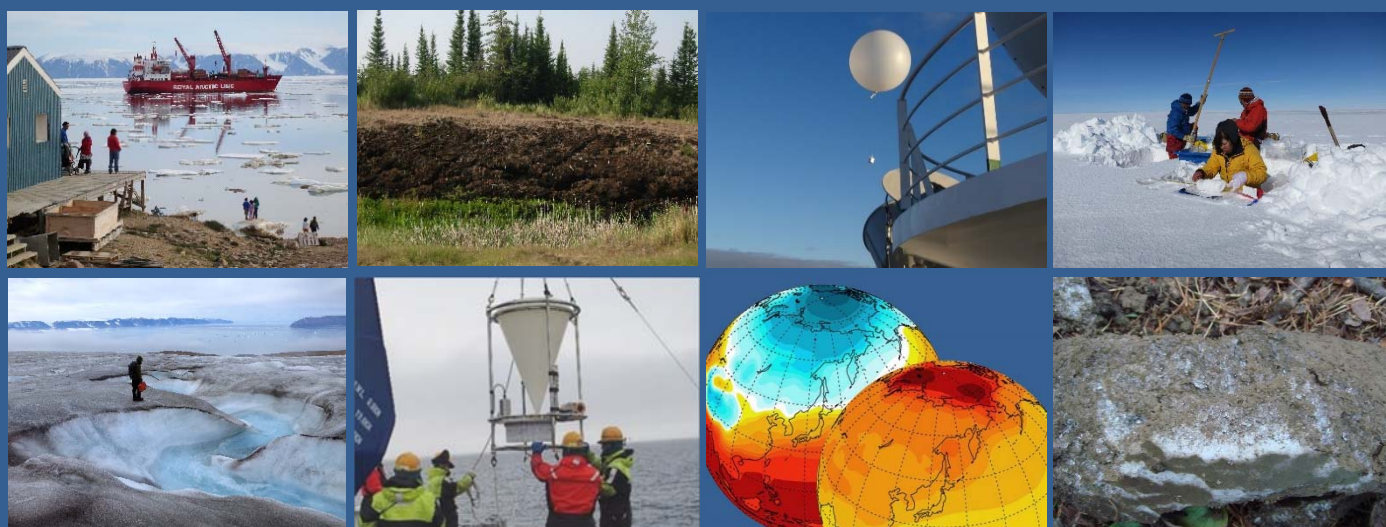


北極環境研究の長期構想

要約版



北極環境研究コンソーシアム（JCAR）

2014年9月

2014年12月15日 改訂版

この冊子は「北極環境研究の長期構想」の要約版です。
長期構想の詳細は、全体版を参照して下さい。
全体版は、北極環境研究コンソーシアムのウェブサイトに掲載されています。
<http://www.jcar.org/>

北極環境研究の長期構想 要約版

目次

1. まえがき.....	1
(1) 報告書で目指すこと.....	1
(2) 報告書作成の背景と経緯.....	1
(3) 内容の説明.....	3
2. 北極環境の現在までと近い将来に起こりうる変化.....	3
3. 北極環境研究の歴史.....	6
4. 全テーマの要旨.....	7
(1) 「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.....	7
テーマ1 : 地球温暖化の北極域増幅.....	7
テーマ2 : 海氷減少のメカニズムと影響.....	8
テーマ3 : 物質循環と生態系変化.....	9
テーマ4 : 氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環.....	10
テーマ5 : 北極・全球相互作用.....	11
テーマ6 : 古環境から探る北極環境の将来.....	12
テーマ7 : 北極環境変化の社会への影響.....	13
(2) 「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.....	13
テーマ8 : 陸域生態系と生物多様性への影響.....	13
テーマ9 : 海洋生態系と生物多様性への影響.....	14
(3) 「北極環境研究の広範な重要課題」研究テーマ.....	15
テーマ10 : ジオスペース環境.....	15
テーマ11 : 表層環境変動と固体地球の相互作用.....	16
テーマ12 : 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解.....	17
(4) 「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.....	18
テーマA : 持続するシームレスなモニタリング.....	18
テーマB : 複合分野をつなぐ地球システムモデリング.....	19
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.....	20
5. 研究基盤の整備.....	20
執筆者等一覧.....	22

1. まえがき

(1) 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、従来は通年海氷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湧くであろう。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湧いてくるであろう。自然科学ばかりでなく、先住民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。

(2) 報告書作成の背景と経緯

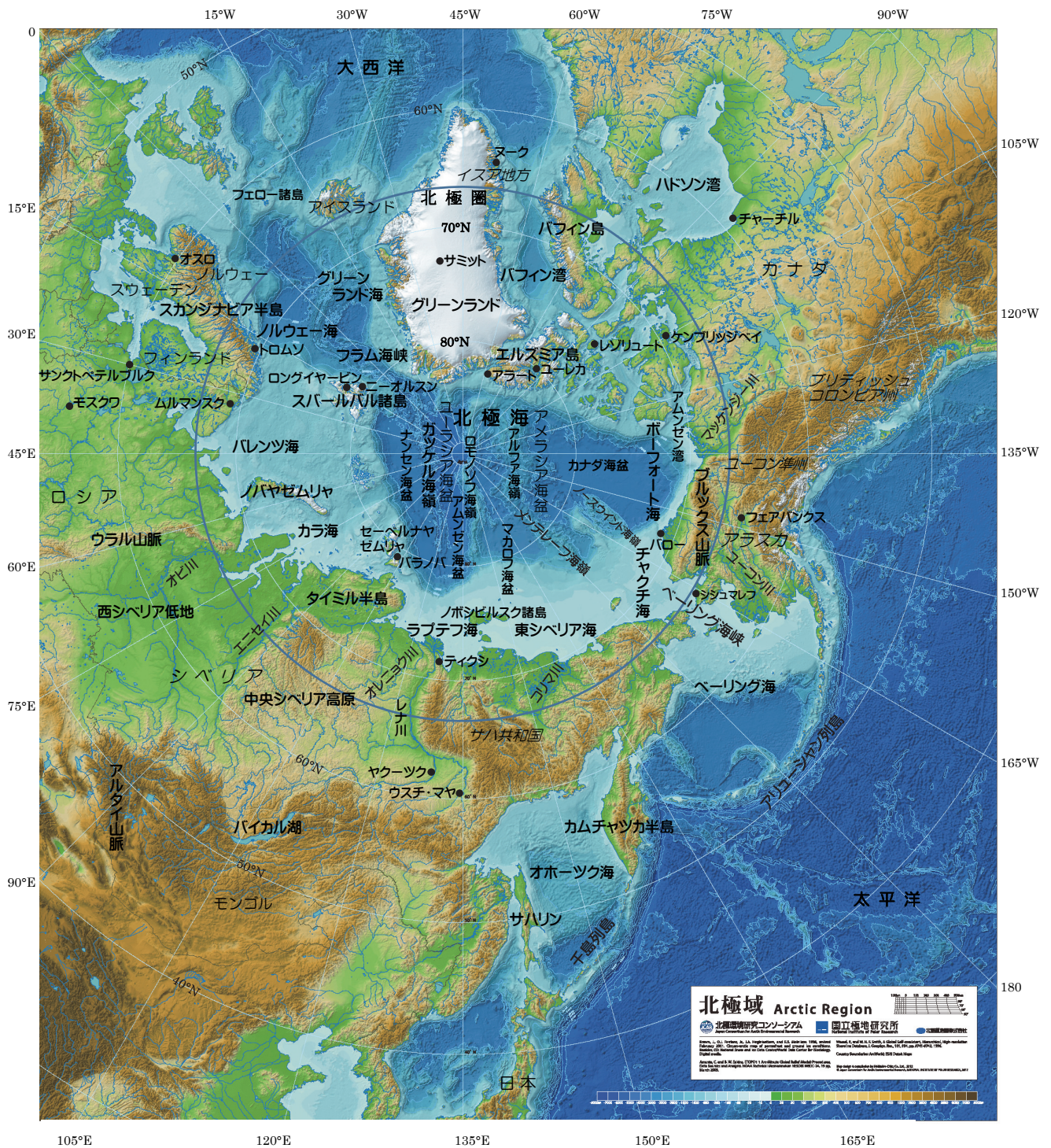
長期構想の作成自体は、現在進められている GRENE 北極気候変動事業²の運用基本方針、JCAR³の趣意書と規約において謳われている。これまで我が国で「北極環境研究」に特化した長期構想はなく、現状の分析、及び将来取るべき方針を示すことは重要である。JCAR が本長期構想を作成できた事実は、その存在意義を確たるものにしたと言っても過言ではない。構想には次世代研究者の希望が反映されており、それらの実現に向けた共同作業によって、多くの研究者が共通の目標を持って前進することが可能となる。

