

これまで記述した諸研究テーマの遂行には、様々な仕組みや設備が必要であり、各テーマで一定の記述がなされている。それらの中で、共通性が高く、国内のコミ

ュニティーとして準備するのが適当と考える、いわゆる研究基盤に相当するものを整理した。

砕氷観測船

砕氷船に想定される利用目的は、物資輸送から海底資源探査に至るまで多岐にわたる。この節では、海洋底の探査を含む極域大気海洋研究に根差した「研究専用砕氷船」とも呼ぶべき観測基盤の必要性について記述する(本稿では便宜上、これを砕氷船と呼ぶ)。

全球気候システムを理解する上で、北極海の海氷変動メカニズムの解明は喫緊の課題であり、北極海氷の将来予測の精度向上には不可欠である。これまで、海氷激減は、海洋温暖化が著しい太平洋側北極海で主に観測されてきたが、現在では北極海全域で季節海氷域化が進行している。一般に、氷縁を含む季節海氷域では、大気-海洋間の熱交換、海氷や高密度水による物質の輸送、植物プランクトンによる生物生産などが活発であり、河川水の流入による影響も受ける場合があり、物理的にも生物地球化学的にも興味深い現象が多く存在する。これらの現象のメカニズムを理解することなく、海氷減少に伴う大気海洋循環や気候変動への影響、物質循環や海洋生態系の応答を予測することは不可能である。現場における諸現象の理解のためには、大気-海氷-海洋の熱収支や生態系および物質循環を視点としたプロセス研究が必須であり、全季節をカバーした現場におけるデータの取得が不可欠となる。さらに、温暖化が進行した北極海や氷床の状況を予測する上では、現在と顕著に異なる気候状態における北極海の海氷分布や氷床末端位置を復元し、それらの変動メカニズムを理解することが重要である。

これを実施するには、北極海の海底地形の探査により、海底における侵食と堆積の状況を把握し、堆積物を広範囲に採取することが不可欠である。加えて、より長期的な変動を理解するには、現在海洋底が拡大しているガッケル海嶺等のテクトニクスおよび、北極海の形成過程や地球内部構造等の解明が必要となり、堆積物等の古環境・古気候研究と合わせた、固体地球変動と表層環境の相互作用とを理解する必要がある。つまり、北極研究の推進のためには、現場データや試料を取得し

ていくための砕氷船という観測基盤整備が最も重要なのである。

これまでの日本の北極海観測は、自国耐氷船か他国砕氷船を利用して行われ、それぞれに観測時期、海域、人員、予算等の制約の中で実施されてきた。特に、他国砕氷船の利用は、各国の政治的動向による自国観測計画への干渉のリスクを常に保有するだけでなく、観測機材およびサンプルの輸送(輸出入)等の無視できない問題を持つ。これは特に、現場分析や実験等が必要な化学および生物分野の研究にとっては、研究対象やデータ数を制限する大きな阻害要因となってきた。一方で、砕氷船を擁する各国は既に観測研究体制を整え、精力的に研究を実施している。このままでは、近年の地球システム変化の理解に最も重要なエリアの研究推進において、日本が大きな遅れを取る事になる。今後、日本独自の北極研究を発展させるためには、観測期間・海域を柔軟に設定できる自国砕氷船を保有し、自国砕氷船をプラットフォームとして現場観測(氷上も含む)、有人観測ステーション、無人観測(AUV等)を、越冬も含めて季節を問わずに展開できる体制を整える必要がある。

氷縁を含む季節海氷域での重点観測は他国の実績を見てもあまりなされていない。北極海、南極海のみならず、季節海氷域であるオホーツク海、ベーリング海において分野をまたいだ研究を数多く実施してきた日本には、独自の砕氷船運用による独創性のある観測研究を行うことで、さらなるプロセス解明を行う余地が多分にある。また、既存の耐氷船との併用は、海氷域、氷縁域、開水面域における結氷のプレコンディションを面的に捉える観測や、通年の大気-海氷-海洋熱収支観測を可能にする。また、IODP等で実施に向けて議論されている国際的な北極海研究掘削においても、事前調査や掘削研究等の面で、日本が大きな役割を担う事が期待される事も、独自の砕氷船を保有する大きな意味の一つとなる。砕氷船の保有が、日本の北極研究の可

能性を飛躍的に広げることが明白である。自国砕氷船を持つことの各種観測活動における具体的な意義について、表4にまとめた。

日本独自の砕氷船が建造された場合に想定される運航海域としては、海水が存在する北極海、南極海、オホーツク海の全てが候補として挙げられる。ただ、現実には多年氷域を航行するにはそれに応じたスペックが必要である。我が国独自の北極研究を展開するには、砕氷船の運用目的はあくまで学術研究に特化したものでなければならないが、各種社会的要請にも柔軟に応じる運用体制の構築が必要であろう。さらに、砕氷船を継続的に運航するための人員、設備、運航組織の構築なども視野に入れる必要がある。早ければ2030年代には北極海で夏季の海水が消失することが予測されているが、冬も含めて通年で北極海に海水が存在しなくなる可能性は極めて低く、今後砕氷船の需要がなくなる状況は考えにくい。単なる砕氷船ではなく「研究専用砕氷船」として実体のある研究を行うには、ムーンプール、運航計画立案のための衛星データ受信システム、CTD観測システム・格納設備、Aフレーム、多目的ケーブル搭載ウインチ、ラジオゾンデ自動放球装置、化学・生物・地質各種分析・実験室(低温室含む)、同階層に実験室等を持つ低・広・長の上方開放型観測舷、船上での機器整備機能を備えた工作室、海水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ー、舷側からコアラーを投下するための大型クレーン、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トムプロファイラー、テクトニクスや地球内部構造推定に使用する重力計や磁力計等の設置が望まれる。また、ムーンプールからより長い堆積物採取を可能にする海底鎮座型掘削装置による掘削が可能な事、および必要に応じて反射および屈折による地震探査装置等が搭載できる事等も望まれる。

日本が砕氷観測船を保有することで、日本独自のミッション型の研究が実施可能になる。例えば、重点海域を設定した特定のプロセスの理解を狙った観測研究の実施が可能になる。また、プラットフォームを基にしたプロジェクトなどで、多分野(大気-海水-海洋-古海洋-古気候-古環境-固体地球物理、生物-物理-化学)の日本人研究者のさらなる極域研究への参画と学際的な極域研究の発展が見込まれる。そして、国境にとらわれない観測計画を国際協力のもとに提案可能になる。既存の観測研究船と同様に、外国人の乗船希望者を受け入れる体制を整えておけば、国際共同研究が促進されると共に、世界と対等に研究を展開する事が可能となる。観測研究者や観測技術者の教育のみならず、航海士等の氷海操船技術向上も含めた、幅広い教育効果も大いに期待される。

表4 自国砕氷船を持つことの各種観測活動における具体的な意義

大気観測	海水上の高層気象観測による、中高緯度における天気予報の精度の向上
	北極航路上の船舶運航の気象情報提供
	MOSAIC等の大型国際プロジェクト立ち上げのためのフラッグシップ
海洋・海水観測	観測時期及び海域の選択に関する自由度(柔軟性)の飛躍的な向上
	氷上通年観測の実施(冬季海水域の観測の重要性)
	海水生成・融解期の物理・化学過程の現場観測の実現(氷上での越冬観測を含む)
	海水消失域との同期観測の実現(既存の耐氷船と連携)
生態系観測	海水結合モデルの再現性の向上(航路予測にも不可欠)
	表層から底層まで、氷の存在に影響されない生物観測の実現
	通年の海洋生態系観測体制の確立(現状の各国砕氷船相乗り体制では不可能)
固体地球・古環境・古気候調査	海洋生態系観測拠点の確立
	過去の海水分布・氷床分布の復元精度の向上
	海底地形図の精度の向上
	海水下海底拡大軸上の熱水系の探査
	北極海海底下内部構造の推定
	古環境・古気候研究の進展と将来の大規模掘削へ向けた事前調査
北極海形成過程の推定	

衛星は環境モニタリングだけでなく様々な目的で用いられており、また環境研究のために様々な衛星ミッションが実施されてきたし、近い将来にも計画されている。この節では、特に下部成層圏に関する衛星ミッションについて記述する。

気候変動の影響を鋭敏に受ける北極圏の環境変動は、海氷、積雪や氷河の減少から生態系の変動まで様々な時空間スケールで発生し、また、それらの変動が地球気候システムに影響を及ぼす。遠隔地かつアクセスが困難で、事象の時空間スケールが大きい北極圏では、同時的、継続的に面的な観測を行える衛星観測網が有用であることは言うまでもない。また、現場観測のスケールアップおよびバックアップ、モデリング研究との親和性の高さから、衛星観測網は今後の北極環境研究の発展的展開において必須の基盤である。加えて、地球温暖化とその気候変動への影響に関する研究をリードしてきた日本にとって、もはや責務といえる「地球環境の変動・変化を明らかにするための Climate Record とも呼ぶべき長期データの作成」に、衛星観測網は大いに資するものである。以下には、北極の地球気候システム研究のみならず、Future Earth 計画が掲げる社会の課題解決という面において、日本が貢献すべき衛星観測網の基盤整備に関して詳述する。

日本は、これまでも衛星観測網において大きく貢献しており、その代表例が AMSR シリーズである。世界最高の性能を誇る日本のマイクロ波放射計 (AMSR、AMSR-E、AMSR2) は、米国の SMMR、SSMI シリーズを引き継ぎ、北極圏における海氷・積雪・氷河氷床モニタリングを継続している。地球表面における“氷”の変化のモニタリングは、氷そのものの特性 (面積、体積、移動速度) に関する研究だけでなく、地表面-大気間における熱収支・水収支変動や生態系変動の研究に必要不可欠である。現在、他国が新規マイクロ波放射計の開発を殆ど行っていない状況下で、その観測の継続において日本の役割は極めて大きい。また、SSMI シリーズに比して、AMSR シリーズは飛躍的に空間解像度を向上させ、極域研究に多大なるインパクトを与えてきた。極域の変動を精確に解析するには、より高い空間分解能が必要であり、また、北極航路の日単位モニタリングを行う上でも、現状の AMSR2 の空間解像度 (89GHz で 3~5km) を 2 倍にするといった技術的革新

