

## 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<sup>130</sup>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

<sup>130</sup> 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。

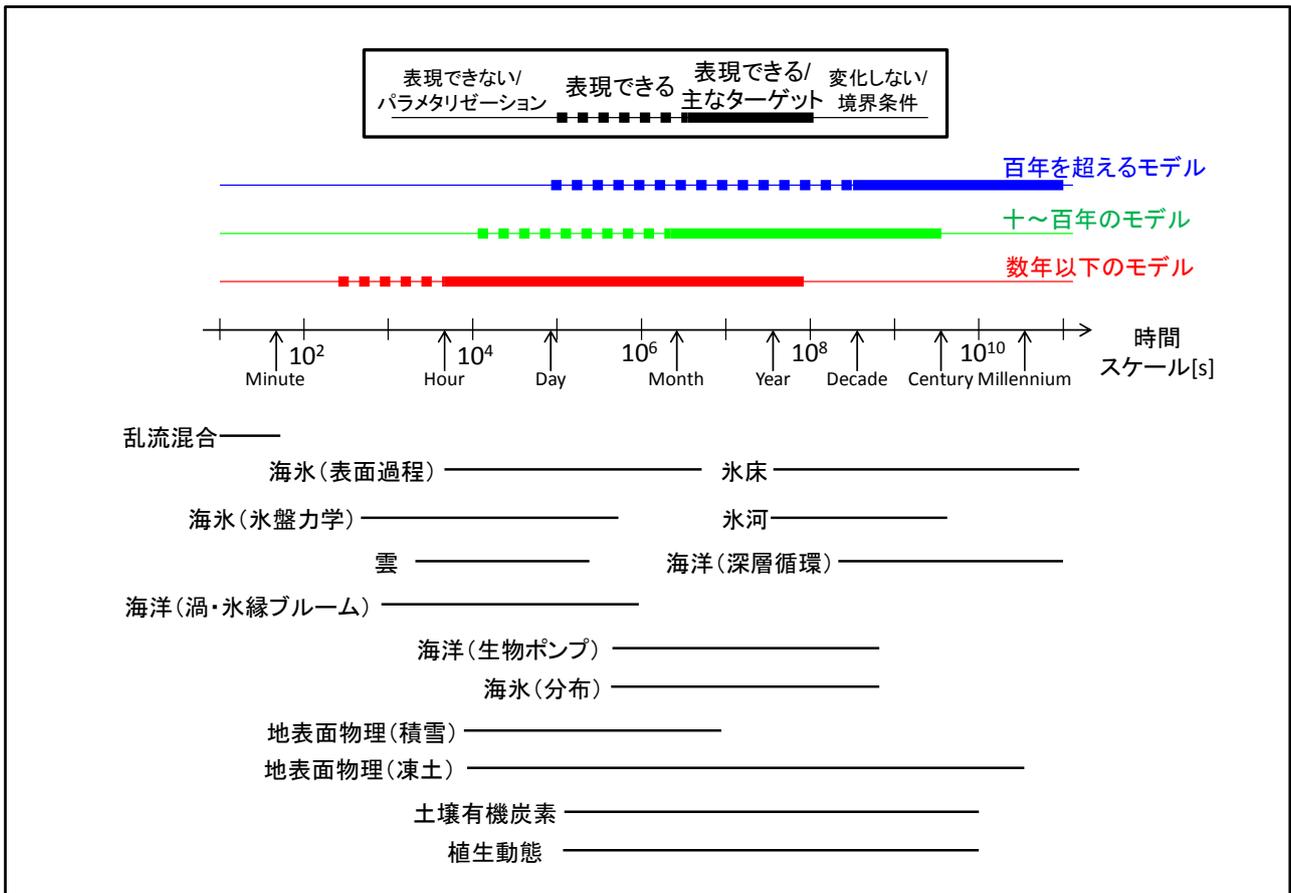


図60 代表的なモデルの時間スケール(上部)と、北極に関わる主要な素過程の持つ時間スケール。モデルと素過程の時間スケールの一致が大きいほど、そのモデルはその素過程を扱うのに適している。

## 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 RASM<sup>131</sup>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

<sup>131</sup> 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 CMIP5<sup>132</sup> や、北極海モデルに特化した相互比較プロジェクト AOMIP<sup>133</sup>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。

<sup>132</sup> CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project phase 5(Taylor et al., 2012)

<sup>133</sup> 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組み込むことが、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<sup>134</sup>NICAM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스팅する方法も試みられてきた。MM5<sup>135</sup>を用いた取り組み、および、それを継承する WRF<sup>136</sup>の利用がその例であり、国際的な

