため不確実ではあるが、以下に述べるプロセスの重要性も認識しておく必要がある。大西洋水層から塩分躍層を横切って海水に達する熱フラックス変動に対して、風や潮汐による鉛直混合、海盆周縁に沿う大西洋水の湧昇、渦による鉛直循環など(図 62)も重要であると指摘されているが、さらなる観測データの取得とプロセス研究による時空間変動の理解が不可欠である。プロセス研究の詳細に関し

¹³⁹ CCSM4: Community Climate System Model, version 4

¹⁴⁰ POP2: Parallel Ocean Program, version 2

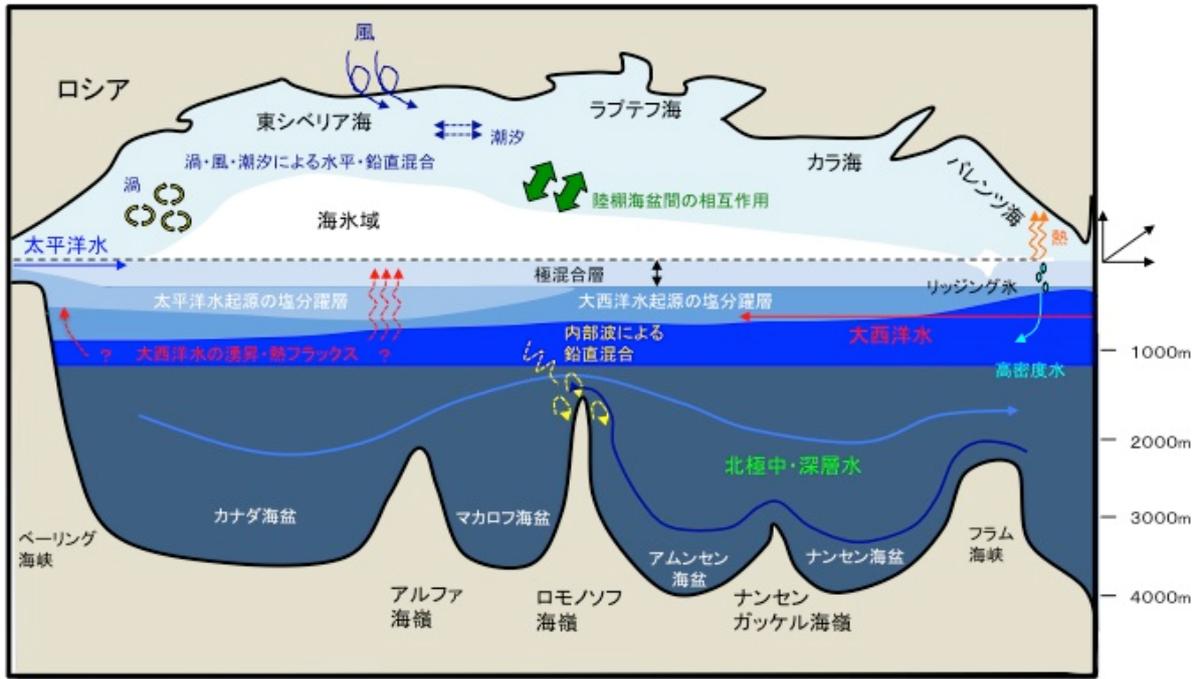


図 62 北極海の鉛直構造と海水海洋プロセスの概念図 (テーマ 5 の図 18 も参照のこと)。

では、テーマ 2 も参照のこと。また、北極海における中深層の定常場は、グリーンランド海から溢れ出てくる深層水が中層から少量ながらも貫入してくる海水と混合してゆっくりと上昇することにより定常状態が保たれていると考えられるが、深層水が再現できない場合、非常に小さい鉛直混合係数を使えばある程度は現実的な鉛直構造を保てるが、得られる定常場は現実とは異なるものになってしまう。したがって、モデルの中で深層水が形成されることとその深層水がより上層の水と適切に混ざるような鉛直混合過程の表現が共に必要になる。このような深層水の形成、輸送プロセスは百年スケールの長期積分を行う場合に特に重要になる。北極海の中・深層の流れに関しては、テーマ 5 の Q2 も参照のこと。

地球システムモデルに海洋生態系プロセスを導入する場合、扱う栄養塩や生物種の数が問題となる。生態系プロセスを解く部分はよほど複雑な数式を使わない限り、計算負荷は高くないが、水温・塩分と同様に栄養塩や生物種の数だけ移流・拡散過程を解く必要があり、高精度なスキームを使う場合には全体の計算時間に対して占める割合が格段に増えるためである。従って、目的が明確でない場合、扱う栄養塩やプランクトン種数をやたらと増やすのは数値計算上好ましくない。また、水温・塩分には高精度スキームを適用して、生態系変数に

は比較的計算負荷の低いスキームを適用するという妥協案も選択肢の一つになる。仮に地球システムモデルで計算された海洋生態系変数が観測値と異なる場合、そのバイアスが生態系プロセスの不確実性に起因するのか、背景物理場の再現性に起因するのかの判断が難しい。日本でも対象海域は異なるが、別々の物理モデルと同一の生態系モデルを結合させて、応答を比較するなどの試みはされている。このあたりの有効な評価手法を確立することが求められる。北極海の海水減少が進むと、海盆域でも生物生産が活発化することが予想されるが、その場合には鉄制限過程と鉄を豊富に含む陸棚水の輸送プロセスを適切に表現する必要がある。また、海域間での差を議論するような段階になると、脱窒や窒素固定も取り入れる必要が出てくるかもしれない。このあたりは海洋単体モデルでも議論の真っ只中であり、得られた知見をベースにシステムモデルでどこまで計算すべきか要検討事項である。海洋生態系変数の妥当性評価は、衛星から見積もられるクロロフィル濃度と現場観測に基づく栄養塩濃度を用いて行われることが多い。ただし、例えば、海面情報から基礎生産の鉛直積算量を見積もる衛星アルゴリズムには亜表層クロロフィル極大などに関する誤差が大きい。一方、栄養塩濃度についても広域で格子化されたデータは World Ocean Atlas くら

いで、これは気候値なので年々変動などの議論には使えない。すなわち、物理変数に比べて観測データが圧倒的に不足していることが問題と言える。

b. 海氷モデルの現状と課題

数年以下および十年～百年程度の時間スケールで変動する地球システムにおいては、数日～数十年スケールの海氷変動に注目する必要がある。現状では、大気強制力を与えている海氷海洋結合モデル(例えば、AOMIP¹⁴¹)は数十 km 以上の空間スケールでの海氷域面積の季節・経年変動をよく再現しているが、大気を結合している気候モデル(例えば、CCSM4)は急激な海氷減少トレンドを過小評価している。この原因が海氷モデルだけにあるとは言えないが、将来の地球システムモデルにおいて考慮すべき海氷の力学・熱力学プロセスについて考えてみる。なお、テーマ 2(10～20 年後を見据えた戦略の d. 数値モデリング)でもいくつか言及されているため、ここでは 3 つの課題について述べることにする。

(1) 氷盤スケールで局所的に起こるリッジング・ラフティング: 海氷厚の力学的な成長過程においては、海氷同士がぶつかり合って厚くなるリッジングと海氷同士が乗り重なって厚くなるラフティングが本質的であり、海氷厚の空間分布の形成、変動に重要なプロセスである。しかし、どれくらいの海氷がリッジングあるいはラフティングするかは十分に観測されていないため、10km 以下の氷盤スケールでは重要な変形プロセスである厚い海氷の隙間における薄い海氷のリッジング、ラフティング過程を表現するのは難しい課題である。

(2) 海氷下の混合層過程: 海氷生成に伴って排出されるブライン(高塩分水)は、周囲の海水と混合しながら海洋表層の混合層深を変化させ、それに伴って海洋亜表層から海面への熱輸送が起こると考えられる。また、風による乱流混合や内部波の砕波によるプロセスも亜表層からの熱解放過程に寄与している。したがって、海氷下の混合層深がどの程度変化し、どれくらいの熱が海面(海氷下面)に運ばれるかを定量的に把握することが海氷の熱力学過程にとって重要である。

(3) 定着氷の効果: AOMIP のモデル結果は、定着氷が存在する沿岸における海氷の再現性を改善するには、定着氷の形成・成長過程のパラメタリゼーションが必要であることを指摘している。また、定着氷の沿岸から沖への張り出し具合は、北極航路を航行する船舶の安全性の観点からも極めて重要な情報であり、航路予測の今後の課題として認識しておく必要がある。

以上のことは重要性が指摘されているものの、観測データによる定量的な議論が十分に行われていないため、さらなる精緻化が必要である。まずは、観測データとプロセスモデルを用いた研究を行い、どのような物理過程でどの程度起こっているのかを定量的に理解することが必要である。日本の実績が高く評価されている衛星観測の技術とデータを最大限利用すれば、地球システムモデルに取り入れる新しいスキーム、パラメタリゼーションの開発につながると期待される。海氷の検証データとしては、衛星観測による海氷密度や海氷域面積が広く利用されているが、海氷厚に関しては不十分である(例えば、Jahn et al., 2012)。北極海の多年氷域が季節海氷域化しつつあることを考えると、時空間的連続観測による海氷厚データを充実させることも長期構想の重要な課題である。また、新たに比較すべき特性としては、海氷変形率のスケール依存性も海氷場の再現性を調べる上で有用であると期待されている。

c. 日本の研究コミュニティの貢献や役割と主要なプロジェクトとのかかわり

日本では、地球システムモデル(例えば、MIROC-ESM¹⁴²、MPI-ESM1¹⁴³)のベースとなる気候モデルとして、東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構が共同で開発した MIROC と気象庁・気象研究所が開発したMRI-CGCMの二つが知られている。この二つの気候モデルは、世界気候研究計画¹⁴⁴(WCRP)の結合モデル間相互比較プロジェクト(CMIP¹⁴⁵)に参加し、IPCC 第五次評価報告書に関わる地球温暖化の将来予測に貢献してきた。今後は、最新の気候モデル(例えば、MIROC5: Watanabe et al., 2010)をベースとした地球システムモデルの開発に

¹⁴¹ AOMIP: Arctic Ocean Model Intercomparison Project

¹⁴² MIROC-ESM: Model for Interdisciplinary Research on Climate-Earth System Model

¹⁴³ MPI-ESM1: Meteorological Research Institute-Earth System Model 1

¹⁴⁴ 世界気候研究計画: World Climate Research Project(WCRP)

¹⁴⁵ CMIP: Coupled Model Intercomparison Project

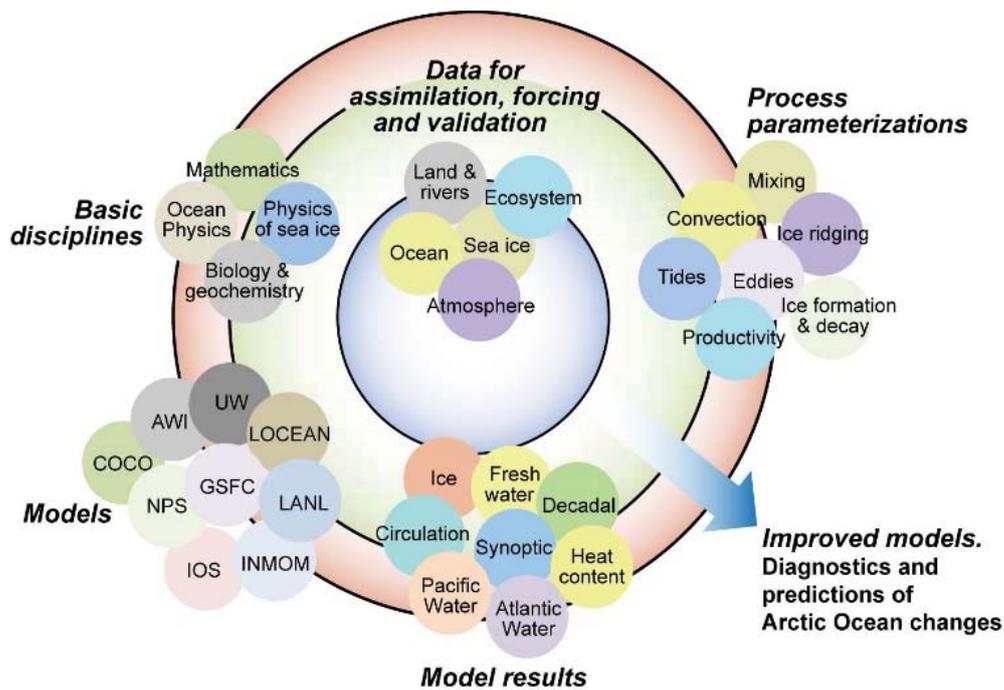


図 63 AOMIP/FAMOS による取り組みを表した概念図。Proshutinsky et al. (2011)の Fig.1 を引用。

加えて、海洋および海氷モデルの開発課題として取り上げた個々のプロセス(テーマ2の「10~20年後を見据えた戦略」を参照のこと)を理解した上でモデルに実装することにより、地球システムモデルによる予測の不確実性の幅を低減し、CMIP6 および IPCC 第六次評価報告書に向けた研究において貢献することが重要である。

一方、MIROCの海氷海洋コンポーネントを用いた研究は、北極海の海氷海洋結合モデルに特化したモデル間相互比較プロジェクト(AOMIP: 図 63、Q1 および

テーマ2も参照のこと)に貢献しており、その後継である FAMOS¹⁴⁶においても日本の役割がますます重要になってくるだろう。さらに、SEARCH¹⁴⁷の一環で行われている Sea Ice Outlook は春先にその年の夏の海氷面積を予測する国際的な取り組みであり、日本からは衛星データを利用した海氷面積の予測結果が提供されている。観測データは地球システムモデルや気候モデルの改良・高精度化に必要不可欠なものであり、日本の得意分野である衛星観測でこのようなプロジェクトに貢献することも重要になってくるだろう。

Q4: 陸面・雪氷モデルについての開発課題は何か？

地球システムモデルのコンポーネントとしての陸面開発においては、1000~10000年スケールの現象をより良く再現できるように改良を行うことで、10~100年スケールの現象の不確実性低減につながる場合がある。特に、ダストエアロゾルと大気メタン濃度が時代ごとに異なっていたことが古環境指標からの再構築により明らかになってきており、モデルの検証対象となる可能性がある。ダストエアロゾルの発生源は陸上の植生被覆、土壌

水分、風速から、メタンの発生源は湿地帯分布と有機炭素貯留量から、それぞれ表現可能である。現在を対象とした観測はサンプル数が不足しているため、陸域物理モデル、陸域生態系モデルで計算されるこれらの量を定量的に確認するのは困難である。しかし、間接的にはあるがダストやメタンなどの古環境指標を通じて陸域モデルの再現性を確認できるため、不確実性の低減が期待される。同時に、100年程度の時間スケールで起こ

¹⁴⁶ FAMOS: Forum for Arctic Ocean Modeling and Observational Synthesis

¹⁴⁷ SEARCH: Study of Environmental Arctic Change

る温暖化の予測においても、不確実性が低減されることが期待できる。大気循環による輸送プロセスも最終的なダストの堆積物量に影響を与えているため、同様に全球の大気循環検証にも貢献できると考えられる。もちろん、ダストやメタンそのものは放射強制力を通じて気候に影響を与えるので、それ自体の不確実性低減も将来予測にとって重要である。

陸面過程・雪氷モデルにおいては、特に 10 年以上の時間スケールでの凍土の消長過程を精度よく再現できることが重要である。積雪は基本的に 1 年で消えるが、凍土はわずかな熱の出入りにより消長が左右され、さらにメモリーとして働くことで、熱・土壌水分・植生に関して長期的に影響するためである。凍土への透水の表現法などモデルの素過程の改良に加え、透水や熱に関する土壌パラメータを全球でどのように合理的に与えるかが大きな問題である。土壌表面を被覆する植生や、枯死物層の厚さも、凍土の動態に大きな影響を与えるため (Yi et al., 2007)、植生変動も凍土消長の予測において重要な要素である。永久凍土－大気－積雪－植生サブシステムの問題に関しては、テーマ 12 の Q4 を参照のこと。

氷床・氷河過程についてはテーマ 4 に記述があり、詳細はそちらに任せここではモデル開発課題に絞って記述する。氷床過程は、大気モデルや海洋モデルで通常固定させる「地形」を大きく変化させる、という意味で特異な過程である。氷床モデルと氷河モデルは、究極的には同一のモデルと考えられるが、典型的な課題や目的に応じてそれぞれ別の構成を取ることが多い。氷河は一つ一つは小さいが、数が非常に多いため、総和としての海水準への寄与が特に短い時間スケールで大きくなる。そのため、数多くの氷河変動を取り扱うための簡略化やパラメータ手法の開発が求められる。より正確な氷河変動予測や急激な変動メカニズムを解明するためには、プロセスモデルの精緻化が重要な課題となる。氷床モデル研究の課題は 100 年程度の時間スケールから 10 万年程度まで多岐にわたる。この内、短い時間スケールの課題、例えば地球温暖化に対する 100 年程度グリーンランド氷床の変動を考える場合は、特に、現在氷床の再現が重要であり、底面すべり過程などを対象とした氷床モデルへの同化技術の導入が望まれる。しかし、特徴的な時間スケールが長い場合、モデルの検証のためには、陸面モデルと同様に古気候など気候

条件が大きく異なる場合の再現等が重要であり、長い時間スケールの変動の再現も重要である。従来の大規模な氷床モデルでは、力学的に重要な、局所的かつ流動速度の大きい過程を十分に表現しきれなかったが、局所的な流動の変化とその大規模な流動への影響などを理解し、長時間スケールの氷床変動再現への適用を考えていくことが重要である。

特に、長期的な研究開発課題という視点から考えると、地球システムモデルとしての運用では、氷床は長く連続的に、気候モデルは短く断続的に時間積分する非同期結合モデルの枠組みの整備を考えていかねばならない。当然膨大な計算資源が必要になるので、技術的な工夫は必須である。過去、現在、将来の氷床変動を統一的にとらえるためには、プロセスを精査した上で、氷床・気候非同期結合モデル開発も不可避の課題であると考えられる。それに加えて、大気・海洋・固体地球との相互作用を適切に導入することが必要である。大気との結合では、融解計算をする上で氷床・氷河ともに要求する水平分解能は高い。現状の典型的な結合手法では大気モデルと氷床モデルの間に経験的な質量収支モデルを導入しそのギャップを埋めているが、今後はより物理的なモデルを利用し改良していくことが期待される。海洋からは棚氷の底面融解や氷山分離過程を通じて氷床・氷河流動に影響をおよぼすと考えられるが、モデル化手法はまだ不確実性が非常に大きく、優先的に開発していく必要がある。

これまで、氷床変動に関連する氷床モデルおよび気候モデルの比較プロジェクトに多く関わってきた (Bindschadler, 2013; Sueyoshi, 2013 など)。特に、PMIP3 の最終氷期最盛期実験では、日本の氷床モデル古気候モデル研究者が境界条件の策定に中心的な役割を果たしたことは特筆に値する。今後も日本の氷床モデル・(古)気候モデルのコミュニティのプレゼンスを示し、モデル開発の最先端に食いこむことが重要な課題の一つである。

要旨

データ同化技術を北極環境研究へ展開する方針に関する現状調査と研究提言をまとめた。現状調査においては、北極圏諸国が整備を進めている大気-海氷-海洋圏現業予報・再解析システムにおいて、高度な同化技術の浸透が着実に進んでいる事が確認された。また、これまで同化技術の適用が積極的には進められていなかった氷床などの状態推定研究においても、データ同化技術の利用が既に始まっている事例が見出された。以上の状況を生み出している背景には、観測技術の向上並びに急激な気候変動を契機とする、気候システムの長期モニタリングの重要性に対する認識の高まりがある。この背景を踏まえ、現在及び近い将来に実現

可能と考えられる観測技術並びに観測網と数値モデル技術の適切な組み合わせにより、実現可能な北極圏におけるデータ同化研究案件を提案する。長期にわたる方向性として、多圏システムのデータ同化に挑戦すること、そして現業面の目的である北極海況予報の実用化を目指すことを提案する。また、日本の北極研究体制における限られた研究資源の現状を踏まえ、ここで提案された北極圏データ同化研究実施へ至る適切な道筋についても考察を加えた。データ同化研究関連文献を読み解くにあたり必要な用語並びにデータ同化技術に関する解説についても必要最低限まとめた。

まえがき

データ同化とは、あるシステムの振る舞いを記述するモデルより得られた解と、それに対応する実測値を融合する事により、利用価値の高い情報を生み出す技術の総称である。データ同化の目的は主に状態(モデルパラメータ含む)推定と時系列制御の二つに整理される。ここで状態推定技術とは、あるシステムを構成する多変数間の相関関係を利用し、直接観測する事のできない、あるいは観測可能でも不確かさが大きい変数の状態を、観測値データを付加情報として推定する技術である。また、時系列制御技術は、モデル変数の時間発展を、観測値をガイダンスとして逐次的あるいは連続的に制御を行う技術である。これら二つの技術は通常、それぞれのデータ同化システムにおいて適切な組み合わせにより同時運用される。例えば、天気予報システムにおいては、大気循環モデルの初期値更新作業において状態推定技術を用いると同時に、時系列制御技術により予報経路の誤差成長の制御を行っている。

地球環境研究においてデータ同化技術は異なる研究手法(観測、データ解析、モデル、理論)を組み合わせ、大気・海氷・海洋等の気候システムに生じる諸現象を理解するための強力なツールである。観測ネットワークの最適化や再解析データの提供、モデルパラメータの推定などを通じて、それぞれの手法へのフィードバックが可能であり、異なる研究手法を統合する上での基盤技術となる。また、モデル要素の拡張により、物理場だけでなく化学トレーサーや生物量などを扱うことで異なる分野間を繋ぐためのツールとしても機能する。北極

研究において、日本はこの分野で著しく出遅れており、重点課題として取り組む必要がある。

ここでは、北極圏の環境変動を取り巻く個々のプロセスを解明するための一つの手法として、データ同化技術の活用方法を提案する事を目的とする。国際北極圏研究コミュニティでは、既にデータ同化技術の活用を念頭に、数値モデルの改善と数値予報性能の向上並びに状態推定を目指した北極海集中観測プロジェクト(例 WWRP-PPP*)(*については後述)が存在し、本長期構想においても観測とモデルコミュニティの橋渡しとなる具体的研究提案を行う。また、従来データ同化技術が積極的に使われてこなかった氷床や炭素循環などの研究分野への同化技術の展開方法についても、現況調査及び提案を行う。

本稿は次の構成を持つ。データ同化研究関連文章には専門用語の使用頻度が高い傾向があるため、まず、代表的データ同化技術である変分法*とカルマンフィルター*に関する概要をボックス内で説明する。また、同化技術関連用語やプロジェクト名等に関する解説を表 3 にまとめる。本文中、表 3 及びボックス 10 で注釈を加えた用語の右肩にはアスタリスク(*)で印を付けた。最初に、北極圏環境問題において実際にデータ同化技術が使われている事例を解析し、今後の方向性を述べる。次に、具体的なデータ同化研究提案を行う。最後に、日本の北極圏環境科学コミュニティがデータ同化研究を進めるに当たり解決すべき問題を抽出し、対策を提案する。

北極圏におけるデータ同化技術は、衛星及び氷上ブイ搭載観測機器により比較的安定したデータ供給が得られる大気対流圏及び海氷状態の推定及び予報において多く用いられており、海氷の存在により定常モニタリングが難しい海洋については適用例が限られているのが現状である。しかし、近年の ITP* に代表される海氷下設置型の観測機器の開発、改良(詳細はテーマ A 参照)により、多年氷及び季節海氷域において海洋上層の温度塩分観測が可能となり、海洋観測網の整備と共に海洋海氷データ同化システムの開発が進んでいる。ここでは、主に北極圏における大気海氷海洋データ同化研究例及び関連する再解析並びに予報研究の現状について述べる。特に、現業運用体制が進んでいる大気再解析システムと海氷海洋結合データ同化システムに関しては、具体例を挙げてより詳細な現状報告を行う。また近年、衛星観測体制の整備によりモニタリングシステムの充実が著しい、大気化学組成やグリーンランド氷床の状態推定研究の動向についても報告する。

a. 大気再解析

各国・地域の気象現業組織が提供する全球大気再解析データは、数値モデルの計算結果と観測値をデータ同化技術により融合させたものである。しかし、再解析データには数多くの問題があることがわかっている。例えば、複数の全球再解析データセットと、これら再解析値を作成する際に使われていない北極海上空のラジオゾンデ観測値とを比較すると、どの再解析データも観測から有意な乖離を示す事が示されている(Jakobson et al., 2012)。特に、地表付近の気温と水蒸気量の逆転層の再現に問題がある事が見出されており、大気モデルの接境界層スキームあるいは海氷上における大気下部境界条件に問題がある事が示唆される。また、他研究においても、代表的全球再解析値の接海氷境界層データには、風向及び風力に比べ温度及び湿度の再現性が悪いという共通した傾向が見出されており、その原因の同定と関連する物理過程の改善が急務である。

北極圏でこれら再解析データが大きなバイアスあるいは誤差を含む原因の一つは、大気循環数値モデルに含まれる多くのパラメタリゼーションスキームが、中低緯度の観測データを参考に構成されているためだと考えられる。この問題に対処するための一つの解は、北極

圏に最適化された領域モデルを用いて再解析値を作成する事であり、その先駆けとしてオハイオ大学の研究グループは WRF* を北極大気再現に最適化した Polar-WRF* を元に、領域 3 次元変分法データ同化システムにより北極圏大気再解析データ ASR* を作成した。また、さらに地域を限定した試みとして、Polar-WRF を元にした領域データ同化システム WRFDA* を用いて、チャクチ海とポーフォート海上空に特化した大気再解析データ CBHAR* が作成されている。

海洋分野に比して、大気分野では全球観測データセットを用いて、大気再解析データを自前で作成できる環境が整い始めており、特定の観測データを加えたり除いたりする観測システム実験が北極海上でも行われ始めている。これまでに、北極低気圧中心部の高層気象データが低気圧の再現性に極めて役立つこと、中緯度対流圏上部の大気循環の再現性にも影響が及ぶ可能性があることなどが、海洋研究開発機構が開発した大気データ同化システム ALERA2* から示されている(Inoue et al., 2013)。その結果得られた、海氷上に展開されている海面気圧計及び北極海上のラジオゾンデ観測の重要性への知見は、大気再解析分野で世界をリードする成果となっている。現業の気象センターに依存しない観測活動とデータ同化システムを併用できる日本の研究体制は、国際的に見ても稀で、国際北極科学委員会(IASC)大気作業部会でも注目され始めている。

b. 海洋海氷データ同化システム

現時点でデータ同化技術を用いて海洋及び海氷の同時解析値の作成を現業運用している代表例としては、ノルウェーのナンセン環境リモートセンシングセンターが開発したアンサンブル・カルマンフィルター* による北大西洋及び北極海の領域海洋海氷結合データ同化システム TOPAZ* と、英国気象局(UK Met Office)が開発した最適内挿法* による全球海洋海氷同化システム FOAM* がある。それぞれ用いる同化技術は異なるが、共に海洋海氷結合モデルを基盤として開発され、中・長期予報値ならび再解析データの作成を目的としている。TOPAZ 及び FOAM の解析値及び予報値の日毎更新データは、共に海洋データポータルサイト MyOcean を通して公開されている。

研究目的で海洋海氷結合データ同化システムを構

築した例としては、DAMOCLES*プロジェクトのNAOSIMDAS*及びECCO2*プロジェクトの北極海解析システムが挙げられる。両システムとも4次元変分法を採用しており、本稿執筆段階で海洋及び海氷両モデルのアジョイントコード*の開発に成功しているのは、この二つの同化システムのみである。この他、ワシントン大学では最適内挿法による北極海海氷海洋再解析システム PIOMAS*が開発され、準現業体制が構築されている。海洋海氷結合データ同化システムは、海洋及び海氷観測データを同時に同化できる強みがあり、例えば、NAOSIMDASにより作成された解析値は、海氷観測データが海洋内部の状態推定に大きな影響を及ぼ

す可能性を示しており興味深い。

大気海氷海洋結合予報システムへ試験的に海氷同化システムが導入された例として、カナダ環境省における領域大気海氷海洋結合予報システムへの最適内挿法による海氷データ同化の組込み実験がある。それに加えて、気象庁気象研究所が開発を進めている変分法海洋同化システム上において、オホーツク海におけるナッジング*による海氷密接度同化実験(碓氷他 2010)と、さらに、3次元変分法によって得られた海氷密接度解析値をIAU*により全球大気海氷海洋結合モデルに同化した研究(Toyoda et al., 2011)が挙げられる。大気海氷海洋結合モデルを用いたカナダ環境省の事例

ボックス 10

データ同化技術の解説

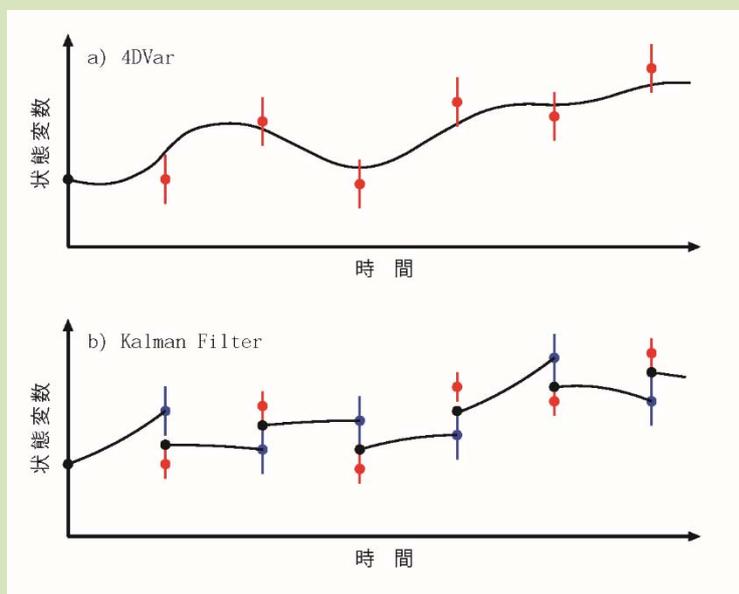
大気および海洋データ同化システムで現在主流となっている同化技術には、大きく分けて変分法とカルマンフィルターの二系統があり、ここではそれぞれの特徴を簡単に解説する。その技術詳細や代表的な応用例並びに他の同化技術に関する情報は、日本のデータ同化研究コミュニティにより編集された教科書(淡路他 2009)に詳しく書かれているので参照されたい。

a. 変分法(アジョイント法):4DVar/3DVar

モデルの挙動を決める変数(制御変数)の修正により、観測値とモデル出力値の距離を測る関数(評価関数)を最小化する。その結果得られた最適制御変数値から決められるモデル変数値を解析値と定義する。制御変数には初期値、境界値あるいはモデルパラメータを選ぶ場合が一般的であり、得られた解析値は1サイクルの同化期間中、モデルの支配法則を厳密に満たす事になる(図64a)。3次元空間を表すモデルの場合は、支配法則に時間軸を含む場合を4次元変分法:4DVar、含まない場合を3次元変分法:3DVarと呼ぶ。

b. カルマンフィルター:Kalman Filter

カルマンフィルターの特徴は、モデル支配法則が原則的に時間軸を含み、その支配法則及び境界データの誤差について時間変化するモデル予報値の誤差共分散行列を陽に計算する事にある。モデルの予報変数値