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。

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も含む。

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。



(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。

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。

(3) 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描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は、社会的な関心事を含む「まえがき」から始め、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。

2. 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りうるのかについて、北極環境研究の専門家が答えるべき学術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、すでに取り組ま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、複合分野の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、その上にある超高層大気にと

っては長波放射が減るので寒冷化する。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ば、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

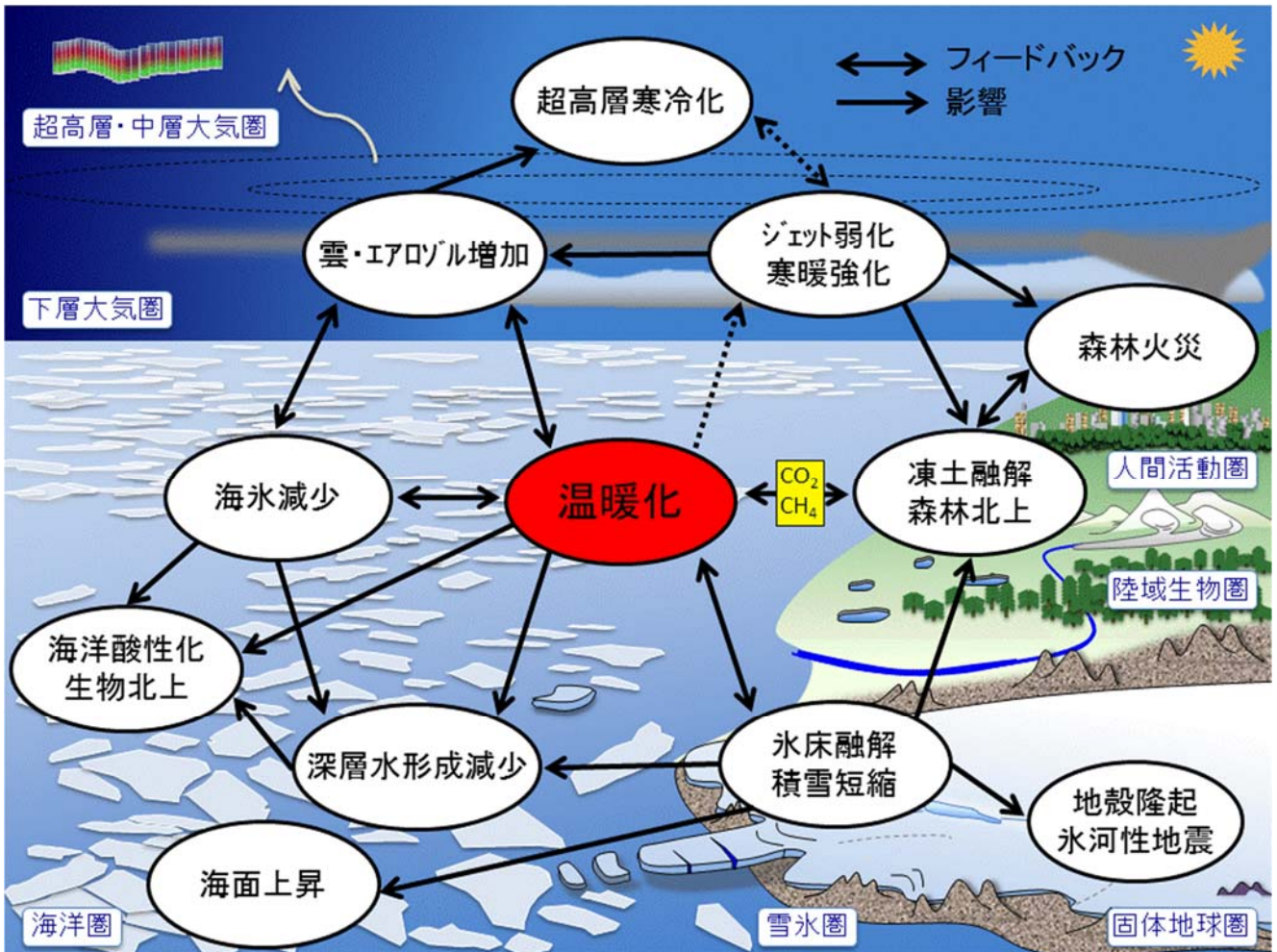


図2 現在進行中の気候変化に伴って、北極域の大気、陸域、雪氷、海洋に起こりつつある顕著で重要とおもわれる変化を揭示し、それらの間、および地球温暖化との間に働く影響(一方から他方へ)とフィードバック(双方の間で)を示している。あくまでも主たる作用を示したものであり、これら以外にも影響とフィードバックがありうることに留意していただきたい。実線はほぼ確かなものであり、点線は理論的には考えられるがまだ仮説の段階のものを示している。また、雲と温暖化の関係のように、矢印と逆の影響を持つ場合もある。すなわち、ここでは夏季以外のフィードバックが年平均では重要であるものの、夏季には雲が太陽放射をさえぎることによって海水の融解を抑える、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。

球海洋コンベアベルト⁴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

⁴ 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。

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⁵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。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、表層大気の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の現象を引き起こす。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。

陸域雪氷が関わるプロセスで、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。高緯度域全体に渡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。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、海水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。季節海氷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

⁵ 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。

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。

3. 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⁶(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。まだ、北極海航路の探査、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、氷山利用の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やアーリス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⁷(IASC)を設置した。1991年1月、オスロで開催された第一回の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、スバルバル諸島スピッツベルゲン島ニー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年にウッズ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・ウェグナー極地海洋研究所との航空機による大気観測、日本から北極海を横断してスバル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、スバルバル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、1997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、1997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。

⁶ 国際極年: International Polar Year (IPY)

⁷ 国際北極科学委員会: International Arctic Science Committee (IASC)

また名古屋大学等は、WCRP⁸の GEWEX⁹研究プログラムに対応し、1997 年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、総合地球環境学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きたが、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水氷減少を機に盛んになってきた。国際地球観測年¹⁰(IGY)の 50 周年に当たる 2007~2008 年に ICSU¹¹、WMO¹²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。

4. 全テーマの要旨

(1) 「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

地球温暖化は人間社会や生態系に大きな影響を与えうる今世紀の環境変化であり、社会の関心が高いので、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

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。とりわけ、「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と現状、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水アルベドの役

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

⁸ WCRP: World Climate Research Programme、世界気候研究計画

⁹ 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)

¹⁰ 国際地球観測年: International Geophysical Year (IGY)

