

## 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<sup>161</sup>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

<sup>161</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。

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、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。

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：＜大気の役割について＞ 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？ .....	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