と観測データを線形に足し合わせることで最適解(解析値)が得られる。そのため解析(同化)時刻では、モデルの支配法則を満たさないが、4DVarに比べより観測値を追従した解析時系列値を得やすいという特徴がある。(図64b)。

図 64
4次元変分法及びカルマンフィルターの模式図。赤丸は観測値。黒丸及び黒線は解析値。

では、海氷同化が大気並びに海洋予報精度の向上に貢献する事が報告されており興味深い。

海氷解析値に特化した現業システムを運用している代表例としては、カナダ環境省が開発した 3 次元変分法による領域海氷解析・予報システム RIPS*がある。RIPS は簡易化された海氷移動モデルのみを下に同化システムが開発されており、従来予報官が手作業で行っていた海氷解析作業の自動化を目的としている。RIPS による海氷密接度解析値は天気予報と同じ 1 日 4 回の頻度で作成され、予報官によるアイスチャート作成作業への入力値や数値天気予報システムの大气下部境界条件として利用されている。海洋観測データの不足を反映して、海洋循環場のデータ同化に特化した再解析データ作成は事例が少なく、例えば、アラスカ大学においてベーリング海ーチャクチ海領域の気候値海洋循環状態の推定に 4 次元変分法データ同化技術を適用した例が報告されている。

c. 海氷季節予報

氷厚実測値データを用いたデータ同化技術による晩春の初期海氷厚分布の修正が、海洋海氷結合モデルによる夏季後期における海氷分布予報精度の改善に貢献することが報告されている (Lindsay et al., 2012)。同様の結論は、他の予報実験においても確認されており、大気海氷海洋結合モデル CNRM-CM3.3*の長期積分データの解析からは、晩春におけるサブ格子スケールの海氷厚分布が、夏季後期における海氷面積の予報可能性の向上に最も大きく貢献する事が見出されている。その理由は、積分値では同じ体積の水で覆われている格子点同士でも、薄い水で広く覆われている格子点よりも厚い氷が点在している格子点の方が、夏季の融解期に海氷が完全に融解しない可能性が高くなるためである。こうした海氷を長時間存在させるメカニズムが有効ならば、海氷厚分布データによる初期値修正が海氷季節予報の性能向上において、重要な役割を果たすことが期待できる。

d. 大気化学組成の推定

極域高層大気における成層圏オゾン観測の歴史は比較的早く、北極圏においては、ゾンデ観測データは過去約 45 年の蓄積がある。また、衛星搭載センサによる観測データも、既に過去 35 年の蓄積がある。これら長期観測

データの解析により、冬季及び春季の北極圏オゾン層分布に活発な経年及び長期変動が見いだされており、Brewer-Dobson 循環に代表される大気循環場の変動との関連が指摘されている。オゾンに限らず各大気圏の化学組成変動は、動的に大気循環と結合している事が理解されつつあり、大気循環ー化学組成変動を一つの結合系として理解する動きが進んでいる。このため近年は、対流圏並びに成層圏を含む大気循環モデルと化学輸送モデルを結合させた化学気候モデルが、この大気ー化学結合システムの理解に重要な役割を果たしており (Dameris and Jöckel 2013)、物理モデルと化学モデルの同時データ同化システムの開発と再解析値の作成が、目下の重要な開発及び研究テーマである。

e. 氷床の状態推定

この 10 年程で衛星観測より得られる氷床高度や氷移動速度データの整備が進み、グリーンランド氷床のモニタリング状況は劇的に向上した。氷床変動の定量的な評価は、気候変動研究において重要な要素であるが、氷床底面境界条件に代表される直接観測が難しいパラメータをどの様に推定するかが重要な課題である。氷床のデータ同化研究は、標準的な氷床力学モデル (例えば、SICOPOLIS*) のアジョイントモデルを用いた感度解析及び双子実験* から始まり (Heimbach and Bugnion, 2009)、現在は変分法およびカルマンフィルターを用いた実際の観測データによる外力並びにパラメータ推定を行う段階に至っている。氷床高度データを用いたグリーンランド氷床の状態推定を目的としたデータ同化実験例からは、過去 10 年程度の現実的な氷床高度変動を再現するには、氷床上部境界条件である表層質量バランス項 (SMB:surface mass balance) と、氷床底面における抵抗係数の両方の修正が有効である事が示されている。先の感度実験より、氷移動速度に対しては底面抵抗係数と底面地形の両方に強い感度がある事が見出されており、高度データと速度データの同時同化により、より正確な氷床下部境界条件を推定できる事が期待される。また、氷床高度の時間変動の再現に重要であるとされた SMB は通常、大気モデルの出力値あるいは再解析値より見積もられるため、領域大気モデルを用いたデータ同化システムにおいて SMB を推定する研究も行われている。

データ同化を北極環境研究に展開する方針

北極圏は、その特殊な気候条件および地理条件により、気候システムのモニタリングが最も難しい地域の一つである。「北極圏におけるデータ同化研究の現状」で述べたデータ同化技術の北極環境問題への応用例とその成功例は、複数の観測データとモニタリング対象であるシステムの支配法則との融合により、この状況を打破できる可能性を示している。ここでは、「北極圏におけるデータ同化研究の現状」で取り上げた大気海洋海氷システムのモニタリングに同化技術を利用する例をさらに発展させると共に、海洋生態系、氷床及び陸域植生をも含む多圏気候システムのモニタリングへ、データ同化技術の利用を拡張する方針を提示する。また、海氷面積の減少に代表される急激な気候変動下において、北極圏における経済活動を円滑に進めるためには、新しい要素を含む現業予報システムの整備が求められており、天気及び海況予報システムの構築についても提案する。

a. 海洋データ同化

現行の海氷海洋結合北極海モデルが作り出す海洋循環場及び海氷場は、一般に観測値からの乖離が大きく、中緯度域に比べモデル間での分散が大きい事がAOMIP*などにより明らかとなった。従って、精度の高い北極海海洋再解析値を作成するには、まずベースとなる海氷海洋結合モデルの改善が必須である。モデル誤差を生み出す原因は複合的要因から成ると考えられるため、本原稿執筆段階ですべての原因を網羅する事はできないが、明らかな問題点とその対処方法を以下に羅列する。1. モデル解像度の不足。2. 海氷下の温度塩分データの代表性。3. 海氷-海洋熱フラックスに含まれる誤差及びバイアス。4. 外力データが含む誤差及びバイアス。

1. に関しては計算機能力の継続的向上により解決される可能性が高い。2. の問題を解決するには、海氷下でも稼働及び情報通信が可能なArgo*型の漂流ブイの全海盆展開が必須であり、観測システムの発展と共に海洋-海氷データ同化研究が発展する事が望ましい(海氷下海洋観測システムに関してはテーマA参照)。その際、高解像度海氷-海洋結合モデルを用いた観測網感度実験を通して、最適な観測網の提案を行う事はデータ同化研究コミュニティの重要な役割である。3.

及び4. の問題は外力誤差に起因するため、前述の大気再解析データの精度向上と共にデータ同化技術による外力修正が効果的である。

以上のプロセスを経て北極海海洋モデルの基本性能及び海洋観測体制を向上させる間、海洋同化コミュニティは海洋再解析データの作成に必要な詳細技術の検討及び実験を行う。地形に捕捉された流れが卓越する北極海内の詳細な循環を海洋モデルで再現するには、渦と複雑な海底地形の効果を表現することができる水平解像度が必要だが、海洋観測網は近未来においてもその解像度に達する見込みは無い。このため、データ同化のプロセスを逆問題と解釈した場合、観測値により海洋状態を決定する事が事実上不可能である事は明らかである。この状況において、バロー溪谷周辺等これまでの観測事実より渦の働きが重要と認識されている海域において、渦を解像できる観測網を設置し、領域モデルをベースとした同化システムを組むことは有効な方法であろう。北極海全体の状態推定を行う場合は、渦による運動量並びに塩分、温度の輸送過程を何らかのパラメタライゼーションスキームにより取り扱うか、EOFモード展開により統計的に推定すべき海洋循環場の解像度のオーダーを落として同化システムを組むことが有効である可能性がある。

物理環境の同化に一定の成果をあげた後は、後述する様に、計画の進捗に応じて物質循環モデルや海洋生態系モデルを順次結合させていく。その後、再解析データの提供、予測実験の初期値提供、最適観測ネットワークの提唱、物質循環・海洋生態系の状態推定などの課題に順次取り組む。物質循環・生態系モデル開発において、日本は世界のトップレベルにあり、この分野の研究者とデータ同化専門家との協働により、多圏海洋データ同化研究の分野では、将来大きな科学的成果が期待できる。トレーサー収支の整合性を前提とする物質循環研究を行う場合には4次元変分法が適しているが、その際に問題となるのは強非線形問題への対応である。非線形問題が生じやすいモデルパラメータの推定などには補助的手段として遺伝的アルゴリズム*やグリーン関数法*を併用することで対処する。

b. 海氷データ同化

海氷データ同化の目的は、大気モデルに対する下

部境界条件の供与、海洋モデルへの上部境界条件の供与、そして海氷自身の短中期変動予測及び長期再解析データ作成に、大別される。海氷予測性能及び再解析データの精度向上には、ベースとなる数値モデルの性能改善と共に、初期値並びに外力を含む境界条件の最適化が必要であり、どちらの場合にもデータ同化技術が大きな役割を果たす事ができる。

現在海洋海氷結合モデルにおいて、標準的に用いられている Viscous-Plastic 型モデル及び Elastic-Viscous-Plastic 型モデルで用いられているレオロジー関数は、海氷密接度の高い海氷場の振る舞いを再現する近似解として生み出されたため、密接度が 90%を割る氷縁域においては適切な近似ではない事が長い間指摘されてきた。そのため、氷縁域における海氷モデルには、近年、氷盤直径サイズ分布を変数とした氷盤間の緩い衝突過程が取り入れられている。このモデルに含まれるパラメータには不確実性が含まれており、観測値によるパラメータ調整がモデル精度の向上に大きく貢献すると期待される。また、大気海氷間及び海氷海洋間の運動量・熱フラックスの計算に用いられるパラメータの値や、海氷内部応力に関する海氷強度の値を最適化することにより、海氷の力学・熱力学プロセスが改善され、ベースとなる海氷モデルのバイアスが低減し、予測性能の向上につながると期待される。

将来の海氷データ同化改善に、最も威力を発揮すると期待される観測値は、衛星搭載センサより見積もられる海氷厚分布及び海氷密接度データであり、今後現場観測との比較実験を通してアルゴリズムの精細化が期待される(海氷の衛星観測に関する詳細は、テーマ A 参照)。日本の極域研究コミュニティは、北極海並びに季節海氷域を含む縁辺海(オホーツク海及びベーリング海)における現場観測等を通して、海氷衛星データの解析アルゴリズム開発に定評がある。この状況を活用し、データ同化研究者と衛星データ解析研究者は積極的な協働作業を通して、海氷の状態推定技術の発展に大きな貢献ができる可能性が高い。さらに、これら技術向上により得られた、より正確な海氷初期値場は、海氷短期及び季節予報精度の向上に貢献するものと考えられる。

c. 大気海氷海洋氷床結合データ同化

北極圏の大気、海氷、海洋の状態を予測するには、

観測データと整合的な初期条件と境界条件を与えた数値モデルを基盤とする、北極圏を対象とした現業的データ同化・短期予測システムを構築することが重要な研究課題である。基盤となるモデルには、Polar-WRF により有効性が示された様に、北極圏の大気海氷海洋結合物理過程に最適化された領域結合モデルを採用する。この際、極域物理過程に特化した諸パラメタリゼーションスキームの最適な選択と共に、データ同化技術を用いてパラメータを観測データと整合するように調整する事も重要な研究課題である。短期予測性能の向上には初期値の精度を上げる事が重要となるため、カルマンフィルターが有効であると考えられる。同化するデータは、これまでにモデル領域内で観測されている大気・海氷・海洋の複合データとする。どのようなデータが予測に最適であるかを見極めながら、大気海氷海洋結合領域モデルによる予測に最適な同化手法を確立する。

北極圏における大気-海氷-海洋間の運動量、熱及び淡水フラックスの見積もりには大きな誤差が含まれる事が従来指摘されている(Bourassa et al., 2013)。これら諸フラックスは、海氷海洋結合モデルや大気モデルの駆動に必要な上部並びに下部境界条件を決めるため、そこに含まれるバイアスならびに誤差は、これら数値モデルの持つ現実再現性能や予報性能の低下に直結する。誤差を生み出す原因の一つである観測データの不足は、気候条件ならびに地理的環境に起因しているため、観測技術の向上のみでは直ちに改善される事は期待できない。この問題に対処するには、全球あるいは領域大気-海氷-海洋結合データ同化システムによる物理的整合性を持ったフラックス再解析データの作成が不可欠と考えられる。大気モデル及び海洋海氷結合モデルの開発と、そのデータ同化システムの開発に経験を持つ日本の優位的立場を利用した研究プロジェクトの創出が望まれる。

さらに、長期にわたる方向性を示すと、グリーンランド氷床の融解を予測することも重要な目的となる。氷床上面における積雪、凍結、融解による正味の蓄積には、大気モデルの改良を基礎として、氷床高度データをモデル検証に利用すると共に、氷床モデルに同化する試みを提起する。ただし、底面抵抗が速度に対して非線形(速度が高くなると抵抗の速度依存が低下)であり、また、抵抗係数が融解によって極度に小さくなる性質に注意して、データ同化手法を設計する必要がある。氷床

底面の融解に加えて、海洋に接する氷床の崩壊にも注目すべきであり、海洋との相互作用に関するモデリングが途についたばかりであるが、氷床海洋結合モデルにおけるデータ同化の新たな展開を目指すべきである。これらの結合モデルにデータ同化をどのように適用するか、個別の要素によってモデルの精度とデータ量が異なるので、解決すべき課題は多いものの、挑戦に値する長期課題である。

d. 海洋低次生態系の状態推定

夏季海氷面積の急激な減少により、海洋生態系バランスへのストレスが高まることが予想されるため、早急なモニタリング体制の確立および変動メカニズム解明が必要である(詳細は、テーマ 9 参照)。現場観測数が限られる海洋低次生態系の状態を広くモニターするには、海洋海氷生態系結合モデルを利用する必要がある。北極海における生態系の応答は海氷場の季節変化に支配されるため、その状態推定には、物理背景場となる海氷縁後退のタイミングが観測と一致することが前提となる。海氷条件をモデル結果に基づいて与える場合、海氷海洋物理モデル自体の精度向上は不可欠だが、目的によっては海氷データ同化を活用することも1つのアプローチとなる。ただし、成層構造の季節変化が重要なケースでは、短波入射だけでなく、海氷生成融解に伴う海面淡水フラックスも正しく表現されている必要がある。一般に、海氷密接度をナッジング手法により同化すると、淡水フラックスに相当なバイアスを含んでしまう。仮に海氷海洋の背景物理場が完璧でも、生物変数の計算結果は実装する生態系モデルの不確定性に依存する。物理モデル同様に生態系モデル自体の改良も進めつつ、データ同化手法を活用して関連パラメータの最適値推定を行うことも高精度データの取得につながる。日本でも SeaWiFS* のクロロフィルデータと World Ocean Atlas (WOA) の栄養塩データを利用して、低次海洋生態系モデル NEMURO* の最適パラメータ値を全球で海域別に推定した例がある(Toyoda et al., 2013)。このような現状を踏まえて、海洋生態系モデルにデータ同化を適用する場合に克服すべき課題を以下に記述する。

まず、ベースモデルの再現性向上が挙げられる。AOMIP で実施された北極海を対象とした生態系モデル間比較からは、基礎生産量の計算結果に差異が生じ

る要因として混合層深度がモデル間で一致していないことが指摘されている(Popova et al., 2012)。極域海洋に特有なアイスアルジーを含めて主要なプランクトン種や栄養塩コンポーネントは、多くの北極海生態系モデルで表現されているが、海域間の差を議論するのに重要な脱窒、窒素固定、鉄制限などの要素が、ベースとなる海洋生態系モデルにまだ十分に組み込まれていない。これは、北極海に限ったことではないため中低緯度海洋を対象にしたモデル研究で得られつつある知見を参考に、必要な要素を取り入れていく必要がある。ベースモデルのバイアス要因は多岐にわたるため、詳細はテーマ B を参照のこと。

次に、同化に用いるデータセットの妥当性が挙げられる。一般に同化に用いる観測データの取得可能期間はデータセット間で一致しないことが多い。例えば SeaWiFS* のクロロフィル量は 1997~2010 年の時系列データとして得られるが、WOA は気候値のみなので評価関数の与え方を変える必要がある。また、衛星クロロフィルデータは特に極域でバイアスが大きいことが知られており、同化する際には注意が必要である。いずれにせよ観測データの充実、高精度化は、同化プロダクトの有用性に直結するので、観測サイドとの連携が不可欠である。

同化を行うにあたっては、生態系モデルの変数やパラメータは物理モデルより格段に数が多いため、限られた計算機資源を効率的に利用するために最適値推定すべきパラメータの選択、順位付けを行う作業が重要である。植物プランクトンの最大光合成速度や半飽和定数だけでなく、海底堆積物からの栄養塩フラックス等も最適値推定の対象になり得る。いずれにせよ、得られた推定値が現実的に取り得る範囲内かの妥当性評価が行われて初めて意味のある同化プロダクトとなる。

e. 北極圏炭素循環の状態推定

開氷域の拡大に伴い、北極海全体の炭素吸収量が増加傾向にある事が、観測結果より見いだされている。また、地上平均気温の上昇は高緯度帯における植物生産量の増加を促しており、既に一部の地域では森林限界の北上が報告されている。次の数十年間で北極圏の炭素循環サイクルが強まる事が予想され、それに伴う気候変動の背景原理を把握するためにも、早急な炭素循環の監視体制の確立が求められる。大気・海洋・海水結合システムの状態推定と同様に、炭素循環を定量的に

見積もるには、データ同化技術を用いて、限られた数の観測データと数値モデルの最適な融合が必須であると考えられる。

大気－海洋間の二酸化炭素フラックスの見積もりにおいて、データ同化手法を用いた推定はある程度の成功を既に納めている。例えば、Valsala and Maksyutov (2010)は有光層内における溶存無機炭素¹⁴⁸(DIC)の時間変動モデルに対応する4次元変分法データ同化システムを構築し、全球大気－海洋間の二酸化炭素フラックスの時空間分布を、海洋表層二酸化炭素分圧(pCO₂)データの同化より見積もった。ここで、背景移流場及びDICフラックスのパラメタリゼーションに必要な温度・塩分場には海洋再解析値を用い、初期値を制御変数とした。この手法では支配方程式をDICモデルに一本化するために、様々な単純化が行われており、同様な手法を北極海へ展開するには、それぞれの仮定の検証が必要である。また、北極海ではpCO₂の現場観測値の分布がチャクチ海やバレンツ海に代表される夏季の開氷域に限られるため、観測データの代表性の問題を解決する必要がある。現在、ITPによるpCO₂観測が試みられており、近い将来、海氷下におけるpCO₂の通年モニタリングが実現する可能性がある。

北極圏における大気－陸面の炭素フラックスの広域モニタリングは、衛星データと陸域炭素フラックスモデルの組み合わせにより既に実現されている(Kimbell et al., 2009)。炭素フラックスモデルには、生産効率モデル¹⁴⁹(PEM)と呼ばれる診断モデルが用いられ、大気中二酸化炭素の植生への取り込み量を衛星データで得られる種々の変数より推定する。その結果、得られた大気－陸面間の炭素フラックスは、フラックスタワーにおける現場観測値により検定され、モデルに含まれるパラメータの最適化が行われている。PEMによる炭素フラックスの見積もりには、衛星データと共に、大気再解析データから供給される気象要素が入力値として必要になる。陸域においても、北極圏における大気再解析データには、無視できない大きさの不確実性が含まれているために、その結果得られた炭素フラックスの精度も影響を受ける。大気再解析データはフラックスタワーデータを入力値として、カルマンフィルター等のデータ同化技術により逐次修正できるため、データ同化技術がPEMによ

る大気－陸面炭素フラックス推定値の精度を向上させる可能性がある。

f. 北極圏陸域植生データ同化

北極圏では、温暖化による気温上昇に伴って植生が活発になる場合もあるが、凍土融解が土壌水分を減らして植生が衰退する所も見られる(テーマ8参照)。その結果として、野生動物への影響に留まらず、住民の生活にも深刻な打撃が及ぶ(テーマ7参照)。このような気候変動下における植生変動の地域的影響を評価するには、地形や土壌などの地域特性に依存する個別の植物種の分布変動まで予測することが求められている。陸域植生の生長と枯死は、主に大気、日照、土壌水分などに依存し、最新の植生モデルではその依存関係は種毎に異なる関数として記述されている。これらの関数は、観測データに基づく経験則により構築されるため、多くの不確かなパラメータを含む。将来予測研究を行う場合、このパラメータの不確実性をなるべく小さくする事が必要である。

データ同化技術で多くのパラメータの同時推定を行う場合、観測データが不十分な状況では多数のパラメータが不定となる可能性が高くなる。このため、陸域植生データ同化研究の現状は、パラメータの数を減らした生態系ボックスモデルにおいて、正味の二酸化炭素交換、総一次生産、日平均の総呼吸、および炭素蓄積量のデータを同化することで、ようやく広域植生総和の季節変動を再現した。植生の気候変動への応答の細かい空間分布まで予測する場合には、やはり、複数の種の衰退、発生などをモデルで再現する必要があり、多くのパラメータを同時に最適化するための道筋を付ける必要がある。

北海道、アラスカ、シベリアなどにおける現場調査から、多様な植生種の環境応答に関する統合的なデータベースが構築されており(テーマ8参照)、植生モデルにデータ同化技術を応用する環境は整いつつある。まずは、特定の植物種に関するモデルパラメータの最適化について、データ同化が有効であることを確認することから始める。そこで、有効性が認められたならば、多様な植物種と大気境界層の変動プロセスの最適化に特化した植生・土壌・大気結合モデルに対するデータ同化に挑戦していく。この構想には、観測網の充実化とデー

¹⁴⁸ 溶存無機炭素: dissolved inorganic carbon(DIC)

¹⁴⁹ 生産効率モデル: production efficiency model(PEM)

タセットの整備、植生モデルの適切な複雑さの調整、および適切なパラメータ推定技術の選択が必要であるため、現場観測とモデル研究に精通した植生研究の専門家とデータ同化技術に精通した専門家との共同研究が必須である。

g. 大気データ同化

北極海上の数値予報の進展は、海氷減少に伴って今後ニーズが高まると思われる。これは、北極航路上での船舶の往来が増えるにつれて、北極低気圧等の進路予報や海氷移流の予報が運航上の要となるからである。また、極温暖化増幅下の中緯度における極端現象の頻発は、社会的にもインパクトが大きい。予測精度向上のためには、データ同化技術を用いた数値予報における初期値改善に資する観測、特にデータの取得場所や頻度に関する予備調査が必要不可欠である。ドイツは、特にこの活動に熱心で、2012年の海氷減少に大きく貢献した北極低気圧に関して、ドイツ砕氷船で取得したラジオゾンデデータと日本のデータ同化システムALERA2を用いた観測システム実験が進行中であり、日本が当該分野の最前線で活躍し始めている。この活動は、2018～2019年に計画されているMOSAIC*のパイロットスタディーとしても認識されており、近未来の北極研究の根幹をなす分野であることは間違いない。

先行研究事例が示している北極圏における再現性に特化した北極圏領域大気モデルと対応する同化システムの開発は、極域における観測網が整うに従い、重要な課題となるであろう。この場合、領域モデルには全球大気解析システムより境界条件を与え、大気下部境界条件である海氷は大気海氷結合モデルとして同化システムに組み込む事が望ましい。また、Inoue et al, (2013)が示した観測網解析が有効であることを、海氷を含む観測網解析へと拡張し、北極圏における大気状態推定に最適な観測システムに関する知見を得る事も重要な研究課題である。

近年の集中観測によるデータの蓄積が契機となり、北極大気下面境界層の構造に大きな影響を与える大気-海氷界面フラックス評価におけるパラメタリゼーションスキームが見直される動きがある。例えば、海氷域の表面はリッジやフリーボードなどの影響を受けており、主に密接度の関数として大気に対する粗度係数が異なる事が近年取り上げられている。また、近年の温暖化傾向により面積が拡大している海氷面のメルトポンドが熱放

射過程に与える影響を考慮するため、海氷面アルベドスキームの見直しも進んでいる。海氷面の物理状況の多くは、衛星搭載センサによる観測が可能のため、これら大気下面境界におけるパラメタリゼーションスキームの改良と共に、データ同化システムによる粗度係数等パラメータの最適化が大気循環モデルの性能向上に大きく貢献すると期待される。

h. 北極航路域における海氷及び表層海流短期予測

北極海の急激な海氷減少に伴い、北極航路(ロシア側の北東航路とカナダ側の北西航路)が利用され始めている。北極航路を通る船舶の安全運航を支援するには、一週間程度先までの低気圧の経路、波浪、氷況を高精度に予測し、それらの情報を船舶に提供することが必要である。北極航路域の予測を高精度に行なうためには、細かい空間スケールの海氷及び表層海流を表現できる水平解像度が望まれる。したがって、データ同化・短期予測システムのベースとなるモデルは、北極航路域に特化した高解像度の大気海氷海洋結合領域モデルとし、その境界条件として北極圏大気海氷海洋広域モデルを用いた解析値を与えるために力学的ダウンスケーリング手法を採用することが望ましい。境界値を与える広域解析値が存在しない、あるいはその利用が不可能な場合は、広域解析システムを作成する事から始める必要がある。その際は、ある一定時間内(例 6 時間)で予報値を提供しなければならないという現業予報体制特有の時間制限を考慮し、ナッジングや最適内挿法などの計算量が軽い同化手法を用いて広域解析システムを構築する。また、北極航路域では、沿岸域特有の定着氷や低気圧発生に伴う波浪の影響についても認識しておく必要があり、データの取得状況と合わせながら同化システムへの導入を準備しておくことも長期的に重要な課題と考えられる。

i. 北極海沿岸における波浪予報

海氷面積の減少と同時進行する低気圧現象の活発化に伴い、北極海沿岸地域では波浪現象の活発化が観測されている。商業利用が進むと期待されている北極航路において、正確な波浪情報が得られることは安全な航海を進めるために必須である。波浪は氷縁分布を決める重要な要因でもあるため、その予測は氷縁域における海氷分布予測にも必要となる。実際にノルウェーの Mohn-Sverdrup Center ではこの動きにならった

プロジェクト WIFAR*が進行中である。また、波浪に起因する海岸浸食が進む北極海沿岸に立地する集落に対し海岸線変遷の予測情報を提供するためにも、現業波浪予報・予測システムの開発は必須である。低中緯度帯において、データ同化システムによる波浪予報システムの運用は既に長い歴史があり、北極海にこのシステムを延長する事が必要と考えられる。

日本では波浪研究に携わる海洋研究者が少なく、波

浪データ同化研究についてはさらに経験が乏しいのが現状である。そのため、北極海においてはまず日本の研究機関による集中観測海域であるチャクチ海及びカナダ海盆沿岸等で、モデル研究及びその観測データによる検証を先行させ、波浪予報のために必要な条件(モデル精度、初期値推定に必要な観測データセット等)の精査を行う。その後、段階的にデータ同化技術に基づく予報システムの構築へと向かう必要がある。

北極圏データ同化研究の実現に向けた環境整備

前項において述べたデータ同化研究課題に取り掛り、遂行するには、日本国内の環境整備も重要な課題である。ここでは特に、限られた人的資源をいかに有効に活用するか、データ同化研究の基盤である観測データをどの様に整備するか、また、予想される技術課題にどの様に対応するかの3点に絞り議論する。

データ同化研究の実績が非常に少ない日本の北極圏研究コミュニティは、同化技術の開発を行っている拠点機関と緊密な連携を図りアドバイスを適時受け、北極圏を対象としたモデルを同化システムへ実装していく必要がある。将来の様々な応用を視野に入れた場合、複数の同化技術を並行的に実装していくことが望ましいが、国内の人的資源の制約を考えると困難な課題である。そこで、それぞれの応用課題ごとに適切な同化技術の絞り込みを行い、人的資源を集中的に投入する必要がある。また、既に同化研究に実績を持つ大気及び海洋データ同化研究コミュニティが、ワークショップやサマースクールの開催を通して、他分野への同化技術の普及を支援する事も重要であろう。

北極圏でのデータ同化に利用可能な観測データの種類は多岐にわたるため、これらの集積・アーカイブ化をデータ同化のためだけに行うのは現実的でない。そこで、データの集積には既存のアーカイブシステムを利用し、観測データの蓄積に対してデータ同化コミュニティ側から積極的に提言を行っていくという方策を採る。具体的には、蓄積すべきデータの種類、記録形式、利用のためのインターフェイスの実装方法等について、同化コミュニティ側の要請を明確に伝え、観測コミュニティへ対しても積極的な参加を呼びかける。一方で、現場観測データは個別の研究機関、研究者がその研究資産として管理している場合が多く、これらを引き出してデータ同化に活用するための個別の関係構築が不可欠

である。この点に留意し、データ同化と観測コミュニティの相互連携の枠組みを構築する必要がある。

データ同化研究共通の問題として、観測データ誤差(測器誤差と時空間代表性誤差)評価がある。同化システムの挙動に大きな影響を与える要素にも関わらず、同化される観測データの誤差評価が十分に行われてこなかった。この状況が残されたのは、データの不確実性評価は当該データ毎に行う必要があり、分野横断的なメリットが乏しいためである。しかし、データの不確実性評価はデータ同化の核をなす重要な技術課題であり、今後精力的に取り組む必要がある。特に、複数種類の観測データを同化する場合には、それぞれの観測データの相対的な不確実性評価が重要となる。実際の適用場面において難しいのは、測器誤差よりも時空間代表性誤差の評価なので、観測データに対応するモデル出力値の検定を通して、代表性誤差の統計情報を提供できるような観測計画の立案を積極的に提言していく必要がある。