による高解像度化とセンサの継続が望まれる。

さらに、氷の質量変動をモニタリングするには、日本独自のレーザー・レーダー高度計が必須である。現在、観測を続けている Cryosat-2 に加えて、米国は ICESat-2 を打ち上げ予定であるが、高度計の最大の欠点は空間方向にデータが粗であるために、氷質量の小規模変動を分解できないことにある。日本独自の高度計と他国の高度計の協力による、シームレスかつ高解像度な合成高度データの取得は、氷河・氷床、海氷、積雪の質量変動モニタリングを介して、地球規模でおきる水循環変動の研究に多いに寄与するものである。加えて、氷河・氷床の変動監視には、光学・合成開口レーダー (SAR) の整備も不可欠である。たとえば、高解像度の可視ステレオペア画像は、精密 DEM (digital elevation mode) に基づいた氷体積の変動測定に大きな成果が期待できる。したがって、ALOS/PRISM 後継機の開発と打ち上げが急務である。また、光学センサ・SAR による氷流動速度の測定は、氷河・氷床変動のモニタリングに必須である。

2014 年打ち上げ予定の ALOS-2 に搭載される PALSAR-2 (L バンド SAR) は、他国の SAR 衛星とは異なるユニークなもので、氷河・氷床モニターにとっても極めて有用である。実際、ALOS/PALSAR は南極大陸の流動速度分布の取得において主要な役割を果たしており、ALOS-2 データも世界の氷河研究者から期待されている。今後も国産衛星による高時空間解像度のデータ取得が望まれる。また、250 m 解像度で高頻度に全球を観測可能な光学センサ (波長帯: 可視~熱赤外に 19 チャンネル) による積雪物理量やアルベドの測定も、温暖化に伴い急変しつつある両極並びにヒマラヤ域の積雪涵養・消耗プロセスの解明に大変重要である。2016 年度に日本が打ち上げ予定の GCOM-C1/SGLI は、全球の積雪域の面的・質的な変動を観測し、数値気候モデルの陸面過程の改良に貢献するものと期待されている。さらに、近年 GRACE 衛星によって大きな成果を挙げている衛星重力測定についても、国内での開発検討を進めるべきであろう。

北極圏の気候システム形成の解明には、地球放射収支と水循環に大きく関与する雲の高精度の観測とエアロゾルの観測も重要となる。静止衛星を中心に利用する ISCCP や AQUA 衛星に搭載された MODIS センサ等

受動型衛星による観測が行われており、全球観測としては、気候モデルの検証と改良にも一定の成果を挙げた。しかし、極域においては地表面アルベドの問題等受動型センサ特有の問題によって雲量等の巨視的な物理量に対しても雲観測精度には限界があった。これらの限界を克服するため、2006年よりアメリカを中心とした雲レーダーを搭載した雲観測衛星 CloudSat と、ライダーを搭載した CALIPSO 衛星が観測を開始した。これらの衛星は、他の Aqua 衛星等とともに、A-Train という同じ軌道上をわずかな時間のずれで観測するというコンセプトで運用されており、このため複数の衛星を組み合わせて利用した解析を実施しやすいという特徴を持つ。CloudSat 衛星では 94GHz 帯の雲レーダーを搭載しレーダー反射因子の観測が可能であり、雲と降水の鉛直分布を水平と鉛直方向にそれぞれ 1.1km、鉛直 240m 毎にデータを提供する。CALIPSO に搭載されたライダーは、可視と近赤外波長の 2 波長を持ち、可視波長では偏光特性も取得可能であり、水平と鉛直は下層と上層で異なるが、もっとも細かい場合では水平と鉛直方向に、それぞれ 330m、30m 毎にデータが提供されている。両方のセンサでは雲を観測することが可能で、これらのデータ解析から、従来できなかった雲の多重層の巨視的情報や、鉛直層ごとの氷か水の相状態に関する情報を得る事ができるようになった。また、CloudSat と CALIPSO を複合利用することで、雲の放射収支や水収支に対する影響評価の定量的な把握に不可欠な、雲微物理特性を求めることが可能となった。

CALIPSO のライダーに関しても、2 波長の後方散乱特性や偏光解消度から、エアロゾルの種類ごとの消散係数を求めることが可能となっており、ライダーのアルベドによらない観測の特性を生かして、海陸両方で高精度のエアロゾル特性の抽出が可能となっている。これらの衛星は極軌道であり、観測時刻は固定されている。このため日変化やより詳細な情報を得るためには、地上における能動型測器による雲とエアロゾル観測が重要となる。国立極地研究所は、ニーオルスンで、従来よりライダー観測を実施してきたが、これに加えて、95GHz 帯のドップラー機能を有する雲レーダーを配備した観測を昨年度より開始した。GRENE プロジェクトでも、これらの地上観測を取り込んだ集中観測を 2014 年度夏季に

実施予定である。

2016 年度に打ち上げ予定の日欧共同ミッションである EarthCARE 衛星は、初のドップラー雲レーダー (CPR) と高分解能ライダー (ATLID)、多波長イメージャー (MSI)、そして広帯域放射収支 (BBR) の合計 4 つのセンサを搭載する予定である。EarthCARE の雲レーダーは、CloudSat よりレーダー反射因子で約 7dB の高感度化とドップラー機能を実現し、ATLID の高分解能ライダー機能と共に、雲微物理特性抽出や鉛直流や雲粒子落下速度等新たな物理量抽出へと道を拓くと期待されている。この EarthCARE 衛星の重要な地上検証サイトとしても、国立極地研究所のニーオルスン基地における地上観測網は重要な役割を担うと期待されている。

一方で、地球温暖化に伴う炭素循環・生態系変動のモニタリングも欠かせない。これらのモニタリングは、米国の MODIS、SPOT Vegetation や VIIRS に代表される可視(近赤外・熱赤外)域センサで行われている。これらのセンサは、大気に関する特性(雲、エアロゾルなど)も観測し、放射フラックスや放射強制力の研究に利用されるだけでなく、可視域センサの精度を決める重要なプロダクトである。上記の可視域センサにより、陸域では、葉面積指数(単位土地面積あたりに存在する緑葉の片面の総面積)の地理的分布と変化、春から秋までの成長季 (growing season) の推定が可能になり、炭素循環の理解に重要な年間の生産量の把握ができる。さらに、推定された植物の季節性などからは、各地域の植生の群系や植生機能型¹⁵⁰の分布の推定も可能となる。また、前述の ALOS に搭載された AVNIR-2 と PALSAR は森林伐採をはじめとする土地被覆変化の研究や炭素循環中のカーボンストックの一つである森林バイオマスの推定研究を進展させてきた。同様に海域でも、深度方向観測の制約はあるものの、可視域(海色)センサは生態系モニタリングに必須な「生物情報」を取得可能な唯一の衛星センサであり、クロロフィル *a* バイオマス・純一次生産量だけでなく、海洋植物プランクトングループ組成¹⁵¹変動の研究に大きく寄与している。さらに、光学モデルの発達により、北極海において高濃度で存在し炭素プールの一つとして重要な有色溶存有機物 (CDOM) の推定と研究が発展してきた。しかし、

¹⁵⁰ 植生機能型: Plant Functional Type (PFT)

¹⁵¹ 海洋植物プランクトングループ組成: Phytoplankton Functional Types (PFTs)

現状では米国のセンサに依存しており、即時性、独自性で遅れをとっている。日本の北極研究における分野間連携体制の構築とその強化において、過去の ADEOS シリーズで培った技術を活かし、日本独自の可視域-熱赤外センサを開発してモニタリングを継続することが必要である。日本では上述の GCOM-C1/ SGLI が打ち上げ予定にあり、陸域・海洋(特に、沿岸域・氷縁域)における生態系変動研究への寄与が期待される。

日本の北極研究では、すでに多岐にわたって衛星観測を利用する土壌が醸成されており、今後は高感度・高解像度・多波長といったセンサの高度化が望まれる。しかし、統計的有意性を伴った議論を可能にするには、

航空機

航空機観測は地球科学の広い分野にわたり、きわめて有効な観測手段の一つである。特に、大気科学においては直接観測として、また、植生、氷厚、重力場、地形等の研究分野では、上空からのリモートセンシング観測として、必要不可欠な観測手段である。

大気科学では、地上観測は固定点での観測であり、船舶観測が平面的であるのに対して、航空機は 3 次元的空间での観測が可能なることから、大気構造の立体的詳細観測に有利である。航空機観測といえば固定翼が主流であるが、回転翼いわゆるヘリコプターも含まれる。しかし、ヘリコプターは観測すべき大気場そのものを乱す可能性があることから遠隔観測に限られることが多い。航空機を飛行体の一つと考えた場合、他に、飛行船や自由気球、係留気球を用いた観測も有効であり、それぞれの用途に応じて使い分けられる。近年、グライダー(動力を持たない滑空機)の利用も進められている。

航空機観測においても研究のためには最先端の装備が要求される。大気観測機器としては、微量気体、エアロゾル、雲粒子等の直接測定機器やサンプリング手法の開発、およびレーダー・ライダーを中心とする遠隔測定機器の開発、整備も強く望まれるとともに、空間的に密な大気観測を可能にするようなドロップゾンデシステム等の整備も重要である。その際、機器の小型・軽量化、省電力化は常に重要な課題である。

海氷観測機器については、曳航式の電磁誘導式氷厚計(EM-BIRD)による氷厚測定や 3 次元レーザーキャナーによるラフネス測定等が期待されている。これらの装置は回転翼と固定翼の両方で運用が可能であ