¹¹ ICSU: The International Council for Science、国際科学会議

¹² WMO: The World Meteorological Organization、世界気象機関

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

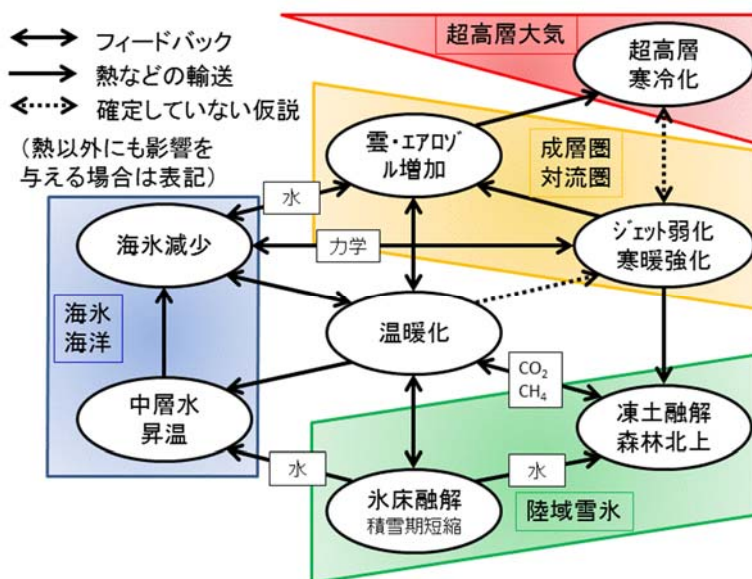


図3 北極域各要素間の潜在的フィードバック効果 [テーマ1]

至る衛星観測の拡充を図るため、センサー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、定期的に繰り返す体制を維持しなければならない。

テーマ2：海氷減少のメカニズムと影響

北極海の海氷は近年急激に減少しており、「北極海からいつ海氷がなくなるのか？」に人々の関心が集まりつつある。北極海の海氷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。まず海氷減少メカニズムとして、海氷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、それに続いて海氷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氷減少を促進するか？
- Q2: 海氷の熱的減少はどのように進むのか？
- Q3: 海氷減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？
- Q4: 海氷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氷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

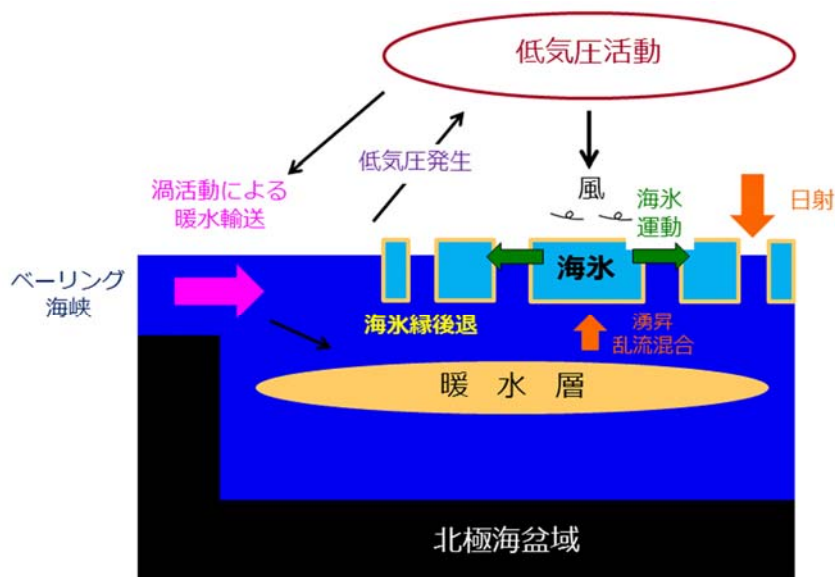


図4 海氷変動の模式図。海氷は海水が冷やされることで生成され、日射や海洋からの熱供給により融解する。また風を受けて絶えず動いており、多くは大西洋側に流出する。 [テーマ2]

べき情報のひとつである。また、海氷減少の全体像を海氷自身の動きやすさ、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、極域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。

テーマ3：物質循環と生態系変化

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、微量元素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。

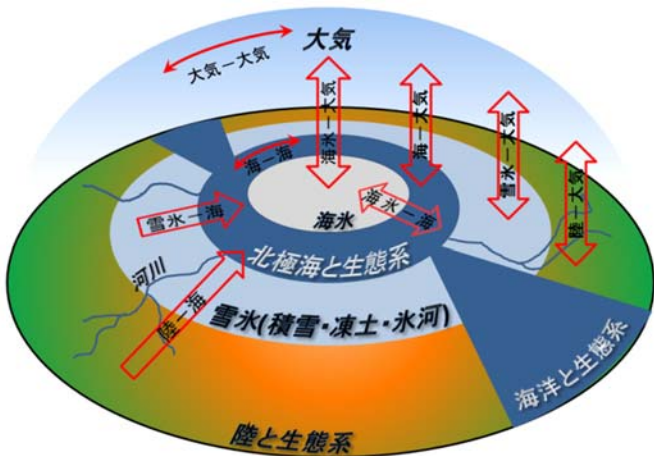


図5 北極域における物質循環の概念図 [テーマ3]

テーマ4：氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環

北極域における氷床・氷河変動は、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ためには、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氷生成、物質循環へ及ぼす影響を解明するためには、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のか?
- 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?

テーマ4 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

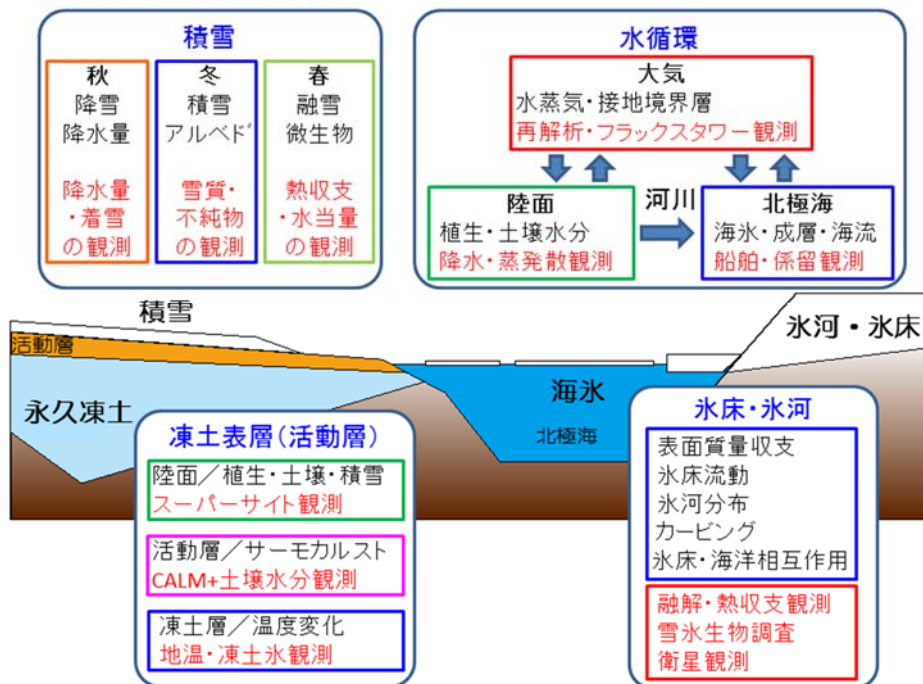


図6 氷床・氷河、凍土(活動層)、降積雪の変動と水循環変化の研究全体像 [テーマ4]

テーマ5：北極・全球相互作用

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、極域超高層大気が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。

- Q1: 大気的作用について:北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか?
- Q2: 海洋的作用について: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: 陸域的作用について: 植生と凍土の変化に

