

## 巻頭言

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

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

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

長期構想はJCAR第一期代表の大畑哲夫氏の強い意向で2013年に検討から実施に向けて動き出し、これをまとめるために編成されたワーキンググループ(WG)の活動が作業の進め方や編集作業を行なった。3回の全体ワークショップの他、各分野の検討や、分野間共通の研究基盤についての討論会等も開かれた。当初は長期構想執筆に多大な時間を費やすこと、研究のアイデアを公開してしまうことの不都合が懸念されたこともあった。しかし、今回の「北極環境研究の長期構想」執筆には140名を超える方が協力を表明した。WGの代表である池田元美氏をはじめとし、執筆者だけでなく、査読に関わられた方、またこの活動の必要性やあるべき姿についての意見を出された方、それら北極に関わる研究者の多くの議論とJCAR事務局の支援により本構想作成活動が進められた。日本においてこの長期構想が書かれたこと自体が、新しく始まった北極研究、北極研究者体制の成果であると言え、長期構想の作成に携われた関係者に心から感謝したい。

長期構想では今後10年～20年で取り組むべき課題を考えた。各分野の多くのテーマが盛り込まれた。執筆者は自らの興味と活動だけを主張するのではなく、広い視野から、重要な分野、日本の研究者が活動すべき対象についても盛り込んだ。そこで扱われた多くのテーマは国内にとどまらず、国際的にも提言していける完成度の高いものである。