同じ設計思想に基づく衛星観測が長期にわたり続くことが必須である。また、以上に述べた地球観測衛星以外に、ARGOS に代表されるトラッキング・モニタリング衛星やイリジウムなどの通信衛星は、北極における移動体、ブイによる遠隔観測やリアルタイムな情報収集、発信に必須の基盤である。しかし、その利用に際して、研究者各人が契約手続きや高額な利用料等、様々なコストを払っているのが現状である。今後は、それらの窓口を一本化することにより、経済的・時間的コスト削減を図ることが望まれる。また、このコスト削減は、RADARSAT など地球観測を目的とした商業衛星のデータを購入する場合でも同様である。

り、現在ドイツのアルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所が航続距離の長いバスターボ型の Polar-5 と Polar-6 の 2 機を所有し、春季の北極海において EM-BIRD による広域観測を実施している。

氷床の内部 3 次元構造、基盤地形は、氷床流動のメカニズムを探る上で重要な情報を提供することになるが、そのアイスレーダーによる電波探査は、人工衛星では無理で、航空機によらねばならない。

また、北極域での航空機による磁気・重力測定やレーザー測量といった、固体地球科学に関する観測は、ドイツをはじめカナダやデンマーク等の国々で実施されている。これらの観測も、回転翼と固定翼航空機の両方で実施可能であり、今後は回転翼航空機を使用した高空空間分解能のデータ取得が望まれる。さらに、北極圏はアクセスの困難さから、南極とならんで野外調査データの乏しい地域となっている事から、地形地質や測地等の現地調査を可能にする、回転翼航空機等の活用も期待される。

欧米では大学や公立研究所等の研究機関が独自に観測専用機を所有、運用することはごく一般的に行われているが、日本ではそのような状況には至らなかった。かつて唯一、国立極地研究所が南極での運用のために単発航空機を所有し大気観測にも用いられたが、その運用もすでに終了して久しい。それ以外、日本の研究機関による大気観測はすべて民間航空機を借用する形で実施されてきた。このことが、日本の航空機観測が進展せず、欧米諸国に比して航空機用観測機器の開発が著しく遅れたことの一因とも言われる。そのた

め、今後日本でも独自に観測専用航空機を所有し運用する体制が強く望まれる。その際、観測に用いられる航空機は観測高度、速度、飛行距離によって使い分けられる必要があるため、飛行性能の異なる複数機の運用も必要となるであろう。このような体制作りにおいては、航空機観測の経験豊富な欧米諸国との国際協力も不可欠である。広い極域をカバーするには航空機ネットワークが重要な役割を果たす。また、北極は日本から遠隔の地であるので、航空機の運用には北極圏あるいは

その近くに運用基地を設けるが必要になるであろう

北極域では、無人航空機の利用も有効であると思われる。特に、極域で特徴的な混相雲を対象とする航空機観測では過冷却水滴の着氷により雲内飛行の危険性が増すことから、安全性の面からも無人航空機は極めて有用である。近年、無人航空機は大気観測でも広く用いられるようになってきており、日本でもそのノウハウが蓄積されつつあることから、今後、この分野のさらなる発展を期待したい。

海外の研究・観測拠点

a. はじめに

北極域の環境は、気候に対し敏速に反応する要素（例えば、植生、海氷、氷河）と緩慢に反応する要素（例えば、永久凍土、氷床）が複雑に絡み合って成り立っている。北極域環境の理解にはこれら諸要素の動態を個別に長期観測するだけでなく、要素間での相互作用システムを紐解くためのプロセス研究や、影響評価のための実験的観測も求められる。さらに、広域的な環境変化を理解していくための国際的な協力体制も構築していかなければならない。

このような多様な観測活動は、北極域における環境研究の一つの重要な基盤といえる。基盤構築にむけて日本の研究者コミュニティは、国際的な方向性や役割分担を強く意識したうえで拠点を設立、整備し、持続的に維持していかなければならない。また、北極域における日本の観測は殆どの場合他国における活動であることから、国際的な趨勢への対応に加え当事国の利益、意向も汲んで実施されることが重要である。

日本の研究者コミュニティはこれまでも、北極域にて様々な観測活動を行い、そのための拠点を築いてきた。しかし一方で、個々の研究者が関心をもつ事象に応じて、観測対象とされる空間・時間規模は渾然としていた。ここでは、これらをおもに運営体制や機能、時空間規模などの視点から整理、分類したうえで、近年の国際的な協働観測の趨勢も踏まえつつ、今後の発展について記述する。

b. 観測・研究施設の種類

拠点を研究拠点と観測拠点とに分類した。加えて広域を対象とした観測の機能、対象についても述べる。

(1) 観測拠点 (Observation base)

観測に関する共同研究を実施できる施設であり、以下の性格を持つ。

① 2カ国（ないしそれ以上）が共同で形成し、協定をもとに運営し、協定に基づき機材の持ち込み、試料・観測資料・データの確保や持ち出しが可能である。

② 作業空間、現地管理者・研究者が配置され、現地滞在し研究・観測を実施する日本研究者等の研究・観測に協力する。

観測拠点の種類としては、次の2種類に分類できる。

(a) スーパーサイト (integrated site) : 多様な分野からなる持続的観測を実施することが可能で、一定の観測基準に基づいて行う設備が揃っている拠点。衛星やモデルの較正や検証に有効なサイトとなる。人員の訓練も含め、長期に維持管理する体制が必要。

(b) レファレンスサイト (reference site) : 特定分野の研究について、それらに適合した地点（地域）で一定の観測基準に基づく持続的観測を行うサイト。長期に維持管理する体制が必要。

(2) 研究拠点 (Research base)

上記観測拠点の性格に加え、以下の性格を持つ。

① 現地国および日本の人材育成、相互の研究交流、共同解析の場である。

② 付近に観測拠点、広域観測網が存在する。

(3) 広域観測

① 移動観測 (periodic observation)

特定の分野の要素に関して、特定地域、特定時期に繰り返し行う観測。主として長期にわたるものを指す。これ

には、陸域に関する観測のみならず、陸上の観測拠点を起点とした沿岸の海洋観測もある。

② 観測網(ネットワーク)(network observation)

一定地域にて特定分野の観測を多数(一般的に10以上)の地点で長期的に行う観測。観測形態としては、機器を設置し時間的に連続した自動観測や、マニュアル観測など多様である。この例としては、凍土観測網や氷河地震観測ネットワークが挙げられている。

これら広域観測は、研究拠点ないし観測拠点をベースにして実施するケースが多いと考えられる。IASOA(国際北極大気観測システム)という北極圏全体のネットワークもあることも指摘しておく。

c. 観測拠点等の候補と運営

(1) 観測拠点・研究拠点候補

表5に観測拠点候補を研究分野別に整理するとともに、上記の拠点・観測の分類を行い、観測の現状を備考欄に記した。また、各拠点がどの研究テーマに関係する拠点であるかも示した。図65は、これらの位置を示した地図で、四角で示した範囲は、遠い将来考える拡張候補領域である。表6に分野別の観測項目等を示した。国際動向や期待される国際分担を考慮した上で、日本が進める重点プロジェクトによって、これら拠点の充実・発展の優先順位を決めることになる。

これらの内、現在でも研究拠点に近い性格を有する地点、あるいは要望がある地点は、以下の拠点である。

① スパールバル・ニーオルスン他

ノルウェー極地研究所が主催し、多くの国が参加する国際共同観測基地であり、国立極地研究所が1991年以来拠点を設置している。多分野の研究が行われたが、現在は、温室効果気体モニタリング、雲・エアロゾル観測、雪氷サンプリング、ツンドラ生態系長期監視活動、環北極大気循環の定点観測点、超高層大気観測などを実施している。国際共同活動の拠点として機能しており、この拠点を維持・発展させることが、わが国の責務を果たす上にもプレゼンスを高める上にも必須であろう。SIOS(スパールバル統合観測システム)により国際共同研究もこれから強化される予定であり、日本の基地機能拡充が重要なプレゼンスとなる。

② 東シベリア・ヤクーツク

JAMSTEC(海洋研究開発機構)、北海道大学、名古屋大学等が1990年以来、植生、凍土、温室効果気体、

水文、雪氷等の陸上観測を行なっている中心的な場所であり、そこを起点にして北極海沿岸や広域に観測点を展開している。1997年以降タワー観測を実施し、現在ではオランダも関与し、GRENEでも新たな研究者が参加している。WMO/GCW(全球雪氷圏観測計画)のinitial reference siteとなっている上、INTERACTの地点にもなっている。ティクシ等、北極海沿岸に展開する複数のフィールドステーションを共同利用する場合の拠点ともなる。

③ アラスカ・フェアバンクス

1997年以来、JAXAおよびJAMSTECが、フェアバンクスのアラスカ大学・IARCを拠点に共同研究を実施してきた。現在、両日本機関の関わりは縮小方向にあるが、観測拠点・移動広域観測を含め人材育成などの実績が多い研究拠点の性格があり、今後も研究拠点としての性格を維持すべきであろう。

さらに、今後の利用が期待できる地点として、カナダ北極圏のケンブリッジベイのCHARS(Canadian High Arctic Research Station)、ロシアのセーベルナヤゼムリヤのバラノバ基地などがあげられる。大気、ツンドラ、雪氷観測のほか、海洋への観測アクセス性が高い。

(2) 観測拠点等の運営

研究拠点および観測拠点で長期的・大規模な拠点は、国内のしかるべき中核機関がその基本部分を担当し、それ以外は、各プロジェクトで対応するのが適当である。

また、陸域において近隣に他国、現地国の他の観測点がある場合には、日本が関係する研究拠点、観測拠点を中心に、ある広がりを持った国際レベルでの「特定観測地域」なる概念も必要である。

これら研究拠点、観測拠点は、以下に留意し運営する必要がある。

- 1) 研究の効率、利用者の便宜の点から同一機関が維持・運営に当たることが好ましい。
- 2) 長期観測が重要であるため、基本運営費は競争的資金ではなく特定機関の運営交付金でまかない、安定していることが望ましい。
- 3) 観測拠点等での各分野の観測項目に基準を設けデータを高度化する必要がある。
- 4) 各拠点で、研究者間の相互乗り入れがしやすいような仕組みにする。