表 3 用語解説集

用 語	解 説
ALERA2 : AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis	地球シミュレータセンターで公開されている 2008 年 1 月 1 日から 2013 年 1 月 5 日までの実験的アンサンブル大気再解析データセット
AOMIP : Arctic Ocean Model Intercomparison Project	1999 年から 2011 年に掛けて実施された北極海モデルの相互比較プロジェクト。実験設定をなるべく統一することで既存の北極海モデルに共通して見られる問題点を検出し、再現性の向上に生かすことを目的とする。
Argo	漂流ブイによる海洋場の自動観測器。海水の移動する軌跡に沿って水温・塩分等を準リアルタイムで測定・配信する。
ASR:Arctic System Reanalysis	極域天気予報モデル(Polar-WRF)の高解像度版と北極に最適化された同化システムを用いて作られた北極大気再解析データ
CBHAR : Chukchi-Beaufort Seas High-Resolution Atmosphere Reanalysis	Polar-WRF をベースとする WRFDA を用いて作成された 1979 年～2009 年までのチャクチ海およびボーフォート海に特化した高解像度大気再解析データ
CNRM-CM : Centre National de Recherches Me'te'orologiques-Climate Model	フランス国立気象研究所を中心に CMIP 対応のために開発された気候システムモデル
DAMOCLES : Developing Arctic Modeling and Observing Capabilities for Long-term Environmental Studies	北極気候変動の理解を深めるために欧州主導で立ち上げたプロジェクト。海氷季節予報プロジェクト Sea Ice Outlook を管轄する SEARCH も DAMOCLES の一環。
ECCO2 : Estimating the Circulation and Climate of the Ocean Phase 2	気候モデルと観測の融合を目的の 1 つとし、WOCE の一環として 1998 年に設立された海洋研究プロジェクト。JPL、NOAA、マサチューセッツ工科大学、スクリプス海洋研究所などが参加している。
FOAM: Forecasting Ocean Assimilation Model	英国気象局で開発された海洋海水結合データ同化システム。全球、北大西洋、地中海とインド洋のそれぞれの現業システムが稼働している。
IAU: incremental analysis updating	初期値への修正量を一定期間に分散させてモデルの解に反映させる技術。データ同化技術による初期値推定と同時に用いられる。
ITP : Ice Tethered Profiler	海氷設置型の自動観測器で、氷盤が移動する軌跡に沿って水温・塩分等を準リアルタイムで測定・配信する。
MITGCM : MIT General Circulation Model	マサチューセッツ工科大学(MIT)で開発された大気・海洋・気候研究のための数値モデル。
MOSAiC: Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate	国際北極科学委員会(IASC)大気作業部会にて策定された北極海中心部における国際氷上漂流観測計画。2018～2019 年の実施を目指している。
NAOSIMDAS : North Atlantic/Arctic Ocean Sea Ice Model Data Assimilation System	アルフレッド・ウェゲナー研究所で開発された海氷海洋結合モデルをベースとして、DAMOCLES の一環として開発された 4 次元変分法データ同化システム。
NEMURO : North Pacific Ecosystem Model Used for Regional Oceanography	北太平洋海洋科学機構(PICES)で開発された低次海洋生態系モデル。開発当初の対象海域は北太平洋だったが、現在では全球および北極海にも適用されている。

用語	解説
PIOMAS : Pan-arctic Ice-Ocean Modeling and Assimilation System	ワシントン大学で開発された海氷海洋結合モデルをベースに、海氷密接度を衛星データにナッジングするデータ同化システムをオプションとして加えたもの。
Polar-WRF : Polar Weather Forecast Model	オハイオ州立大学の Byrd Polar Research Center の気象グループによって開発された極域に特化された天気予報モデル(WRF 参照の事)
RIPS : Regional Ice Prediction System	カナダ環境省で開発された領域海氷予報システム。3次元変分法により自動化された海氷密接度分布の現業解析システムを運用している。
SeaWiFS : Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor	衛星搭載の海色センサ。海色データからアルゴリズムを介することでクロロフィル濃度を推定できる。
SICOPOLIS : Simulation COde for POLythermal Ice Sheets	大規模な氷床の時間発展をシミュレートする3次元の氷床力学・熱力学モデル
TOPAZ : Towards an Operational Prediction system for the north Atlantic european coastal Zones	ナンセン環境リモートセンシングセンターが開発したアンサンブル・カルマンフィルタを用いた北大西洋及び北極海の領域海氷海洋現業予報システム
WIFAR : Waves-in-Ice Forecasting for Arctic Operators	Mohn-Sverdrup Center が実施中の氷縁域における波浪現象が海氷海洋場に及ぼす影響を評価するプロジェクト
WRF : Weather Research and Forecasting model	大気の研究や天気予報のために開発された次世代型のメソスケール天気予報システム
WRFDA : WRF Data Assimilation system	WRF をベースとした大気データ同化システム
WWRP-PPP : World Weather Research Programme-Polar Prediction Projects	世界気象機関が主導し、北極圏における予測可能性を評価することを目的としたプロジェクト
アジョイントコード	変分法同化システムで必要となる評価関数の勾配を出力する。線形化したモデル演算子に対応する随伴(アジョイント)演算子に相当。
アンサンブル・カルマンフィルタ(スモーカー)	カルマンフィルタ(スモーカー)における誤差共分散行列の時間発展方程式をモデル変数のアンサンブル平均で置き換えて解く方式
遺伝的アルゴリズム	評価関数の最小値探索技術の一つ。解の探索過程に進化過程を模した手続きを用いる事により非線形性の強い現象に対応できるとされる。
カルマンフィルタ: Kalman Filter (KF)	データ同化技術の一つ。数値モデル変数とその誤差共分散行列を共に予報しながら解析値を作成する事に特徴があり、主に数値予報システムの初期値化に使われる。非線形発展方程式に対応するための拡張形式として、接線形演算子を用いるアンサンブル・カルマンフィルタが良く用いられる。
カルマン smoother : Kalman Smoother (KS)	データ同化技術の一つ。KF と原理は同じだが、KF が過去の観測値のみを用いるのに対し KS では未来の観測値も用いて解析値を作成する。主に再解析値作成に使われる。
グリーン関数法	主に海洋同化研究で用いられる評価関数の最小値探索技術の一つ。降下法で要求される評価関数の勾配をアジョイントコードを使わずに差分法近似により計算する。

用 語	解 説
最適内挿法	データ同化技術の一つ。モデル予報値と観測値を線形で足し合わせる事で融合する。その際、線形の観測演算子と予め決められた誤差共分散行列より相対的重みを決める。
ナッジング	データ同化技術の一つ。モデル方程式に観測データに対する緩和項を加える事により解を観測値に近づけ、解析値を作成する。
双子実験	データ同化システムの評価方法の一つ。通常の設定では数値モデルの出力値から疑似観測値を生成し同化システムの評価実験を行う事を指す。

これまで記述した諸研究テーマの遂行には、様々な仕組みや設備が必要であり、各テーマで一定の記述がなされている。それらの中で、共通性が高く、国内のコミ

ュニティーとして準備するのが適当と考える、いわゆる研究基盤に相当するものを整理した。

砕氷観測船

砕氷船に想定される利用目的は、物資輸送から海底資源探査に至るまで多岐にわたる。この節では、海洋底の探査を含む極域大気海洋研究に根差した「研究専用砕氷船」とも呼ぶべき観測基盤の必要性について記述する(本稿では便宜上、これを砕氷船と呼ぶ)。

全球気候システムを理解する上で、北極海の海氷変動メカニズムの解明は喫緊の課題であり、北極海氷の将来予測の精度向上には不可欠である。これまで、海氷激減は、海洋温暖化が著しい太平洋側北極海で主に観測されてきたが、現在では北極海全域で季節海氷域化が進行している。一般に、氷縁を含む季節海氷域では、大気-海洋間の熱交換、海氷や高密度水による物質の輸送、植物プランクトンによる生物生産などが活発であり、河川水の流入による影響も受ける場合があり、物理的にも生物地球化学的にも興味深い現象が多く存在する。これらの現象のメカニズムを理解することなく、海氷減少に伴う大気海洋循環や気候変動への影響、物質循環や海洋生態系の応答を予測することは不可能である。現場における諸現象の理解のためには、大気-海氷-海洋の熱収支や生態系および物質循環を視点としたプロセス研究が必須であり、全季節をカバーした現場におけるデータの取得が不可欠となる。さらに、温暖化が進行した北極海や氷床の状況を予測する上では、現在と顕著に異なる気候状態における北極海の海氷分布や氷床末端位置を復元し、それらの変動メカニズムを理解することが重要である。

これを実施するには、北極海の海底地形の探査により、海底における侵食と堆積の状況を把握し、堆積物を広範囲に採取することが不可欠である。加えて、より長期的な変動を理解するには、現在海洋底が拡大しているガッケル海嶺等のテクトニクスおよび、北極海の形成過程や地球内部構造等の解明が必要となり、堆積物等の古環境・古気候研究と合わせた、固体地球変動と表層環境の相互作用とを理解する必要がある。つまり、北極研究の推進のためには、現場データや試料を取得し

ていくための砕氷船という観測基盤整備が最も重要なのである。

これまでの日本の北極海観測は、自国耐氷船か他国砕氷船を利用して行われ、それぞれに観測時期、海域、人員、予算等の制約の中で実施されてきた。特に、他国砕氷船の利用は、各国の政治的動向による自国観測計画への干渉のリスクを常に保有するだけでなく、観測機材およびサンプルの輸送(輸出入)等の無視できない問題を持つ。これは特に、現場分析や実験等が必要な化学および生物分野の研究にとっては、研究対象やデータ数を制限する大きな阻害要因となってきた。一方で、砕氷船を擁する各国は既に観測研究体制を整え、精力的に研究を実施している。このままでは、近年の地球システム変化の理解に最も重要なエリアの研究推進において、日本が大きな遅れを取る事になる。今後、日本独自の北極研究を発展させるためには、観測期間・海域を柔軟に設定できる自国砕氷船を保有し、自国砕氷船をプラットフォームとして現場観測(氷上も含む)、有人観測ステーション、無人観測(AUV等)を、越冬も含めて季節を問わずに展開できる体制を整える必要がある。

氷縁を含む季節海氷域での重点観測は他国の実績を見てもあまりなされていない。北極海、南極海のみならず、季節海氷域であるオホーツク海、ベーリング海において分野をまたいだ研究を数多く実施してきた日本には、独自の砕氷船運用による独創性のある観測研究を行うことで、さらなるプロセス解明を行う余地が多分にある。また、既存の耐氷船との併用は、海氷域、氷縁域、開水面域における結氷のプレコンディションを面的に捉える観測や、通年の大気-海氷-海洋熱収支観測を可能にする。また、IODP等で実施に向けて議論されている国際的な北極海研究掘削においても、事前調査や掘削研究等の面で、日本が大きな役割を担う事が期待される事も、独自の砕氷船を保有する大きな意味の一つとなる。砕氷船の保有が、日本の北極研究の可

能性を飛躍的に広げることが明白である。自国砕氷船を持つことの各種観測活動における具体的な意義について、表4にまとめた。

日本独自の砕氷船が建造された場合に想定される運航海域としては、海水が存在する北極海、南極海、オホーツク海の全てが候補として挙げられる。ただ、現実には多年氷域を航行するにはそれに応じたスペックが必要である。我が国独自の北極研究を展開するには、砕氷船の運用目的はあくまで学術研究に特化したものでなければならないが、各種社会的要請にも柔軟に応じる運用体制の構築が必要であろう。さらに、砕氷船を継続的に運航するための人員、設備、運航組織の構築なども視野に入れる必要がある。早ければ2030年代には北極海で夏季の海水が消失することが予測されているが、冬も含めて通年で北極海に海水が存在しなくなる可能性は極めて低く、今後砕氷船の需要がなくなる状況は考えにくい。単なる砕氷船ではなく「研究専用砕氷船」として実体のある研究を行うには、ムーンプール、運航計画立案のための衛星データ受信システム、CTD観測システム・格納設備、Aフレーム、多目的ケーブル搭載ウインチ、ラジオゾンデ自動放球装置、化学・生物・地質各種分析・実験室(低温室含む)、同階層に実験室等を持つ低・広・長の上方開放型観測舷、船上での機器整備機能を備えた工作室、海水下を長期間航行可能かつ多数のセンサを搭載可能なAUV、試料採取も

可能なROV、長尺大口径ピストンコアラー、舷側からコアラーを投下するための大型クレーン、海底地形調査に使用するマルチビーム測深器、地層探査に使用するサブトムプロファイラー、テクトニクスや地球内部構造推定に使用する重力計や磁力計等の設置が望まれる。また、ムーンプールからより長い堆積物採取を可能にする海底鎮座型掘削装置による掘削が可能な事、および必要に応じて反射および屈折による地震探査装置等が搭載できる事等も望まれる。

日本が砕氷観測船を保有することで、日本独自のミッション型の研究が実施可能になる。例えば、重点海域を設定した特定のプロセスの理解を狙った観測研究の実施が可能になる。また、プラットフォームを基にしたプロジェクトなどで、多分野(大気-海水-海洋-古海洋-古気候-古環境-固体地球物理、生物-物理-化学)の日本人研究者のさらなる極域研究への参画と学際的な極域研究の発展が見込まれる。そして、国境にとらわれない観測計画を国際協力のもとに提案可能になる。既存の観測研究船と同様に、外国人の乗船希望者を受け入れる体制を整えておけば、国際共同研究が促進されると共に、世界と対等に研究を展開する事が可能となる。観測研究者や観測技術者の教育のみならず、航海士等の氷海操船技術向上も含めた、幅広い教育効果も大いに期待される。

表4 自国砕氷船を持つことの各種観測活動における具体的な意義

大気観測	海水上の高層気象観測による、中高緯度における天気予報の精度の向上
	北極航路上の船舶運航の気象情報提供
	MOSAIC等の大型国際プロジェクト立ち上げのためのフラッグシップ
海洋・海水観測	観測時期及び海域の選択に関する自由度(柔軟性)の飛躍的な向上
	氷上通年観測の実施(冬季海水域の観測の重要性)
	海水生成・融解期の物理・化学過程の現場観測の実現(氷上での越冬観測を含む)
	海水消失域との同期観測の実現(既存の耐氷船と連携)
生態系観測	海水結合モデルの再現性の向上(航路予測にも不可欠)
	表層から底層まで、氷の存在に影響されない生物観測の実現
	通年の海洋生態系観測体制の確立(現状の各国砕氷船相乗り体制では不可能)
固体地球・古環境・古気候調査	海洋生態系観測拠点の確立
	過去の海水分布・氷床分布の復元精度の向上
	海底地形図の精度の向上
	海水下海底拡大軸上の熱水系の探査
	北極海海底下内部構造の推定
	古環境・古気候研究の進展と将来の大規模掘削へ向けた事前調査
北極海形成過程の推定	

衛星は環境モニタリングだけでなく様々な目的で用いられており、また環境研究のために様々な衛星ミッションが実施されてきたし、近い将来にも計画されている。この節では、特に下部成層圏に関する衛星ミッションについて記述する。

気候変動の影響を鋭敏に受ける北極圏の環境変動は、海氷、積雪や氷河の減少から生態系の変動まで様々な時空間スケールで発生し、また、それらの変動が地球気候システムに影響を及ぼす。遠隔地かつアクセスが困難で、事象の時空間スケールが大きい北極圏では、同時的、継続的に面的な観測を行える衛星観測網が有用であることは言うまでもない。また、現場観測のスケールアップおよびバックアップ、モデリング研究との親和性の高さから、衛星観測網は今後の北極環境研究の発展的展開において必須の基盤である。加えて、地球温暖化とその気候変動への影響に関する研究をリードしてきた日本にとって、もはや責務といえる「地球環境の変動・変化を明らかにするための Climate Record とも呼ぶべき長期データの作成」に、衛星観測網は大いに資するものである。以下には、北極の地球気候システム研究のみならず、Future Earth 計画が掲げる社会の課題解決という面において、日本が貢献すべき衛星観測網の基盤整備に関して詳述する。

日本は、これまでも衛星観測網において大きく貢献しており、その代表例が AMSR シリーズである。世界最高の性能を誇る日本のマイクロ波放射計 (AMSR、AMSR-E、AMSR2) は、米国の SMMR、SSMI シリーズを引き継ぎ、北極圏における海氷・積雪・氷河氷床モニタリングを継続している。地球表面における“氷”の変化のモニタリングは、氷そのものの特性(面積、体積、移動速度)に関する研究だけでなく、地表面-大気間における熱収支・水収支変動や生態系変動の研究に必要不可欠である。現在、他国が新規マイクロ波放射計の開発を殆ど行っていない状況下で、その観測の継続において日本の役割は極めて大きい。また、SSMI シリーズに比して、AMSR シリーズは飛躍的に空間解像度を向上させ、極域研究に多大なるインパクトを与えてきた。極域の変動を精確に解析するには、より高い空間分解能が必要であり、また、北極航路の日単位モニタリングを行う上でも、現状の AMSR2 の空間解像度 (89GHz で 3~5km) を 2 倍にするとした技術的革新

による高解像度化とセンサの継続が望まれる。

さらに、氷の質量変動をモニタリングするには、日本独自のレーザー・レーダー高度計が必須である。現在、観測を続けている Cryosat-2 に加えて、米国は ICESat-2 を打ち上げ予定であるが、高度計の最大の欠点は空間方向にデータが粗であるために、氷質量の小規模変動を分解できないことにある。日本独自の高度計と他国の高度計の協力による、シームレスかつ高解像度な合成高度データの取得は、氷河・氷床、海氷、積雪の質量変動モニタリングを介して、地球規模でおきる水循環変動の研究に多いに寄与するものである。加えて、氷河・氷床の変動監視には、光学・合成開口レーダー (SAR) の整備も不可欠である。たとえば、高解像度の可視ステレオペア画像は、精密 DEM (digital elevation mode) に基づいた氷体積の変動測定に大きな成果が期待できる。したがって、ALOS/PRISM 後継機の開発と打ち上げが急務である。また、光学センサ・SAR による氷流動速度の測定は、氷河・氷床変動のモニタリングに必須である。

2014 年打ち上げ予定の ALOS-2 に搭載される PALSAR-2 (L バンド SAR) は、他国の SAR 衛星とは異なるユニークなもので、氷河・氷床モニターにとっても極めて有用である。実際、ALOS/PALSAR は南極大陸の流動速度分布の取得において主要な役割を果たしており、ALOS-2 データも世界の氷河研究者から期待されている。今後も国産衛星による高時空間解像度のデータ取得が望まれる。また、250 m 解像度で高頻度に全球を観測可能な光学センサ (波長帯: 可視~熱赤外に 19 チャンネル) による積雪物理量やアルベドの測定も、温暖化に伴い急変しつつある両極並びにヒマラヤ域の積雪涵養・消耗プロセスの解明に大変重要である。2016 年度に日本が打ち上げ予定の GCOM-C1/SGLI は、全球の積雪域の面的・質的な変動を観測し、数値気候モデルの陸面過程の改良に貢献するものと期待されている。さらに、近年 GRACE 衛星によって大きな成果を挙げている衛星重力測定についても、国内での開発検討を進めるべきであろう。

北極圏の気候システム形成の解明には、地球放射収支と水循環に大きく関与する雲の高精度の観測とエアロゾルの観測も重要となる。静止衛星を中心に利用する ISCCP や AQUA 衛星に搭載された MODIS センサ等

受動型衛星による観測が行われており、全球観測としては、気候モデルの検証と改良にも一定の成果を挙げた。しかし、極域においては地表面アルベドの問題等受動型センサ特有の問題によって雲量等の巨視的な物理量に対しても雲観測精度には限界があった。これらの限界を克服するため、2006年よりアメリカを中心とした雲レーダーを搭載した雲観測衛星 CloudSat と、ライダーを搭載した CALIPSO 衛星が観測を開始した。これらの衛星は、他の Aqua 衛星等とともに、A-Train という同じ軌道上をわずかな時間のずれで観測するというコンセプトで運用されており、このため複数の衛星を組み合わせて利用した解析を実施しやすいという特徴を持つ。CloudSat 衛星では 94GHz 帯の雲レーダーを搭載しレーダー反射因子の観測が可能であり、雲と降水の鉛直分布を水平と鉛直方向にそれぞれ 1.1km、鉛直 240m 毎にデータを提供する。CALIPSO に搭載されたライダーは、可視と近赤外波長の 2 波長を持ち、可視波長では偏光特性も取得可能であり、水平と鉛直は下層と上層で異なるが、もっとも細かい場合では水平と鉛直方向に、それぞれ 330m、30m 毎にデータが提供されている。両方のセンサでは雲を観測することが可能で、これらのデータ解析から、従来できなかった雲の多重層の巨視的情報や、鉛直層ごとの氷か水の相状態に関する情報を得る事ができるようになった。また、CloudSat と CALIPSO を複合利用することで、雲の放射収支や水収支に対する影響評価の定量的な把握に不可欠な、雲微物理特性を求めることが可能となった。

CALIPSO のライダーに関しても、2 波長の後方散乱特性や偏光解消度から、エアロゾルの種類ごとの消散係数を求めることが可能となっており、ライダーのアルベドによらない観測の特性を生かして、海陸両方で高精度のエアロゾル特性の抽出が可能となっている。これらの衛星は極軌道であり、観測時刻は固定されている。このため日変化やより詳細な情報を得るためには、地上における能動型測器による雲とエアロゾル観測が重要となる。国立極地研究所は、ニーオルスンで、従来よりライダー観測を実施してきたが、これに加えて、95GHz 帯のドップラー機能を有する雲レーダーを配備した観測を昨年度より開始した。GRENE プロジェクトでも、これらの地上観測を取り込んだ集中観測を 2014 年度夏季に

実施予定である。

2016 年度に打ち上げ予定の日欧共同ミッションである EarthCARE 衛星は、初のドップラー雲レーダー (CPR) と高分解能ライダー (ATLID)、多波長イメージャー (MSI)、そして広帯域放射収支 (BBR) の合計 4 つのセンサを搭載する予定である。EarthCARE の雲レーダーは、CloudSat よりレーダー反射因子で約 7dB の高感度化とドップラー機能を実現し、ATLID の高分解能ライダー機能と共に、雲微物理特性抽出や鉛直流や雲粒子落下速度等新たな物理量抽出へと道を拓くと期待されている。この EarthCARE 衛星の重要な地上検証サイトとしても、国立極地研究所のニーオルスン基地における地上観測網は重要な役割を担うと期待されている。

一方で、地球温暖化に伴う炭素循環・生態系変動のモニタリングも欠かせない。これらのモニタリングは、米国の MODIS、SPOT Vegetation や VIIRS に代表される可視(近赤外・熱赤外)域センサで行われている。これらのセンサは、大気に関する特性(雲、エアロゾルなど)も観測し、放射フラックスや放射強制力の研究に利用されるだけでなく、可視域センサの精度を決める重要なプロダクトである。上記の可視域センサにより、陸域では、葉面積指数(単位土地面積あたりに存在する緑葉の片面の総面積)の地理的分布と変化、春から秋までの成長季 (growing season) の推定が可能になり、炭素循環の理解に重要な年間の生産量の把握ができる。さらに、推定された植物の季節性などからは、各地域の植生の群系や植生機能型¹⁵⁰の分布の推定も可能となる。また、前述の ALOS に搭載された AVNIR-2 と PALSAR は森林伐採をはじめとする土地被覆変化の研究や炭素循環中のカーボンストックの一つである森林バイオマスの推定研究を進展させてきた。同様に海域でも、深度方向観測の制約はあるものの、可視域(海色)センサは生態系モニタリングに必須な「生物情報」を取得可能な唯一の衛星センサであり、クロロフィル *a* バイオマス・純一次生産量だけでなく、海洋植物プランクトングループ組成¹⁵¹変動の研究に大きく寄与している。さらに、光学モデルの発達により、北極海において高濃度で存在し炭素プールの一つとして重要な有色溶存有機物 (CDOM) の推定と研究が発展してきた。しかし、

¹⁵⁰ 植生機能型: Plant Functional Type (PFT)

¹⁵¹ 海洋植物プランクトングループ組成: Phytoplankton Functional Types (PFTs)

現状では米国のセンサに依存しており、即時性、独自性で遅れをとっている。日本の北極研究における分野間連携体制の構築とその強化において、過去の ADEOS シリーズで培った技術を活かし、日本独自の可視域・熱赤外センサを開発してモニタリングを継続することが必要である。日本では上述の GCOM-C1/ SGLI が打ち上げ予定にあり、陸域・海洋(特に、沿岸域・氷縁域)における生態系変動研究への寄与が期待される。

日本の北極研究では、すでに多岐にわたって衛星観測を利用する土壌が醸成されており、今後は高感度・高解像度・多波長といったセンサの高度化が望まれる。しかし、統計的有意性を伴った議論を可能にするには、

航空機

航空機観測は地球科学の広い分野にわたり、きわめて有効な観測手段の一つである。特に、大気科学においては直接観測として、また、植生、氷厚、重力場、地形等の研究分野では、上空からのリモートセンシング観測として、必要不可欠な観測手段である。

大気科学では、地上観測は固定点での観測であり、船舶観測が平面的であるのに対して、航空機は 3 次元的空间での観測が可能なることから、大気構造の立体的詳細観測に有利である。航空機観測といえば固定翼が主流であるが、回転翼いわゆるヘリコプターも含まれる。しかし、ヘリコプターは観測すべき大気場そのものを乱す可能性があることから遠隔観測に限られることが多い。航空機を飛行体の一つと考えた場合、他に、飛行船や自由気球、係留気球を用いた観測も有効であり、それぞれの用途に応じて使い分けられる。近年、グライダー(動力を持たない滑空機)の利用も進められている。

航空機観測においても研究のためには最先端の装備が要求される。大気観測機器としては、微量気体、エアロゾル、雲粒子等の直接測定機器やサンプリング手法の開発、およびレーダー・ライダーを中心とする遠隔測定機器の開発、整備も強く望まれるとともに、空間的に密な大気観測を可能にするようなドロップゾンデシステム等の整備も重要である。その際、機器の小型・軽量化、省電力化は常に重要な課題である。

海氷観測機器については、曳航式の電磁誘導式氷厚計(EM-BIRD)による氷厚測定や 3 次元レーザーキャナーによるラフネス測定等が期待されている。これらの装置は回転翼と固定翼の両方で運用が可能であ

同じ設計思想に基づく衛星観測が長期にわたり続くことが必須である。また、以上に述べた地球観測衛星以外に、ARGOS に代表されるトラッキング・モニタリング衛星やイリジウムなどの通信衛星は、北極における移動体、ブイによる遠隔観測やリアルタイムな情報収集、発信に必須の基盤である。しかし、その利用に際して、研究者各人が契約手続きや高額な利用料等、様々なコストを払っているのが現状である。今後は、それらの窓口を一本化することにより、経済的・時間的コスト削減を図ることが望まれる。また、このコスト削減は、RADARSAT など地球観測を目的とした商業衛星のデータを購入する場合でも同様である。

り、現在ドイツのアルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所が航続距離の長いバスターボ型の Polar-5 と Polar-6 の 2 機を所有し、春季の北極海において EM-BIRD による広域観測を実施している。

氷床の内部 3 次元構造、基盤地形は、氷床流動のメカニズムを探る上で重要な情報を提供することになるが、そのアイスレーダーによる電波探査は、人工衛星では無理で、航空機によらねばならない。

また、北極域での航空機による磁気・重力測定やレーザー測量といった、固体地球科学に関する観測は、ドイツをはじめカナダやデンマーク等の国々で実施されている。これらの観測も、回転翼と固定翼航空機の両方で実施可能であり、今後は回転翼航空機を使用した高空空間分解能のデータ取得が望まれる。さらに、北極圏はアクセスの困難さから、南極とならんで野外調査データの乏しい地域となっている事から、地形地質や測地等の現地調査を可能にする、回転翼航空機等の活用も期待される。

欧米では大学や公立研究所等の研究機関が独自に観測専用機を所有、運用することはごく一般的に行われているが、日本ではそのような状況には至らなかった。かつて唯一、国立極地研究所が南極での運用のために単発航空機を所有し大気観測にも用いられたが、その運用もすでに終了して久しい。それ以外、日本の研究機関による大気観測はすべて民間航空機を借用する形で実施されてきた。このことが、日本の航空機観測が发展せず、欧米諸国に比して航空機用観測機器の開発が著しく遅れたことの一因とも言われる。そのた

め、今後日本でも独自に観測専用航空機を所有し運用する体制が強く望まれる。その際、観測に用いられる航空機は観測高度、速度、飛行距離によって使い分けられる必要があるため、飛行性能の異なる複数機の運用も必要となるであろう。このような体制作りにおいては、航空機観測の経験豊富な欧米諸国との国際協力も不可欠である。広い極域をカバーするには航空機ネットワークが重要な役割を果たす。また、北極は日本から遠隔の地であるので、航空機の運用には北極圏あるいは

その近くに運用基地を設けるが必要になるであろう

北極域では、無人航空機の利用も有効であると思われる。特に、極域で特徴的な混相雲を対象とする航空機観測では過冷却水滴の着氷により雲内飛行の危険性が増すことから、安全性の面からも無人航空機は極めて有用である。近年、無人航空機は大気観測でも広く用いられるようになってきており、日本でもそのノウハウが蓄積されつつあることから、今後、この分野のさらなる発展を期待したい。

海外の研究・観測拠点

a. はじめに

北極域の環境は、気候に対し敏速に反応する要素（例えば、植生、海氷、氷河）と緩慢に反応する要素（例えば、永久凍土、氷床）が複雑に絡み合って成り立っている。北極域環境の理解にはこれら諸要素の動態を個別に長期観測するだけでなく、要素間での相互作用システムを紐解くためのプロセス研究や、影響評価のための実験的観測も求められる。さらに、広域的な環境変化を理解していくための国際的な協力体制も構築していかなければならない。

このような多様な観測活動は、北極域における環境研究の一つの重要な基盤といえる。基盤構築にむけて日本の研究者コミュニティは、国際的な方向性や役割分担を強く意識したうえで拠点を設立、整備し、持続的に維持していかなければならない。また、北極域における日本の観測は殆どの場合他国における活動であることから、国際的な趨勢への対応に加え当事国の利益、意向も汲んで実施されることが重要である。

日本の研究者コミュニティはこれまでも、北極域にて様々な観測活動を行い、そのための拠点を築いてきた。しかし一方で、個々の研究者が関心をもつ事象に応じて、観測対象とされる空間・時間規模は渾然としていた。ここでは、これらをおもに運営体制や機能、時空間規模などの視点から整理、分類したうえで、近年の国際的な協働観測の趨勢も踏まえつつ、今後の発展について記述する。

b. 観測・研究施設の種類

拠点を研究拠点と観測拠点とに分類した。加えて広域を対象とした観測の機能、対象についても述べる。

(1) 観測拠点 (Observation base)

観測に関する共同研究を実施できる施設であり、以下の性格を持つ。

① 2カ国（ないしそれ以上）が共同で形成し、協定をもとに運営し、協定に基づき機材の持ち込み、試料・観測資料・データの確保や持ち出しが可能である。

② 作業空間、現地管理者・研究者が配置され、現地滞在し研究・観測を実施する日本研究者等の研究・観測に協力する。

観測拠点の種類としては、次の2種類に分類できる。

(a) スーパーサイト (integrated site) : 多様な分野からなる持続的観測を実施することが可能で、一定の観測基準に基づいて行う設備が揃っている拠点。衛星やモデルの較正や検証に有効なサイトとなる。人員の訓練も含め、長期に維持管理する体制が必要。