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

北極環境研究コンソーシアム運営委員長 榎本浩之

# 北極環境研究の長期構想

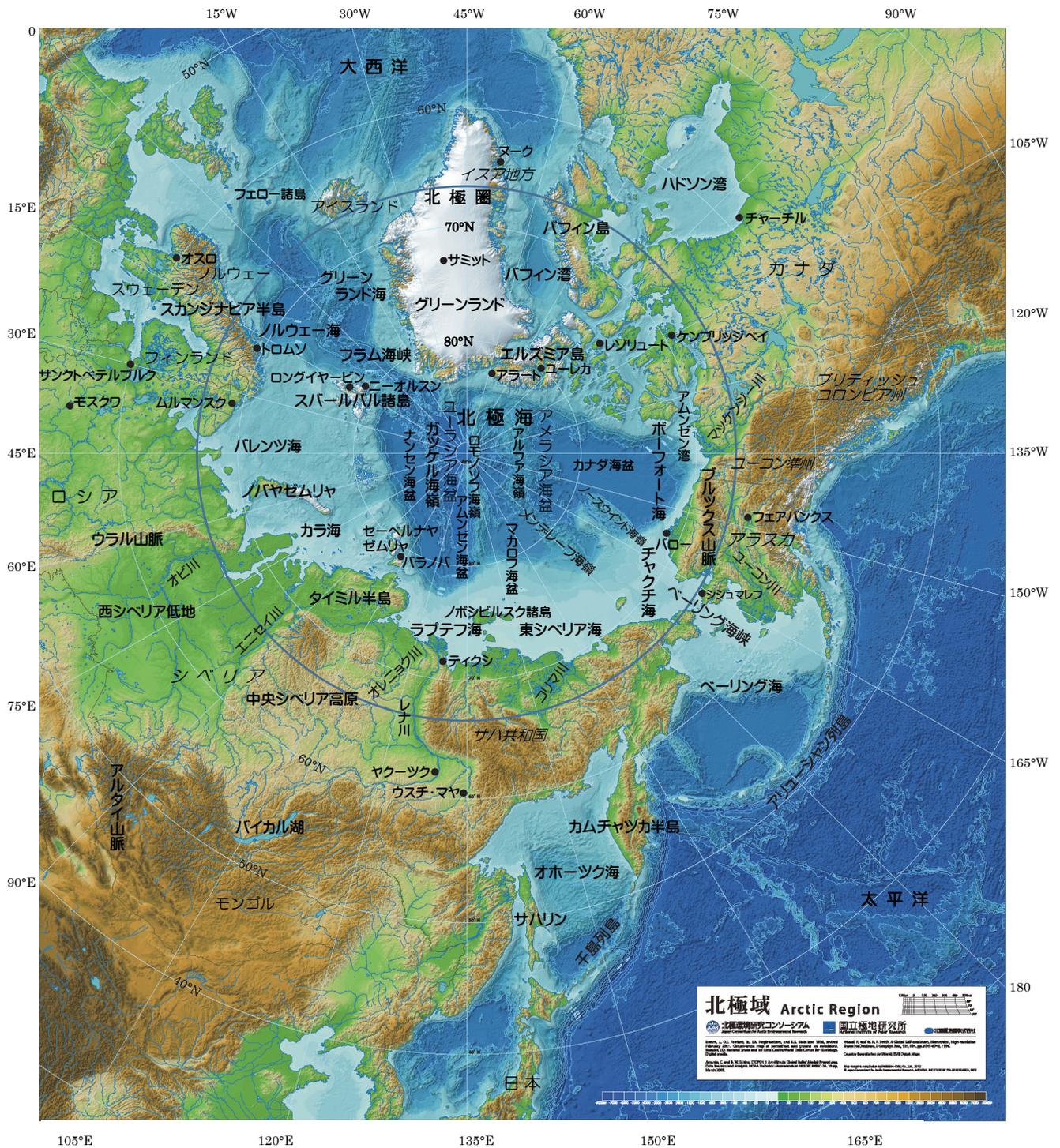
## 目次

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

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

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

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



(v.2)

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

## 1章 報告書で目指すこと

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

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

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

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

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

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

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

## 2章 背景と内容

### 報告書作成の背景と経緯

長期構想の作成自体は、現在進められている GRENE 北極気候変動研究事業<sup>2</sup>の運用基本方針、JCAR<sup>3</sup>の趣意書と規約において謳われている。これまで我が国で「北極環境研究」に特化した長期構想はなく、現状の分析、及び将来取るべき方針を示すことは重要である。JCAR が本長期構想を作成できた事実は、その存在意義を確たるものにしたと言っても過言ではない。構想には次世代研究者の希望が反映されており、それらの実現に向けた共同作業によって、多くの研究者が共通の目標を持って前進することが可能となる。

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

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

### 内容の説明

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

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

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

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

本長期構想の英語版を作成して国際的な情報発信を図ることとしている。日本における研究者コミュニティとして、学問の発展に道筋を示すことに大きな意義がある。国際的には ICARPIII<sup>4</sup>の議論が2014年に開始予定であり、日本の北極環境研究の長期構想をインプットできる機会を逃すべきではない。

<sup>2</sup> 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。

<sup>3</sup> 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。

<sup>4</sup> ICARPIII：The Third International Conference on Arctic Research Planning

### 3章 北極環境の現在までと近い将来に起こりうる変化

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

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

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

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

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

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

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

以下に北極環境の各要素について、それらに起きつつある変化と学究上の質問を掘り下げる。大気を取り巻く状況では、海氷減少に伴って海面からの長波放射、顕熱と潜熱<sup>6</sup>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。