表 5 研究拠点等の現況と候補地

地域	拠 点	大気	陸域 (生態、水を含む)	雪氷 (凍土、氷河、氷床を含む)	海洋 (沿岸、海水を含む)	超高層	拠点と観測の種別		テーマ番号	備 考
							現状	将来		
①	ニーオルスン (スバルバル)	○	○	●		○	B-1	A, B-1, D	1, 3, 4, 6, 8, 10, A	日本を含む多国の観測点あり、研究拠点候補
①	ロングイヤービン (スバルバル)					○	B-2		10	EISCAT(日本参加) スバルバル大学UNIS
①	氷上基地、他	●		●	●			B-1	1, 2, 3, 9	ロシアの氷上基地は停止。 Baranova 基地を再開。
②	トロムソ (ノルウェー)					○	B-2		10	EISCAT(日本参加)
②	ティクシ (ロシア)	●	○	○	●		B-2, C, D	B-2, C, D	1, 2, 3, 4, 8, 10, 12	米露基地、独露共同観測点あり。 GCWsite候補。海洋観測可
②	ヤクーツク (ロシア)	○	○	○			B-1, C, D	A, B-1, C, D	3, 4, 8, 12	日露共同観測点あり、 GCWsite候補。研究拠点候補。
③	フェアバンクス (アメリカ)	○	○	○		○	A, B-2, C, D	A, B-2, C, D	3, 4, 8, 12	JAMSTEC-IARC共同観測点あり。 研究拠点候補。
③	バロー (アメリカ)	●			●		B-2		1	アメリカの観測施設多し
③	ユーレカ (カナダ)	●	○			●		B-2	1, 3, 8, 10	
③	ケンブリッジベイ (カナダ)		●	●	●	●		B-2, C	2, 9	カナダ新基地あり。海洋観測可。
④	サミット、他 (グリーンランド)	●	○	○			B-2, C	B-2	4, 6, 11	

地域： ①：北極海域、②：ユーラシア、③：北米大陸、④：グリーンランド

現在の活動の有無： ○：日本活動あり ●：要望あり

拠点の種別： A：研究拠点、B-1：観測拠点(スーパーサイト)、B-2：観測拠点(レファレンス・サイト)、C：移動観測、D：ネットワーク

テーマ番号： 1～12、本文のテーマ番号に相当

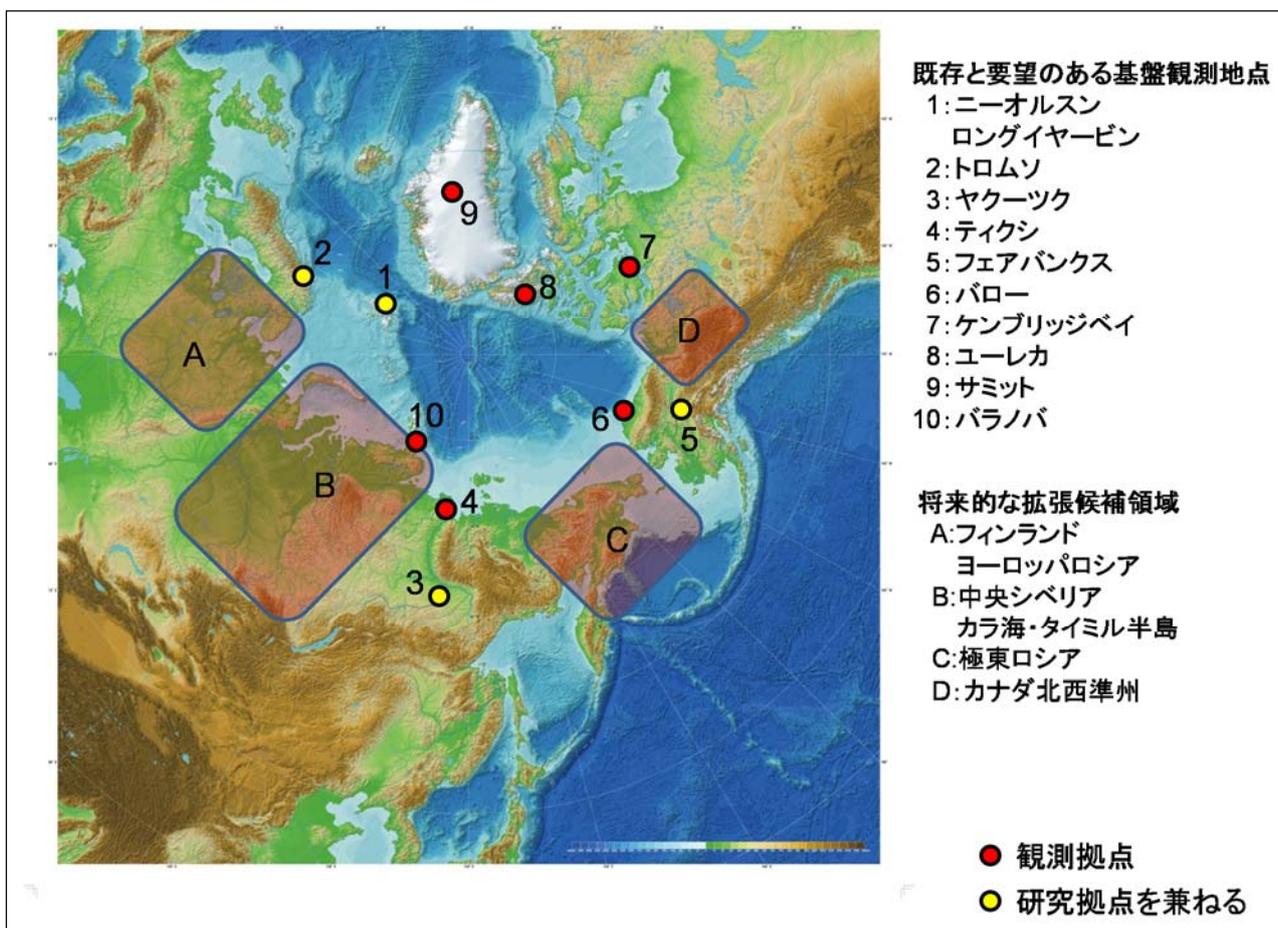


図 65 観測地点等の位置

表 6 観測拠点に必要な分野別の観測項目、設備と体制

	大気	陸域 (生態、水を含む)	雪氷 (凍土、氷河氷床を含む)	海洋 (沿岸、結氷を含む)	超高層
項目	水蒸気 降水 雲 放射 温室効果ガス 短寿命成分 エアロゾル 気象要素	諸気象要素 諸雪氷要素 地温 土壌水分 土壌有機物 植生パラメータ 陸面フラックス (温室効果気体含む) 動物生活史 (移動体追跡)	雪氷分布 積雪面積 積雪水量 密度 雪質 不純物 降水(降雪)量 各種気象・放射要素	二酸化炭素 (炭酸系物質) メタン 汚染物質 海水温・塩分 溶存酸素 栄養塩 微量元素 動植物プランクトン 微生物 海鳥・海洋性哺乳類	太陽波動の活動度 超高層大気温度変動 大気微量成分
設備	地上気象観測機器 高層ゾンデシステム 係留装置 放射計 各種分析計 ライダー レーダー 計算機 無人航空機	スーパーサイト 機器倉庫 サンプル処理室 スノーモービル ボート 各種センサー データ記憶装置 観測タワー	掘削機器 安全通信機器類 各種センサー データ記憶装置 自動大気・陸域・雪氷 観測装置	研究室 実験室 宿泊所 小型船舶 海水汲み上げ装置 自動採水器 係留系 耐氷船 AUV	Naライダー レーダーライダー 光学観測機器 HF・VHFレーダー 流星レーダー 磁力計 GNSS受信器 電磁波動受信器
体制	衛星地上検証 長期モニタリング サンプリング 機器維持	リエゾンオフィス 遠隔地機器開発 情報集約センター 先住民との繋がり	情報集約センター 氷河地震観測ネット ワーク GTN-Pとの連携	国内耐氷船 IARCとの連携 砕氷船・耐氷船の国 際利用	EISCATへの参画・ 利用 レーダーネットワーク

データおよびサンプルのアーカイブシステム

a. 背景

北極圏では温暖化によって様々な変化が起こっている。これまでの研究で、北極海の海氷面積の減少、シベリア域での地温の上昇、永久凍土融解、河川流出量の増加、積雪面積の減少等が明らかになってきた。また、これらの変化に伴う生態系及び人間活動への影響も懸念されている。北極圏の環境変化の実態とそのメカニズムは、いまだ解明されていない部分も多くあり、実態把握および、メカニズムの解明が求められている。これまでの研究は、大気、海洋、陸域の分野ごとに独立に進められてきたが、北極圏は大気—海洋—陸面—雪氷からなるシステムであり、それらのシステムはそれぞれ時間スケール、及び空間スケールの異なる現象を含む。これらの異なる時空間スケールでの変動、および異なる分野の変動が複雑に絡み合う北極圏の環境変動を明らかにするには、これら複数分野にまたがる観測データや研究結果を集積した統合データセットを用いた、新たなプロセスの理解、メカニズムの解明が求められている。データおよびサンプルのアーカイブシステムの整備は、ほぼすべての研究課題において重要な研究基盤と見做されて

おり、整備の優先度は高いと考えられる。デジタルデータ、サンプルに共通して、自前でアーカイブのシステムを持ってデータを管理し、研究者の相互利用を促進し、新たな研究につながるようなシステムを持つことが研究の地力を高めることにつながると考えられる。

b. データのアーカイブ

日本のデータアーカイブとしては、現状を踏まえて特に重要と思われる提言を以下に整理する。

(1) 安定なデータアーカイブ

データアーカイブは当然のことであるが、安定なシステムであることは最低限求められる条件である。ここで「安定」であるとは、データの冗長性が確保される(バックアップがある)ことだけではなく、アーカイブが長期間にわたって維持されることである。特に、研究プロジェクトの採否などに左右されないことは、データアーカイブの信頼性を確保する上では重要であり、時限のある短期のプロジェクトではなく、原則として恒久的な研究機関などによって維持されるべき性質のものである。