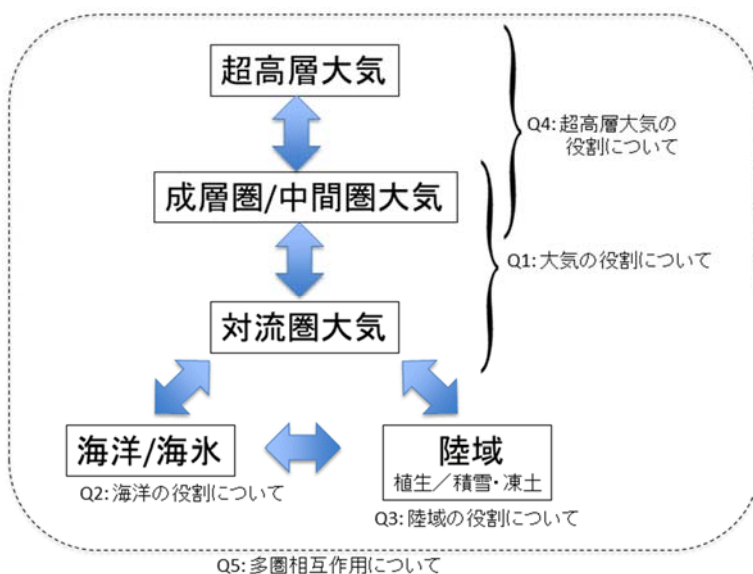


図7 大気・海洋・陸域等の複数の圏の相互作用 (模式図) [テーマ5]

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？
 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か？

テーマ6：古環境から探る北極環境の将来

北極域の温暖化が氷床や海氷、凍土、植生、大気エアロゾル等に与える影響や、それらによるフィードバックが注目されているが(図8参照)、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係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。

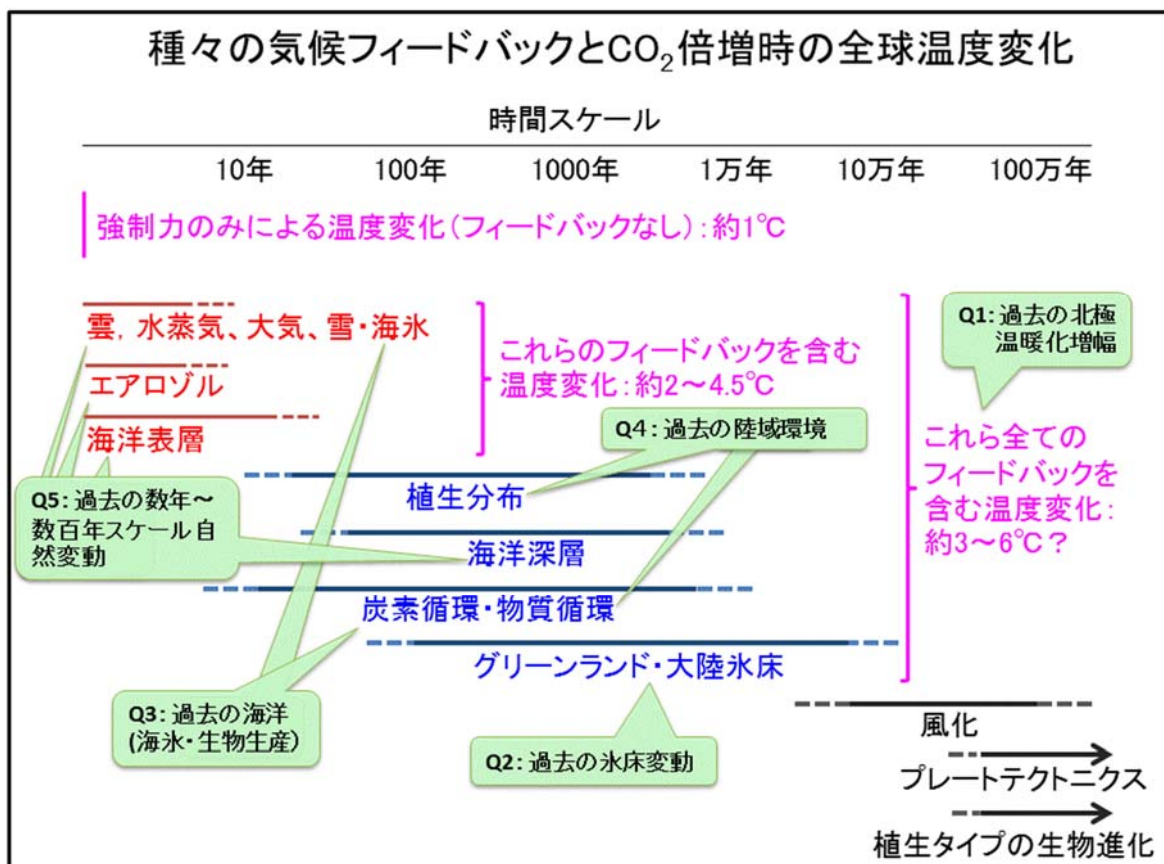


図8 種々の気候フィードバックと、それらによるCO₂倍増時の全球温度変化。各気候要素の時間スケールや、各設問と気候要素との主な対応関係も示す。[テーマ6]

テーマ7：北極環境変化の社会への影響

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？

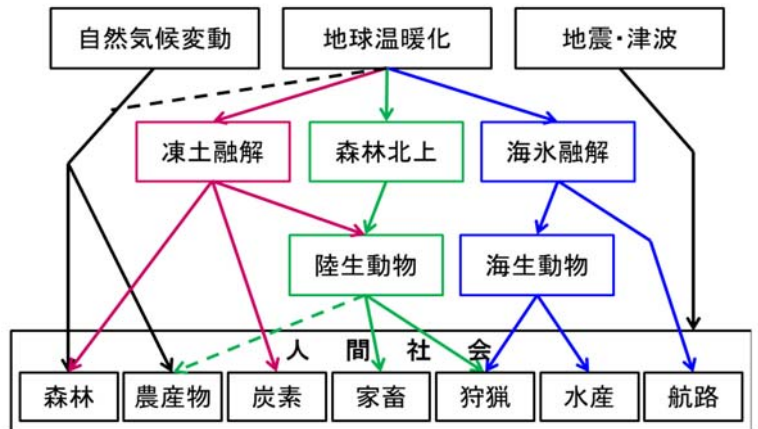


図9 北極環境変化の人間社会への影響(概念図) [テーマ7]

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。

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び、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。

(2) 「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

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ため(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。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か？

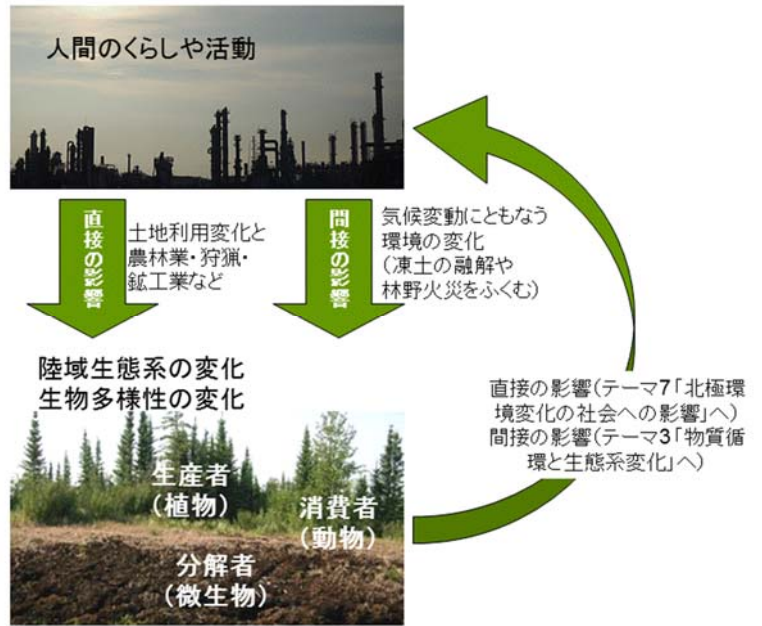


図10 北極陸域生態系と生物多様性が人間社会と相互作用する模式図 [テーマ8]