(b) レファレンスサイト (reference site) : 特定分野の研究について、それらに適合した地点（地域）で一定の観測基準に基づく持続的観測を行うサイト。長期に維持管理する体制が必要。

(2) 研究拠点 (Research base)

上記観測拠点の性格に加え、以下の性格を持つ。

① 現地国および日本の人材育成、相互の研究交流、共同解析の場である。

② 付近に観測拠点、広域観測網が存在する。

(3) 広域観測

① 移動観測 (periodic observation)

特定の分野の要素に関して、特定地域、特定時期に繰り返し行う観測。主として長期にわたるものを指す。これ

には、陸域に関する観測のみならず、陸上の観測拠点を起点とした沿岸の海洋観測もある。

② 観測網(ネットワーク)(network observation)

一定地域にて特定分野の観測を多数(一般的に10以上)の地点で長期的に行う観測。観測形態としては、機器を設置し時間的に連続した自動観測や、マニュアル観測など多様である。この例としては、凍土観測網や氷河地震観測ネットワークが挙げられている。

これら広域観測は、研究拠点をないし観測拠点をベースにして実施するケースが多いと考えられる。IASOA(国際北極大気観測システム)という北極圏全体のネットワークもあることも指摘しておく。

c. 観測拠点等の候補と運営

(1) 観測拠点・研究拠点候補

表5に観測拠点候補を研究分野別に整理するとともに、上記の拠点・観測の分類を行い、観測の現状を備考欄に記した。また、各拠点がどの研究テーマに関係する拠点であるかも示した。図65は、これらの位置を示した地図で、四角で示した範囲は、遠い将来考える拡張候補領域である。表6に分野別の観測項目等を示した。国際動向や期待される国際分担を考慮した上で、日本が進める重点プロジェクトによって、これら拠点の充実・発展の優先順位を決めることになる。

これらの内、現在でも研究拠点に近い性格を有する地点、あるいは要望がある地点は、以下の拠点である。

① スパールバル・ニーオルスン他

ノルウェー極地研究所が主催し、多くの国が参加する国際共同観測基地であり、国立極地研究所が1991年以来拠点を設置している。多分野の研究が行われたが、現在は、温室効果気体モニタリング、雲・エアロゾル観測、雪氷サンプリング、ツンドラ生態系長期監視活動、環北極大気循環の定点観測点、超高層大気観測などを実施している。国際共同活動の拠点として機能しており、この拠点を維持・発展させることが、わが国の責務を果たす上にもプレゼンスを高める上にも必須であろう。SIOS(スパールバル統合観測システム)により国際共同研究もこれから強化される予定であり、日本の基地機能拡充が重要なプレゼンスとなる。

② 東シベリア・ヤクーツク

JAMSTEC(海洋研究開発機構)、北海道大学、名古屋大学等が1990年以来、植生、凍土、温室効果気体、

水文、雪氷等の陸上観測を行なっている中心的な場所であり、そこを起点にして北極海沿岸や広域に観測点を展開している。1997年以降タワー観測を実施し、現在ではオランダも関与し、GRENEでも新たな研究者が参加している。WMO/GCW(全球雪氷圏観測計画)のinitial reference siteとなっている上、INTERACTの地点にもなっている。ティクシ等、北極海沿岸に展開する複数のフィールドステーションを共同利用する場合の拠点ともなる。

③ アラスカ・フェアバンクス

1997年以来、JAXAおよびJAMSTECが、フェアバンクスのアラスカ大学・IARCを拠点に共同研究を実施してきた。現在、両日本機関の関わりは縮小方向にあるが、観測拠点・移動広域観測を含め人材育成などの実績が多い研究拠点の性格があり、今後も研究拠点としての性格を維持すべきであろう。

さらに、今後の利用が期待できる地点として、カナダ北極圏のケンブリッジベイのCHARS(Canadian High Arctic Research Station)、ロシアのセーベルナヤゼムリヤのバラノバ基地などがあげられる。大気、ツンドラ、雪氷観測のほか、海洋への観測アクセス性が高い。

(2) 観測拠点等の運営

研究拠点および観測拠点で長期的・大規模な拠点は、国内のしかるべき中核機関がその基本部分を担当し、それ以外は、各プロジェクトで対応するのが適当である。

また、陸域において近隣に他国、現地国の他の観測点がある場合には、日本が関係する研究拠点、観測拠点を中心に、ある広がりを持った国際レベルでの「特定観測地域」なる概念も必要である。

これら研究拠点、観測拠点は、以下に留意し運営する必要がある。

- 1) 研究の効率、利用者の便宜の点から同一機関が維持・運営に当たることが好ましい。
- 2) 長期観測が重要であるため、基本運営費は競争的資金ではなく特定機関の運営交付金でまかない、安定していることが望ましい。
- 3) 観測拠点等での各分野の観測項目に基準を設けデータを高度化する必要がある。
- 4) 各拠点で、研究者間の相互乗り入れがしやすいような仕組みにする。

表 5 研究拠点等の現況と候補地

地域	拠 点	大気	陸域 (生態、水を含む)	雪氷 (凍土、氷河、氷床を含む)	海洋 (沿岸、海氷を含む)	超高層	拠点と観測の種別		テーマ番号	備 考
							現状	将来		
①	ニーオルスン (スバルバル)	○	○	●		○	B-1	A, B-1, D	1, 3, 4, 6, 8, 10, A	日本を含む多国の観測点あり、研究拠点候補
①	ロングイヤービン (スバルバル)					○	B-2		10	EISCAT(日本参加)スバルバル大学UNIS
①	氷上基地、他	●		●	●			B-1	1, 2, 3, 9	ロシアの氷上基地は停止。Baranova 基地を再開。
②	トロムソ (ノルウェー)					○	B-2		10	EISCAT(日本参加)
②	ティクシ (ロシア)	●	○	○	●		B-2, C, D	B-2, C, D	1, 2, 3, 4, 8, 10, 12	米露基地、独露共同観測点あり。GCWsite候補。海洋観測可
②	ヤクーツク (ロシア)	○	○	○			B-1, C, D	A, B-1, C, D	3, 4, 8, 12	日露共同観測点あり、GCWsite候補。研究拠点候補。
③	フェアバンクス (アメリカ)	○	○	○		○	A, B-2, C, D	A, B-2, C, D	3, 4, 8, 12	JAMSTEC-IARC共同観測点あり。研究拠点候補。
③	バロー (アメリカ)	●			●		B-2		1	アメリカの観測施設多し
③	ユーレカ (カナダ)	●	○			●		B-2	1, 3, 8, 10	
③	ケンブリッジベイ (カナダ)		●	●	●	●		B-2, C	2, 9	カナダ新基地あり。海洋観測可。
④	サミット、他 (グリーンランド)	●	○	○			B-2, C	B-2	4, 6, 11	

地域： ①：北極海域、②：ユーラシア、③：北米大陸、④：グリーンランド

現在の活動の有無： ○：日本活動あり ●：要望あり

拠点の種別： A：研究拠点、B-1：観測拠点(スーパーサイト)、B-2：観測拠点(レファレンス・サイト)、C：移動観測、D：ネットワーク

テーマ番号： 1～12、本文のテーマ番号に相当

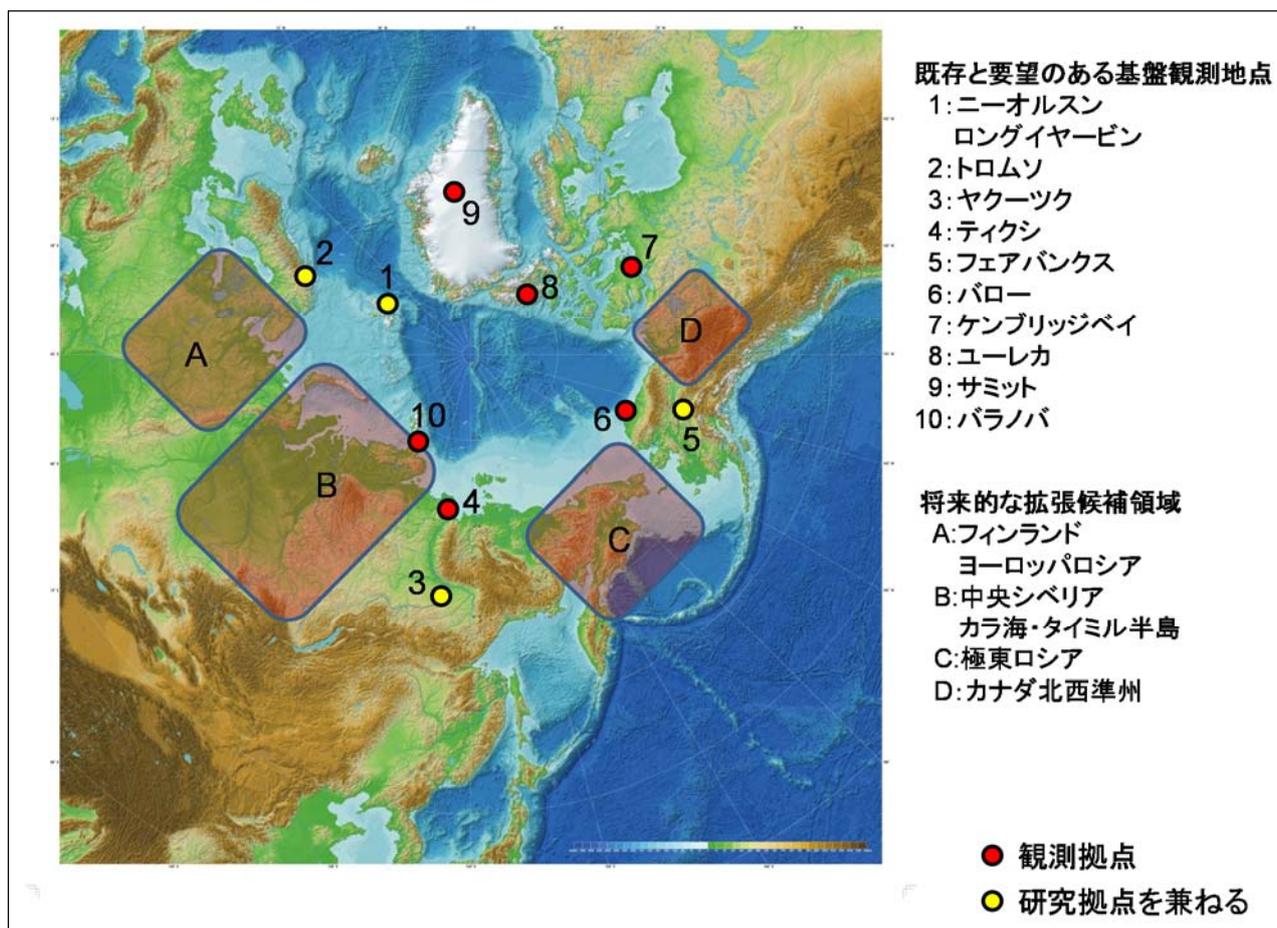


図 65 観測地点等の位置

表 6 観測拠点に必要な分野別の観測項目、設備と体制

	大気	陸域 (生態、水を含む)	雪氷 (凍土、氷河氷床を含む)	海洋 (沿岸、結氷を含む)	超高層
項目	水蒸気 降水 雲 放射 温室効果ガス 短寿命成分 エアロゾル 気象要素	諸気象要素 諸雪氷要素 地温 土壤水分 土壤有機物 植生パラメータ 陸面フラックス (温室効果気体含む) 動物生活史 (移動体追跡)	雪氷分布 積雪面積 積雪水量 密度 雪質 不純物 降水(降雪)量 各種気象・放射要素	二酸化炭素 (炭酸系物質) メタン 汚染物質 海水温・塩分 溶存酸素 栄養塩 微量元素 動植物プランクトン 微生物 海鳥・海洋性哺乳類	太陽波動の活動度 超高層大気温度変動 大気微量成分
設備	地上気象観測機器 高層ゾンデシステム 係留装置 放射計 各種分析計 ライダー レーダー 計算機 無人航空機	スーパーサイト 機器倉庫 サンプル処理室 スノーモービル ボート 各種センサー データ記憶装置 観測タワー	掘削機器 安全通信機器類 各種センサー データ記憶装置 自動大気・陸域・雪氷 観測装置	研究室 実験室 宿泊所 小型船舶 海水汲み上げ装置 自動採水器 係留系 耐氷船 AUV	Naライダー レーラーライダー 光学観測機器 HF・VHFレーダー 流星レーダー 磁力計 GNSS受信器 電磁波動受信器
体制	衛星地上検証 長期モニタリング サンプリング 機器維持	リエゾンオフィス 遠隔地機器開発 情報集約センター 先住民との繋がり	情報集約センター 氷河地震観測ネット ワーク GTN-Pとの連携	国内耐氷船 IARCとの連携 砕氷船・耐氷船の国 際利用	EISCATへの参画・ 利用 レーダーネットワーク

データおよびサンプルのアーカイブシステム

a. 背景

北極圏では温暖化によって様々な変化が起こっている。これまでの研究で、北極海の海氷面積の減少、シベリア域での地温の上昇、永久凍土融解、河川流出量の増加、積雪面積の減少等が明らかになってきた。また、これらの変化に伴う生態系及び人間活動への影響も懸念されている。北極圏の環境変化の実態とそのメカニズムは、いまだ解明されていない部分も多くあり、実態把握および、メカニズムの解明が求められている。これまでの研究は、大気、海洋、陸域の分野ごとに独立に進められてきたが、北極圏は大気—海洋—陸面—雪氷からなるシステムであり、それらのシステムはそれぞれ時間スケール、及び空間スケールの異なる現象を含む。これらの異なる時空間スケールでの変動、および異なる分野の変動が複雑に絡み合う北極圏の環境変動を明らかにするには、これら複数分野にまたがる観測データや研究結果を集積した統合データセットを用いた、新たなプロセスの理解、メカニズムの解明が求められている。データおよびサンプルのアーカイブシステムの整備は、ほぼすべての研究課題において重要な研究基盤と見做されて

おり、整備の優先度は高いと考えられる。デジタルデータ、サンプルに共通して、自前でアーカイブのシステムを持ってデータを管理し、研究者の相互利用を促進し、新たな研究につながるようなシステムを持つことが研究の地力を高めることにつながると考えられる。

b. データのアーカイブ

日本のデータアーカイブとしては、現状を踏まえて特に重要と思われる提言を以下に整理する。

(1) 安定なデータアーカイブ

データアーカイブは当然のことであるが、安定なシステムであることは最低限求められる条件である。ここで「安定」であるとは、データの冗長性が確保される(バックアップがある)ことだけではなく、アーカイブが長期間にわたって維持されることである。特に、研究プロジェクトの採否などに左右されないことは、データアーカイブの信頼性を確保する上では重要であり、時限のある短期のプロジェクトではなく、原則として恒久的な研究機関などによって維持されるべき性質のものである。

(2) データアーカイブの利便性

データアーカイブシステムは、データの提供側と利用側の双方にとって可能な限り使いやすいシステムである必要がある。データアーカイブシステムは、データ提供者以外の研究者から広く利用されるところに存在意義があり、利用側にとってデータの閲覧、アクセスが容易であることが重要である。このために、検索サービスの充実とデータクイックルックの整備はアーカイブシステムの生命線と呼べると考えられる。例えば、既に国立極地研究所の北極域データアーカイブ(ADS)などでも試みられているように、データ登録・検索機能の開発及び最低限の解析を可能にするデータ閲覧システムの開発は有効であると考えられ、今後も開発が継続されることが必要である。

データ提供側からは、データ提供の手間を減らし、提供を容易にすることが強く求められる。メタデータの充実はこの点で相反する部分があるが、データアーカイブのシステム側からのサポート体制を構築することでスムーズなデータ提供をしてもらえよう、環境整備が必要である。

(3) データの柔軟性

極域環境科学は学際的な広がりを持ち、データの形式もおのずから多岐にわたる。近年の環境研究においては、人文・社会科学的なデータも重要性を増しており、既存のデジタルデータのフォーマットに限らず、多様なデータ形式を受け入れられるような体制が望ましい。また、時間的あるいは空間的に高解像度のデータが取得されるようになり、これまでと比べても非常にデータ量の多い観測データ、モデル出力などが取得されるようになった。このような複雑多岐かつ多量のデータは、一般の研究者が取り扱うためには非常に労力を必要とし、利用性が低くなることが考えられる。今後データアーカイブは、複雑多岐かつ多量のデータを利便性よく使えるシステム構築を行うべきである。

(4) データレスキューの促進

北極地域は世界的に見ても、データ整備が遅れている地域であり、世界的には流通していないデータの収集・管理をすることが必要である。また、これらの地域で緊急に実行が必要なデータレスキュー(紙等書かれているデータで、適切に保管しないと地球上から失われてしまう危険があるデータを電子媒体として保存する)

作業をする必要がある。

(5) データの公開・流通

この数年、各データセンターでは、データセットの恒久的なリンクを保証するために各データセットの DOI の付与が進んでいる。DOI はデジタル化されたコンテンツを識別する文字列であり、データの流通性や活用度の向上、かつ恒久的なリンクを保証するには、必要なものである。現在、日本では学术论文や図書など限られたコンテンツにしか利用されていない。日本が主体として取得されたデータに関しても DOI を付与し、データの流通を促進する必要がある。

また、データの記載と公開を目的とする学術雑誌が、メジャーな出版社から複数創刊されている。主なものとして、Earth System Science Data (EGU)、Geoscience Data Journal(Wiley)、Scientific Data (Nature)を挙げることができる。これらの媒体は観測されたデータの公開を促す効果を持つのみならず、データレスキューのためにも有効であると考えられる。国内において欧文のデータジャーナルの創刊、あるいは既存ジャーナルの拡充という形で同様の媒体を設置することを検討するべきである。

(6) 国際連携

北極域には様々な地域や国々が存在し、北極域の環境を理解するうえではデータ利用の国際連携が必要となる。北極研究に関するデータベースは、北極圏国を中心に各国が独自に運用してきており、様々なデータセンターやデータポータルが存在する(NSIDC、CADIS、GCMD、GEO-Portal、GCW 等)。これを一つのシステムに集約することは現実的ではない。ただし、それぞれが連携することは極めて重要であり、メタデータの相互流通や、他のデータベースからの検索を可能にする機能を導入し、分散型のデータベースを国際連携で構築していくべきである。データマネジメントについては、現在 IASC(国際北極科学委員会)のデータマネジメント WG や SAON(持続可能な北極観測ネットワーク)で議論が始まったところであり、今後国際的な連携を積極的に進める必要がある。

(7) 北極域データセンターの必要性

データセットは、付随するメタデータによって管理されている。現在、情報技術の進歩・情報共通化の動きの

中で、このメタデータ format を統一する動きがあり、観測データを国際的なデータセンターの下に収集、蓄積する必要性は低くなりつつある。しかし、日本国内の研究機関および大学の現場観測分野では、データセット構築、公開というデータマネージメントに重きが置かれずに、他国のデータセンターに依存しているのが現状である。国内予算を用いて研究観測を行い取得したデータは、貴重な成果であり、独自に公開し、国内研究者の利便性を高める必要がある。しかし、これらの現場観測データを含めた個々の研究機関および大学が独自に行うには無理があるので、北極域環境研究の分野では日本独自の統一的なデータセンターを持ち、データを公開することが必要である。また、上述のデータの公開・流通、国際連携は北極環境研究を進める上で日本として統一的に進める必要があり、データセンターの機能として組み込むべきである。

c. サンプルのアーカイブシステム

北極環境研究においては、サンプルの取得とその分析に基づく研究も多く含まれ、サンプルを長期間、安定にアーカイブできる仕組みは非常に重要である。これまでに、あるいは今後取得されるサンプルは研究の資産であり、これを継承し、継続的・長期的な研究を可能に

することの重要性を考慮すれば、各研究者の現在の所属機関とは独立な機関として、新たな分析を可能にするための試料保管・配分システムを持つことが望ましいと考えられる。この場合、可能であればサンプルを分割して、一方を科学博物館等の機関で管理し、もう一方をサンプル取得者が管理するなどの工夫が必要となる可能性がある。言うまでもなく、このような独立機関・あるいは博物館などについても資金と人材の安定的な確保が必要であり、10年程度ではなく、さらに長期的な視点で考慮されるべきである。

同時に重要となるのが、サンプルのメタデータである。取得される、または、取得されたサンプルに関してもメタデータの作成を行い、十分な情報を公開しかつ情報へのアクセスを容易にすることによって、サンプルの存在を研究者に知らせ、分析及び研究を推進する必要がある。

サンプルの種類・性質によって、必要とされるアーカイブのシステムは大きく異なるが、メタデータについては、データ形式に十分な柔軟性があれば、前述したデータシステムによって収集・公開可能と考えられる。データセンターの役割として(数値的な観測データのみならず)サンプル情報の収集・管理も考慮されるべきと考えられる。

人材育成

a. 日本における北極環境研究に関する人材育成の現状

北極環境研究に限らず、日本国内における人材育成は根本的な問題を抱えている。多くの博士後期課程修了者が雇用期限の付かない研究職に就くことができず、いくつものポストドクター職を渡り歩いており、その影響もあって、博士後期課程に進学を希望する学生数は極端に減少してしまった。この現状を打開する方策まで示唆することを目指す。多様な進路に適合する人材を育成し、それを成長の糧にする産業に結びつける。自然科学だけでなく、人文社会科学の専門家を育成し、特に双方からの統合したアプローチを可能にする育成方策を立てる必要がある。さらに、環境変化の影響を受ける北極人間社会に関する知見の涵養も重要である。また、日本は北極に領土を持たないので、北極環境研究において現場観測、現地調査を実施するには、国

外における観測・フィールドワーク研究活動が必要となる。日本人の学部生、大学院生の多くは、海外に出る選択肢を取らないため、北極は遠い存在になっているが、その障壁を低くする策を提案する。

b. 人材育成における国際的な活動

北極環境研究に関しては、国際協力として次の3つの組織が活動を行っている。

(1) APECS (Association of Polar Early Career Scientists)

両極を対象とした研究を行っている学生および若手研究者が自ら運営する組織で、IASC、SCARなど多数の組織が資金を支援し、様々な活動を行っている。APECSに参画し活動に参加することは、研究者を目指す若手のキャリア形成に有効であると考えられる。JCARはAPECSの日本国内組織の立ち上げを支援

し、準備を開始した。今後はAPECSおよびその国内組織への活動資金の支援を行なっていくべきである。

(2) 北極圏大学(University of the Arctic)

北極圏を中心としてメンバー校、準メンバー校あわせて130校以上の大学のネットワークで、北極圏大学としてのコース(講義および実習)を多数提供している。日本国内では、北海道大学が2011年に準メンバー校として登録され、アラスカ大学などと連携して活動を開始している。

(3) UNIS(The University Centre in Svalbard)

スバルバル諸島のロングイヤービンにあり、国立極地研究所がオフィスを設けている。ノルウェーの大学連合が1993年に設置した世界最北の大学である。20名近い専任教員がおり、学生はフィールド科学を体験できる。世界中から1年に約300名近い学生がコースを選択しているが、我が国からは若干名である。

c. 人材育成に関する今後の検討課題

研究者の育成を目的にした支援体制に加えて、専門技術の伝授とリテラシーの確立についても提案をする。以下に述べる取り組みに対して、研究者や研究機関が個別に実施するだけでなく、国内の大学の連携、および我が国と北極圏の大学間の連携も必要であり、JCARがそれらの連携の橋渡しをして、我が国の北極関係者全体としての取り組みを進めることで、より効果的な人材育成を行う必要がある。

(1) 研究者の育成

国内の大学間、および我が国と北極圏の大学間の連携を通し、以下のプログラムを実施する。

- ・インターン制度を設け、研究活動への大学院生・学部生の参加を可能にする。
- ・サマースクール等を実施し、研究を開始した学部学生、大学院生の教育をコミュニティで実施する。
- ・キャリアパスの開発、紹介、実習によって、学位取得後の進路選択肢を拡充する。
- ・人材バンクを作り、大学や知り合いの枠を超えてPIと学生をマッチングさせる。
- ・GRENE 若手研究者派遣支援事業の実施、およびそ

の後継事業として、海外の研究機関や大学での研究活動を目的とした派遣制度を設ける。

- ・北極圏でのフィールドワークを支援する助成制度を設ける。

(2) 国際的な連携

JCARとしてはAPECSの活動に協力すると共に、国内の大学とともに北極圏大学、UNIS、その他の北極圏の大学との連携強化にも協力することによって交流をスムーズに進める。さらに、IARCの利用も有効であると考えられる。学生を派遣し滞在させる場合、安全確保は最重要課題であるが、IARCはその体制も整っている。また、英語圏であるためコミュニケーションが比較的容易である。

今後の取り組みには、ARCUS¹⁵²の人材育成の取り組みも参考になると考えられる。例えば、TREC¹⁵³は学校の先生を対象にフィールドやそこでの研究活動を体験してもらい取り組みで、日本においても実施できれば研究活動を伝える有効な手段となる。

我が国が率先して進めるべき国際的な取り組みのひとつは、先住民の若手研究者を対象にした招へい制度を立ち上げて、人材育成に貢献することである。その成果が、ひいては我が国の若手研究者を国外で育成する国際連携に結実するであろう。もうひとつは、非北極圏、特に東アジアの若手研究者を招へいすることによって、長期にわたる国際的な共同研究と国家間連携の基礎を築くことである。

(3) 専門技術の継承と発展

大学も含めた研究機関では、効率的な人員の配置という号令のもと、技術者が削減されてきた。しかし、先駆的な研究の展開を支える一翼は技術革新であり、北極環境研究にはモデリング、観測手法、衛星データ解析、化学分析、遺伝子解析などの高い技術能力と、新たな発展が必須である。予測モデルの開発と高度化、各種パラメータの高精度分析、船舶観測の高度化、観測項目の多様化など、技術を向上させる基盤を確保しなければならない。継承と発展の最も基本的な条件は、技術者の養成と雇用の確保である。また、技術者と研究者の隔壁を下げるには、多様な評価軸を提案していくこと

¹⁵² ARCUS: Arctic Research Consortium of the United States

¹⁵³ TREC: Teachers and Researchers - Exploring and Collaborating

が有効であろう。

技術の急速な発展に対し、異なる研究分野間の情報交換が追いつかず、ある分野ですぐれた技術を利用できないことも起こりうる。異分野間の連携が情報を迅速に交換することに役立つ。異なる研究手法を使う専門家間の連携、例えば現場観測とモデル計算の連携においても、双方をつなぐ研究者と技術者の育成に力を注がねばならない。

(4) リテラシーの確立とアウトリーチ

小中学校の理科教育における地球環境の重視は、従来から強調されてきた。市民の理解力は情報公開の基礎であり、初等中等教育に携わる JCAR 会員を求め

る理由である。学校教育に携わる会員と知識や情報を共有することで、北極環境研究の重要性と魅力を、若い世代に正確かつ効率的に伝えることができる。それに加え、市民向けの講演会、サイエンスカフェ等により、小・中・高校生に最先端の研究の魅力を伝える活動にも尽力すべきである。北極環境研究の重要性を伝えるアウトリーチ活動を人材育成につなげ、北極環境研究に興味を持つ学生数を増やしていく。北極域は日本からは遠い存在であるが、人が住む都市や町があり、フィールドを体験するプログラムを組むことが可能である。体験の機会を提供することによって、野外活動の経験を積んだ学生を育てることができる。

研究推進体制

a. 整備の背景と目的

北極環境研究は複雑化、大型化しているが、それを円滑にそして効率的に実施し、多くの成果創出が可能な体制を構築することが重要になっている。そのためには、国内における研究推進の体制を整備する必要がある。

複雑化の意味は、科学的知見を必要とする社会分野が、科学コミュニティのみならず産業、資源等にも広がっていること、また、それに関係し諸政府機関が政策的な活動を活発化してきている、そして、国際的枠組みで捉えざるをえないことが増えていることを指す。これは、多くの国での国際的な動向であり、国内ではそれらの影響をも強く受け、変化している。このような北極域に関する状況は、南極地域の状況と異なり、この複雑化した状況の中で、しかも効率的・効果的な研究を推進することが求められている。これは、科学的真理の探究を行う場合でもコミュニティ以外との関わりが強く求められていることを意味し、これは新たなチャンスでもある。しかし、それを円滑に実施していくためには、研究における体制の見直しが必要となる。

b. 国際動向

北極環境の研究は、北極国、非北極国が協力し推進することが必須となっている。科学者連合である国際北極科学委員会 (IASC) を中心に、北極国政府が中心となった北極評議会 (AC) およびその関連団体、そして WCRP や GEOSS など北極域を関心対象の一部とする国際組織などが存在し、研究および事業の方向付け

や提言を行っている。日本における研究もそれらとは無関係に存在しえない状況となっているため、国際組織への日本の意見のインプット、国際組織の方針への協力など、日本が国際組織の動きに強く関与しなければならないことを意味している。

さらにその一環として 2 カ国間の協力要請が多々来ているのが現状であり、そのような枠組みに対応し、それらを通じた研究実施を検討する機会が増えてきている。また、ベルmontフォーラムのようにファンディングに関しても国際的枠組みが登場し始めており研究推進環境は、一層複雑化している。

これらの国際的な動きに集団として迅速に適切に対応するためにも、国内の体制を考えなければならない。

c. 国内研究推進体制の在り方

国内での体制は、これらを考慮し、以下の基本をもとに設計することが必要である。

- ・研究者が研究に必要な整備された共通の基盤をもとに、自由で斬新な発想により、新しい研究を実施できる。そのためには、なるべく多くの研究基盤を共同利用できる体制を整えるべき。
- ・国際的な枠組みと制約の中で、日本の研究者・機関が円滑に研究活動を行い、全体として国際的な分担を全うできる。
- ・国内における社会各層、他分野との交流、社会への成果還元を十全に行うことができる。

d. 具体的な体制

具体的には、以下の体制を強化することが望ましい。

(1) 中核機関を強化し、それを中心に、国内推進・実施体制が進むよう整備する。そのために、中核機関内に主要機関、関連団体からなる推進委員会を設置し、それが全体的な研究、ファンディング機関との協調、および基盤整備などを推進する機能を果たすのが望ましい。2013年の学術会議に対する大型研究計画の提案の中で、中核機関が「北極域環境システム研究拠点」の設置をうたっているが、このような提案は歓迎される。

(2) 研究基盤(観測プラットフォーム、海外拠点、機器、モデル、データ)を主要機関が分担し整備し、研究者・研究グループに供するため、機関に基盤整備を割り当てる。このために、新たな組織を立ち上げることも視野に入れるべきである。観測プラットフォーム、機器の一部やモデルの整備などは、全球の地球科学研究の状況との兼ね合いを考慮する必要がある。

(3) 基盤整備の要請に基づき、分野ごとの国内推進の分担を決め、研究の効率化を図る必要がある。日本の地球科学研究推進の現状を鑑みると、船舶を活用し研究を行う海洋研究などと、主として他国の陸上で研究を行う陸域・雪氷研究を推進する担当機関は別機関が中心となるのが適当である。それ以外の分野についても主たる担当機関を一定程度明確化し推進する必要がある。また、衛星観測は重要な研究手段でありながらも、研究者が利用するにあたり不備な面が多々あるため、国内のデータ利活用の体制を改善する必要がある。

