

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

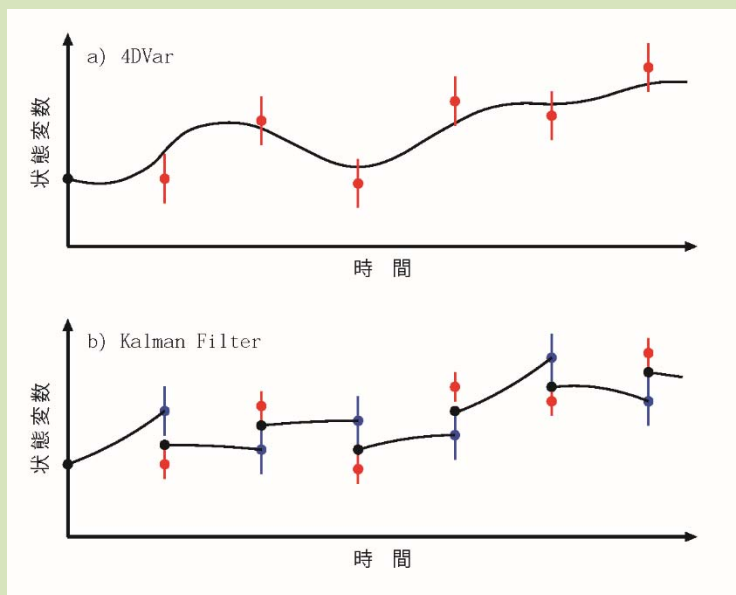
大気および海洋データ同化システムで現在主流となっている同化技術には、大きく分けて変分法とカルマンフィルターの二系統があり、ここではそれぞれの特徴を簡単に解説する。その技術詳細や代表的な応用例並びに他の同化技術に関する情報は、日本のデータ同化研究コミュニティにより編集された教科書(淡路他 2009)に詳しく書かれているので参照されたい。

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気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、薄い氷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、海氷内部応力に関係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、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測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。

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/>

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