テーマ9： 海洋生態系と生物多様性への影響

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、北極海が季節海氷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。

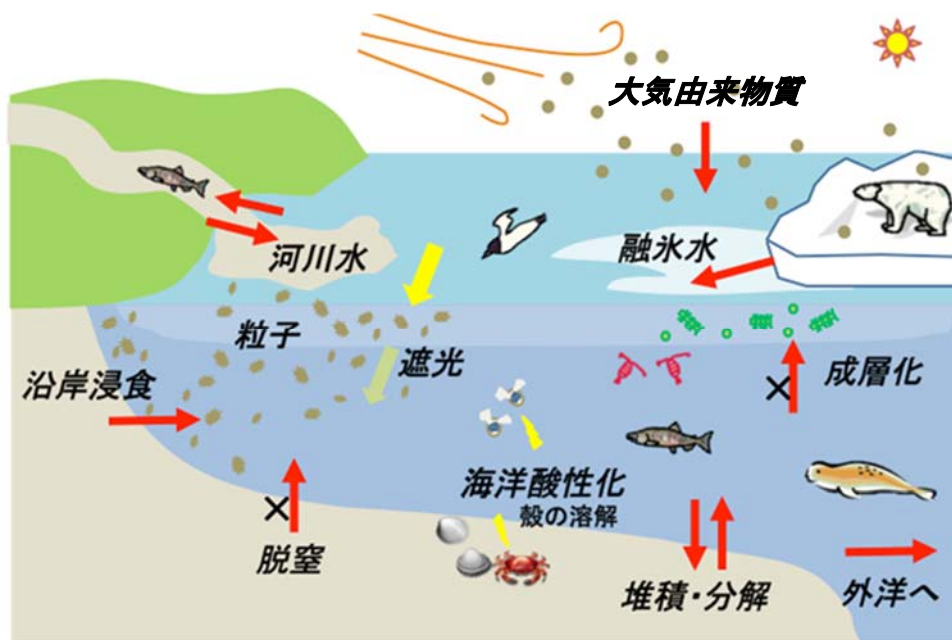


図11 陸や大気からの物質流入と海洋内部での各種プロセスが生物に与える影響を表した模式図 [テーマ9]

- 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のか？
- 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、ほとんど説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。

(3) 「北極環境研究の広範な重要課題」研究テーマ

前のふたつの焦点に含まれない重要な環境研究も、北極域について進められており、JCAR のコミュニティとしての活動を際立たせる研究を取り上げる。研究の進展

によっては、ふたつの焦点に関する情報を与える可能性も考えられる。また前のふたつの焦点の基礎情報を記述する役割を期待できる研究分野も含める。

テーマ 10: ジオスペース環境

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が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

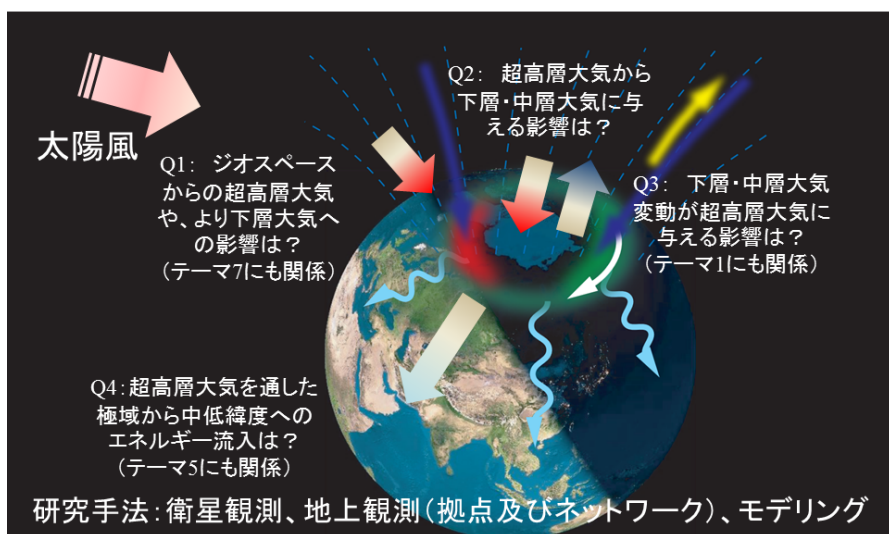


図12 テーマ 10 の4つの Key Questions の関係

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 Questions 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: 超高層大気が下層・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: 超高層大気を通した極域から中低緯度へのエネルギー流入は？

テーマ 11: 表層環境変動と固体地球の相互作用

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である。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 に及び極域固有の現象で、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

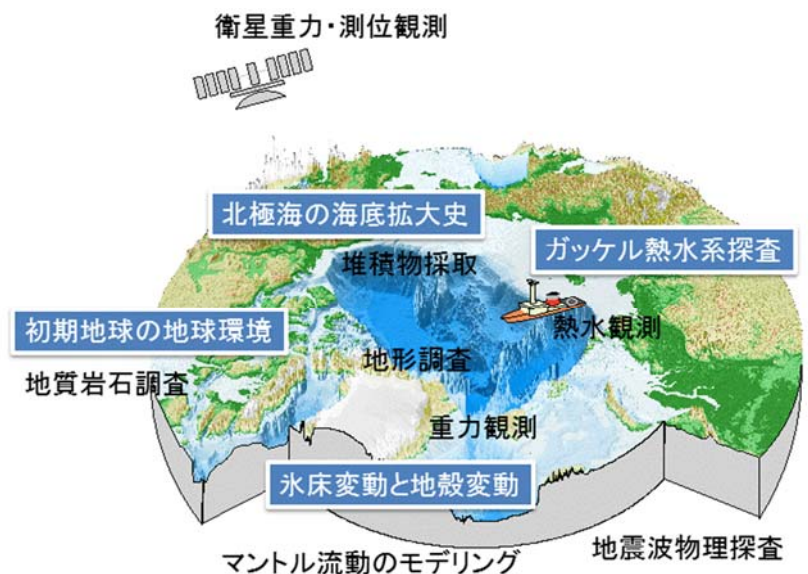


図 13 表層環境変動と固体地球の相互作用に関する重点研究課題 [テーマ 11]

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。

テーマ 12： 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解

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？

永久凍土分布
(永久凍土が占める土地面積比率によって区分分け)

- 連続的永久凍土 : 90-100%
- 不連続的永久凍土 : 50-90%
- 点在的永久凍土 : 10-50%
- 孤立的永久凍土 : 0-10%
- 化石永久凍土
- 氷河・氷床・氷帽
- 北極海の海底永久凍土の北限(推定を含む)