<sup>134</sup> 全球非静力学モデル: NICAM(Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model)

<sup>135</sup> MM5: Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model

<sup>136</sup> 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-NHM<sup>137</sup> や CReSS<sup>138</sup> 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

<sup>137</sup> JMA-NHM: Japan Meteorological Agency Nonhydrostatic Model

<sup>138</sup> CReSS: Cloud Resolving Storm Simulator

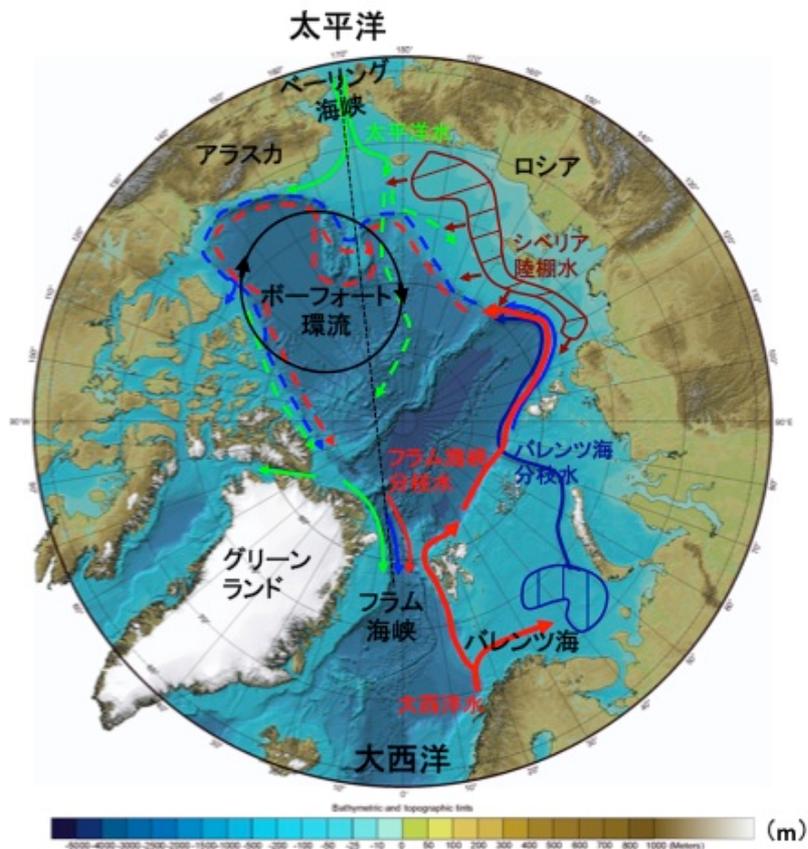


図 61 北極海の表層循環像(実線:明らかになっている流れ場、破線:推定されている流れ場)。黒色点線で示したベーリング海峡とフラム海峡を結ぶ鉛直断面を図 62 に示す。地形は IBCAO より引用。

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 CCSM4<sup>139</sup>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(POP2<sup>140</sup>)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