(4) 北極域の環境変化は、相互作用の結果として発生しているため、システムとしての取り扱いが重要である。このため、研究分野間の情報交流を多くし学際的研究を通じて、現象に対して正確な理解に到達できるような体制面での配慮が必要である。

(5) 北極域の環境変化は、社会的影響が大きいことから、社会への科学的知見の普及と理解の向上を促進する体制の確保が必要である。国内の北極研究が一般向け・専門家向けにひと目でわかる場所(おそらくは Web ページ)の整備・維持が必要。

(6) 北極環境研究コンソーシアム(JCAR)ができて3年経つが、JCAR は北極環境研究推進に重要な役割を果たしてきた。短い期間でありながら中核機関・主要機関の状況、国内および国際レベルでの研究推進状況などが大きく変化してきたことを考え、長期的視野に立って今後の役割およびその在り方を検討する必要がある。

ある。

e. 研究基盤の準備・開発・維持

本章では、機器等の基盤の必要性、開発について記述してきたが、北極域については、まだこれらが遅れているのが現状である。寒冷地域であるということ以南極域と類似しているが、周辺を陸域で囲まれた北極海での現象が重要であること、また、周辺部には広大な陸域があり、またそれらが特定国の領土であることでのいろいろな制約を受けるという点で、南極とは大きく異なる。

本章では、数多くの提案が出されているが、当然資金が必要な事もあり、優先順位づけを行い、順次開発し、実用に供していく必要がある。また、効率化の観点から独自に開発するのが適当か、それとも海外の類似品を確保し、早急に観測に供するののかも検討する必要がある。

基盤の一つであるデータアーカイブは、国際的な課題であり、日本のみならず世界的な研究の効率化という観点からすると、早急に力を注ぐべき分野であり、今にもまして体制の整備が必要である。

すべての基盤については、その持続性を確保することが重要であり、それぞれの担当機関を明確化する必要がある。

f. 国際協力の促進

北極環境研究においては、過去にも増して国際協力および、そのための日本の研究者と研究環境の国際化が重要になってきたことを述べてきたが、上記の中核機関や関係機関や諸省庁などは、以下の点に留意する必要がある。

(1) 諸国際機関、諸外国、諸プロジェクトに関する情報の整備と流通の確保: 日本語による情報流通、専門家グループの形成を通じて適切な情報確保。

(2) 相談窓口を設け、国際的な研究企画を個別に具体的に支援。

(3) 日本研究者にとって共通性の高い諸外国との協定・協力方法の整備。

(4) ハイレベル(2カ国科学技術協定、AC、IASC)における協力活動の推進。

(5) 研究者および研究環境の国際化に関する取り組みの推進。

- ・研究者の早期からの企画会議等への参加支援。
- ・国際機関、プロジェクトなどの事務局への事務系、研

究系人材の派遣。

(6) 国際協力の促進の形として、ベルモントフォーラムのような国際的ファンディングなどは効果的と考えられ、

分野別研究機器等

a. 大気

北極域での大気観測の戦略として、長期的連続観測基盤としての地上観測体制の整備、人工衛星を用いた広域観測、船舶による洋上観測、航空機等による 3 次元構造の詳細観測などが考えられる。さらに、これらは相補的であることから、これらを組み合わせた総合的な観測形態が望まれる。

大気観測で用いられる機器は遠隔測定 (remote sensing) と直接測定 (in-situ measurement) に大別される。遠隔測定は、一般に電磁波 (主に、紫外域～マイクロ波領域) を利用した測定であり、観測対象からの電磁波を一方向的に受信 (受光) する受動型 (passive) 測器と自ら電磁波を射出し観測対象からの反射波を受信 (受光) する能動型 (active) 測器とに分けられる。また、直接測定では測定プローブや分析計を用いた現場観測だけでなく、現場で採取したサンプルを実験室に持ち帰り分析する場合もある。これらの様々な方法から観測対象や目的により最適の方法が取られる。

雲、エアロゾル、微量気体、降水 (雪) 等の大気成分や気温、湿度、風等の気象要素を観測対象とする地上設置型の大気観測システムを考えると、能動型・受動型リモートセンシングと直接測定とを組み合わせたシステムが必要である。能動型測器はこれまでの電波領域の周波数を用いたレーダーに加えて、可視域のレーザー光を利用したライダーが多く使用されるようになり、さらに多波長型、ドップラー方式、空間走査型の測器が、高精度での物理量観測やその空間変動を知る上で極めて有効であり、ドップラー雲レーダーと多波長偏光ライダーの同期観測は今では雲物理放射研究には欠かせないツールとなっている。受動型測器は、遠隔測定による物理量の定量化の高度化のためにはより広い波長領域をより高分解能で測定できる測器 (可視、赤外、マイクロ波分光放射計) が必要である。

二酸化炭素を含む温室効果気体の連続観測において、近年、微量気体の高感度精密測定の新技術として

2014 年段階で提示されている「自然と社会のテーマ」のみならず、北極域自然現象に関する持続的観測を含むことも重要と考えられる。

CRD¹⁵⁴分光法が広く用いられるようになってきた。この方式は、エアロゾルの吸収特性の直接観測にも応用され、大気化学分野での利用が今後一層盛んになると思われる。

雲粒子・エアロゾル粒子の直接観測は、航空機観測用プローブの開発によって大きく進展したが、それらの測器は地上観測用に改良されているものも多く、地上での長期連続観測に有効である。

温室効果気体や雲、エアロゾル、水蒸気等の大気成分による気候影響の研究では、精密な放射観測が基本となる。そのため、BSRN¹⁵⁵が放射観測の全球ネットワークとして展開されている。BSRN で定められた測定基準は放射観測の世界標準に位置づけられるので、北極域での放射観測もこれに準ずることが望ましい。ただし、放射観測のみならず、極地における大気観測は自然条件の厳しさから、その精度を維持するには、現地での観測機器の保守等に相当の努力を要する。

大気陸面間の水・熱・炭素交換のモニタリングでは、観測地点の充実が必要である。これまで FLUXNET と呼ばれる観測ネットワークが構築されているが、アジア (Asiaflux)、アメリカ (Ameriflux) やヨーロッパ (Euroflux) と比較して、極域での観測密度は極端に低い (2013 年 4 月時点で日本・韓国が計 40 点に対し、シベリアは計 3 点)。フラックスターによる観測データは現場の監視の他、大気モデルでは下部境界条件として利用可能である。さらに、近年ではデータ同化手法による大気モデルと観測の融合が試みられている。フラックスの空間的な観測密度の増加が極域における下層大気と陸面の水・熱・炭素循環を理解する上で今後より重要となっていくであろう。衛星観測にとって、観測から得られる物理量の検証は必要不可欠である。数少ない極地観測サイトは地上検証サイトとして重要な役割を果たす。

日平均気温、降水量や風速といった多くの陸面過程モデルを駆動するために必要な気象状態量の観測データは、国内外の研究機関によって収集・整備されてい

¹⁵⁴ CRD: cavity ring-down

¹⁵⁵ BSRN: Baseline Surface Radiation Network

る(例えば、シベリアでは、JAMSTEC による Baseline Meteorological Data in Siberia)。今後温暖化の影響が強く表れると考えられている極域のシグナルを捉えるため、地点観測を継続していく必要がある。高品質の観測のためには機器の定期的な整備が不可欠である。特に、雨量計と温度計に不純物が混入していないか、また、周辺環境が観測に適する場所であるかどうかについて半年に1度程度の頻度で見回りとメンテナンスが必要である。

雨量計による降水観測では、捕捉率を向上させる技術の開発が必要であろう。極域では降水が雪として観測される頻度が高く、風によって降雪が雨量計に入らない割合が大きい。正確な降水・降雪量把握のため、雨量計の改良や観測値を補正する統計手法の開発が望まれる。

b. 中層・超高層大気

(1) 欧州非干渉散乱レーダー(EISCAT レーダー)¹⁵⁶

北欧に国際共同にて設置・運営されている大型レー

ダーシステム(EISCAT レーダー)を用いて、下層・中層・超高層大気・電離圏・ジオスペース環境観測を実施する。EISCAT レーダーは、これまでに30年以上にわたる観測を実施してきたが、現在、大幅なリニューアル計画(EISCAT_3D 計画)が進められている。日本もこれに参加し、大気圏・電離圏(高度約1~30 km、60~1000 km)変動のモニタリング・3D 立体観測を実施する。日本独自の大型大気レーダーである MU レーダー(日本・信楽)、赤道大気レーダー(インドネシア)、PANSY レーダー(南極・昭和基地)と EISCAT_3D レーダーとを加えたレーダーネットワークを構築・整備することにより、地球環境研究のための極めて強力な研究基盤を得ることができる。

(2) 飛翔体観測、及び搭載機器開発

2015 年度、内部磁気圏観測衛星 ERG の打ち上げにより、高エネルギー粒子観測、プラズマ波動観測等、地球周辺のジオスペース環境の詳細なモニタリングが可能となる。このような宇宙空間からのジオスペース探

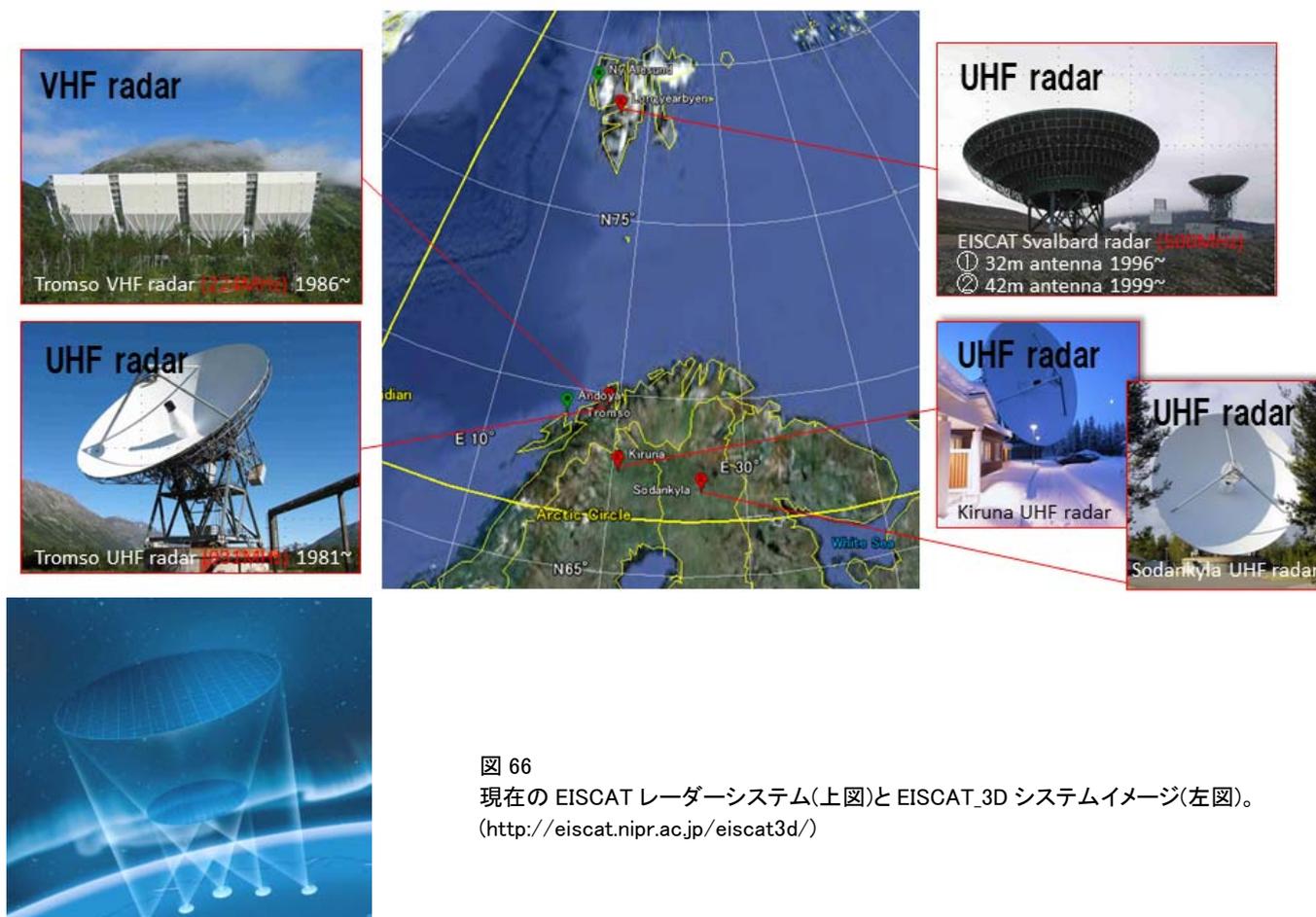


図 66
現在の EISCAT レーダーシステム(上図)と EISCAT_3D システムイメージ(左図)。
(<http://eiscat.nipr.ac.jp/eiscat3d/>)

¹⁵⁶ 欧州非干渉散乱レーダー: European Incoherent Scatter (EISCAT) レーダー

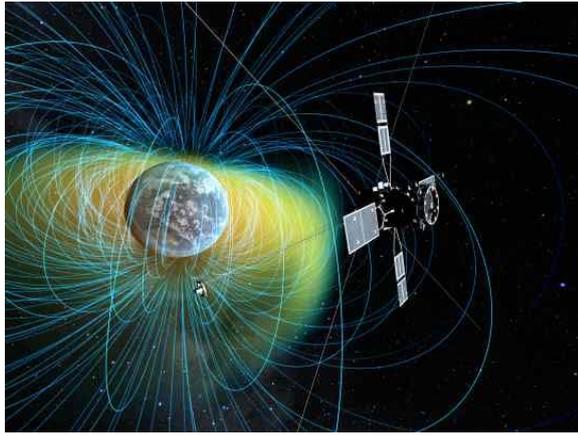


図 67 内部磁気圏観測衛星 ERG(左図: http://www.jaxa.jp/projects/sat/erg/index_j.html) と国際宇宙ステーションからの大気光観測(右図: <http://www.iss-imap.org/>)

査計画は、各国で精力的に進められており、同じく内部磁気圏を探索する Van Allen Probes(米国:2012 年打ち上げ)、Resonance (ロシア:2016 年打ち上げ)、VSX(米国:2016 年打ち上げ)、電離圏探査 Swarm (ヨーロッパ:2013 年打ち上げ)などがある。また、国際宇宙ステーション(ISS_KIBO モジュール)からの大気光観測により、高度 100 km、250 km 付近の大気変動のイメージング観測が実施されている。今後も同様の観測を継続的に実施し、次のステップとして複数衛星によ

る同時複合観測を実現する必要がある。最新技術を導入した宇宙機搭載用機器、例えば、赤外・可視・紫外・X 線撮像装置、加速度計、質量分析器、粒子計測器、その他のプラズマ計測器などの独自開発により、種々の衛星ミッションを実現する。ロケット・気球観測は、人工衛星が飛翔できない領域(成層圏～下部熱圏)で必要不可欠である。地上、衛星観測と連携し、また、国際共同によるロケット実験(例えば、ノルウェーとの共同観測は古くからの実績がある)を実施する必要がある。

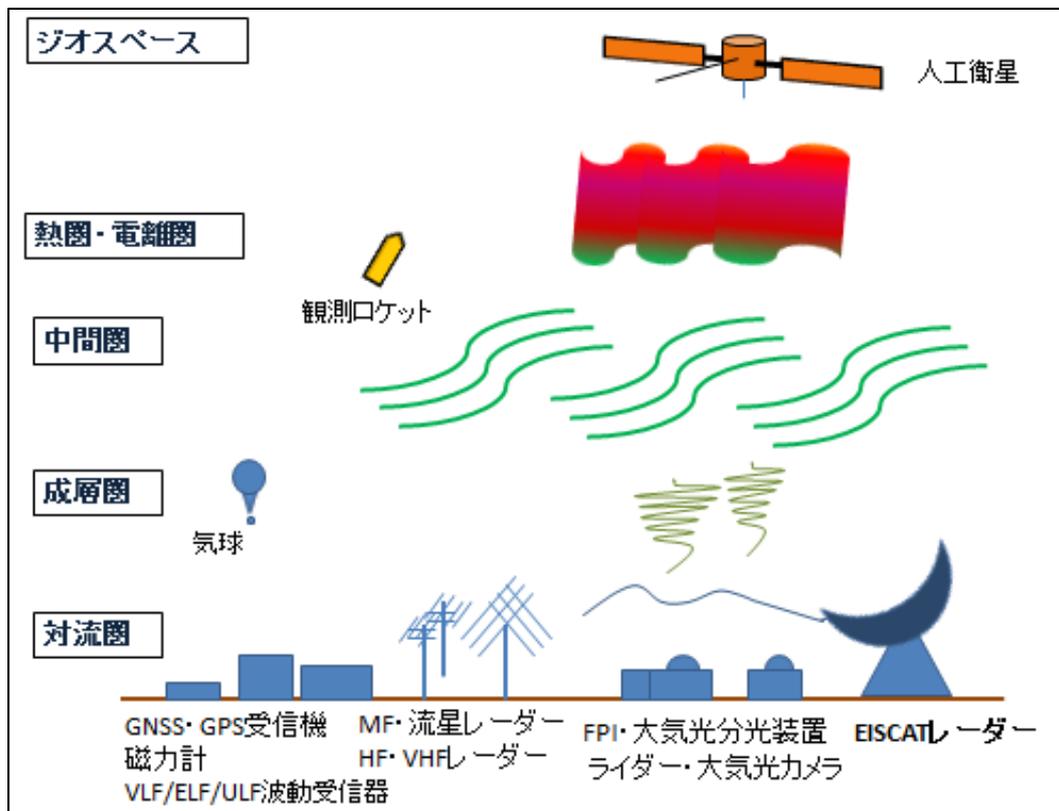


図 68 北極域観測ネットワークを構成する機器群

(3) 広域多点観測のための機器整備

北極域の大気重力波、プラネタリー波の中層・超高層大気での性質・役割を理解するため、高度70~100 kmの風速・温度を計測するMF・流星レーダー、ライダー、大気分光観測装置の開発・整備が必須である。また、電離圏変動や地球周辺の高エネルギー粒子の加速・加熱過程の理解のため、HF・VHFレーダー、磁力計、GNSS・GPS受信機、大気光カメラ、VLF/ELF/ULF波動受信器の開発・整備が必須である。経度方向に伝播・散逸する大気波動や、地球周辺を経度方向に周回する高エネルギープラズマの全体像を捉えるため、北極を取り囲む観測ネットワークとしてこれらの装置群を整備する。これらのシステムの構築・観測とシステム維持のための国内外の共同研究体制を確立する。

(4) 拠点観測のための機器整備

宇宙や下層大気からのエネルギー流入が中層・超高層大気へ及ぼす影響を理解するため、EISCATレーダーサイトなど、高精度な測定が可能な大型装置が配備された観測拠点に、上述の観測機器群を集中的に整備し、中層・超高層大気の総合的モニタリングを実施することも重要である。

(5) 基盤観測とデータ解析・モデリング/シミュレーションとの連携

上述の衛星・地上観測とシミュレーション研究との連携も重要である。データ同化などの手法開発、モデル

の高分解能化、素過程のモデリング、大規模計算のためのモデルのチューニングを随時行う。さらに、膨大なデータを解析するための環境構築や解析手法の開発、ソフトウェア開発を実施する。

c. 雪氷

北極の雪氷研究においては、現場における観測や試料採集が極めて重要である。それらの資試料は、観測点における雪氷圏の諸変動やそのメカニズムを明らかにするためだけでなく、人工衛星による広域変動監視のための校正や、数値モデルへの入力・検証データの提供といった点で大きな役割を示しており、長期的な継続が不可欠である。氷河内部や底面における諸物理量や試料など、現場でしか得られない物も多い。

(1) 氷床・氷河観測

氷床・氷河質量収支の観測や生物作用の影響評価のためには、長期運用可能な観測地点の整備が必要である。具体的には、観測の拠点となる研究宿泊施設の整備、野外観測に必要なスノーモービルや小型ボートなどの移動手段、自動気象測器やGPS装置などの観測機材が必要となる。また、雪氷コアの掘削や氷床内部のレーダー観測などは、固定された観測地点に留まらず機動的に広域で行う必要がある。そのための機器としては、航空機やヘリコプターを使ったアイスレーダーやレーザー高度計、氷床内部の観測やサンプリング用の熱水掘削装置やアイスコア掘削装置、検層機器などがある。それらの新規開発や既存の装置の更新も重要である。氷河地震観測のためには、地震計や観測シス

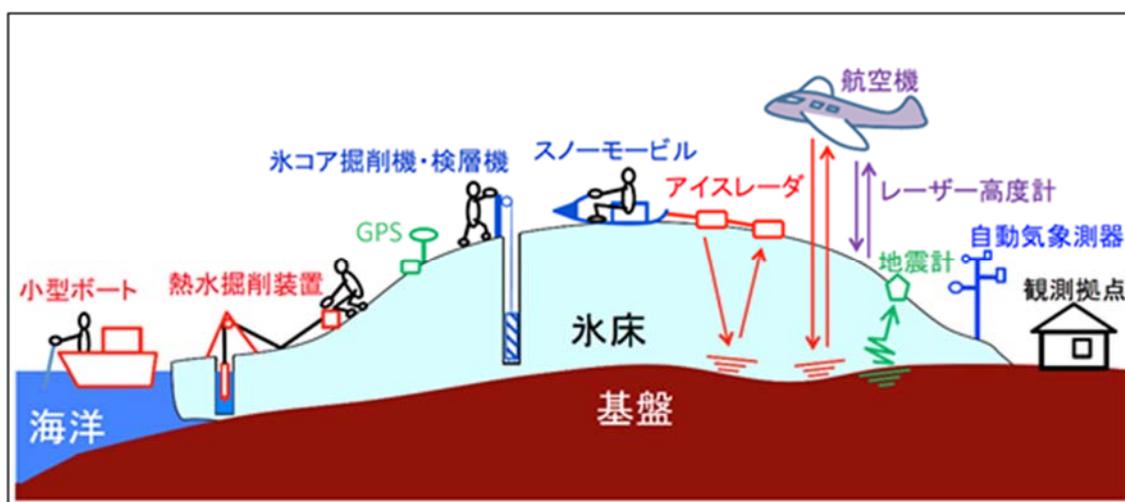


図 69 氷床・氷河観測で使用される主な機器

テムなどの機材が必要となる。上記のうち代表的な機器類を図 69 に示す。また、環境変動に関する代理指標(テーマ 6 参照)の形成過程を理解するための現場観測には、可搬型の水蒸気同位体やエアロゾル濃度などの分析装置が不可欠である。それらの機器の開発や現場観測・試料採集を継続的に実施できる体制(人員、組織)の構築と維持も重要である。

(2) 雪氷コア分析

過去の気候や雪氷圏の変動を復元するには、採集された雪氷コアを実験室で分析する必要がある。分析項目としては水同位体やエアロゾル、固体微粒子、気体成分等があり、それらを高時間分解能で分析するには、測定機器や分析技術、分析体制を整備・維持する必要がある。従来から運用されている分析機器(質量分析計、液体クロマトグラム、ガスクロマトグラム、粒子分析計、黒色炭素分析計等)に加えて、気体(温室効果気体、希ガス等)やエアロゾル(硫黄、カルシウム、ストロンチウム、鉛等)の高精度同位体比測定による起源・輸送経路の推定や、複数指標の組み合わせによる定量的な推定を可能にするための分析機器が必要となる。また、アイスコアの環境情報を高時間分解能で大量に取得する手法として、連続融解技術が実用化されているが、まだ歴史が浅く今後の継続的な開発が重要である。レーザーの吸収や散乱等を応用した雪氷試料の分析や空気抽出など、連続融解と組み合わせた分析技術の革新も継続する必要がある。

(3) 永久凍土

凍土を構成する氷の研究では、氷河・氷床研究と同様に長期運用可能な観測拠点、移動手段、基本データとしての気象観測設備が必要である。特に深部の地温観測においては時定数が長いため、観測拠点を長期間安定に維持することは必須であり、また、活動層など浅部観測では空間的な広がりカバーするために多点展開を可能にする移動手段を備えるべきである。現状の凍土掘削技術には改善の余地があり、新たに多点掘削を念頭に置いた、研究者が扱える規模で機動性の高い凍土掘削システムや、船舶から海底・湖底に存在する凍土を不攪乱で採取できるシステムの開発が必要である。凍土氷融解のプロセス理解、凍土地温からの古

環境復元には、融点付近の温度測定精度を上げるための小数点第 2 位での精度をもつ地温センサとロギングシステムの開発や、不凍水量を現地測定するための観測技術の開発などが必要になる。また、活動層内土壌のアイスレンズ(再凍結した氷層)や有機質分布、土壌構造に対応した熱的パラメータ測定装置の改良が必要である。

(4) 降水・積雪観測

北極域の降水観測で最も重要なのは、冬季降水量の高精度測定である。固体降水捕捉率のキャリブレーションに利用される Double Fenced Inter comparison Reference (DFIR) の WMO 基準測定に加えて、重量式、光学式などの多様な冬季降水(降雪)センサの開発と比較観測によって、観測精度の向上を進める必要がある。降水レーダーを用いた水蒸気(雲)ならびに降雪粒子の時空間変動観測を利用し、降水衛星データ(GPM/DPR およびその後継機データ)との比較によって、空間的な降水観測精度の改良も重要である。積雪については、地表の積雪被覆や積雪水量、雪質、積雪不純物、北方林の樹冠着雪量や昇華量など、衛星光学センサおよびマイクロ波センサに対応したアルゴリズムの開発改良のための地上校正検証の観測技術の開発改良が必要である。

(5) 陸域水文過程

陸域水文過程の解明には、降水・積雪観測に加えて、土壌水分や蒸発散量、流出量の詳細な現場観測が必要である。特に、今後の大きな変化が予想される季節進行に関して、雪解けの春季と積雪の秋季の観測が重要となる。蒸発散量の観測には水・熱フラックスのタワー観測に加えて、植生の観測を同時に行う必要がある。土壌水分は、凍土融解深や地温とも関連しており、それらの現場観測は簡単ではないが、多点観測などによる空間的な把握が求められる。これらの観測と合わせてドップラーレーダー観測が行えると、雲・降水システムを含むローカルな水循環の解明が期待できる。土壌水分量水循環トレーサーとして、水安定同位体のレーザー測定手法が開発利用されつつあるが、降水、降雪、土壌水、植物体内水、水蒸気などを一体として測定できる、野外サンプリングと分析手法の確立も必要である。

d. 陸域生態系・物質循環

陸域生態系は、炭素・窒素・水などの循環に強い影響を及ぼすため、今後モニタリングに力を入れる必要がある。大気の項に記載されているとおり、フラックスタワー観測を充実させ、長期間にわたって安定した観測を行えるような体制を整えることは重要であろう。また、人工衛星を利用したリモートセンシング観測の充実に加え、陸域生態系を精密に観測するための次世代センサ(ライダーや高精度ハイパースペクトルカメラ¹⁵⁷)を搭載した航空機による観測も望まれる。ライダー観測によって森林を構成する樹木の構造を把握できるようになるうえ、高精度ハイパースペクトルカメラで分光反射画像情報を分析することで、葉などの化学組成(葉緑素をはじめ、リグニンやセルロースなど)が分析可能となり、物質循環にとどまらず、種構成に踏み込んだ生物多様性の研究も可能になる。さらに、植生の変化とその季節性を観測するため、インターバルカメラを環北極域に多数設置しデータを蓄積するという大規模な機器網の整備も提案する。

また、広大かつ未踏の原野の広がる北極陸域における観測の効率を上げるため、以下の提案を行う。すでに海洋の観測のための導入例のあるホバークラフトを陸域の観測にも利用することで、雪のために海との境界が不明瞭な湖沼や湿地を経て内陸部へ広がるツンドラ域などでの観測に威力を発揮するはずである。水面と湿地の入り組んだこのような地域では、徒歩、車両、船舶いずれによるアクセスも困難なため、ホバークラフトを用いた観測をシベリア沿岸部などで構想すべきであろう。また、遠隔地に設置された観測機器から日本へのデータ転送機器の開発と導入が切に求められている。現在も衛星を用いたデータ転送は行われているが、フラックスタワー観測データや画像データといった大容量の転送は普及していない。今後、遠隔地から大容量データを転送するシステムと通信衛星のさらなる整備が進むことによって、莫大な労力と旅行費用を要するデータ回収が飛躍的に容易になるであろう。データ転送に用いられる通信衛星の整備は、動物の移動を追跡する動物生活史の研究や、陸域の研究のみならず大気・海洋などの観測の発展にも有効である。

e. 海洋

北極圏は、全球的な環境変動の影響が顕著に現れると同時に、北極圏の変動は、大気・海洋循環や雪氷圏の変化等を通して、逆に全球的な気候システムに大きな影響をもたらすと考えられている。全球的な気候システムを含む地球システムそのものを理解する上で、北極圏のシステムの解明は不可欠であり、その基礎となる現場での観測データは必須となる。中でも、北極圏は中央に広大な北極海を有する事から、海洋域での観測が要となり、海洋域での海底から大気にかけての鉛直的かつ面的に広範囲な観測や、長期的なモニタリング観測等の実施が必要である。また、北極海においても、中緯度や低緯度において観測船等により実施される観測と、少なくとも同等程度の時間・空間変動を把握できる調査等が期待される。特に、地球システムを理解する観点から、北極圏海洋域での通年観測による季節変化やより長期的な変動、大気—海氷—海洋モデルの精緻化等に必要なデータ取得が求められる。

しかし、北極海での観測は、海氷の存在により、未だ観測が立ち後れており、観測の空白域と言っても過言ではない。今後、北極海での観測を進展させるには、高い砕氷能力を有し、多岐にわたる観測が可能な砕氷観測船は必須であるが、それとともに観測機器自体も海氷域で観測可能な機器開発等が必要となる。以下では、今後の北極海での海洋観測に向け、海氷域において技術的な課題を有し、開発等が必要である観測機器等に関して記載する。

(1) 船上観測機器

ここでの船上観測機器は、船上に設置し航路上等で、大気や海洋観測を実施する機器である。ほとんどの観測機器は、海氷域でも船上での観測である事から、大きな障害がないと考えられる。しかし、音響を利用した観測機器は、船による音響ノイズは最小限に抑制する事は当然であるが、さらに海氷域での砕氷に伴う音響ノイズ対策を考慮する必要がある。このような音響を利用した観測には、低周波領域の地層探査装置やマルチナロービーム測深機や、高周波超音波領域のマルチ周波数音響プロファイラー等が挙げられる。周波数帯も広範囲であるが、砕氷に伴う音響ノイズの周波数特性の調査と、その対応を検討する必要がある。また、観測船