(2) データアーカイブの利便性

データアーカイブシステムは、データの提供側と利用側の双方にとって可能な限り使いやすいシステムである必要がある。データアーカイブシステムは、データ提供者以外の研究者から広く利用されるところに存在意義があり、利用側にとってデータの閲覧、アクセスが容易であることが重要である。このために、検索サービスの充実とデータクイックルックの整備はアーカイブシステムの生命線と呼べると考えられる。例えば、既に国立極地研究所の北極域データアーカイブ(ADS)などでも試みられているように、データ登録・検索機能の開発及び最低限の解析を可能にするデータ閲覧システムの開発は有効であると考えられ、今後も開発が継続されることが必要である。

データ提供側からは、データ提供の手間を減らし、提供を容易にすることが強く求められる。メタデータの充実はこの点で相反する部分があるが、データアーカイブのシステム側からのサポート体制を構築することでスムーズなデータ提供をしてもらえよう、環境整備が必要である。

(3) データの柔軟性

極域環境科学は学際的な広がりを持ち、データの形式もおのずから多岐にわたる。近年の環境研究においては、人文・社会科学的なデータも重要性を増しており、既存のデジタルデータのフォーマットに限らず、多様なデータ形式を受け入れられるような体制が望ましい。また、時間的あるいは空間的に高解像度のデータが取得されるようになり、これまでと比べても非常にデータ量の多い観測データ、モデル出力などが取得されるようになった。このような複雑多岐かつ多量のデータは、一般の研究者が取り扱うためには非常に労力を必要とし、利用性が低くなることが考えられる。今後データアーカイブは、複雑多岐かつ多量のデータを利便性よく使えるシステム構築を行うべきである。

(4) データレスキューの促進

北極地域は世界的に見ても、データ整備が遅れている地域であり、世界的には流通していないデータの収集・管理をすることが必要である。また、これらの地域で緊急に実行が必要なデータレスキュー(紙等にかかれていたデータで、適切に保管しないと地球上から失われてしまう危険があるデータを電子媒体として保存する)

作業をする必要がある。

(5) データの公開・流通

この数年、各データセンターでは、データセットの恒久的なリンクを保証するために各データセットの DOI の付与が進んでいる。DOI はデジタル化されたコンテンツを識別する文字列であり、データの流通性や活用度の向上、かつ恒久的なリンクを保証するには、必要なものである。現在、日本では学术论文や図書など限られたコンテンツにしか利用されていない。日本が主体として取得されたデータに関しても DOI を付与し、データの流通を促進する必要がある。

また、データの記載と公開を目的とする学術雑誌が、メジャーな出版社から複数創刊されている。主なものとして、Earth System Science Data (EGU)、Geoscience Data Journal(Wiley)、Scientific Data (Nature)を挙げることができる。これらの媒体は観測されたデータの公開を促す効果を持つのみならず、データレスキューのためにも有効であると考えられる。国内において欧文のデータジャーナルの創刊、あるいは既存ジャーナルの拡充という形で同様の媒体を設置することを検討するべきである。

(6) 国際連携

北極域には様々な地域や国々が存在し、北極域の環境を理解するうえではデータ利用の国際連携が必要となる。北極研究に関するデータベースは、北極圏国を中心に各国が独自に運用してきており、様々なデータセンターやデータポータルが存在する(NSIDC、CADIS、GCMD、GEO-Portal、GCW 等)。これを一つのシステムに集約することは現実的ではない。ただし、それぞれが連携することは極めて重要であり、メタデータの相互流通や、他のデータベースからの検索を可能にする機能を導入し、分散型のデータベースを国際連携で構築していくべきである。データマネジメントについては、現在 IASC(国際北極科学委員会)のデータマネジメント WG や SAON(持続可能な北極観測ネットワーク)で議論が始まったところであり、今後国際的な連携を積極的に進める必要がある。

(7) 北極域データセンターの必要性

データセットは、付随するメタデータによって管理されている。現在、情報技術の進歩・情報共通化の動きの

中で、このメタデータ format を統一する動きがあり、観測データを国際的なデータセンターの下に収集、蓄積する必要性は低くなりつつある。しかし、日本国内の研究機関および大学の現場観測分野では、データセット構築、公開というデータマネージメントに重きが置かれずに、他国のデータセンターに依存しているのが現状である。国内予算を用いて研究観測を行い取得したデータは、貴重な成果であり、独自に公開し、国内研究者の利便性を高める必要がある。しかし、これらの現場観測データを含めた個々の研究機関および大学が独自に行うには無理があるので、北極域環境研究の分野では日本独自の統一的なデータセンターを持ち、データを公開することが必要である。また、上述のデータの公開・流通、国際連携は北極環境研究を進める上で日本として統一的に進める必要があり、データセンターの機能として組み込むべきである。

c. サンプルのアーカイブシステム

北極環境研究においては、サンプルの取得とその分析に基づく研究も多く含まれ、サンプルを長期間、安定にアーカイブできる仕組みは非常に重要である。これまでに、あるいは今後取得されるサンプルは研究の資産であり、これを継承し、継続的・長期的な研究を可能に

することの重要性を考慮すれば、各研究者の現在の所属機関とは独立な機関として、新たな分析を可能にするための試料保管・配分システムを持つことが望ましいと考えられる。この場合、可能であればサンプルを分割して、一方を科学博物館等の機関で管理し、もう一方をサンプル取得者が管理するなどの工夫が必要となる可能性がある。言うまでもなく、このような独立機関・あるいは博物館などについても資金と人材の安定的な確保が必要であり、10年程度ではなく、さらに長期的な視点で考慮されるべきである。

同時に重要となるのが、サンプルのメタデータである。取得される、または、取得されたサンプルに関してもメタデータの作成を行い、十分な情報を公開しかつ情報へのアクセスを容易にすることによって、サンプルの存在を研究者に知らせ、分析及び研究を推進する必要がある。

サンプルの種類・性質によって、必要とされるアーカイブのシステムは大きく異なるが、メタデータについては、データ形式に十分な柔軟性があれば、前述したデータシステムによって収集・公開可能と考えられる。データセンターの役割として(数値的な観測データのみならず)サンプル情報の収集・管理も考慮されるべきと考えられる。

人材育成

a. 日本における北極環境研究に関する人材育成の現状

北極環境研究に限らず、日本国内における人材育成は根本的な問題を抱えている。多くの博士後期課程修了者が雇用期限の付かない研究職に就くことができず、いくつものポストドクター職を渡り歩いており、その影響もあって、博士後期課程に進学を希望する学生数は極端に減少してしまった。この現状を打開する方策まで示唆することを目指す。多様な進路に適合する人材を育成し、それを成長の糧にする産業に結びつける。自然科学だけでなく、人文社会科学の専門家を育成し、特に双方からの統合したアプローチを可能にする育成方策を立てる必要がある。さらに、環境変化の影響を受ける北極人間社会に関する知見の涵養も重要である。また、日本は北極に領土を持たないので、北極環境研究において現場観測、現地調査を実施するには、国

外における観測・フィールドワーク研究活動が必要となる。日本人の学部生、大学院生の多くは、海外に出る選択肢を取らないため、北極は遠い存在になっているが、その障壁を低くする策を提案する。

b. 人材育成における国際的な活動

北極環境研究に関しては、国際協力として次の3つの組織が活動を行っている。

(1) APECS (Association of Polar Early Career Scientists)

両極を対象とした研究を行っている学生および若手研究者が自ら運営する組織で、IASC、SCARなど多数の組織が資金を支援し、様々な活動を行っている。APECSに参画し活動に参加することは、研究者を目指す若手のキャリア形成に有効であると考えられる。JCARはAPECSの日本国内組織の立ち上げを支援

し、準備を開始した。今後はAPECSおよびその国内組織への活動資金の支援を行なっていくべきである。

(2) 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、アラスカ大学などと連携して活動を開始している。

(3) UNIS(The University Centre in Svalbard)

スバルバル諸島のロングイヤービンにあり、国立極地研究所がオフィスを設けている。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ある。20名近い専任教員がおり、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が、我が国からは若干名である。

c. 人材育成に関する今後の検討課題

研究者の育成を目的にした支援体制に加えて、専門技術の伝授とリテラシーの確立についても提案をする。以下に述べる取り組みに対して、研究者や研究機関が個別に実施するだけでなく、国内の大学の連携、および我が国と北極圏の大学間の連携も必要であり、JCARがそれらの連携の橋渡しをして、我が国の北極関係者全体としての取り組みを進めることで、より効果的な人材育成を行う必要がある。

(1) 研究者の育成

国内の大学間、および我が国と北極圏の大学間の連携を通し、以下のプログラムを実施する。

- ・インターン制度を設け、研究活動への大学院生・学部生の参加を可能にする。
- ・サマースクール等を実施し、研究を開始した学部学生、大学院生の教育をコミュニティで実施する。
- ・キャリアパスの開発、紹介、実習によって、学位取得後の進路選択肢を拡充する。
- ・人材バンクを作り、大学や知り合いの枠を超えてPIと学生をマッチングさせる。
- ・GRENE 若手研究者派遣支援事業の実施、およびそ

の後継事業として、海外の研究機関や大学での研究活動を目的とした派遣制度を設ける。

- ・北極圏でのフィールドワークを支援する助成制度を設ける。

(2) 国際的な連携

JCARとしてはAPECSの活動に協力すると共に、国内の大学とともに北極圏大学、UNIS、その他の北極圏の大学との連携強化にも協力することによって交流をスムーズに進める。さらに、IARCの利用も有効であると考えられる。学生を派遣し滞在させる場合、安全確保は最重要課題であるが、IARCはその体制も整っている。また、英語圏であるためコミュニケーションが比較的容易である。