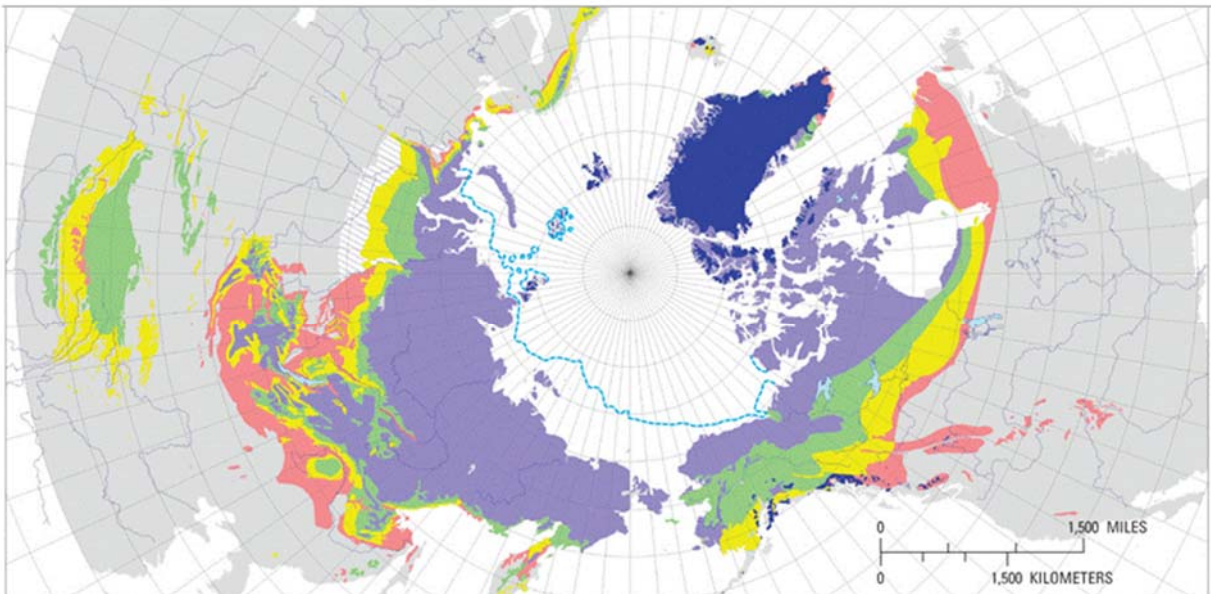


図14 北半球の永久凍土分布図 [テーマ 12]
USGS Professional Paper 1386-A を一部改訂し引用。

(4) 「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

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

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

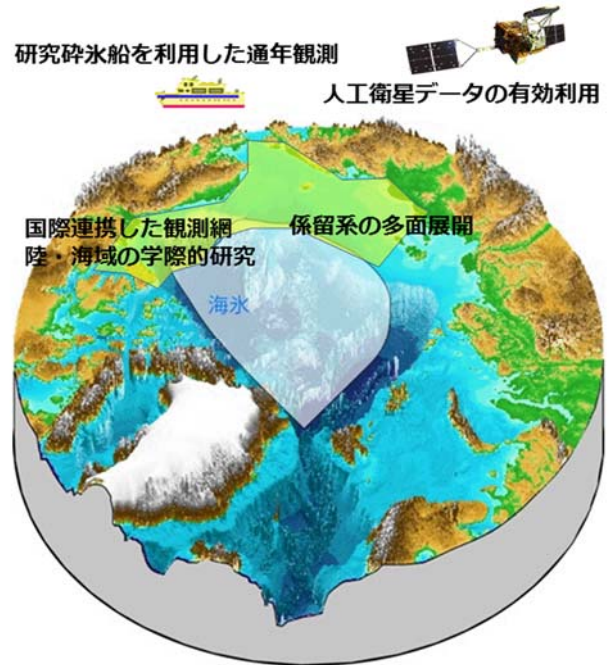


図15 今後の海洋生態のモニタリングに必要な要素(概念図) [テーマA]

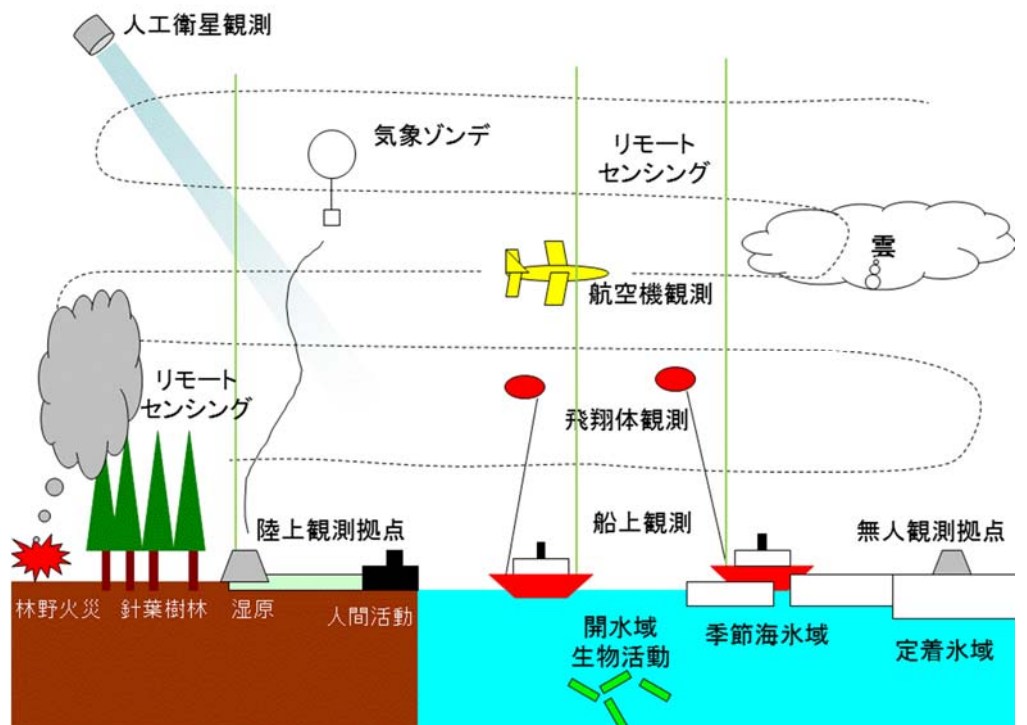


図16 今後の大気微量成分のモニタリングに必要な要素(概念図) [テーマA]

テーマB：複合分野をつなぐ地球システムモデリング

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依りて異なった性質のモデルを用いると効率が良い。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・水収支をよりよく再現し、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¹³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、あるいは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。