¹⁵⁷ ハイパースペクトルカメラ: 人間の目や通常のデジタルカメラは、色の情報を赤・緑・青の三原色(波長)で取得している。ハイパースペクトルカメラに搭載されたセンサーは、色の情報を数十種類もの波長に分けて取得することができるので、人間の目や通常のデジタルカメラではとらえられなかった、対象物の特性や情報が得られる。

の喫水が深ければ、ノイズ源から少しでも遠ざけられる事から、新たな観測船を建造する場合は、この点の検討も必要であると考えられる。

(2) 水中ロボット

ROV¹⁵⁸や AUV¹⁵⁹といった水中ロボットの活躍が、海氷下の探査では期待される。特に AUV は、外界の認識や行動決定を自ら行う無索の無人海中探査機であり、海氷下での鉛直方向や広域の調査に適した探査機である。一方、ROV は、有索で潜水機の運動を制御する無人潜水機であり、操作が船上から制御できる事から、詳細な海氷下や海底面の観察や、試料採取等を可能とする。さらに ROV は、海氷域における係留系等の海中敷設・回収や、AUV の非常時の回収等に利用可能であると考えられる。

水中ロボットの海氷域での運用にあたっては、船上での低温対策や音響ナビゲーションシステムを用いた潜航体の位置決め、特に AUV は確実に回収可能な運用形態等を検討する必要がある。北極海の平均深度は 1,330m であるが、その中央部には水深約 4,000m の深海平原が存在する事から、これらの水中ロボットの耐圧が 4,000m 以上であれば、ほとんどの海域が網羅可能となる。一方で、水中ロボットは、可能な限り小型で扱いやすいものが望まれる事から、耐圧、観測機器用のペイロードや投入するムーンプールの大きさ等のバランスを考慮して開発を行う必要もある。

(3) 係留系等の海中設置観測機器

海氷域定点での、超音波氷厚計 (IPS)、超音波ドップラー式多層流向流速計や水温塩分深度計等を用いた、海氷の動態、変動や、海水の物理・化学的な変動を連続観測可能な係留系観測も必須である。また、海底下構造や堆積物—海水間の物質循環プロセス等を推定するための海底地震計や海底圧力計、各種化学センサ等による、海底敷設型機器による観測も期待される。これらの機器やシステムも海氷下での観測に適した開発が必要であり、特に連続観測を可能にするには、ROV 等による機器の回収・設置を視野に入れるとともに、音響データ通信や、潮流発電や海中燃料電池等の適用も検討する必要がある。海中設置観測機器の電源問題は、極域特有の問題ではないが、回収・設置が難

しい海氷域でこそ解決していくべき問題であろう。その他、物理・生物・化学センサを搭載した、ある深度帯から海氷直下まで観測可能な、耐水型プロファイリングフロートの開発も望まれる。プロファイリングフロートの開発にあたっては、海氷域では GPS による位置決め・衛星を介したデータ送受信が困難なため、海氷下での音響ナビゲーションシステムやデータ伝送ネットワークの構築といった解決策を用意しておく必要がある。

(4) コアリング等

古環境・古気候研究のための堆積物採取に関しては、通常のピストンやグラビティコアラーに加えて、60m 以上の堆積物採取が可能なジャイアントコアラーや、海底鎮座型掘削装置の開発が期待される。特に、海底鎮座型掘削装置は、回転式の掘削装置であるので、堅い岩盤層等の掘削も可能となる。

(5) 海氷の観測機器

北極圏の気候システムを理解するにあたっては、大気や海洋に加えて海氷特性の観測も重要である。特に必要とされるのは、海氷の質量収支および形態のモニタリングと考えられる。

質量収支は、北極海海氷の激減が注目される今、現況を正しく把握する上で重要であり、北極海における熱力学的な生成・融解量と北極海から流出する氷量を見積もる必要がある。前者を正しく見積もるためには、現場気象観測と氷厚分布のデータが必要となる。このため、船舶搭載型の観測に加えて、できれば無人観測ブイが望ましい。従来、北極海では国際北極ブイ計画で氷上に設置された機器により気象観測等が実施されてきたが、氷量減少に伴い氷上設置ブイで北極海を広範囲に覆うことが難しくなっている。氷厚分布は航空機観測や衛星データからある程度推定することとし、気象観測は海洋上に設置可能な耐久性があつて強固なブイを製作することなどにより観測領域密度を保つ努力が必要であろう。一方、後者の見積もりには流出海域に当たる Fram 海峡に IPS などを設置して氷厚分布と漂流速度を定量的に見積もることが必要である。

海氷の形態については、北極海で季節海氷域の割合が増加している今、海氷の変形過程そのものが変化している可能性があり、数値海氷モデルで用いられてい

¹⁵⁸ ROV: Remotely Operated Vehicle

¹⁵⁹ AUV: Autonomous Underwater Vehicle

る物理過程を見直す必要がある。特に海氷表面の凹凸(リッジ)分布特性と融解期のメルトポンド分布特性が重要であり、航空機搭載型の2Dレーザースキャナーおよびビデオなどによる現場観測が期待される。

(6) その他(沿岸域での観測等)

観測船での観測以外では、沿岸域での観測装置の開発も必要である。沿岸域での係留観測では、冬季の海氷の発達によりシステムが引き摺られないような構造を検討する必要がある。また、紋別オホーツクタワーのような、冬季でも海氷下のサンプリングが可能で、より堅牢なプラットフォームの開発も重要である。さらに、海洋域での航空機を使用した電磁式の海氷厚測定や、地磁気・重力測定等も検討する必要がある。

f. 数値モデリング

急変する北極環境の総合的把握、全球気候における北極域の役割や日本に及ぼす影響の解明、さらに北極気候の将来予測のために、数値モデリングは欠かすことができない研究手段である。そのためには大規模計算資源や、モデルの入出力データおよび検証データを保管するための大容量ストレージが不可欠であり、さらにそれらを合わせ持つ基盤的組織体制の構築が必要である。

組織体制はプロジェクトによる時限付きのものではなく、長期的に維持されなければならない。現在 GRENE 北極気候変動分野において数値モデリング関連の研究が進行しているが、プロジェクト期間内にすべての目的が達成できるわけではなく、より精緻なモデルの開発やそれを用いた研究を継続して推進する必要がある。国際的には、季節～年々変動を対象とした北極域の予測可能性に関するプログラム(APPOSITE¹⁶⁰)が立ち上がっているが、日本では組織的な対応をしておらず、個人の努力に頼らざるを得ない状況である。また、北極域を対象とした領域気候モデリングに関しても、米国では Naval Postgraduate School などで開発が進められているものの、日本国内で具体的な動きはまだない。これらは基盤組織の欠如が大きな一因となっている。海外には大規模で継続性のあるモデリングセンター(NCAR、ECMWF、UKMO 等)やデータセンター(NSIDC 等)が研究基盤として存在する。同様のモデリ

ング研究基盤を日本も持たなければ、最先端研究において国際的に大きく立ち遅れる恐れがある。

計算資源については、国内の大学・研究機関にある大型計算機を公募プロジェクトや有償で利用する方法も考えられるが、他の利用者との競合になるので十分な資源を確保することは難しい。安定的な計算資源を保証するには、基盤となる組織独自の計算機の所有が望ましい。大型計算機やデータサーバシステムの管理・運用、大気・海洋・陸面・氷床など各プロセスのモデルを結合した大規模モデルの開発、モデルの高効率実行に向けた改良などには高度な専門知識が必要である。また、モデルの入力、検証データとなる観測・客観解析データの整備のような支援業務を行う人材も必要である。コーディングルール(プログラミングの方法)やデータ入出力フォーマットの統一化、解析手法およびソフトウェアの開発などを主導するようなコーディネーターも求められる。基盤となるべき組織には、高度な専門知識を持つ技術職だけでなく、研究職と技術職の中間的な立場を担う人材が長期的に雇用されることも重要である。

このようなモデリング基盤組織が率先して国際的な研究計画への参画を行い、数値モデルを用いた各種感度実験やアンサンブル実験の実行および管理を行う他、北極海氷況予測などの現業的遂行が望まれる。

¹⁶⁰ APPOSITE: Arctic Predictability and Prediction On Seasonal to Inter-annual Timescales

10章 長期にわたる方向性と取り組み体制のまとめ

本長期構想では、すでに取り組みられている研究計画に留まるのではなく、10年を越える時間スケールで挑戦していく方向性まで示唆している。研究の進展に役立つ仮説を立てることや、先駆的な成果をあげるための体制などを大胆に提案することも試みた。15のテーマ及び基盤整備について簡潔に記述する。

「現在進行中の地球温暖化に伴う北極の急激な環境変化を解き明かす」研究テーマ

「地球温暖化の北極域増幅(テーマ1)」では、北極域を中心としたエネルギー輸送に焦点を当て、超高層、雲・エアロゾル、積雪、海氷、そして海洋中層までの各要素間の相互作用を解明していく。そのための手段である地球システムモデルを開発・利用するには、様々な分野のモデラーの協力のみならず、モデル検証に用いるデータの計画的取得が必要である。我が国の貢献として、超高層から海氷に至る衛星観測の拡充を図るため、センサ開発と衛星打ち上げを継続するよう担当機関に働きかける。もうひとつの鍵となる海洋の現場観測を定期的に繰り返す体制を維持しなければならない。

「海氷減少のメカニズムと影響(テーマ2)」では、海氷直下から海洋中層までを含めた海洋熱輸送、そして雲や低気圧を介した大気-海氷-海洋間相互作用について、プロセスの理解と定量化を目指す。海氷自身の特性に関しては、表面融解水(メルトポンド)の形成過程と氷盤同士の衝突過程を詳細に明らかにする。これらの現場観測には砕氷船の運用が必須であり、天候に左右されないマイクロ波衛星観測も欠かせない。また、個々の氷盤や高密度水沈降を陽に¹⁶¹扱える海氷海洋結合モデルを構築し、北極航路に関する信頼性の高い情報を船舶に提供できるようにする。

「物質循環と生態系変化(テーマ3)」で主眼を置いているのは、これまで夏季に偏っていた大気、土壌、河川観測を通年かつ長期に継続して行うこと、陸域生態系の点観測を衛星データなどによって拡張、代表性のある面データを取得することである。海洋については、生態系に影響を与える海岸侵食や永久凍土融解などの環境変化、及び、炭素や栄養塩等の輸送を海洋循環や渦と

合わせてモニタリングする。最新の化学・生物センサと試料採取装置を物理センサと共に氷上キャンプやデータ空白域に設置して通年観測を行い、物質輸送と生態系変化の定量的理解を目指す。

「氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環(テーマ4)」では、氷床表面と総質量の衛星観測を格段に向上させ、現場データによって検証すると共に、氷床内部の情報を十分に集める。また、海洋との相互作用については、海洋物理学専門家と連携する。永久凍土の観測体制構築には国際連携が必須であり、テーマ3とも協力してスーパーサイトの運営を目指す。この取り組みは大気、陸面、土壌におよぶ水循環を広域で把握することにも貢献する。気象で日常的に行われている客観解析を、陸域水循環にまで拡張する。

「北極・全球相互作用(テーマ5)」が焦点を当てるのは、地球温暖化の進行に伴い、自然変動として顕在化する大気海氷海洋の経年変動がどう変わるかである。上は超高層大気との相互作用、下は弱化する北大西洋深層水形成まで、広範な対象について観測とモデリング、そしてデータ同化に基づく再解析を推し進める。陸海分布に起因する大気・水循環の変化は、物質循環まで影響を及ぼし、海洋循環とのフィードバックを介して北極海にも影響が及ぶ。テーマ4から凍土の広域変化に関する重要な情報を得る。

「古環境から探る温暖化の将来(テーマ6)」は、将来起こりうる温暖化や突然の気候変化の実態を過去の事例に求め、そのメカニズムにデータとモデルから迫る。極域特有のアイスコアや北極海海底コアの採取と解析に取り組み、新たな間接指標の開発や気候-氷床結合モデルによる長期数値実験に挑む。北極振動などの短周期変動の盛衰を見いだすことも重要である。様々な時間スケールを含む氷床や海洋・海氷、陸域、大気等の変動を復元し理解することで、過去の温暖化増幅を定量化し気候変動研究に貢献する。

「北極環境変化の社会への影響(テーマ7)」で挑戦するのは、自然科学と人文社会科学の連携を北極域にも展開することである。緊急事態における自然災害情報、地球温暖化などによる災害の軽減、炭素クレジット

¹⁶¹ モデリングの分野ではある過程(変数の時間変化)をモデル方程式の中で直接、明示的に書き表すことを「陽に」と表現することが多い。

の導入など、いずれも先住民・新移住者との協働に基づいて、国家や地方自治体に対する提言を用意することを目指す。環境研究コミュニティを越えた連携が必須である。

「生物多様性を中心とする環境変化を解き明かす」研究テーマ

「陸域生態系と生物多様性への影響(テーマ 8)」では、地球温暖化とその他の環境変化が生態系に与える影響を解明するため観測とモデリングを進め、その中でも自動観測機器の拡充によってできるだけ多くデータを集める。寒冷域の種の多様性は比較的低い、生態的応答の多様性は必ずしも低くないので、環境変化に対する脆弱性を精査することが重要である。そのためにはスポット調査を広域化すると共に、北海道の生態系も利用して北極圏の生態系影響の研究を進める。

「海洋生態系と生物多様性への影響(テーマ 9)」では、海洋環境の変化による生態系への影響を究明するが、長期構想の軸は北極海が季節海氷化することに伴う生息域の北上にある。既存種のあるものは絶滅することが容易に想像でき、回復が不可能であることを深刻に受け止めるべきである。海洋生態系の仕組みの解明に酸性化の進行も合わせ、様々な影響をモニターするため、砕氷観測船を十分に活用するよう努める。

「北極環境研究の広範な重要課題」研究テーマ

「ジオスペース環境(テーマ 10)」では、ジオスペースから降り込む高エネルギー粒子が北極域中層・超高層大気に与える影響など、極域特有の大気上下結合過程の解明に取り組む。同時に、極域超高層大気と中低緯度域との緯度間結合にも着目する。これらの過程を観測的に捉え、さらに宇宙天気などの予測研究に発展させるためには、大型大気レーダーを中心とした拠点観測や地上多点ネットワーク観測、衛星観測、全大気圏モデルの開発体制を整える必要がある。

「表層環境変動と固体地球の相互作用(テーマ 11)」では、氷床融解と地殻隆起とマントル粘性率の相互関係を解明する。そのための野外地形地質調査と測地観測は、長期間を要する困難な課題であるが、将来のグローバルな海面変化を予測する上で、挑戦する意義は十分にある。また、地質学的・地球物理学的手法による、超大陸の形成・分裂等の固体地球内部に起因する変動と、表層環境変動との相互作用の解明は、地球の

進化過程の理解を進める上で大きな貢献となる。

「永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解(テーマ 12)」によって、凍土の広域的な現状に関する基礎情報を確立することを目指す。特に、凍土の水平分布、厚さ分布、活動層厚、凍土中の氷・炭素の含有量について情報の解像度を上げる必要性があり、多地点でのデータ取得を目指す。凍土の変化については、顕著な例としてサーモカルストによる地盤沈下として現れており、森林火災による地表面変化など気温変化以外の要因にも注意が必要である。永久凍土の情報収集には国際的な観測ネットワークとの協力体制が必須である。

「環境研究のブレークスルーを可能にする手法の展開」テーマ

「持続するシームレスなモニタリング(テーマ A)」では、様々な環境変化を調査し解明するために、代表性のあるデータを継続して集めることが重要である。氷床の内部構造、永久凍土の深部からは貴重なデータを得られる。永久凍土の掘削孔管理にも責任がある。データを集める手段として、海洋では砕氷船、係留系、遠隔操作センサが必須である。陸域ではスーパーサイトにおいて、気象、雪氷、水文、植生、土壌のデータを集めることが有効である。

「複合分野をつなぐ地球システムモデリング(テーマ B)」で注目しているのは、地球環境を構成する要素を含む地球システムモデルの構築と検証である。大気、海氷・海洋、雪氷、陸域植生の各要素で、鍵となるプロセス、そして他の要素に及ぼす影響の精度は様々である。個別要素モデルにおいては、プロセスを陽に表現することが基本となるが、結合モデルでは目的に応じてパラメータ化を使い分ける必要がある。ある要素のプロセスに含まれる誤差が他の要素にどう現れるかという感度実験結果を客観的に評価する。

「モニタリングとモデリングをつなぐデータ同化(テーマ C)」で目指すものは、多圏システムのデータ同化への挑戦である。その難しさは、それぞれの要素における時間スケールの違い、数値モデルの完成度、不確定パラメータ数、データ量の違いにある。この壁を打ち破るためには、観測とモデルの両方面からの投資が必要である。現業面の目的は、北極圏の天気予報の信頼向上、さらに北極海況予報の実用化であるが、それには国際的な連携体制が必要条件である。

研究基盤の整備

a. 船舶

新たに研究用の砕氷船を建設し、その機能も従来のものより格段に高度化する。機器・設備で特記すべきものは、ムーンプール、化学・生物・地質各種実験室(低温室含む)、海氷下を長期間航行可能かつ多数のセンサを搭載可能な AUV、試料採取も可能な ROV、長尺大口径ピストンコアラー、海底地形調査に使用するマルチビーム測深器、地層探査に使用するサブボトムプロファイラーである。

b. 衛星

氷河氷床・海氷・積雪の質量変動をモニターする合成開口レーダーと、レーザー・レーダー高度計を組み合わせた観測システムを運用する。重力測定を行う衛星の開発を進める。陸域と海洋の生態系をモニターする可視光センサを 2016 年度に打ち上げ予定の GCOM-C1/SGLI に搭載し、さらに、この方針を継続するよう関係機関に働きかける。

c. 航空機

北極観測のための機器開発を視野に入れ、航空機を所有できるよう体制を整える。その一方で無人機を利用して大気観測を行うことも追求する。

d. 拠点ネットワーク

スーパーサイトで多様なパラメータを継続して収集するため、スバルバル、東シベリア、アラスカにおいて二カ国間連携に基づく拠点を維持する。また、カナダの高緯度北極圏、ロシアの北極海沿岸などの観測設備の活用を探る。

e. データアーカイブ

データセンターの設立を目指し、国際的なデータベースとの連携によって、さらに広範なアーカイブの利用を可能にする。

f. 人材育成

我が国の若手研究者育成を目的に、JCAR は国内の大学と北極国の大学の間で連携を構築する。インターン制度、サマースクール、キャリアパスの開発に加え、GRENE 若手研究者派遣支援事業の発展を目指す。先住民の若手研究者育成に貢献する。

g. 研究体制(国内、国際)

国立および独立行政法人の機関が構成するトップダウン型の体制と、JCAR を例にするボトムアップ型の自主組織が相互に支援しあう統合的体制を確立する。国際的には、非北極圏国である日本の立場が正当に認められるよう働きかけていく。

h. 機器(大気、超高層、雪氷、陸域、海洋)

超高層大気モニタリングを広域に展開するためのレーダーのネットワーク、雪氷ではエアロゾルなどの分析装置開発を継続する。陸域植生の観測には、樹木の構成を捕らえられるハイパースペクトルカメラを運用する。機器を展開するための移動装置として、海氷下から効率的にデータを取得するため、水中ロボットの活用を目指す。

i. 数値モデリング

大規模計算資源と大容量ストレージなどのハード面に加えて、モデル開発とハードの運用などに専念する人員の確保が必須である。さらにデータ、ソースコードなどの整備を担当する研究技術職員を配置する体制をつくる。

引用文献

テーマ 1

- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton (1999), Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere, *J. Geophys. Res.*, *104*, 30937-30946.
- Curry, J. A., W. B. Rossow, D. Randall, and J. L. Schramm (1996), Overview of Arctic cloud and radiation characteristics, *J. Climate*, *9*, 1731-1764.
- Derksen, C., and R. Brown (2012), Spring snow cover extent reductions in the 2008–2012 period exceeding climate model projections, *Geophys. Res. Lett.*, *39*, L19504, doi:10.1029/2012GL053387.
- Graversen, R. G., T. Mauritsen, M. Tjernström, E. Källén, and G. Svensson (2008), Vertical structure of recent Arctic warming, *Nature*, *451*, 53-56.
- Hall, A., and X. Qu (2006), Using the current seasonal cycle to constrain snow albedo feedback in future climate change, *Geophys. Res. Lett.*, *33*, doi:10.1029/2005GL025127.
- Hwang, Y.-T., D. M. W. Frierson, and J. E. Kay (2011), Coupling between Arctic feedback and changes in poleward energy transport, *Geophys. Res. Lett.*, *38*, L17704, doi: 10.1029/2011GL048546.
- Liu, Y., J. R. Key, Z. Liu, X. Wang, and S. J. Vavrus (2012), A cloudier Arctic expected with diminishing sea ice, *Geophys. Res. Lett.*, *39*, L050705, doi: 10.1029/ 2012GL051251.
- Manney, G. L., et al. (2011), Unprecedented Arctic ozone loss in 2011, *Nature*, *478*, 469-475.
- O'ishi, R. and A. Abe-Ouchi (2011), Polar amplification in the mid - Holocene derived from dynamical vegetation change with a GCM, *Geophys. Res. Lett.*, *38*, L14702.
- Oort, A. H. (1971), The Observed Annual Cycle in the Meridional Transport of Atmospheric Energy. *J. Atmos. Sci.*, *28*, 325–339.
- Perovich, D.K., B. Light, H. Eicken, K.F. Jones, K. Runciman, and S.V. Nghiem (2007), Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979-2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback, *Geophys. Res. Lett.*, *34*, doi:10.1029/2007GL031480.
- Trenberth, K. E., and D. P. Stepaniak (2003a), Covariability of components of poleward atmospheric energy transports on seasonal and interannual timescales, *J. Clim.*, *16*, 3691–3705.
- Tucker, C. J., D. A. Slayback, J. E. Pinzon, S. O. Los, R. B. Myneni, and M. G. Taylor (2001), Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999, *Int. J. Biometeorol.*, *45*, 184-190.
- Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, M. Watanabe, A. Oka, and T. Ogura (2014), Robust seasonality of Arctic warming processes in two different versions of MIROC GCM. *J. Climate*, accepted.

テーマ 2

- Inoue, J., and M. Hori (2011), Arctic cyclogenesis at the marginal ice zone: A contributory mechanism for the temperature amplification?, *Geophys. Res. Lett.*, *38*, doi:10.1029/2011GL047696.
- Jackson, J. M., E. C. Carmack, F. A. McLaughlin, S. E. Allen, and R. G. Ingram (2010), Identification, characterization, and change of the near-surface temperature maximum in the Canada Basin, 1993–2008, *J. Geophys. Res.*, *115*, C05021, doi:10.1029/2009JC005265
- McPhee, M. G. (2013), Intensification of geostrophic currents in the Canada Basin, Arctic Ocean, *J. Clim.*, *26*, 3130-3138.
- Overland, J. E., and M. Wang (2013), When will the summer Arctic be nearly sea ice free?, *Geophys. Res. Lett.*, *40*, 2097-2101, doi:10.1002/grl.50316.
- Rampal, P., J. Weiss, C. Dubois, and J.-M. Campin (2011), IPCC climate models do not capture Arctic sea ice drift acceleration: Consequences in terms of projected sea ice thinning and decline, *J. Geophys. Res.*, *116*, doi:10.1029/2011JC007110.

テーマ 3

- Bates, N. R., and J. T. Mathis (2009), The Arctic Ocean marine carbon cycle: evaluation of air-sea CO₂ exchanges, ocean acidification impacts and potential feedbacks, *Biogeosciences*, *6*, 2433–2459.
- Frey, K. E., and J. W. McClelland (2009), Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry, *Hydrol. Process.*, *23*, 169–182, doi: 10.1002/hyp.7196.
- Holmes, R. M., J. W. McClelland, B. J. Peterson, S. E. Tank, E. Bulygina, T. I. Eglinton, V. V. Gordeev, T. Y. Gurtovaya, P. A. Raymond, D. J. Repeta, R. Staples, R. G. Striegl, A. V. Zhulidov, and S. A. Zimov (2012), Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas, *Estuaries and Coasts*, *35*, 369-382, doi: 10.1007/s12237-011-9386-6.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013a), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013b), Summary for Policymakers. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. and New York, NY, USA.
- Ise, T., A. L. Dunn, S. C. Wofsy, and P. R. Moorcroft (2008), High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback, *Nature Geoscience*, *1*, 763-766.
- Kirchman, D. L., X. A. G. Morán, and H. Ducklow (2009), Microbial growth in the polar oceans — role of temperature and potential impact of climate change, *Nature Reviews in Microbiology*, *7*, 451- 459.
- Lubin and Vogelmann (2010), Observational quantification of a total aerosol indirect effect in the Arctic, *Tellus B*, *62*, 181–189.
- 森本真司、石戸谷重之、石島健太郎、八代 尚、梅澤 拓、橋田 元、菅原 敏、青木周司、中澤高清、山内 恭(2010), 南北両極域における大気中の温室効果気体と関連気体の変動, 南極資料, *54*, 374-409.
- Quinn, P. K., G. Shaw, E. Andrew, E. G. Dutton, T. Ruoho-Airola, and S. L. Going (2007), Arctic haze: current trends and knowledge gaps, *Tellus Series B-chemical and Physical Meteorology*, *59B*, 99–114.
- Shakhova, N., I. Semiletov, A. Salyuk, V. Joussupov, D. Kosmach, and Ö. Gustafsson (2010), Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf, *Science*, *327*, 1246-1250, doi: 10.1126/science.1182221.
- Suzuki, R., Y. Kim, R. Ishii (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.
- Yamamoto-Kawai, M., F. McLaughlin, E. Carmack, S. Nishino, and K. Shimada (2009), Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: Effects of ocean acidification and sea ice melt, *Science*, *326*, 1098-1100.

テーマ 4

- Abe-Ouchi, A., et al. (2013), Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature*, *500*, 190-193.
- Brown, R.D. and P.W. Mote (2009), The response of northern hemisphere snow cover to a changing climate, *Journal of Climate*, *22*, 2124-2145.
- Brutsaert, W., and T. Hiyama (2012), The determination of permafrost thawing trends from long-term streamflow measurements with an application in eastern Siberia, *J. Geophys. Res.*, *117*, D22110, doi:10.1029/2012JD018344.
- Ekström, G., M. Nettles, and V. C. Tsai (2006), Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes. *Science*, *311*, 1756–1758.
- Gardner, A. S., et al. (2013), A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009, *Science*, *340(6134)*, 852–857, doi: 10.1126/science.1234532
- Goodison, B. E., P. Y. T. Louie, and D. Yang (1998), WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison Final Report, *World Meteorological Organization Instruments and Observing Methods Report No. 67*, 212.
- Hiyama T., K. Asai, A. B. Kolesnikov, L. A. Gagarin, and V. V. Shepelev (2013), Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia, *Environmental Research Letters*, *8*, 035034.
- Iijima, Y., A.N. Fedorov, H. Park, K. Suzuki, H. Yabuki, T.C. Maximov, and T. Ohata (2010), Abrupt increase in soil temperature under conditions of increased precipitation in a permafrost region, the central Lena River basin. *Permafrost and Periglacial Processes*, *21*, 30–41.
- Iijima, Y., T. Ohta, A. Kotani, A. N. Fedorov, Y. Kodama, and T. C. Maximov (2014), Sap flow changes in relation to permafrost degradation under increasing precipitation in an eastern Siberian larch forest, *Ecohydrology*, *7*, doi: 10.1002/eco.1366
- Jorgenson, M. T., Y. L. Shur, and E. R. Pullman (2006), Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska, *Geophysical Research Letters*, *33*, L02503. doi: 1029/2005GL024960
- Landerer, F.W., J.O. Dickey, and A. Guentner (2010), Terrestrial water budget of the Eurasian pan - Arctic from GRACE satellite measurements during 2003–2009. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)* *115* (D23).
- Lemke, P., J. Ren, R.B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R.H. Thomas, and T. Zhang (2007), Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Matsumura, S., K. Yamazaki, and T. Tokioka (2010), Summertime land-atmosphere interactions in response to anomalous springtime snow cover in northern Eurasia, *J. Geophys. Res.*, *115*, D20107.
- Nitu R. (2013), Cold as SPICE, *Meteorological Technology International*, 148–150.
- 小川涼子, B. F. Chao, 日置幸介 (2010), シベリア永久凍土帯における重力の季節変化と経年変化, 月刊地球, 32, 234–238.
- Ohta, T., A. Kotani, Y. Iijima, T. C. Maximov, S. Ito, M. Hanamura, A. V. Kononov, and A. P. Maximov (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.
- Park H., J. Walsh, A. N. Fedorov, A. B. Sherstiukov, Y. Iijima, and T. Ohata (2013), The influence of climate and hydrological variables on opposite anomaly in active-layer thickness between Eurasian and North American watersheds, *Cryosphere*, *7*, 631–645, doi:10.5194/tc-7-631-2013.
- Rasmussen, R., and Coauthors (2012), How well are we measuring snow: The NOAA/FAA/NCAR winter precipitation test Bed. Bull, *Amer. Meteor. Soc.*, *93*, 811–829. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00052.1>
- Romanovsky, V. E., D. S. Drozdov, N. G. Oberman, et al. (2010), Thermal state of permafrost in Russia, *Permafrost Periglac. Process.*, *21*(2), 136–155, doi:10.1002/ppp.683.
- Shepherd, A., et al. (2012), A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, *338* (6111), 1183–1189, doi:10.1126/science.1228102
- Shur, Y., K. M. Hinkel, and F. E. Nelson (2005), The Transient Layer: Implication for Geocryology and Climate-Change Science, *Permafrost and Periglacial Processes*, *16*, 5–17.
- Sugiura, K., and T. Ohata (2008), Large-scale characteristics of the distribution of blowing snow sublimation, *Annals of Glaciology*, *49*, 11–16.
- Suzuki, K., J. Kubota, Y. Zhang, T. Kadota, T. Ohata, and V. Vuglinsky (2006), Snow ablation in an open field and larch forest of the southern mountainous region of eastern Siberia, *Hydrol. Sci. J.*, *51*(3), 465–480, doi:10.1623/hysj.51.3.465.
- Takeuchi, N., S. Kohshima, and K. Seko (2001), Structure, formation, and darkening process of albedo-reducing material (cryoconite) on a Himalayan glacier: a granular algal mat growing on the glacier, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, *33*, 115–122.
- Toyokuni, G., M. Kanao, Y. Tono, T. Himeno, S. Tsuboi, D. Childs, K. Anderson, and H. Takenaka (2014), Japanese Contribution to the Greenland Ice Sheet Monitoring Network (GLISN), *Antarctic Report*, in press.
- Yallop, M. L., A. M. Anesio, R. G. Perkins, J. Cook, J. Telling, D. Fagan, J. MacFarlane, M. Stibal, G. Barker, C. Bellas, A. Hodson, M. Tranter, J. Whadhan, and N. W. Roberts (2012), Photophysiology and albedo-changing potential of the ice algal community on the surface of the Greenland ice sheet, *The ISME journal*, *6*(12), 2302–2313.
- Yoshimori, M., and A. Abe-Ouchi (2012), Sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice-sheet surface mass balance, *J. Climate*, *25*(4), 1157–1175.
- Zhang K., J. Kimball, Q. Mu, L. A. Jones, S. J. Goetz, and S. W. Running (2009), Satellite based analysis of northern ET trends and associated changes in the regional water balance from 1983 to 2005. *J. Hydrol.*, *379*, 92–110, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.047.
- Zhang, X., J. He, J. Zhang, I. Polaykov, R. Gerdes, J. Inoue, and P. Wu (2013), Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend, *Nature Climate Change*, *3*, 47–51, doi:10.1038/NCLIMATE1631.