今後の取り組みには、ARCUS¹⁵²の人材育成の取り組みも参考になると考えられる。例えば、TREC¹⁵³は学校の先生を対象にフィールドやそこでの研究活動を体験してもらい取り組みで、日本においても実施できれば研究活動を伝える有効な手段となる。

我が国が率先して進めるべき国際的な取り組みのひとつは、先住民の若手研究者を対象にした招へい制度を立ち上げて、人材育成に貢献することである。その成果が、ひいては我が国の若手研究者を国外で育成する国際連携に結実するであろう。もうひとつは、非北極圏、特に東アジアの若手研究者を招へいすることによって、長期にわたる国際的な共同研究と国家間連携の基礎を築くことである。

(3) 専門技術の継承と発展

大学も含めた研究機関では、効率的な人員の配置という号令のもと、技術者が削減されてきた。しかし、先駆的な研究の展開を支える一翼は技術革新であり、北極環境研究にはモデリング、観測手法、衛星データ解析、化学分析、遺伝子解析などの高い技術能力と、新たな発展が必須である。予測モデルの開発と高度化、各種パラメータの高精度分析、船舶観測の高度化、観測項目の多様化など、技術を向上させる基盤を確保しなければならない。継承と発展の最も基本的な条件は、技術者の養成と雇用の確保である。また、技術者と研究者の隔壁を下げるには、多様な評価軸を提案していくこと

¹⁵² ARCUS: Arctic Research Consortium of the United States

¹⁵³ TREC: Teachers and Researchers - Exploring and Collaborating

が有効であろう。

技術の急速な発展に対し、異なる研究分野間の情報交換が追いつかず、ある分野ですぐれた技術を利用できないことも起こりうる。異分野間の連携が情報を迅速に交換することに役立つ。異なる研究手法を使う専門家間の連携、例えば現場観測とモデル計算の連携においても、双方をつなぐ研究者と技術者の育成に力を注がねばならない。

(4) リテラシーの確立とアウトリーチ

小中学校の理科教育における地球環境の重視は、従来から強調されてきた。市民の理解力は情報公開の基礎であり、初等中等教育に携わる JCAR 会員を求め

る理由である。学校教育に携わる会員と知識や情報を共有することで、北極環境研究の重要性と魅力を、若い世代に正確かつ効率的に伝えることができる。それに加え、市民向けの講演会、サイエンスカフェ等により、小・中・高校生に最先端の研究の魅力を伝える活動にも尽力すべきである。北極環境研究の重要性を伝えるアウトリーチ活動を人材育成につなげ、北極環境研究に興味を持つ学生数を増やしていく。北極域は日本からは遠い存在であるが、人が住む都市や町があり、フィールドを体験するプログラムを組むことが可能である。体験の機会を提供することによって、野外活動の経験を積んだ学生を育てることができる。

研究推進体制

a. 整備の背景と目的

北極環境研究は複雑化、大型化しているが、それを円滑にそして効率的に実施し、多くの成果創出が可能な体制を構築することが重要になっている。そのためには、国内における研究推進の体制を整備する必要がある。

複雑化の意味は、科学的知見を必要とする社会分野が、科学コミュニティのみならず産業、資源等にも広がっていること、また、それに関係し諸政府機関が政策的な活動を活発化してきている、そして、国際的枠組みで捉えざるをえないことが増えていることを指す。これは、多くの国での国際的な動向であり、国内ではそれらの影響をも強く受け、変化している。このような北極域に関する状況は、南極地域の状況と異なり、この複雑化した状況の中で、しかも効率的・効果的な研究を推進することが求められている。これは、科学的真理の探究を行う場合でもコミュニティ以外との関わりが強く求められていることを意味し、これは新たなチャンスでもある。しかし、それを円滑に実施していくためには、研究における体制の見直しが必要となる。

b. 国際動向

北極環境の研究は、北極国、非北極国が協力し推進することが必須となっている。科学者連合である国際北極科学委員会 (IASC) を中心に、北極国政府が中心となった北極評議会 (AC) およびその関連団体、そして WCRP や GEOSS など北極域を関心対象の一部とする国際組織などが存在し、研究および事業の方向付け

や提言を行っている。日本における研究もそれらとは無関係に存在しえない状況となっているため、国際組織への日本の意見のインプット、国際組織の方針への協力など、日本が国際組織の動きに強く関与しなければならないことを意味している。

さらにその一環として 2 カ国間の協力要請が多々来ているのが現状であり、そのような枠組みに対応し、それらを通じた研究実施を検討する機会が増えてきている。また、ベルmontフォーラムのようにファンディングに関しても国際的枠組みが登場し始めており研究推進環境は、一層複雑化している。

これらの国際的な動きに集団として迅速に適切に対応するためにも、国内の体制を考えなければならない。

c. 国内研究推進体制の在り方

国内での体制は、これらを考慮し、以下の基本をもとに設計することが必要である。

- ・研究者が研究に必要な整備された共通の基盤をもとに、自由で斬新な発想により、新しい研究を実施できる。そのためには、なるべく多くの研究基盤を共同利用できる体制を整えるべき。
- ・国際的な枠組みと制約の中で、日本の研究者・機関が円滑に研究活動を行い、全体として国際的な分担を全うできる。
- ・国内における社会各層、他分野との交流、社会への成果還元を十全に行うことができる。

d. 具体的な体制

具体的には、以下の体制を強化することが望ましい。

(1) 中核機関を強化し、それを中心に、国内推進・実施体制が進むよう整備する。そのために、中核機関内に主要機関、関連団体からなる推進委員会を設置し、それが全体的な研究、ファンディング機関との協調、および基盤整備などを推進する機能を果たすのが望ましい。2013年の学術会議に対する大型研究計画の提案の中で、中核機関が「北極域環境システム研究拠点」の設置をうたっているが、このような提案は歓迎される。

(2) 研究基盤(観測プラットフォーム、海外拠点、機器、モデル、データ)を主要機関が分担し整備し、研究者・研究グループに供するため、機関に基盤整備を割り当てる。このために、新たな組織を立ち上げることも視野に入れるべきである。観測プラットフォーム、機器の一部やモデルの整備などは、全球の地球科学研究の状況との兼ね合いを考慮する必要がある。

(3) 基盤整備の要請に基づき、分野ごとの国内推進の分担を決め、研究の効率化を図る必要がある。日本の地球科学研究推進の現状を鑑みると、船舶を活用し研究を行う海洋研究などと、主として他国の陸上で研究を行う陸域・雪氷研究を推進する担当機関は別機関が中心となるのが適当である。それ以外の分野についても主たる担当機関を一定程度明確化し推進する必要がある。また、衛星観測は重要な研究手段でありながらも、研究者が利用するにあたり不備な面が多々あるため、国内のデータ利活用の体制を改善する必要がある。

(4) 北極域の環境変化は、相互作用の結果として発生しているため、システムとしての取り扱いが重要である。このため、研究分野間の情報交流を多くし学際的研究を通じて、現象に対して正確な理解に到達できるような体制面での配慮が必要である。

(5) 北極域の環境変化は、社会的影響が大きいことから、社会への科学的知見の普及と理解の向上を促進する体制の確保が必要である。国内の北極研究が一般向け・専門家向けにひと目でわかる場所(おそらくは Web ページ)の整備・維持が必要。

(6) 北極環境研究コンソーシアム(JCAR)ができて3年が経つが、JCAR は北極環境研究推進に重要な役割を果たしてきた。短い期間でありながら中核機関・主要機関の状況、国内および国際レベルでの研究推進状況などが大きく変化してきたことを考え、長期的視野に立って今後の役割およびその在り方を検討する必要がある。

ある。

e. 研究基盤の準備・開発・維持

本章では、機器等の基盤の必要性、開発について記述してきたが、北極域については、まだこれらが遅れているのが現状である。寒冷地域であるということ以南極域と類似しているが、周辺を陸域で囲まれた北極海での現象が重要であること、また、周辺部には広大な陸域があり、またそれらが特定国の領土であることでのいろいろな制約を受けるという点で、南極とは大きく異なる。

本章では、数多くの提案が出されているが、当然資金が必要な事もあり、優先順位づけを行い、順次開発し、実用に供していく必要がある。また、効率化の観点から独自に開発するのが適当か、それとも海外の類似品を確保し、早急に観測に供するののかも検討する必要がある。

基盤の一つであるデータアーカイブは、国際的な課題であり、日本のみならず世界的な研究の効率化という観点からすると、早急に力を注ぐべき分野であり、今にもまして体制の整備が必要である。

すべての基盤については、その持続性を確保することが重要であり、それぞれの担当機関を明確化する必要がある。

f. 国際協力の促進

北極環境研究においては、過去にも増して国際協力および、そのための日本の研究者と研究環境の国際化が重要になってきたことを述べてきたが、上記の中核機関や関係機関や諸省庁などは、以下の点に留意する必要がある。

(1) 諸国際機関、諸外国、諸プロジェクトに関する情報の整備と流通の確保: 日本語による情報流通、専門家グループの形成を通じて適切な情報確保。

(2) 相談窓口を設け、国際的な研究企画を個別に具体的に支援。

(3) 日本研究者にとって共通性の高い諸外国との協定・協力方法の整備。

(4) ハイレベル(2カ国科学技術協定、AC、IASC)における協力活動の推進。

(5) 研究者および研究環境の国際化に関する取り組みの推進。

- ・研究者の早期からの企画会議等への参加支援。
- ・国際機関、プロジェクトなどの事務局への事務系、研

究系人材の派遣。

(6) 国際協力の促進の形として、ベルモントフォーラムのような国際的ファンディングなどは効果的と考えられ、

分野別研究機器等

a. 大気

北極域での大気観測の戦略として、長期的連続観測基盤としての地上観測体制の整備、人工衛星を用いた広域観測、船舶による洋上観測、航空機等による 3 次元構造の詳細観測などが考えられる。さらに、これらは相補的であることから、これらを組み合わせた総合的な観測形態が望まれる。