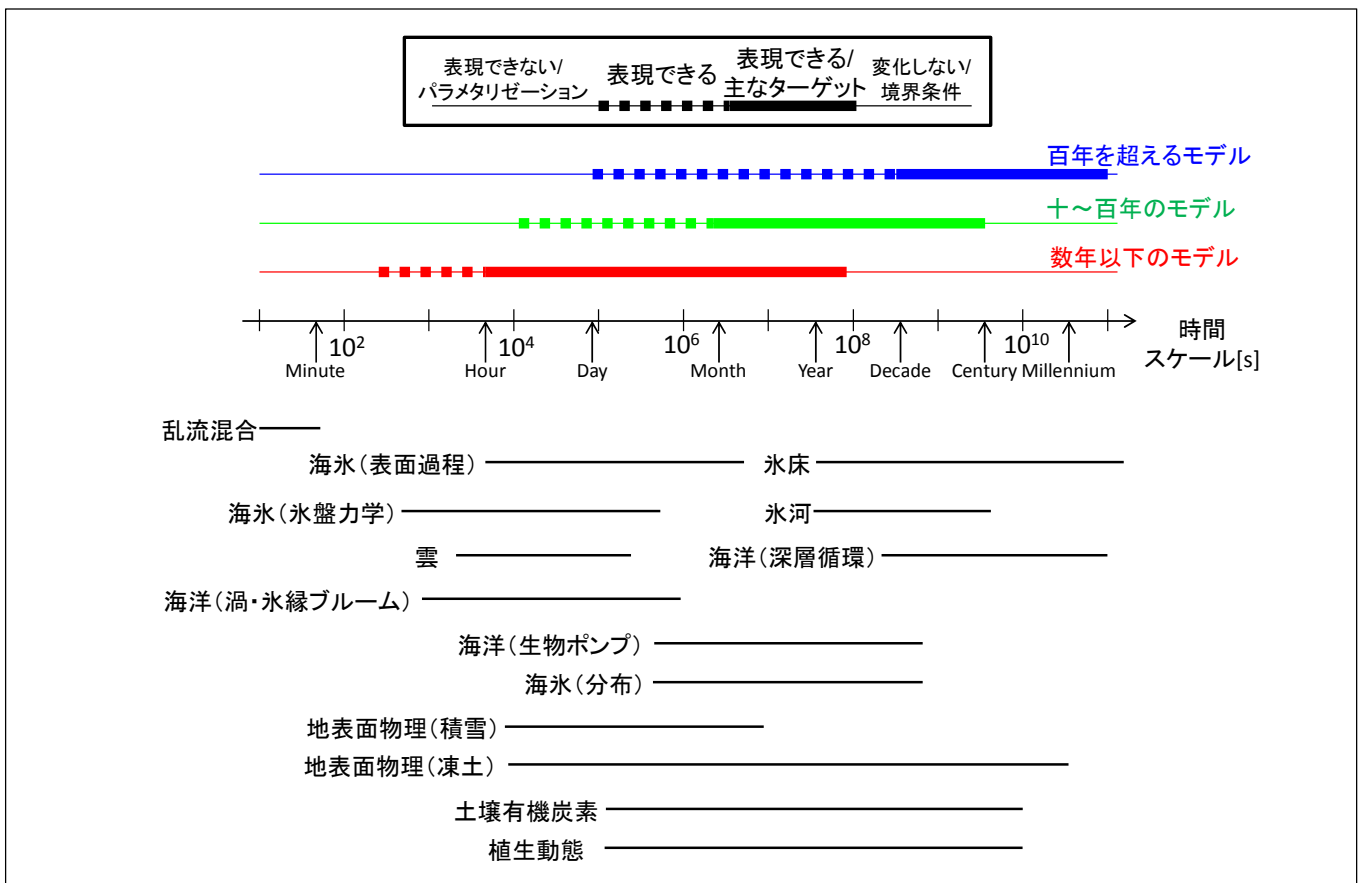


図17 代表的なモデルの時間スケール(上部)と、北極に関わる主要な素過程の持つ時間スケール [テーマB]

¹³ モデリングの分野ではある変数をモデル方程式の中で直接、明示的に書き表す場合、「陽に」と表す。

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

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。

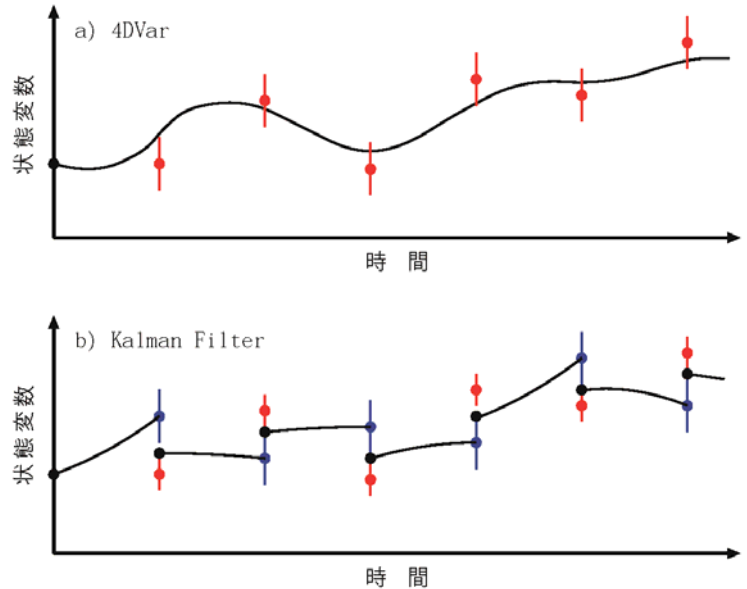


図18 4次元変分法(4DVar)、カルマンフィルター(Kalman Filter)の模式図。赤丸は観測値。黒丸及び黒線は解析値。青丸はモデル予報値。状態変数としては温度や速度などの数値をとる。[テーマC]

5. 研究基盤の整備

これまで記述した諸研究テーマの遂行には、様々な組織、制度、設備などが必要であり、各テーマで個別に記述されている。しかしながら、それらには共通性が高いものもあり、国内のコミュニティとして準備するのが適当であるので、いわゆる研究基盤に相当する項目を整理した。

○ 船舶

我が国は北極海で運用する砕氷観測船を所有したことはなく、観測するためには他国の砕氷船に測器を持ち込んで同乗させてもらわなければならない。そのことによる制約は大きく、腰をすえた観測計画を立てることさえ難しい。この壁を突き破ることは、北極環境研究遂行の必須条件である。新たな研究用砕氷船の建造は、それを打開することができる。観測機能を従来のものより格段に高度化することにより、世界をリードする観測が可能となる。機器、設備で特記すべきものは、ムーンプール、多目的ケーブル搭載ウィンチ、ラジオゾンデ自動放

球装置、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ーを搭載可能なAUV¹⁴、試料採取も可能なROV¹⁵、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などである。

○ 衛星

マイクロ波放射計を搭載する衛星による海氷分布観測網をさらに向上させ、現状のAMSR 2の空間解像度(89GHzで3~5km)を2倍にする。氷床・氷河、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ことが、非常に有用である。重力測定を行う衛星の開発にも着手したい。

陸域と海洋の生態系をモニターする可視光センサーは、米国に依存することが多かったが、2016年度に我が国はGCOM-C1/SGLIを打ち上げ予定であり、この方針を

¹⁴ AUV: Autonomous Underwater Vehicle、自律型無人潜水機

¹⁵ ROV: Remotely Operated Vehicle、遠隔操作無人探査機

継続するよう関係機関に働きかける。

○ 航空機

大気中の微量成分、雲粒子を3次元で直接計測する能力に加え、電磁誘導式氷厚計の使用に欠かせない。北極観測には民間航空機を借用してきたが、観測機器の開発を視野に入れ、航空機を所有することが最も有効である。その一方で、無人機を利用して大気観測を行うことの利点も認識し、追求すべきであろう。

○ 海外の研究・観測拠点

国際的協調および持続的観測の観点から、スーパーサイトを含む観測拠点やネットワークなどを整備・構築し、多様なパラメータを安定的に収集することを優先する。地理的位置から重要となるスバルバル、ロシア、アラスカ、カナダにおいて、二カ国間連携に基づく研究拠点も必要である。それは人材育成にも有用である。拠点運営には、国内の取りまとめも含め、継続性が鍵となる。

○ データアーカイブ

本システムに必須な要素は、まず安定性であり、それに加えて柔軟性を持たせること、すなわちデータ提供側と利用側にとって使いやすく、多様なデータ形式を受け入れるシステムである。データセンターの設立が期待され、そこではデータの復刻、デジタル化、識別するためのDOI付与を進める。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。

○ 人材育成

我が国の若手研究者育成を目的に、JCARはAPECS¹⁶の活動に協力するとともに、国内の大学とともに北極圏大学¹⁷、UNIS¹⁸、その他の北極圏の大学との連携強化にも協力する。実施するプログラムは、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継続である。先住民の若手研究者を対象にした招聘制度を立ち上げて、人材育成に貢献することにも尽力すべきである。

○ 研究推進体制

研究機関、大学等、JCARおよび諸学会が協力し北極環境研究を推進する体制を構築することが重要である。まず、中核となる機関を強化し、それを中心に、国内推進・実施体制が進むよう整備するとともに、研究の効率・強