テーマ 5

- Beare, R.J., M. K. Macvean, A. A. M. Holtslag, J. Cuxart, I. Esau, J.-C. Golatz, M. A. Jimenez, M. Khairoutdinov, B. Kosovic, D. Lewellen, T. S. Lund, J. K. Lundquist, A. McCabe, A. F. Moene, Y. Noh, S. Raasch, and P. Sullivan (2006), An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, *118*, 247–272.
- Brown, R., C. Derksen, and L. Wang (2010), A multi-data set Analysis of Variability and Change in Arctic Spring snow Cover Extent, 1967–2008, *J. Geophys. Res.*, *115*, D16111, doi:10.1029/JD013975.
- Chapman, W.L., and J. E. Walsh (2007), Simulations of Arctic temperature and pressure by global coupled models, *J. Clim.*, *20*, 609–632, doi:10.1175/JCLI4026.1.
- Dickson, B., I. Yashayaev, J. Meincke, B. Turrel, S. Dye, and J. Holfort (2002), Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature*, *416*, 832–837.
- Fereday, D., J. R. Knight, A. A. Scaife, C. K. Folland, and A. Philipp (2008), Cluster analysis of North Atlantic European weather types, *J. Clim.*, *21*, 3687–3703.
- Groisman P. Y., and T. D. Davies (2001), Snow cover and the Climate System, In *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems*, edited by H. G. Jones, et al., pp. 1–44, Cambridge University Press.

- Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane (2009), Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *Geophys. Res. Lett.*, *36*, L08707, doi:10.1029/2008GL037079.
- Hu, A., G. A. Meehl, W. Han, A. Timmermann, B. Otto-Bliesner, Z. Liu, W. M. Washington, W. Large, A. Abe-Ouchi, M. Kimoto, K. Lambeck, and B. Wu (2012), Role of the Bering Strait on the hysteresis of the ocean conveyor belt circulation and glacial climate stability, *PNAS*, *109*(17), 6417-6422.
- Ineson, S., and A. A. Scaife (2009), The role of the stratosphere in the European climate response to El Niño, *Nature Geoscience*, *2*, 32-36.
- Inoue, J., M. E. Hori, and K. Takaya (2012), The Role of Barents Sea Ice in the Wintertime Cyclone Track and Emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly, *J. Climate*, *25*, 2561-2568. doi:http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00449.1.
- Liston, G.E. (2004), Representing Subgrid Snow Cover Heterogeneities in Regional and Global Models, *J. Clim.*, *17*, 1381-1397.
- Steele, M., and W. Ermold (2007), Steric sea level change in the Northern Seas, *J. Clim.*, *20*(3), 403-417.
- Tape, K., M. Sturm, and C. Racine (2006), The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic, *Global Change Biology*, *12*, 686-702.
- Zhang, T. (2005), Influence of the Seasonal Snow Cover on the Ground Thermal Regime: An Overview, *Rev. Geophys.*, *43*, RG4002. doi: 10.1029/2004RG000157.

テーマ 6

- Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi, and H. Blatter (2013), Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature*, *500*(7461), 190-193, doi:10.1038/nature12374.
- Bindschadler, R. A., S. Nowicki, A. Abe-Ouchi, A. Aschwanden, H. Choi, J. Fastook, G. Granzow, R. Greve, G. Gutowski, U. Herzfeld, C. Jackson, J. Johnson, C. Khroulev, A. Levermann, W. H. Lipscomb, M. A. Martin, M. Morlighem, B. R. Parizek, D. Pollard, S. F. Price, D. Ren, F. Saito, T. Sato, H. Seddik, H. Seroussi, K. Takahashi, R. Walker, and W. L. Wang (2013), Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea level (the SeaRISE project), *J. Glaciol.*, *59*(214), 195-224, doi:10.3189/2013JoG12J125.
- de Vernal, A., C. Hillaire-Marcel, A. Rochon, B. Fréchette, M. Henry, S. Solignac, and S. Bonnet (2013), Dinocyst-based reconstructions of sea ice cover concentration during the Holocene in the Arctic Ocean, the northern North Atlantic Ocean and its adjacent seas, *Quat. Sci. Rev.*, *79*, 111-121, doi:10.1016/j.quascirev.2013.07.006.
- Harrison, S. P., and C. I. Prentice (2003), Climate and CO₂ controls on global vegetation distribution at the last glacial maximum: analysis based on palaeovegetation data, biome modelling and palaeoclimate simulations, *Global Change Biology*, *9*(7), 983-1004, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00640.x.
- Iizuka, Y., R. Uemura, H. Motoyama, T. Suzuki, T. Miyake, M. Hirabayashi, and T. Hondoh (2012), Sulphate-climate coupling over the past 300,000 years in inland Antarctica, *Nature*, *490*(7418), 81-84, doi:10.1038/nature11359.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013), Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Joussaume, S., K. E. Taylor, P. Braconnot, J. F. B. Mitchell, J. E. Kutzbach, S. P. Harrison, I. C. Prentice, A. J. Broccoli, A. Abe-Ouchi, P. J. Bartlein, C. Bonfils, B. Dong, J. Guiot, K. Herterich, C. D. Hewitt, D. Jolly, J. W. Kim, A. Kislov, A. Kitoh, M. F. Loutre, V. Masson, B. McAvaney, N. McFarlane, N. de Noblet, W. R. Peltier, J. Y. Peterschmitt, D. Pollard, D. Rind, J. F. Royer, M. E. Schlesinger, J. Syktus, S. Thompson, P. Valdes, G. Vettoretti, R. S. Webb, and U. Wyputta (1999), Monsoon changes for 6000 years ago: Results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP), *Geophys Res Lett*, *26*(7), 859-862, doi:10.1029/1999GL900126.
- Kobashi, T., D. T. Shindell, K. Kodera, J. E. Box, T. Nakaegawa, and K. Kawamura (2013), On the origin of multidecadal to centennial Greenland temperature anomalies over the past 800 yr, *Clim. Past*, *9*(2), 583-596, doi:10.5194/cp-9-583-2013.
- Lambert, F., J.-S. Kug, R. J. Park, N. Mahowald, G. Winckler, A. Abe-Ouchi, R. O'ishi, T. Takemura, and J.-H. Lee (2013), The role of mineral-dust aerosols in polar temperature amplification, *Nature Climate Change*, *3*(5), 487-491, doi:10.1038/nclimate1785.
- Meyer, H., L. Schirrmeyer, A. Andreev, D. Wagner, H.-W. Hubberten, K. Yoshikawa, A. Bobrov, S. Wetterich, T. Opel, E. Kandiano, and J. Brown (2010), Lateglacial and Holocene isotopic and environmental history of northern coastal Alaska - Results from a buried ice-wedge system at Barrow, *Quat. Sci. Rev.*, *29*(27-28), 3720-3735, doi:10.1016/j.quascirev.2010.08.005.

- Moran, K., J. Backman, H. Brinkhuis, S. C. Clemens, T. Cronin, G. R. Dickens, F. Eynaud, J. Gattacceca, M. Jakobsson, R. W. Jordan, M. Kaminski, J. King, N. Koç, A. Krylov, N. Martinez, J. Matthiessen, D. McInroy, T. C. Moore, J. Onodera, M. O'Regan, H. Palike, B. Rea, D. Rio, T. Sakamoto, D. C. Smith, R. Stein, K. St John, I. Suto, N. Suzuki, K. Takahashi, M. Watanabe, M. Yamamoto, J. Farrell, M. Frank, P. Kubik, W. Jokat, and Y. Kristoffersen (2006), The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean, *Nature*, *441*(7093), 601–605.
- NEEM community members (2013), Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core, *Nature*, *493*(7433), 489–494, doi:10.1038/nature11789.
- O'ishi, R. and A. Abe-Ouchi (2011), Polar amplification in the mid-Holocene derived from dynamical vegetation change with a GCM, *Geophys Res Lett*, *38*, L14702, doi:10.1029/2011GL048001.
- PALAEOSSENS Project Members (2012), Making sense of palaeoclimate sensitivity, *Nature*, *491*(7426), 683–691, doi:doi:10.1038/nature11574.
- Pollack, H. N. (2003), Surface temperature trends in Russia over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures, *J. Geophys. Res.*, *108*(B4), 2180, doi:10.1029/2002JB002154.
- Sigl. M., J. R. McConnell, M. Toohey, M. Curran, S.B. Das, R. Edwards, E. Isaksson, K. Kawamura, J. Kipfstuhl, K. Krüger, L. Layman, O. Maselli, Y. Motizuki, H. Motoyama, D. Pasteris, and M. Severi (2014), New insights from Antarctica on volcanic forcing during the Common Era, *Nature Clim. Change*, in press.
- Sueyoshi, T., R. Ohgaito, A. Yamamoto, M. O. Chikamoto, T. Hajima, H. Okajima, M. Yoshimori, M. Abe, R. O'ishi, F. Saito, S. Watanabe, M. Kawamiya, and A. Abe-Ouchi (2013), Set-up of the PMIP3 paleoclimate experiments conducted using an Earth system model, MIROC-ESM, *Geoscientific Model Development*, *6*(3), 819–836, doi:10.5194/gmd-6-819-2013.
- Uemura, R., V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, A. Landais, H. Motoyama, and B. Stenni (2012), Ranges of moisture-source temperature estimated from Antarctic ice cores stable isotope records over glacial–interglacial cycles, *Clim. Past*, *8*(3), 1109–1125, doi:10.5194/cp-8-1109-2012.
- Yoshimura, K., T. Miyoshi, M. Kanamitsu (2014), Observation System Simulation Experiments using Water Vapor Isotope Information, *J. Geophys. Res. Atmos.*, in press, doi:10.1029/2014JD021662.
- Zachos, J., M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas, and K. Billups (2001), Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present, *Science*, *292*(5), 686–693, doi:10.1126/science.1059412.

テーマ 7

地球電磁気学・地球惑星圏学会(2013), 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来、地球電磁気学・地球惑星圏学会、2013年1月

- Kaeriyama, M., H. Seo, H. Kudo, and M. Nagata (2012), Perspectives on wild and hatchery salmon interactions at sea, potential climate effects on Japanese chum salmon, and the need for sustainable salmon fishery management reform in Japan, *Environ. Biol. Fish.*, *94*, 165–177.
- Kelly, R., M. L. Chipman, P. E. Higuera, I. Stefanova, L. B. Brubaker, and F. S. Hu (2013), Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years, *PNAS*, *110*-32, 13055–13060.
- 北川弘光、小野延雄、山口一、泉山耕、亀崎一彦(2000), 北極海航路、シップ・アンド・オーシャン財団
- Koshino, Y., H. Kudo, and M. Kaeriyama (2013), Stable isotope evidence indicates the incorporation of marine-derived nutrients transported by spawning Pacific salmon to Japanese catchments. *Freshwater Biology*, *58*, 1864–1877.
- Post, E., U. S. Bhatt, C.M. Bitz, J. F. Brodie, T. L. Fulton, M. Hebblewhite, J. Kerby, S. J. Kutz, I. Stirling, D. A. Walker (2013), Ecological Consequences of Sea-Ice Decline, *Science*, *341*(6145), 519–524, doi:10.1126/science.1235225.
- SATREPS プロジェクト、http://www.jst.go.jp/global/kadai/h2004_indonesia.html.
- Steppuhn, H. (1981), Snow and Agriculture, *Handbook of Snow*, 60–125, Pergamon Press.
- Symon C., L. Arris, and B. Heal (Eds.) (2005), *Arctic climate impact assessment*, Cambridge Univ. Press, New York.
- 田中博(2008), 日本の異常気象と北極振動の関係, 2008年度雪氷防災研究講演会報文集, 防災科学技術研究所、雪氷防災研究センター. 1-6、<http://air.geo.tsukuba.ac.jp/~tanaka/papers/paper220.pdf>.
- Tsuboi, S., D. Komatitsch, C. Ji, and J. Tromp (2003), Broadband modeling of the 2002 Denali fault earthquake on the Earth Simulator, *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, doi:10.1016/j.pepi.2003.09.012.
- Yamaguchi, H. (2013), Sea ice prediction and construction of an ice navigation support system for the Arctic sea routes, *Proc. 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions (POAC'13)*, Espoo, Finland, June 9–13, 2013.

テーマ 8

- Cardinale B. (2012), Impacts of Biodiversity Loss, *Science*, *336*, 552–553.
- Clymo R.S. (1983), Peat, In *Ecosystems of the world, 4A Mires: swamp bog, fen and moor, general studies*, edited by A. J. P. Gore, 159–224R, Elsevier, Amsterdam.

- Clymo, S., and P. M. Hayward (1982), The ecology of Sphagnum, In *Bryophyte Ecology*, edited by A. J. E. Smith, 229-289, Chapman and Hall, London, England.
- Elmqvist, T., C. Folke, M. Nyström, G. Peterson, J. Bengtsson, B. Walker, J. Norberg (2003), Response diversity, ecosystem change, and resilience, *Frontiers in Ecology and the Environment*, *1*, 488-494.
- Ganter, B., A. J. Gaston (2013), Birds, In *Arctic Biodiversity Assessment*, edited by H. Meltofte, 142-181, The Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF), Akureyri, Iceland.
- Ise, T., H. Sato (2008), Representing subgrid-scale edaphic heterogeneity in a large-scale ecosystem model: A case study in the circumpolar boreal regions, *Geophysical Research Letters*, *35*, L20407, doi:10.1029/2008GL035701.
- Loreau, M., S. Naeem, P. Inchausti, J. Bengtsson, J. P. Grime, A. Hector, D. U. Hooper, M. A. Huston, D. Raffaelli, B. Schmid, D. Tilman, D. A. Wardle (2001), Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current Knowledge and Future Challenges, *Science*, *294*, 804-808.
- Mäkilä, M., M. Saarnisto, T. Kankainen (2001), Aapa mires as a carbon sink and source during the Holocene, *Journal of Ecology*, *89*, 589-599.
- Mori, A. S., T. Furukawa, T. Sasaki (2013), Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change, *Biological Reviews*, *88*, 349-364.
- Post, E., U. S. Bhatt, C. M. Bitz, J. F. Brodie, T. L. Fulton, M. Hebblewhite, J. Kerby, S. J. Kutz, I. Stirling, D. A. Walker (2013), Ecological Consequences of Sea-Ice Decline, *Science*, *341*, 519-524.
- Purves, D., J. P. W. Scharlemann, M. Harfoot, T. Newbold, D. P. Tittensor, J. Hutton, S. Emmott (2013), Ecosystems: Time to model all life on Earth, *Nature*, *493*, 295-297.
- Tsuyuzaki, S., K. Kushida, Y. Kodama (2009), Recovery of surface albedo and plant cover after wildfire in a *Picea mariana* forest in interior Alaska, *Climate Change*, *93*, 517-525.

テーマ 9

- Abdul-Aziz, O. I., N. J. Mantua, and K. W. Myers (2011), Potential climate change impacts on thermal habitats of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the North Pacific Ocean and adjacent seas, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, *68*, 1660-1680.
- AMAP(2009), *Arctic Pollution 2009*, Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo. xi+83pp.
- AMAP (2013), *AMAP Assessment 2013*, Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. viii + 99 pp.
- Bluhm, B. A., A. V. Gebbruk, R. Gradinger, R. R. Hopcroft, F. Huettmann, K. N. Kosobokova, B. I. Sirenko, and J. M. Weslawski (2011), Arctic marine biodiversity: An update of species richness and examples of biodiversity change, *Oceanography*, *24*, 232-248.
- Boetius, A., S. Albrecht, K. Bakker, C. Bienhold, J. Felden, and others (2013), Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice, *Science*, *339*, 1430-1432.
- Buchholz, et al. (2012), First observation of krill spawning in the high Arctic Kongsfjorden, west Spitsbergen. *Polar Biol.*, *35*, 1273-1279.
- CAFF (2013), *Life Linked to Ice: A guide to sea-ice-associated biodiversity in this time of rapid change*, CAFF Assessment Series 10, p. 115.
- CoML (2010), *First Census of Marine Life 2010*, Highlights of a decade of discovery, edited by J. H. Ausubel, p. 64.
- Cooper et al. (2013), Linkages between sea-ice coverage, pelagic-benthic coupling, and the distribution of spectacled eiders: Observations in March 2008, 2009 and 2010, northern Bering Sea. *Deep-Sea Res. II*, *94*, 31-43.
- Grebmeier, J.M. et al. (2006) Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced Northern Bering and Chukchi Seas, *Prog. Oceanogr.*, *71*, 331-361.
- Honjo, S., R. A. Krishfield, T. I. Eglinton, S. J. Manganini, J. N. Kemp, K. Doherty, J. Hwang, T. K. McKee, T. Takizawa (2010), Biological pump processes in the cryopelagic and hemipelagic Arctic Ocean: Canada Basin and Chukchi Rise, *Progress in Oceanography*, *85*, 137-170.
- Kaeriyama, M. (2008), Ecosystem-based sustainable conservation and management of Pacific salmon, In *Fisheries for Global Welfare and Environment*, edited by K. Tsukamoto, T. Kawamura, T. Takeuchi, T. D. Beard, Jr., and M. J. Kaiser, 371-380, TERRAPUB, Tokyo.
- Kaeriyama, M., H. Seo, H. Kudo, and M. Nagata (2012), Perspectives on wild and hatchery salmon interactions at sea, potential climate effects on Japanese chum salmon, and the need for sustainable salmon fishery management reform in Japan, *Environ. Biol. Fish.*, *94*, 165-177.
- Kaeriyama, M., H. Seo, and Y. Qin (2014), Effect of global warming on the life history and population dynamics of Japanese chum salmon, *Fisheries Sci.*, *80* (2), 251-260.
- Koshino, Y., H. Kudo, and M. Kaeriyama (2013), Stable isotope evidence indicates the incorporation of marine-derived nutrients transported by spawning Pacific salmon to Japanese catchments, *Freshwater Biology*, *58*, 1864-1877.
- McClelland, J. W., R. M. Holmes, K. H. Dunton, and R. W. Macdonald (2012), The Arctic Ocean Estuary, *Estuaries and Coasts*, *35*, 353-368.

- Mallory, and Braune (2012), Tracking contaminants in seabirds of Arctic Canada: temporal and spatial insights. *Mar. Pollut. Bull.*, *64*, 1475-1484.
- Matsuno, et al. (2011), Year-to-year changes of the mesozooplankton community in the Chukchi Sea during summers of 1991, 1992 and 2007, 2008. *Polar Biol.*, *34*, 1349-1360.
- Michelutti et al. (2009), Seabird-driven shifts in Arctic pond ecosystems. *Proc. R. Soc. B*, *276*, 591-596.
- Orr, J.C., et al. (2005), Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, *437*, 681-686.
- Pabi, et al. (2008), Primary production in the Arctic Ocean, 1998–2006. *J. Geophys. Res.*,
Doi:10.1029/2007JC004578.
- Tremblay, J.-É., and J. Gagnon (2009), The effects of irradiance and nutrient supply on the productivity of Arctic waters: a perspective on climate change, 73-92, In *Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions*, edited by J. C. J. Nihoul, and A. G. Kostianoy, Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Uchimiya, M., H. Fukuda, S. Nishino, T. Kikuchi, H. Ogawa, T. Nagata (2011), Does freshening of surface water enhance heterotrophic prokaryote production in the western Arctic? Empirical evidence from the Canada Basin during September 2009, *Journal of Oceanography*, *67*, 589–599.
- Wassmann, P.(1998), Retention versus export food chains: processes controlling sinking loss from marine pelagic systems, *Hydrobiologia*, *36*, 29-57.
- Wassmann, P. (2011), Arctic marine ecosystems in an era of rapid climate change, *Progress in Oceanography*, *90*, 1-17

テーマ 10

- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton (1999), Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere, *J. Geophys. Res.*, *104*, 30937-30946.
- Chau, J. L., L. P. Goncharenko, B. G. Fejer, and H.L. Liu (2012), Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden stratospheric warming events, *Space Sci Rev*, *168*, 385–417, DOI 10.1007/s11214-011-9797-5.
- 地球電磁気・地球惑星圏学会将来構想検討ワーキンググループ編 (2013), 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来, 地球電磁気・地球惑星圏学会.
- Gray, L. J., J. Beer, M. Geller, J. D. Haigh, M. Lockwood, K. Matthes, U. Cubasch, D. Fleitmann, G. Harrison, L. Hood, J. Luterbacher, G. A. Meehl, D. Shindell, B. van Geel, and W. White (2010), Solar Influences on Climate, *Reviews of Geophysics*, *48*, 1209/10/2009RG000282, 2010.
- Jackman, C. H., et al. (2001), Northern Hemisphere atmospheric effects due to the July 2000 solar proton event, *Geophys. Res. Lett.*, *28*, 2883-2886.
- Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, K. Terada, N. Terada, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito (2011), Vertical connection from the tropospheric activities to the ionospheric longitudinal structure simulated by a new Earth's whole atmosphere - ionosphere coupled model, *J. Geophys. Res.*, *116*, A01316,
doi:10.1029/2010JA015925.
- Makela J. J., and Y. Otsuka (2012), Overview of Nighttime Ionospheric Instabilities at Low- and Mid-Latitudes: Coupling Aspects Resulting in Structuring at the Mesoscale, *Space Science Reviews*, *168*, 419-440.
- Manney, G. L., et al. (2011), Unprecedented Arctic ozone loss in 2011, *Nature*, *478*, 469-475.
- Plumb, R. A., and K. Semeniuk (2003), Downward migration of extratropical zonal wind anomalies, *J. Geophys. Res.*, *108*, 4223, doi:10.1029/2002JD002773.
- Randall, C. E., V. L. Harvey, C. S. Singleton, S. M. Bailey, P. F. Bernath, M. Codrescu, H. Nakajima, and J. M. Russell (2007), Energetic particle precipitation effects on the Southern Hemisphere stratosphere in 1992-2005, *J. Geophys. Res.*, *112*, D08308, doi:10.1029/2006JD007696.
- Rishbeth, H., and O. K. Garriott (1969), Introduction to ionospheric physics, *International Geophysics Series*, *14*, Academic Press, New York.
- Roble, R. G., and R. E. Dickinson (1989), How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere?, *Geophys. Res. Lett.*, *16*, 1441-1444.
- Rozanov, E., et al. (2005), Atmospheric response to NO_y source due to energetic electron precipitation, *Geophys. Res. Lett.*, *32*, L14811, doi:10.1029/2005GL023041.
- Shiota, D., S. Tsuneta, M. Shimojo, N. Sako, D. Orozco Suarez, and R. Ishikawa (2012), Polar Field Reversal as observed with Hinode, *The Astrophysical Journal*, arXiv:1205.2154 [astro-ph.SR].
- Schunk, R. W., and A. F. Nagy (2000), *Ionospheres: Physics, plasma physics, and chemistry*, Cambridge University Press.
- Tsugawa, T., et al. (2011), Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, Planets and Space*, *63*, 875-879.
- Turner, J., J. E. Overland, and J. E. Walsh (2007), An Arctic and Antarctic perspective on recent climate change, *Int. J. Climatol.*, *27*, 277-293.
- Vadas, S. L., and G. Crowley (2010), Sources of the traveling ionospheric disturbances observed by the ionospheric TIDBIT sounder near Wallops Island on 30 October 2007, *J. Geophys. Res.*, *115*, A07324,
doi:10.1029/2009JA015053.

テーマ 11

- Alvey, A., C. Gaina, N. J. Kuszniir, T. H. Torsvik (2008), Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic, *Earth Planet. Sci. Lett.*, *274*, 310–321.
- Backman, J., K. Moran, L. A. Mayer, D. B. McInroy, and the Expedition 302 Scientists (2006), Proceedings IODP, 302, College Station TX (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.302.104.
- Barletta, V., and A. Bordoni (2009), Clearing observed PGR in GRACE data aimed at global viscosity inversion: Weighted Mass Trends technique, *Geophys. Res. Lett.*, *36*, L02305, doi:10.1029/2008GL036429.
- Barnett, T. P. (1984), The Estimation of "Global" Sea Level Change' A Problem of Uniqueness, *J. Geophys. Res.*, *89*, C5, 7980-7988.
- Bowring, S. A., I. S. Williams, W. Compston (1989), 3.96 Ga gneisses from the Slave province, Northwest Territories, Canada, *Geology*, *17*, 971-975.
- Carson, C. J., S. McLaren, A. L. Roberts, S. D. Boger, D. D. Blankenship (2014), Hot rocks in a cold place: high sub-glacial heat flow in East Antarctica, *Journal of Geological Society of London*, *171*, doi.org/10.1144/jgs2013-030.
- Edmonds, H. N. et al. (2003), Discovery of abundant hydrothermal venting on the ultraslow-spreading Gakkel ridge in the Arctic Ocean, *Nature*, *421*, 252-256.
- Ekman, M., and J. Mäkinen (1996), Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia, *Geophys. J. Int.*, *126*, 229–234.
- Glebovsky, V. Y., L. C. Kovacs, S. P. Maschenkov, J. M. Brozena (1998), Joint compilation of Russian and US Navy aeromagnetic data in the central Arctic seas, Roland, N., F. Tessesnsos (Eds.), ICAM III; Third International Conference on Arctic Margins, Polarforschungpp, 35–40.
- Jakobsson, M., R. Macnab, L. Mayer, R. Anderson, M. Edwards, J. Hatzky, H. W. Schenke, and P. Johnson (2008), An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2008GL033520.
- Jokat, W. (2003), Seismic investigations along the western sector of Alpha Ridge, Central Arctic Ocean, *Geophysical Journal International*, *152* (1), 185-201.
- Lebedeva-Ivanova, N. N., Y. Ya. Zamansky, A. E. Langinen, and M. Yu. Sorokin (2006), Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82°N: evidence of continental crust, *Geophysical Journal International*, *165*, 527–544. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02859.x
- Lorenz, H., D. G. Gee, A. N. Larionov, J. Majka (2012), The Grenville–Sveconorwegian orogen in the high Arctic, *Geological Magazine*, *149*, 875-891.
- Michael, P. J. et al. (2003), Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean, *Nature*, *423*, 956-961.
- Moran, K. et al. (2006), The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean, *Nature*, *441*(7093), 601–605.
- Nutman, A. P., V. C. Bennett, C. R. L. Friend, K. Horie, H. Hidaka (2007), ~3850 Ma tonalites in the Nuuk region, Greenland: geochemistry and their reworking within an Eoarchaeon gneiss complex, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *154*, 385-408.
- Pedersen, R. B. et al. (2010), Discovery of a black smoker vent field and vent fauna at the Arctic mid-ocean ridge, *Nature Communications*, *1*, http://dx.doi.org/10.1038/ncomms1124.
- Peltier, W. R. (2004), Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, *32*, 111-149.
- Sella, G., S. Stein, T. Dixon, M. Craymer, T. James, S. Mazzotti, and R. Dokka (2007), Observation of glacial isostatic adjustment in “stable” North America with GPS, *Geophys. Res. Lett.*, *34*, L02306, doi:10.1029/2006GL027081.
- Seton, M., R. D. Muller, S. Zahirovic, C. Gaina, T. Torsvik, G. Shephard, A. Talsma, M. Gurnis, M. Turner, S. Maus, M. Chandler (2012), Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma, *Earth-Science Reviews*, *113*, 212-270.
- Shank, T., J. Bailey, H. Edmonds, P. Forte, E. Helmke, et al. (2007), Biological and geological characteristics of the Gakkel Ridge, *Eos Trans. AGU Fall Meeting Supplement*, OS41C-08, 88.
- Sohn, R.A., et al. (2008), Explosive volcanism on the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean, *Nature*, *453*, 1236-1238.
- Vernikovskiy, V. A., N. L. Dobretsov, D. V. Metelkin, N. Yu. Matushkin, I. Yu. Koukakov (2013), Concerning tectonics and the tectonic evolution of the Arctic, *Russian Geology and Geophysics*, *54*, 838-858.
- Verhoef, J., W. R. Roest, R. Macnab, J. Arkani-Hamed (1996), Magnetic anomalies of the Arctic and North Atlantic oceans and adjacent land areas.
- Vogt, P. R., P. T. Taylor, L. C. Kovacs, and G. L. Johnson (1982), The Canada Basin: aeromagnetic constraints on structure and evolution, *Tectonophysics*, *89*, 295–336.

テーマ 12

- Brown, J., O. J. Ferrians, Jr, J. A. Heginbottom, and E. S. Melnikov (1997), Circum-arctic map of permafrost and ground ice conditions. United States Geological Survey, published for the International Permafrost Association, Circum-Pacific Map Series, Map CP-45, scale 1:10,000,000.
- Brown, J., O. J. Ferrians, Jr., J. A. Heginbottom, and E. S. Melnikov (2002), *Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2*, National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado USA.
- Francis, J. A., D. M. White, J. J. Cassano, W. J. Gutowski, Jr., L. D. Hinzman, M. M. Holland, M. A. Steele, and C. J. Vörösmarty (2009), An Arctic hydrologic system in transition: feedbacks and impacts on terrestrial, marine, and human life. *Journal of Geophysical Research*, *114*, G04019.
- Harris, C. et al. (2009), Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses, *Earth-Science Reviews*, *92* (3-4), 117-171
- 石川守, 斉藤和之 (2006), 気候・水循環に関わる凍土研究 -現状と展望-, 雪氷, 68, 639-656.
- Ishikawa, M., N. Sharkhuu, Y. Jambaljav, G. Davaa, K. Yoshikawa, and T. Ohata (2012), Thermal states of Mongolian permafrost, 173-178, Proc, 10th Int. Conf. Permafrost, Salehard.
- Koven, C. D., B. Ringeval, P. Friedlingstein, P. Ciais, P. Cadule, D. Khvorostyanov, G. Krinner, and C. Tarnocai (2011), Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming, *Proc. Natl Acad. Sci.*, *108*, 14769-74.
- Lachenbruch, A. H., and B. V. Marshall (1986), Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic, *Science*, *234*, 689-696.
- 松岡憲知・池田敦 (2012), 周氷河地形プロセス研究最前線, 地学雑誌, 121(2), 269-305.
- Romanovsky, V. E. et al. (2010), Thermal state of permafrost in Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, *21* (2), 136-155
- Saito, K., T. Zhang, D. Yang, S. Marchenko, R. G. Barry, V. Romanovsky, and L. Hinzman (2013), Influence of the physical terrestrial Arctic in the eco-climate system, *Ecological Applications*, *23*, 1778-1797.
- Schaefer, K., H. Lantuit, V. E. Romanovsky, and E. A. G. Schuur (2012), Policy Implications of Warming Permafrost, 31 pp., UNEP.
- Schirrmeister, L., D. Froese, V. Tumskoy, G. Grosse, and S. Wetterich (2013), Yedoma: Late Pleistocene Ice-Rich Syngenetic Permafrost of Beringia, in *Encyclopedia of Quaternary Science (Second Edition)*, edited by S. A. Elias, pp. 542-552, Elsevier.
- Schuur, E.A.G., and B. Abbott (2011), High risk of permafrost thaw, *Nature*, *480*(7375), 32-33.
- Shur, Y. L., and M. T. Jorgenson (2007), Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems, *Permafrost and Periglacial Processes* *18*, 7-19.
- Singh, V. P., P. Singh and U. K. Haritashya (Eds.) (2011), Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers, 844, *Springer*, doi: 10.1007/978-90-481-2642-2.
- Slater and Lawrence (2013), Diagnosing Present and Future Permafrost from Climate Models, *J. Clim.*, *26*(15), 5608-5623, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00341.1.
- Tarnocai, C., J. G. Canadell, E. A. G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova and S. Zimov (2009), Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region, *Global Biogeochemical Cycles*, *23*, GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.
- United Nations Environment Programme (2012), Policy implications of warming permafrost.
- Vonk, J. E., P. J. Mann, K. L. Dowdy, A. Davydova, S. P. Davydov, N. Zimov, R. G. M. Spencer, E. B. Bulygina, T. I. Eglinton, and R. M. Holmes (2013), Dissolved organic carbon loss from Yedoma permafrost amplified by ice wedge thaw, *Environ. Res. Lett.*, *8*, 035023, doi:10.1088/1748-9326/8/3/035023.
- Zhang, T., R. G. Barry, K. Knowles, J. A. Heginbottom, and J. Brown (1999), Statistical and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere, *Polar Geogr.*, *23*, 132-154.
- Zimov, S. A., E. A. G. Schuur, and F. S. Chapin III (2006), Permafrost and the global carbon budget, *Science*, *312*, 1612-1613.