大気観測で用いられる機器は遠隔測定 (remote sensing) と直接測定 (in-situ measurement) に大別される。遠隔測定は、一般に電磁波 (主に、紫外域～マイクロ波領域) を利用した測定であり、観測対象からの電磁波を一方向的に受信 (受光) する受動型 (passive) 測器と自ら電磁波を射出し観測対象からの反射波を受信 (受光) する能動型 (active) 測器とに分けられる。また、直接測定では測定プローブや分析計を用いた現場観測だけでなく、現場で採取したサンプルを実験室に持ち帰り分析する場合もある。これらの様々な方法から観測対象や目的により最適の方法が取られる。

雲、エアロゾル、微量気体、降水 (雪) 等の大気成分や気温、湿度、風等の気象要素を観測対象とする地上設置型の大気観測システムを考えると、能動型・受動型リモートセンシングと直接測定とを組み合わせたシステムが必要である。能動型測器はこれまでの電波領域の周波数を用いたレーダーに加えて、可視域のレーザー光を利用したライダーが多く使用されるようになり、さらに多波長型、ドップラー方式、空間走査型の測器が、高精度での物理量観測やその空間変動を知る上で極めて有効であり、ドップラー雲レーダーと多波長偏光ライダーの同期観測は今では雲物理放射研究には欠かせないツールとなっている。受動型測器は、遠隔測定による物理量の定量化の高度化のためにはより広い波長領域をより高分解能で測定できる測器 (可視、赤外、マイクロ波分光放射計) が必要である。

二酸化炭素を含む温室効果気体の連続観測において、近年、微量気体の高感度精密測定の新技術として

2014 年段階で提示されている「自然と社会のテーマ」のみならず、北極域自然現象に関する持続的観測を含むことも重要と考えられる。

CRD¹⁵⁴分光法が広く用いられるようになってきた。この方式は、エアロゾルの吸収特性の直接観測にも応用され、大気化学分野での利用が今後一層盛んになると思われる。

雲粒子・エアロゾル粒子の直接観測は、航空機観測用プローブの開発によって大きく進展したが、それらの測器は地上観測用に改良されているものも多く、地上での長期連続観測に有効である。

温室効果気体や雲、エアロゾル、水蒸気等の大気成分による気候影響の研究では、精密な放射観測が基本となる。そのため、BSRN¹⁵⁵が放射観測の全球ネットワークとして展開されている。BSRN で定められた測定基準は放射観測の世界標準に位置づけられるので、北極域での放射観測もこれに準ずることが望ましい。ただし、放射観測のみならず、極地における大気観測は自然条件の厳しさから、その精度を維持するには、現地での観測機器の保守等に相当の努力を要する。

大気陸面間の水・熱・炭素交換のモニタリングでは、観測地点の充実が必要である。これまで FLUXNET と呼ばれる観測ネットワークが構築されているが、アジア (Asiaflux)、アメリカ (Ameriflux) やヨーロッパ (Euroflux) と比較して、極域での観測密度は極端に低い (2013 年 4 月時点で日本・韓国が計 40 点に対し、シベリアは計 3 点)。フラックスタワーによる観測データは現場の監視の他、大気モデルでは下部境界条件として利用可能である。さらに、近年ではデータ同化手法による大気モデルと観測の融合が試みられている。フラックスの空間的な観測密度の増加が極域における下層大気と陸面の水・熱・炭素循環を理解する上で今後より重要となっていくであろう。衛星観測にとって、観測から得られる物理量の検証は必要不可欠である。数少ない極地観測サイトは地上検証サイトとして重要な役割を果たす。

日平均気温、降水量や風速といった多くの陸面過程モデルを駆動するために必要な気象状態量の観測データは、国内外の研究機関によって収集・整備されてい

¹⁵⁴ CRD: cavity ring-down

¹⁵⁵ BSRN: Baseline Surface Radiation Network

る(例えば、シベリアでは、JAMSTEC による Baseline Meteorological Data in Siberia)。今後温暖化の影響が強く表れると考えられている極域のシグナルを捉えるため、地点観測を継続していく必要がある。高品質の観測のためには機器の定期的な整備が不可欠である。特に、雨量計と温度計に不純物が混入していないか、また、周辺環境が観測に適する場所であるかどうかについて半年に1度程度の頻度で見回りとメンテナンスが必要である。

雨量計による降水観測では、捕捉率を向上させる技術の開発が必要であろう。極域では降水が雪として観測される頻度が高く、風によって降雪が雨量計に入らない割合が大きい。正確な降水・降雪量把握のため、雨量計の改良や観測値を補正する統計手法の開発が望まれる。

b. 中層・超高層大気

(1) 欧州非干渉散乱レーダー(EISCAT レーダー)¹⁵⁶

北欧に国際共同にて設置・運営されている大型レー

ダーシステム(EISCAT レーダー)を用いて、下層・中層・超高層大気・電離圏・ジオスペース環境観測を実施する。EISCAT レーダーは、これまでに30年以上にわたる観測を実施してきたが、現在、大幅なリニューアル計画(EISCAT_3D 計画)が進められている。日本もこれに参加し、大気圏・電離圏(高度約1~30 km、60~1000 km)変動のモニタリング・3D 立体観測を実施する。日本独自の大型大気レーダーである MU レーダー(日本・信楽)、赤道大気レーダー(インドネシア)、PANSY レーダー(南極・昭和基地)と EISCAT_3D レーダーとを加えたレーダーネットワークを構築・整備することにより、地球環境研究のための極めて強力な研究基盤を得ることができる。

(2) 飛翔体観測、及び搭載機器開発

2015 年度、内部磁気圏観測衛星 ERG の打ち上げにより、高エネルギー粒子観測、プラズマ波動観測等、地球周辺のジオスペース環境の詳細なモニタリングが可能となる。このような宇宙空間からのジオスペース探

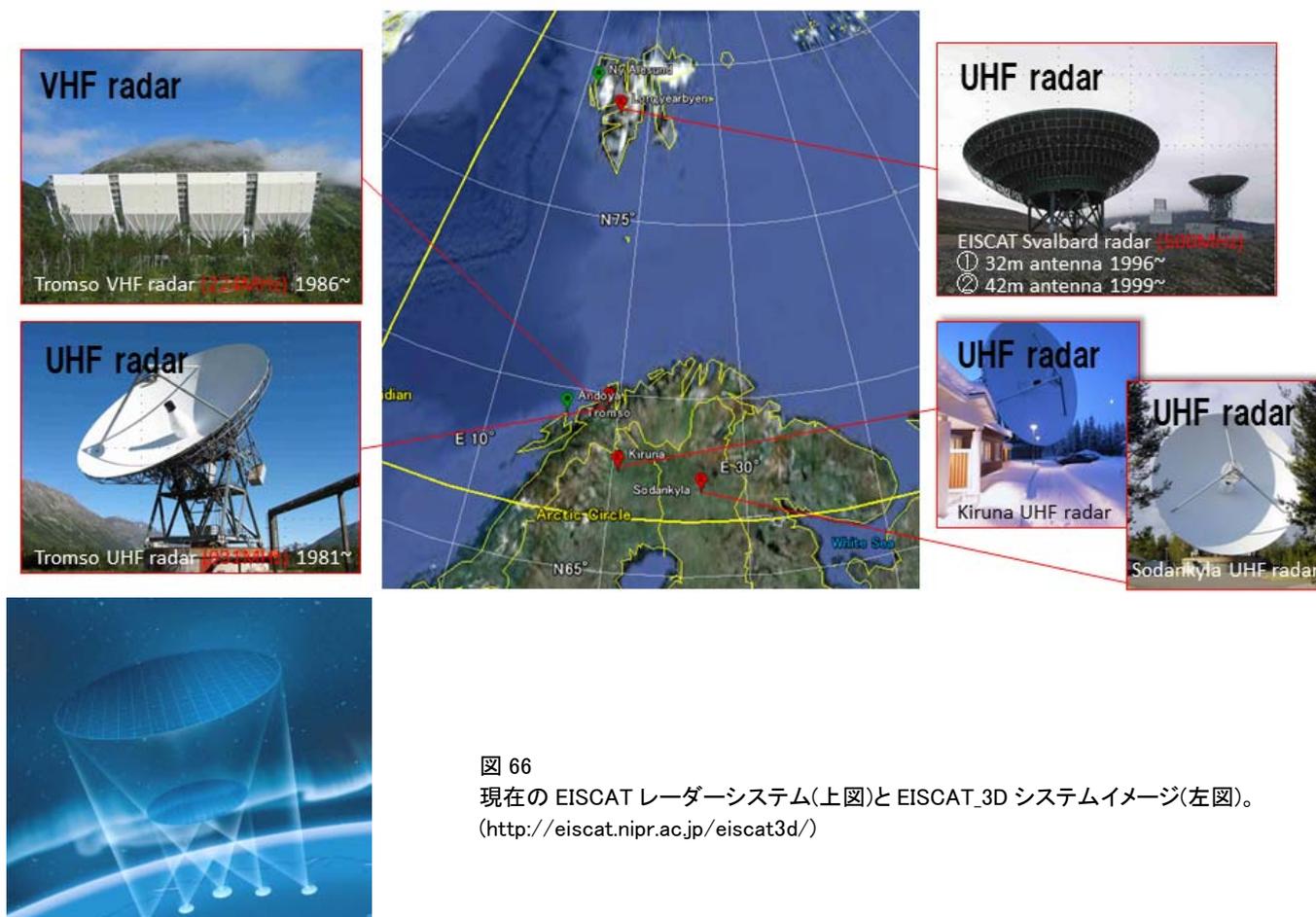


図 66
現在の EISCAT レーダーシステム(上図)と EISCAT_3D システムイメージ(左図)。
(<http://eiscat.nipr.ac.jp/eiscat3d/>)