<sup>139</sup> CCSM4: Community Climate System Model, version 4

<sup>140</sup> POP2: Parallel Ocean Program, version 2

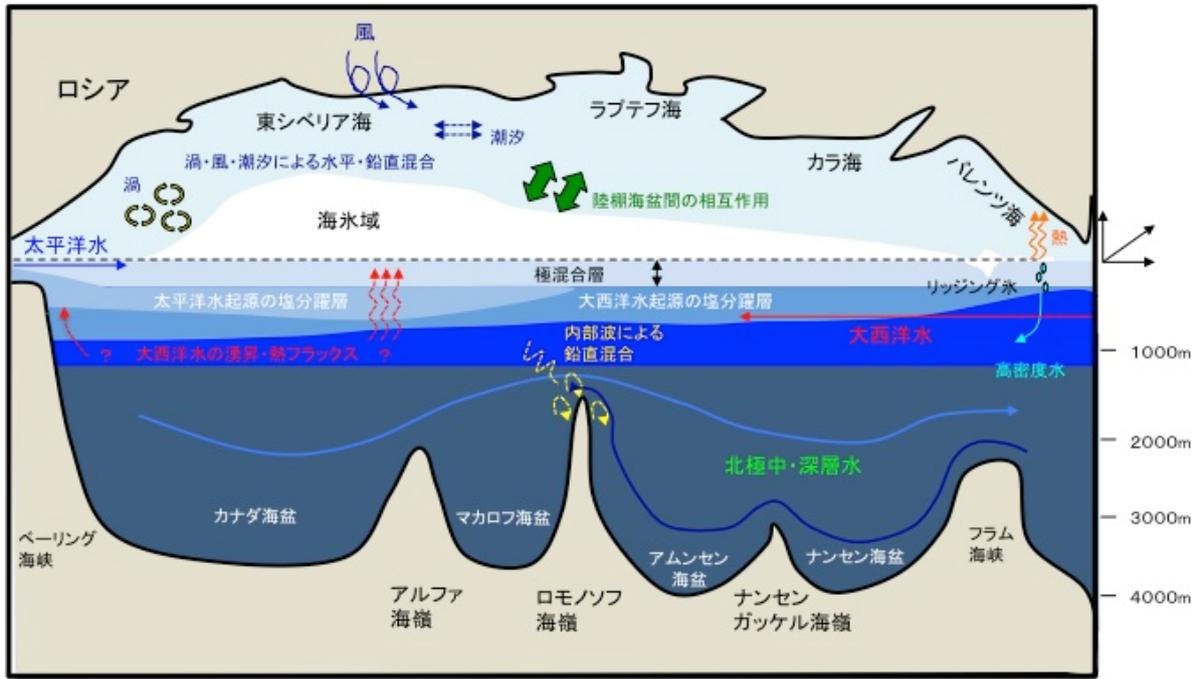


図 62 北極海の鉛直構造と海水海洋プロセスの概念図 (テーマ 5 の図 18 も参照のこと)。

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、AOMIP<sup>141</sup>)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-ESM<sup>142</sup>、MPI-ESM1<sup>143</sup>)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<sup>144</sup>(WCRP)の結合モデル間相互比較プロジェクト(CMIP<sup>145</sup>)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

<sup>141</sup> AOMIP: Arctic Ocean Model Intercomparison Project

<sup>142</sup> MIROC-ESM: Model for Interdisciplinary Research on Climate-Earth System Model

<sup>143</sup> MPI-ESM1: Meteorological Research Institute-Earth System Model 1

<sup>144</sup> 世界気候研究計画: World Climate Research Project(WCRP)

<sup>145</sup> CMIP: Coupled Model Intercomparison Project

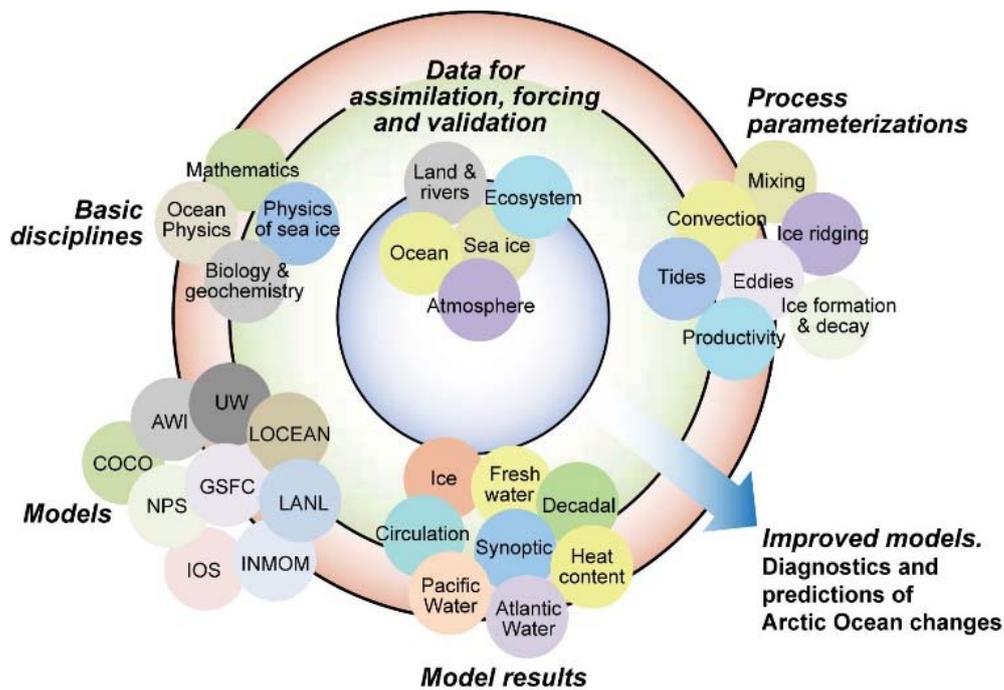


図 63 AOMIP/FAMOS による取り組みを表した概念図。Proshutinsky et al. (2011)の Fig.1 を引用。

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 FAMOS<sup>146</sup>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、SEARCH<sup>147</sup>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

<sup>146</sup> FAMOS: Forum for Arctic Ocean Modeling and Observational Synthesis

<sup>147</sup> 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。

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](mailto: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