テーマ A

- Bolch, T. et al. (2013), Mass loss of Greenland's glaciers and ice caps 2003-2008 revealed from ICESat data, *Geophysical Research Letters*, *40*, 875-881, doi:10.1002/grl.50270.
- Comiso, J. C., and F. Nishio (2008), Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data, *J. Geophys. Res.*, *113*, C02S07, doi:10.1029/2007JC004257.
- Fukuda, M. (1993), Genesis and occurrence of ice complex (Edoma) in lowland area along Arctic coast of east Siberia near Tiksi, In *Proceedings of the First Symposium on Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1992*, 101-103.
- Grebmeier, J. M., Moore, S. E., Overland, J. E., Frey, K. E., and Gradinger, R. (2010), Biological Response to Recent Pacific Arctic Sea Ice Retreats, *EOS Trans. AGU*, *91*(18), doi:10.1029/2010EO180001.
- Hori, M., T. Aoki, K. Stamnes, and W. Li (2007), ADEOS-II/GLI snow/ice products - part III: Retrieved results, *Remote Sens. Environ.*, *111*, 274-319, doi:10.1016/j.rse.2007.01.025.

- Kawamiya, M., T. Hajima, and T. Tokioka (2012), Foreseeing the forests: vegetation dynamics in an Earth system model, In *Forest for people*, Tudor Rose, Leicester, England, 291-294.
- Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. E. Bainbridge, C. A. Ekdahl, Jr., P. R. Guenther, L. S. Waterman, and J. F. S. Chin (1976), Atmospheric Carbon Dioxide Variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii, *Tellus*, *28*, 538-551.
- Key, J., M. Drinkwater, and J. Ukita (2007), Integrated Global Observing Strategy - Partnership (IGOS-P) Cryosphere Theme Report, *World Meteorological Organization*, *132 pp*, Geneva.
- Moon T. et al. (2012), 21st-century evolution of Greenland outlet glacier velocities, *Science* *336(6081)*, 576-578, doi: 10.1126/science.1219985.
- Morimoto, S., S. Aoki, T. Nakazawa and T. Yamanouchi (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, doi:10.1029/2005GL024648.
- Quinn, P. et al. (2007), Arctic haze: current trends and knowledge gaps, *Tellus Series B-chemical and Physical Meteorology*, doi:10.1111/j.1600-0889.2006.00238.x
- Serreze, M. C., A. P. Barrett, A. G. Slater, M. Steele, J. Zhang, and K. E. Trenberth (2007), The large-scale energy budget of the Arctic, *J. Geophys. Res.*, *112*, D11122, doi:10.1029/2006JD008230.
- Steffen, K., and J. E. Box (2001), Surface climatology of the Greenland ice sheet: Greenland climate network 1995-1999, *J. Geophys. Res.*, *106 (D24)*, 33,951-33,964, doi:10.1029/2001JD900161.
- 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*, 48-55.
- Tape, K., M. Sturm, and C. Racine (2006), The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic, *Global Change Biology*, *12*, 686-702.
- Ueyama, M., H. Iwata, and Y. Harazono (2014), Autumn warming reduces the CO₂ sink of a black spruce forest in interior Alaska based on a nine-year eddy covariance measurement, *Global Change Biology*, *20*, 1161-1173.
- Vaughan, D. G., J. C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, P. Mote, T. Murray, F. Paul, J. Ren, E. Rignot, O. Solomina, K. Steffen, and T. Zhang (2013), Observations: Cryosphere, In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Viereck, L. A., N. R. Werdin-Pfisterer, P. C. Adams, and K. Yoshikawa (2008), Effect of Wildfire and Fireline Construction on the Annual Depth of Thaw in a Black Spruce Permafrost Forest in Interior Alaska: A 36-Year Record of Recovery, In *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, 1845-1850, Fairbanks, Alaska.
- Wang, X., and J. Key (2005), Arctic Surface, Cloud, and Radiation Properties Based on the AVHRR Polar Pathfinder Dataset, Part II: Recent Trends, *Journal of Climate*, *18(14)*, 2575-2593.
- Wientjes, I. G. M., R. S. W. Van de Wal, G. J. Reichert, A. Sluijs, and J. Oerlemans (2007), Dust from the dark region in the western ablation zone of the Greenland ice sheet, *The Cryosphere*, *5*, 589-601, doi:10.5194/tc-5-589-2011.
- Yamanouchi, T. (2011), Early 20th century warming in the Arctic: A review, *Polar Science*, doi:10.1016/j.polar.2010.10.002.

テーマ B

- Bindschadler, R., S. Nowicki, A. Abe-Ouchi, A. Aschwanden, H. Choi, J. Fastook, G. Granzow, R. Greve, G. Gutowski, U. Herzfeld, C. Jackson, J. Johnson, C. Khroulev, A. Levermann, W. Lipscomb, M. Martin, M. Morlighem, B. Parizek, D. Pollard, S. Price, D. Ren, F. Saito, T. Sato, H. Seddik, H. Seroussi, K. Takahashi, R. Walker and W. L. Wang (2013), Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea level (the {SeaRISE} project), *J. Glaciol.*, *59*, 195-224.
- De Boer, G., M. D. Shupe, P. M. Caldwell, S. E. Bauer, O. Persson, J. S., Boyle, M. Kelley, S. A. Klein, and M. Tjernstrom (2014), Near-surface meteorology during the Arctic Summer Cloud Ocean Study (ASCOS): evaluation of reanalysis and global climate models, *Atmos. Chem Phys.*, *14*, 427-445, www.atmos-chem-phys.net/14/427/2014/, doi:10.5194/acp-14-427-2014.
- Ise, T., A. L. Dunn, S. C. Wofsy, and P. R. Moorcroft (2008), High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback, *Nature Geoscience*, *1*, 763-766.
- Jahn et al. (2012), Late-twentieth-century simulation of Arctic sea ice and ocean properties in the CCSM4, *J. Climate*, *25*, 1431-1452.
- Jakobsson, M., L. A. Mayer, B. Coakley, J. A. Dowdeswell, S. Forbes, B. Fridman, H. Hodnesdal, R. Noormets, R. Pedersen, M. Rebesco, H.-W. Schenke, Y. Zarayskaya, A. D. Accettella, A. Armstrong, R. M. Anderson, P. Bienhoff, A. Camerlenghi, I. Church, M. Edwards, J. V. Gardner, J. K. Hall, B. Hell, O. B. Hestvik, Y. Kristoffersen, C. Marcussen, R. Mohammad, D. Mosher, S. V. Nghiem, M. T. Pedrosa, P. G. Travaglini, and P. Weatherall, (2012), The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2012GL052219.

- O'ishi, R. and A. Abe-Ouchi (2009), Influence of dynamic vegetation on climate change arising from increasing CO₂, *Climate Dynamics*, *33*, 645-663.
- Proshutinsky, A., and Coauthors (2011), Recent advances in Arctic ocean studies employing models from the Arctic Ocean Model Intercomparison Project, *Oceanography*, *24*(3), 102-113.
- Proshutinsky, A., and Z. Kowalik (2007), Preface to special section on Arctic Ocean Model Intercomparison Project (AOMIP) Studies and Results, *J. Geophys. Res.*, *112*, C04S01, doi:10.1029/2006JC004017.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, and T. Nasuno (2008), Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulation. *J. Comp. Phys.*, *227*, 3486-3514.
- Sueyoshi, T., R. Ohgaito, A. Yamamoto, M. O. Chikamoto, T. Hajima, H. Okajima, M. Yoshimori, M. Abe, R. O'ishi, F. Saito, S. Watanabe, M. Kawamiya and A. Abe-Ouchi (2013), Set-up of the PMIP3 paleoclimate experiments conducted using an Earth system model, MIROC-ESM, *Geosci. Model Dev.*, *6*, 819-836.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. a. Meehl (2012), An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, *93*, 485-498.
- Watanabe, M., and Coauthors (2010), Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity, *J. Climate*, *23*, 6312-6355.
- Yi, S. H., M. K. Woo and M. A. Arain (2007), Impacts of peat and vegetation on permafrost degradation under climate warming. *Geophys. Res. Lett.*, *34*(16), L16504.

テーマ C

- 淡路敏之, 蒲池政文, 池田元美, 石川洋一編著 (2009), データ同化～観測・実験とモデルを融合するイノベーション～, 京都大学学術出版会, 284.
- Bourassa, et al. (2013), High-latitude ocean and sea-ice surface fluxes: Challenges for climate research, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *94*(3), 403-423, doi:10.1175/BAMS-D-11-00244.1.
- Dameris, M. and P. Jöckel (2013), Numerical modelling of climate-chemistry connections: Recent developments and future challenges, *Atmosphere*, *4*, 132-156, doi: 10.3390/atmos4020132.
- Goldberg, D. N., and P. Heimbach (2013), Parameter and state estimation with a time-dependent adjoint marine ice sheet model, *The Cryosphere Discuss.*, *7*, 2845-2890, doi:10.5194/tcd-7-2845-2013.
- Heimbach, P., and V. Bugnion (2009), Greenland ice-sheet volume sensitivity to basal, surface and initial conditions derived from an adjoint model, *Ann. Glaciol.*, *50*, 67-80, doi:10.3189/172756409789624256.
- Inoue, J., T. Enomoto, and M. E. Hori (2013), The impact of radiosonde data over the ice-free Arctic Ocean on the atmosphere circulation in the Northern Hemisphere, *Geophys. Res. Lett.*, *40*, 864-869.
- Jakobson, E., T. Vihma, T. Palo, L. Jakobson, H. Keernik, and J. Jaagus (2012), Validation of atmospheric reanalyses over the central Arctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, *39*, L10802, doi:10.1029/2012GL051591.
- Kimball, J. S., L. A. Jones, K. Zhang, F. A. Heinsch, K. C. McDonald, and W. C. Oechel (2009), A satellite approach to estimate land-atmosphere CO₂ exchange for Boreal and Arctic biomes using MODIS and AMSR-E, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *47*(2), 569-587, 10.1109/TGRS.2008.2003248.
- Lindsay, R., C. Haas, S. Hendricks, P. Hunkeler, N. Kurtz, J. Paden, B. Panzer, J. Sonntag, J. Yungel, and J. Zhang (2012), Seasonal forecasts of Arctic sea ice initialized with observations of ice thickness, *Geophys. Res. Lett.*, *39*, L21502, doi:10.1029/2012GL053576.
- Popova et al. (2012), What controls primary production in the Arctic Ocean? Results from an intercomparison of five general circulation models with biogeochemistry, *J. Geophys. Res.*, *117*, doi:10.1029/2011JC007112.
- Toyoda et al. (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, doi:10.2151/sola.2011-010.
- Toyoda et al. (2013). Improved state estimations of lower trophic ecosystems in the global ocean based on a Green's function approach, *Prog. Oceanogr.*, *119*, 90-107.
- 碓氷典久、今泉孝男、辻野博之 (2010), MOVE/MRI.COM への海氷密度同化導入に向けてーオホーツク海を対象とした予備調査と簡易同化実験ー, 測候時報 第 77 卷 特別号.
- Valsala, K. V. and S. Maksyutov (2010), Simulation and assimilation of global ocean pCO₂ and air-sea CO₂ fluxes using ship observations of surface ocean pCO₂ in a simplified biogeochemical offline model, *Tellus*, *62B*, 821-840, doi:10.1111/j.1600-0889.2010.00495.x.

執筆等一覧（本報告書全体版作成に携わった者、50音順）

北極環境研究長期構想作成ワーキンググループ（2013年2月～）

池田元美（北海道大学）
伊勢武史（京都大学）
大畑哲夫（海洋研究開発機構／国立極地研究所）
川合美千代（東京海洋大学）
兒玉裕二（国立極地研究所）
杉山慎（北海道大学）
藤井理行（総合研究大学院大学／国立極地研究所）
山内恭（国立極地研究所／総合研究大学院大学）
吉田龍平（東北大学）
吉森正和（北海道大学）
渡邊英嗣（海洋研究開発機構）

執筆者、査読者

1～4章、10章

北極環境研究長期構想作成ワーキンググループ

5～8章

テーマ1：地球温暖化の北極域増幅

代表 青木輝夫 副代表 阿部彩子、榎本浩之、吉森正和

青木一真（富山大学）	鈴木力英（海洋研究開発機構）
青木輝夫（気象庁気象研究所）	須股浩（アルフレッドウェゲナー研究所）
阿部彩子（東京大学）	竹村俊彦（九州大学）
阿部学（海洋研究開発機構）	富川喜弘（国立極地研究所／総合研究大学院大学）
池田元美（北海道大学）	羽角博康（東京大学）
石井正好（気象庁気象研究所）	廣田渚郎（国立極地研究所／東京大学）
猪上淳（国立極地研究所／総合研究大学院大学）	藤原均（成蹊大学）
榎本浩之（国立極地研究所／総合研究大学院大学）	堀正岳（海洋研究開発機構）
大石龍太（国立極地研究所／東京大学）	本田明治（新潟大学）
岡本創（九州大学）	三好勉信（九州大学）
小川泰信（国立極地研究所／総合研究大学院大学）	山崎孝治（国立極地研究所／北海道大学）
小端拓郎（ベルン大学）	山内恭（国立極地研究所／総合研究大学院大学）
小室芳樹（海洋研究開発機構）	芳村圭（東京大学）
坂野井和代（駒澤大学）	吉森正和（北海道大学）
佐藤正樹（東京大学）	渡部雅浩（東京大学）
塩原匡貴（国立極地研究所／総合研究大学院大学）	

査読 藤井理行（総合研究大学院大学／国立極地研究所）

テーマ2：海水減少のメカニズムと影響

代表 渡邊英嗣 副代表 大島慶一郎

池田元美 (北海道大学) 豊田威信 (北海道大学)
猪上淳 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 西岡純 (北海道大学)
大島慶一郎 (北海道大学) 二橋創平 (苫小牧工業高等専門学校)
小野純 (国立極地研究所／東京大学) 野村大樹 (北海道大学)
川口悠介 (ワシントン大学) 平野大輔 (国立極地研究所)
木村詞明 (国立極地研究所／東京大学) 溝端浩平 (東京海洋大学)
田村岳史 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 渡邊英嗣 (海洋研究開発機構)
豊田隆寛 (気象庁気象研究所)

査読 菊地隆 (海洋研究開発機構)

羽角博康 (東京大学)

テーマ3：物質循環と生態系変化

代表 鈴木力英 副代表 原田尚美

青木周司 (東北大学) 永田俊 (東京大学)
石川守 (北海道大学) 西岡純 (北海道大学)
伊勢武史 (京都大学) 西野茂人 (海洋研究開発機構)
内田雅己 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 原田尚美 (海洋研究開発機構)
大石龍太 (国立極地研究所／東京大学) 朴昊澤 (海洋研究開発機構)
大畑哲夫 (海洋研究開発機構／国立極地研究所) 早坂洋史 (北海道大学)
川合美千代 (東京海洋大学) 原圭一郎 (福岡大学)
久万健志 (北海道大学) 原登志彦 (北海道大学)
小島覚 (北方生態環境研究学房) 平譚享 (北海道大学)
斉藤和之 (海洋研究開発機構) 松浦陽次郎 (森林総合研究所)
三瓶真 (広島大学) 松岡敦 (ラヴール大学)
杉本敦子 (北海道大学) 森下智陽 (森林総合研究所)
鈴木力英 (海洋研究開発機構) 山内恭 (国立極地研究所／総合研究大学院大学)
知北和久 (北海道大学) 渡邊豊 (北海道大学)

査読 三枝信子 (国立環境研究所)

佐々木洋 (石巻専修大学)

テーマ4：氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環

代表 飯島慈裕 副代表 杉山慎

青木輝夫 (気象庁気象研究所) 齋藤冬樹 (海洋研究開発機構)
東久美子 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 末吉哲雄 (国立極地研究所／海洋研究開発機構)
阿部彩子 (東京大学) 杉浦幸之助 (富山大学)
飯島慈裕 (海洋研究開発機構) 杉山慎 (北海道大学)
石川守 (北海道大学) 鈴木和良 (海洋研究開発機構)
岩花剛 (アラスカ大学) 竹内望 (千葉大学)
榎本浩之 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 坪井誠司 (海洋研究開発機構)
大島和裕 (海洋研究開発機構) 朴昊澤 (海洋研究開発機構)
太田岳史 (名古屋大学) 平沢尚彦 (国立極地研究所／総合研究大学院大学)
大畑哲夫 (海洋研究開発機構／国立極地研究所) 藤井理行 (総合研究大学院大学／国立極地研究所)
金尾政紀 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 的場澄人 (北海道大学)
川合美千代 (東京海洋大学) 山崎剛 (東北大学)
川村賢二 (国立極地研究所／総合研究大学院大学／
海洋研究開発機構) 芳村圭 (東京大学)

査読 高橋修平 (北見工業大学)

檜山哲哉 (名古屋大学)

テーマ5：北極・全球相互作用

代表 高谷康太郎 副代表 高田久美子

池田元美 (北海道大学) 中村尚 (東京大学)
猪上淳 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 羽角博康 (東京大学)
浮田甚郎 (新潟大学) 廣田渚郎 (国立極地研究所／東京大学)
小川泰信 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 藤原均 (成蹊大学)
坂野井和代 (駒澤大学) 堀正岳 (海洋研究開発機構)
鈴木力英 (海洋研究開発機構) 本田明治 (新潟大学)
高田久美子 (国立極地研究所／国立環境研究所) 溝端浩平 (東京海洋大学)
高谷康太郎 (京都産業大学) 三好勉信 (九州大学)
立花義裕 (三重大学) 山崎孝治 (国立極地研究所／北海道大学)
田中博 (筑波大学) 吉田龍平 (東北大学)
富川喜弘 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 渡部雅浩 (東京大学)
豊田隆寛 (気象庁気象研究所)

査読 市井和仁 (海洋研究開発機構)
江尻省 (国立極地研究所／総合研究大学院大学)
川村隆一 (九州大学)
菊地隆 (海洋研究開発機構)

テーマ6：古環境から探る北極環境の将来

代表 川村賢二 副代表 山本正伸、芳村圭

東久美子 (国立極地研究所／総合研究大学院大学) 末吉哲雄 (国立極地研究所／海洋研究開発機構)
阿部彩子 (東京大学) 菅沼悠介 (国立極地研究所／総合研究大学院大学)
飯塚芳徳 (北海道大学) 関幸 (北海道大学)
岩花剛 (アラスカ大学) 原田尚美 (海洋研究開発機構)
植村立 (琉球大学) 藤井理行 (総合研究大学院大学／国立極地研究所)
大石龍太 (国立極地研究所／東京大学) 的場澄人 (北海道大学)
奥野淳一 (国立極地研究所／海洋研究開発機構) 三浦英樹 (国立極地研究所／総合研究大学院大学)
川村賢二 (国立極地研究所／総合研究大学院大学／
海洋研究開発機構) 山本正伸 (北海道大学)
小端拓郎 (ベルン大学) 芳村圭 (東京大学)
齋藤冬樹 (海洋研究開発機構) 吉森正和 (北海道大学)

査読 高橋孝三 (北星学園大学)
堀内一穂 (弘前大学)

テーマ7：北極環境変化の社会への影響

代表 池田元美 副代表 高倉浩樹

荒木田葉月 (理化学研究所) 立澤史郎 (北海道大学)
池田元美 (北海道大学) 坪井誠司 (海洋研究開発機構)
大塚雄一 (名古屋大学) 早坂洋史 (北海道大学)
齋藤誠一 (北海道大学) 松村寛一郎 (関西学院大学)
佐藤篤司 (防災科学技術研究所) 三好由純 (名古屋大学)
高倉浩樹 (東北大学) 山口一 (東京大学)

査読 岸上伸啓 (国立民族学博物館)
北川弘光 (海洋政策研究財団)

テーマ8：陸域生態系と生物多様性への影響

代表 原登志彦 副代表 伊勢武史

荒木田葉月 (理化学研究所)
伊勢武史 (京都大学)
大畑哲夫 (海洋研究開発機構/国立極地研究所)
小島 覚 (北方生態環境研究学房)
鈴木力英 (海洋研究開発機構)
高橋英樹 (北海道大学)
立澤史郎 (北海道大学)

露崎史朗 (北海道大学)
羽島知洋 (海洋研究開発機構)
早坂洋史 (北海道大学)
原登志彦 (北海道大学)
原口 昭 (北九州市立大学)
吉田龍平 (東北大学)

査読 藤巻裕蔵 (帯広畜産大学)

テーマ9：海洋生態系と生物多様性への影響

代表 平譚 享 副代表 綿貫 豊

飯田高大 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)
池田元美 (北海道大学)
内宮万里央 (国立極地研究所/東京大学)
小野寺丈尚太郎 (海洋研究開発機構)
帰山雅秀 (北海道大学)
川合美千代 (東京海洋大学)
齋藤誠一 (北海道大学)

三瓶 真 (広島大学)
服部 寛 (東海大学)
平譚 享 (北海道大学)
松野孝平 (国立極地研究所/北海道大学)
山口 篤 (北海道大学)
綿貫 豊 (北海道大学)

査読 原田尚美 (海洋研究開発機構)
三谷曜子 (北海道大学)

テーマ10：ジオスペース環境

代表 小川泰信 副代表 富川喜弘

大塚雄一 (名古屋大学)
小川泰信 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)
坂野井和代 (駒澤大学)
塩川和夫 (名古屋大学)
富川喜弘 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)

野澤悟徳 (名古屋大学)
藤田 茂 (気象庁気象大学校)
藤原 均 (成蹊大学)
三好勉信 (九州大学)
三好由純 (名古屋大学)

査読 中村卓司 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)
細川敬祐 (電気通信大学)

テーマ11：表層環境変動と固体地球の相互作用

代表 野木義史 副代表 三浦英樹

奥野淳一 (国立極地研究所/海洋研究開発機構)
川村賢二 (国立極地研究所/総合研究大学院大学/
海洋研究開発機構)
菅沼悠介 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)
杉山 慎 (北海道大学)

土井浩一郎 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)
野木義史 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)
藤井理行 (総合研究大学院大学/国立極地研究所)
外田智千 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)
三浦英樹 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)

査読 沖野郷子 (東京大学)
福田洋一 (京都大学)

テーマ12：永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解

代表 末吉哲雄 副代表 石川 守

石川 守 (北海道大学)

岩花 剛 (アラスカ大学)

大畑 哲夫 (海洋研究開発機構/国立極地研究所)

斎藤 和之 (海洋研究開発機構)

末吉 哲雄 (国立極地研究所/海洋研究開発機構)

原田 敏一郎 (宮城大学)

藤井 理行 (総合研究大学院大学/国立極地研究所)

査読 池田 敦 (筑波大学)

檜山 哲哉 (名古屋大学)

テーマA：持続するシームレスなモニタリング

代表 山崎 剛 副代表 田村 岳史

青木 輝夫 (気象庁気象研究所)

飯田 高大 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)

市井 和仁 (海洋研究開発機構)

大島 慶一郎 (北海道大学)

木村 詞明 (国立極地研究所/東京大学)

紺屋 恵子 (海洋研究開発機構)

末吉 哲雄 (国立極地研究所/海洋研究開発機構)

杉本 敦子 (北海道大学)

杉山 慎 (北海道大学)

鈴木 力英 (海洋研究開発機構)

田村 岳史 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)

豊田 威信 (北海道大学)

二橋 創平 (苫小牧工業高等専門学校)

原 圭一郎 (福岡大学)

原田 敏一郎 (宮城大学)

藤井 理行 (総合研究大学院大学/国立極地研究所)

溝端 浩平 (東京海洋大学)

森本 真司 (東北大学)

山崎 剛 (東北大学)

山内 恭 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)

査読 太田 岳史 (名古屋大学)

テーマB：複合分野をつなぐ地球システムモデリング

代表 阿部 彩子 副代表 小室 芳樹

阿部 彩子 (東京大学)

池田 元美 (北海道大学)

伊勢 武史 (京都大学)

大石 龍太 (国立極地研究所/東京大学)

小野 純 (国立極地研究所/東京大学)

小室 芳樹 (海洋研究開発機構)

齋藤 冬樹 (海洋研究開発機構)

佐藤 永 (海洋研究開発機構)

佐藤 正樹 (東京大学)

山崎 剛 (東北大学)

吉森 正和 (北海道大学)

渡邊 英嗣 (海洋研究開発機構)

査読 江守 正多 (国立環境研究所)

時岡 達志 (海洋研究開発機構)

テーマC：モニタリングとモデリングをつなぐデータ同化

代表 若松 剛 副代表 池田 元美

池田 元美 (北海道大学)

猪上 淳 (国立極地研究所/総合研究大学院大学)

小野 純 (国立極地研究所/東京大学)

須股 浩 (アルフレッドウェグナー研究所)

豊田 隆寛 (気象庁気象研究所)

若松 剛 (海洋研究開発機構)

渡邊 英嗣 (海洋研究開発機構)

査読 石井 正好 (気象庁気象研究所)

中野 英之 (気象庁気象研究所)

9章 研究基盤の整備

- 青木輝夫 (気象庁気象研究所)
阿部彩子 (東京大学)
飯島慈裕 (海洋研究開発機構)
池田元美 (北海道大学)
石川守 (北海道大学)
伊勢武史 (京都大学)
大畑哲夫 (海洋研究開発機構／国立極地研究所)
岡本創 (九州大学)
川合美千代 (東京海洋大学)
川村賢二 (国立極地研究所／総合研究大学院大学／
海洋研究開発機構)
小室芳樹 (海洋研究開発機構)
澤柿教伸 (北海道大学)
塩原匡貴 (国立極地研究所／総合研究大学院大学)
末吉哲雄 (国立極地研究所／海洋研究開発機構)
杉本敦子 (北海道大学)
杉山慎 (北海道大学)
鈴木力英 (海洋研究開発機構)
舘山一孝 (北見工業大学)
- 谷川朋範 (宇宙航空研究開発機構)
田村岳史 (国立極地研究所／総合研究大学院大学)
豊田威信 (北海道大学)
西岡純 (北海道大学)
西野茂人 (海洋研究開発機構)
野木義史 (国立極地研究所／総合研究大学院大学)
野村大樹 (北海道大学)
平譚享 (北海道大学)
藤井理行 (総合研究大学院大学／国立極地研究所)
藤原均 (成蹊大学)
古屋正人 (北海道大学)
堀雅裕 (宇宙航空研究開発機構)
溝端浩平 (東京海洋大学)
矢吹裕伯 (海洋研究開発機構／国立極地研究所)
山内恭 (国立極地研究所／総合研究大学院大学)
山本正伸 (北海道大学)
吉田龍平 (東北大学)
渡邊英嗣 (海洋研究開発機構)

北極環境研究コンソーシアム 運営委員

第1期 (2011年5月～2013年6月、所属は任期中のもの)

青木輝夫 (気象庁気象研究所)	杉山 慎 (北海道大学)
東久美子 (国立極地研究所)	田中 博 (筑波大学)
阿部彩子 (東京大学)	中坪孝之 (広島大学)
五十嵐 保 (リモート・センシング技術センター)	中村卓司 (国立極地研究所)
榎本浩之 (国立極地研究所)	野沢 徹 (国立環境研究所)
大島慶一郎 (北海道大学)	羽角博康 (東京大学)
大畑哲夫 (海洋研究開発機構)	檜山哲哉 (総合地球環境学研究所)
神田啓史 (国立極地研究所)	福田正己 (福山市立大学)
菊地 隆 (海洋研究開発機構)	松浦陽次郎 (森林総合研究所)
齊藤誠一 (北海道大学)	矢吹裕伯 (海洋研究開発機構／国立極地研究所)
島田浩二 (東京海洋大学)	山口 一 (東京大学)
杉本敦子 (北海道大学)	山内 恭 (国立極地研究所)

第2期 (2013年6月～)

青木輝夫 (気象庁気象研究所)	中村 尚 (東京大学)
東久美子 (国立極地研究所)	野沢 徹 (岡山大学)
阿部彩子 (東京大学)	羽角博康 (東京大学)
榎本浩之 (国立極地研究所)	檜山哲哉 (名古屋大学)
大畑哲夫 (海洋研究開発機構／国立極地研究所)	深町 康 (北海道大学)
齊藤誠一 (北海道大学)	福田正己 (福山市立大学)
島田浩二 (東京海洋大学)	堀 雅裕 (宇宙航空研究開発機構)
杉本敦子 (北海道大学)	松浦陽次郎 (森林総合研究所)
杉山 慎 (北海道大学)	矢吹裕伯 (海洋研究開発機構／国立極地研究所)
田中 博 (筑波大学)	山口 一 (東京大学)
中坪孝之 (広島大学)	山内 恭 (国立極地研究所)
中村卓司 (国立極地研究所)	

北極環境研究の長期構想
(Long-term Plan for Arctic Environmental Research)

北極環境研究コンソーシアム
(JCAR, Japan Consortium for Arctic Environmental Research)

2014年9月 発行
2015年3月 改訂

連絡先: 北極環境研究コンソーシアム事務局
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3
国立極地研究所 内

E-mail: jcar-office@nipr.ac.jp

ホームページ <http://www.jcar.org/>