<sup>5</sup> 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。

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

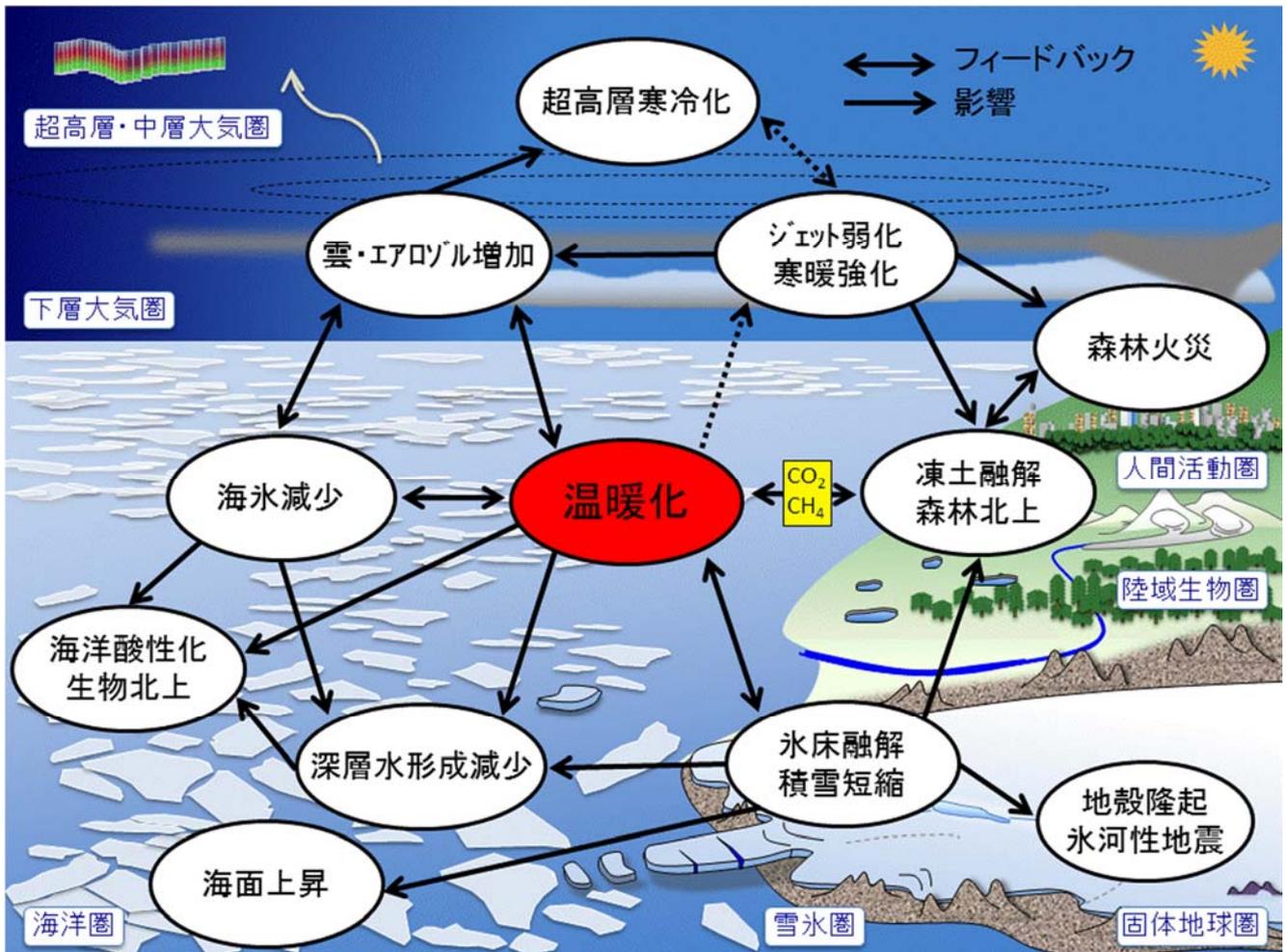


図2 北極温暖化と主要な因子と影響

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

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

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

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

陸域雪氷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。高緯度域全体にわたって積雪期間が短縮しているが、積雪深と陸水量は時空間変動が大きい。森林帯の北上と衰退も同時に調べ、

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

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

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

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

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

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

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

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

## 4 章 北極環境研究の歴史

北極における科学的研究の国際的取組みは、19世紀後半の第一回国際極年<sup>7</sup>(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 Fram 号探検に始まる。また、北極航路の探査、未踏の地の発見、北極点踏破などに各国がしのぎを削る探検の時代であった。

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

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

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

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

北極研究の大きな転機となったのは、ソ連のゴルバチョフ書記長による北極海航路の解放、北極圏における科学研究の促進などを盛りこんだムルマンスクでの演説で、1987年のことである。これを受け北極研究の国際協力の機運が高まり、1990年8月、北極圏8カ国がカナダのレゾリュートで会合を開き、国際北極科学委員会<sup>8</sup>(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、スバル諸島スピッツバルゲン島ニーオルスンに観測基地を設置するとともに、大気、雪氷、海洋、陸域生態、超高層物理の観測を開始した。また、海洋科学技術センター(JAMSTEC; 現、海洋研究開発機構)は、1990年にウヅホール海洋研究所と共同開発した氷海用自動観測ステーションやアラスカ大学の海洋観測船を用いて、北極域の海洋観測を開始した。

国立極地研究所は、ニーオルスン基地での温室効果気体の観測、ポリニア(不凍開水域)での生物観測、グリーンランド氷床などでの雪氷コア掘削、ドイツのアルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所との航空機による大気のコモ観測、日本から北極海を横断してスバル諸島までの航空機による温室効果気体、エアロゾル、雲の観測、スバル諸島とカナダのエルズミア島でのツンドラ植生の炭素循環調査などを行ってきた。一方、JAMSTECは、1998年から海洋地球観測船「みらい」を用いた北極海の海洋観測を開始し、1998年から2013年までに10回の観測航海を行い、国際的な北極海観測に貢献している。また、名古屋大学等は、WCRP<sup>9</sup>のGEWEX<sup>10</sup>研究プログラムに対応し、1997年

<sup>7</sup> 国際極年: International Polar Year (IPY)

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

<sup>9</sup> WCRP: World Climate Research Programme、世界気候研究計画

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

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

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

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

一方、国際的な研究機運も 2000 年頃から見られ始めた北極海の海水減少を機に盛んになってきた。国際地球観測年<sup>11</sup>(IGY)の 50 周年に当たる 2007~2008 年に ICSU<sup>12</sup>、WMO<sup>13</sup>が中心となり、南極も併せた IPY2007~2008 が実施されて、観測・データアーカイブを中心に研究が推進された。IASC でも研究推進を強力に行うため、組織の拡大が議論され、2011 年からワーキンググループの数を増やし、発展している。これを機に日本の研究者も IASC への関与を深めた。

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

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

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

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

<sup>11</sup> 国際地球観測年: International Geophysical Year (IGY)

<sup>12</sup> ICSU: The International Council for Science、国際科学会議

<sup>13</sup> WMO: The World Meteorological Organization、世界気象機関

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/>