化の観点から、研究基盤およびそれに対応した研究分野を主要機関が分担しかつ連携して進める体制が望まれる。一方、北極環境の変化と影響の理解は多分野の協力がなしに達成できないことを考えると、学際的な研究を検討・提案していくJCARのような連携組織の整備が必要である。さらに北極の変化に対する世界各国の関心の強さ、そして日本の研究者が観測を実施する北極域の多くが他国領土であることを考慮に入れると、国際協力・連携を維持・推進する国内体制を整備する必要がある。

○ 機器（大気、超高層、雪氷、陸域、海洋）

モニタリングを広域に展開する例として、超高層大気では欧州非干渉散乱(EISCAT)レーダー¹⁹の更新に伴い、MUレーダー(信楽)などの大型レーダーを加えたネットワークを構築する。試料分析方法の革新として、雪氷ではエアロゾルや気体の高精度同位体比の分析装置、およびアイスコアから高時間分解能で情報を取得する連続融解技術の開発を継続する。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²⁰が必要である。様々な機器を展開する役割を果たすプラットフォームも重要であり、海洋では海水下から効率的にデータを取得するため、ROVやAUVに代表される水中ロボットの開発に期待がかかる。

○ 数値モデル

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。

¹⁶ APECS: Association of Polar Early Career Scientists

¹⁷ 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た。

¹⁸ UNIS: The University Centre in Svalbard.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、スバルバル諸島のロングイヤーピンにある。20名近い専任教員があり、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。国立極地研究所がオフィスを設けている。

¹⁹ 欧州非干渉散乱レーダー: European Incoherent Scatter(EISCAT)レーダー

²⁰ 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。

執筆者等一覧（本報告書全体版作成に携わった人、50音順。各人の所属は「全体版」を参照ください。）

執筆者（氏名後の括弧内は執筆したテーマ番号1~12、A~C、基は研究基盤。代は各テーマ代表、副は副代表を示す。）
青木一真(1)、青木周司(3)、青木輝夫(1代、4、A、基)、東久美子(4、6)、阿部彩子(1副、4、6、B代、基)、阿部学(1)、荒木田葉月(7、8)、飯島慈裕(4代、基)、飯田高大(9、A)、飯塚芳徳(6)、池田元美(1、2、5、7代、9、B、C副、基)、石井正好(1)、石川守(3、4、12副、基)、伊勢武史(3、8副、B、基)、市井和仁(A)、猪上淳(1、2、5、C)、岩花剛(4、6、12)、植村立(6)、浮田甚郎(5)、内田雅己(3)、内宮万里央(9)、榎本浩之(1副、4)、大石龍太(1、3、6、B)、大島和裕(4)、大島慶一郎(2副、A)、太田岳史(4)、大塚雄一(7、10)、大畑哲夫(3、4、8、12、基)、岡本創(1、基)、小川泰信(1、5、10代)、奥野淳一(6、11)、小野純(2、B、C)、小野寺丈尚太郎(9)、帰山雅秀(9)、金尾政紀(4)、川合美千代(3、4、9、基)、川口悠介(2)、川村賢二(4、6代、11、基)、木村詞明(2、A)、久万健志(3)、小島覚(3、8)、小端拓郎(1、6)、小室芳樹(1、B副、基)、紺屋恵子(A)、斉藤和之(3、12)、齋藤誠一(7、9)、齋藤冬樹(4、6、B)、坂野井和代(1、5、10)、佐藤篤司(7)、佐藤永(B)、佐藤正樹(1、B)、澤柿教伸(基)、三瓶真(3、9)、塩川和夫(10)、塩原匡貴(1、基)、末吉哲雄(4、6、12代、A、基)、菅沼悠介(6、11)、杉浦幸之助(4)、杉本敦子(3、A、基)、杉山慎(4副、11、A、基)、鈴木和良(4)、鈴木力英(1、3代、5、8、A、基)、須股浩(1、C)、関宰(6)、高倉浩樹(7副)、高田久美子(5副)、高橋英樹(8)、高谷康太郎(5代)、竹内望(4)、竹村俊彦(1)、立花義裕(5)、立澤史郎(7、8)、館山一孝(基)、田中博(5)、谷川朋範(基)、田村岳史(2、A副、基)、知北和久(3)、坪井誠司(4、7)、露崎史朗(8)、土井浩一郎(11)、富川喜弘(1、5、10副)、豊田隆寛(2、5、C)、豊田威信(2、A、基)、永田俊(3)、中村尚(5)、西岡純(2、3、基)、西野茂人(3、基)、二橋創平(2、A)、野木義史(11代、基)、野澤悟徳(10)、野村大樹(2、基)、朴昊澤(3、4)、羽島知洋(8)、羽角博康(1、5)、服部寛(9)、早坂洋史(3、7、8)、原口昭(8)、原圭一郎(3、A)、原田鉦一郎(12、A)、原田尚美(3副、6)、原登志彦(3、8代)、平沢尚彦(4)、平野大輔(2)、平譚享(3、9代、基)、廣田渚郎(1、5)、藤井理行(4、6、11、12、A、基)、藤田茂(10)、藤原均(1、5、10、基)、古屋正人(基)、外田智千(11)、堀正岳(1、5)、堀雅裕(基)、本田明治(1、5)、松浦陽次郎(3)、松岡敦(3)、松野孝平(9)、松村寛一郎(7)、的場澄人(4、6)、三浦英樹(6、11副)、溝端浩平(2、5、A、基)、三好勉信(1、5、10)、三好由純(7、10)、森下智陽(3)、森本真司(A)、矢吹裕伯(基)、山口篤(9)、山口一(7)、山崎孝治(1、5)、山崎剛(4、A代、B)、山内恭(1、3、A、基)、山本正伸(6副、基)、吉田龍平(5、8、基)、芳村圭(1、4、6副)、吉森正和(1副、6、B)、若松剛(C代)、渡邊英嗣(2代、B、C、基)、渡部雅浩(1、5)、渡邊豊(3)、綿貫豊(9副)

査読者（査読したテーマ番号を氏名後の括弧内に示した。）

池田敦(12)、石井正好(C)、市井和仁(5)、江尻省(5)、江守正多(B)、太田岳史(A)、沖野郷子(11)、川村隆一(5)、菊地隆(2、5)、岸上伸啓(7)、北川弘光(7)、三枝信子(3)、佐々木洋(3)、高橋孝三(6)、高橋修平(4)、時岡達志(B)、中野英之(C)、中村卓司(10)、羽角博康(2)、原田尚美(9)、檜山哲哉(4、12)、福田洋一(11)、藤井理行(1)、藤巻裕蔵(8)、細川敬祐(10)、堀内一穂(6)、三谷曜子(9)

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、伊勢武史、大畑哲夫、川合美千代、兒玉裕二、杉山慎、藤井理行、山内恭、吉田龍平、吉森正和、渡邊英嗣

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)

青木輝夫、東久美子、阿部彩子、五十嵐保、榎本浩之、大島慶一郎、大畑哲夫、神田啓史、菊地隆、齋藤誠一、島田浩二、杉本敦子、杉山慎、田中博、中坪孝之、中村卓司、野沢徹、羽角博康、檜山哲哉、福田正己、松浦陽次郎、矢吹裕伯、山口一、山内恭

第2期(2013年6月～)

青木輝夫、東久美子、阿部彩子、榎本浩之、大畑哲夫、齋藤誠一、島田浩二、杉本敦子、杉山慎、田中博、中坪孝之、中村卓司、中村尚、野沢徹、羽角博康、檜山哲哉、深町康、福田正己、堀雅裕、松浦陽次郎、矢吹裕伯、山口一、山内恭

北極環境研究の長期構想
要約版

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
2014年12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