¹⁵⁶ 欧州非干渉散乱レーダー: European Incoherent Scatter (EISCAT) レーダー

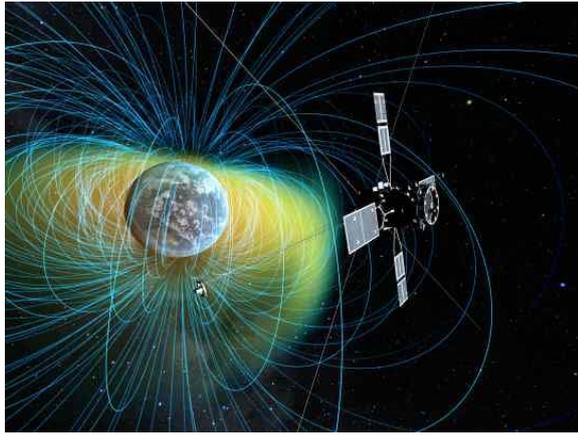


図 67 内部磁気圏観測衛星 ERG(左図: http://www.jaxa.jp/projects/sat/erg/index_j.html) と国際宇宙ステーションからの大気光観測(右図: <http://www.iss-imap.org/>)

査計画は、各国で精力的に進められており、同じく内部磁気圏を探索する Van Allen Probes(米国:2012 年打ち上げ)、Resonance (ロシア:2016 年打ち上げ)、VSX(米国:2016 年打ち上げ)、電離圏探査 Swarm (ヨーロッパ:2013 年打ち上げ)などがある。また、国際宇宙ステーション(ISS_KIBO モジュール)からの大気光観測により、高度 100 km、250 km 付近の大気変動のイメージング観測が実施されている。今後も同様の観測を継続的に実施し、次のステップとして複数衛星によ

る同時複合観測を実現する必要がある。最新技術を導入した宇宙機搭載用機器、例えば、赤外・可視・紫外・X 線撮像装置、加速度計、質量分析器、粒子計測器、その他のプラズマ計測器などの独自開発により、種々の衛星ミッションを実現する。ロケット・気球観測は、人工衛星が飛翔できない領域(成層圏～下部熱圏)で必要不可欠である。地上、衛星観測と連携し、また、国際共同によるロケット実験(例えば、ノルウェーとの共同観測は古くからの実績がある)を実施する必要がある。

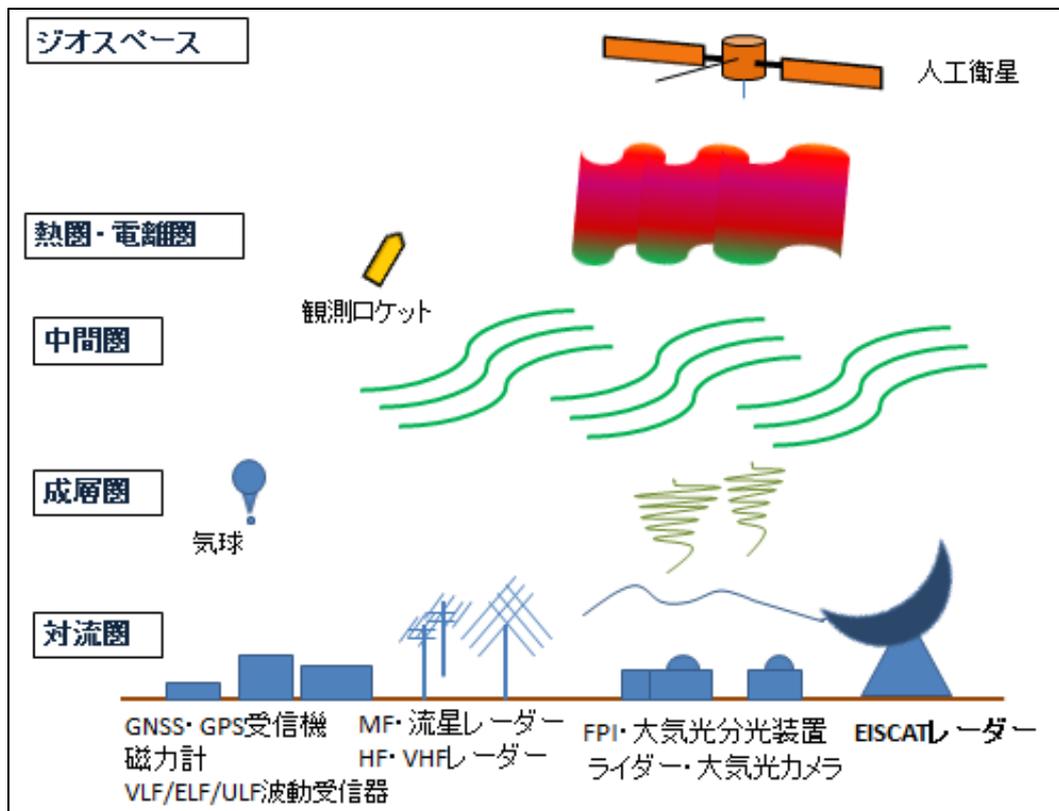


図 68 北極域観測ネットワークを構成する機器群

(3) 広域多点観測のための機器整備

北極域の大気重力波、プラネタリー波の中層・超高層大気での性質・役割を理解するため、高度70~100 kmの風速・温度を計測するMF・流星レーダー、ライダー、大気分光観測装置の開発・整備が必須である。また、電離圏変動や地球周辺の高エネルギー粒子の加速・加熱過程の理解のため、HF・VHFレーダー、磁力計、GNSS・GPS受信機、大気光カメラ、VLF/ELF/ULF波動受信器の開発・整備が必須である。経度方向に伝搬・散逸する大気波動や、地球周辺を経度方向に周回する高エネルギープラズマの全体像を捉えるため、北極を取り囲む観測ネットワークとしてこれらの装置群を整備する。これらのシステムの構築・観測とシステム維持のための国内外の共同研究体制を確立する。

(4) 拠点観測のための機器整備

宇宙や下層大気からのエネルギー流入が中層・超高層大気へ及ぼす影響を理解するため、EISCATレーダーサイトなど、高精度な測定が可能な大型装置が配備された観測拠点に、上述の観測機器群を集中的に整備し、中層・超高層大気の総合的モニタリングを実施することも重要である。

(5) 基盤観測とデータ解析・モデリング/シミュレーションとの連携

上述の衛星・地上観測とシミュレーション研究との連携も重要である。データ同化などの手法開発、モデル

の高分解能化、素過程のモデリング、大規模計算のためのモデルのチューニングを随時行う。さらに、膨大なデータを解析するための環境構築や解析手法の開発、ソフトウェア開発を実施する。

c. 雪氷

北極の雪氷研究においては、現場における観測や試料採集が極めて重要である。それらの資試料は、観測点における雪氷圏の諸変動やそのメカニズムを明らかにするためだけでなく、人工衛星による広域変動監視のための校正や、数値モデルへの入力・検証データの提供といった点で大きな役割を示しており、長期的な継続が不可欠である。氷河内部や底面における諸物理量や試料など、現場でしか得られない物も多い。

(1) 氷床・氷河観測

氷床・氷河質量収支の観測や生物作用の影響評価のためには、長期運用可能な観測地点の整備が必要である。具体的には、観測の拠点となる研究宿泊施設の整備、野外観測に必要なスノーモービルや小型ボートなどの移動手段、自動気象測器やGPS装置などの観測機材が必要となる。また、雪氷コアの掘削や氷床内部のレーダー観測などは、固定された観測地点に留まらず機動的に広域で行う必要がある。そのための機器としては、航空機やヘリコプターを使ったアイスレーダーやレーザー高度計、氷床内部の観測やサンプリング用の熱水掘削装置やアイスコア掘削装置、検層機器などがある。それらの新規開発や既存の装置の更新も重要である。氷河地震観測のためには、地震計や観測シス

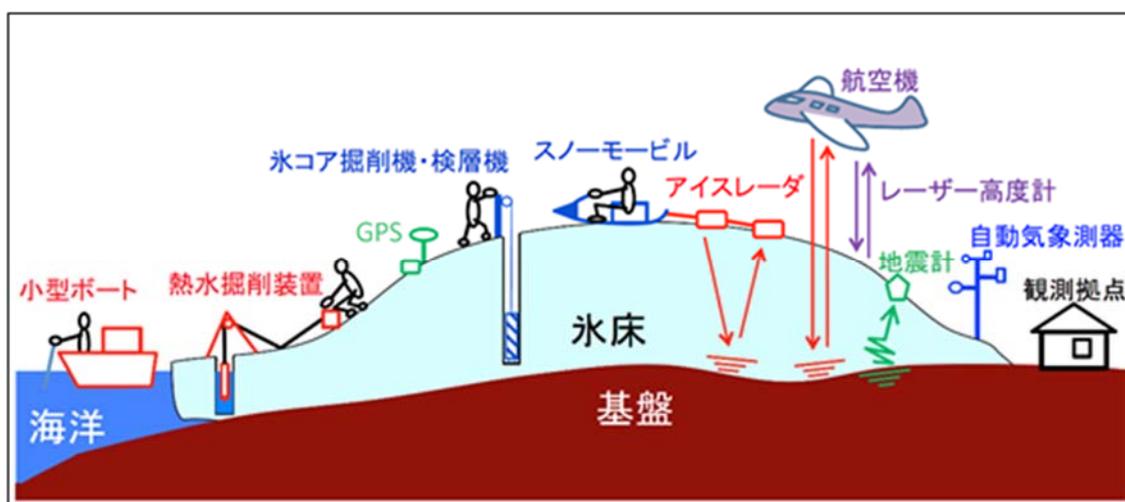


図 69 氷床・氷河観測で使用される主な機器

テムなどの機材が必要となる。上記のうち代表的な機器類を図 69 に示す。また、環境変動に関する代理指標(テーマ 6 参照)の形成過程を理解するための現場観測には、可搬型の水蒸気同位体やエアロゾル濃度などの分析装置が不可欠である。それらの機器の開発や現場観測・試料採集を継続的に実施できる体制(人員、組織)の構築と維持も重要である。

(2) 雪氷コア分析

過去の気候や雪氷圏の変動を復元するには、採集された雪氷コアを実験室で分析する必要がある。分析項目としては水同位体やエアロゾル、固体微粒子、気体成分等があり、それらを高時間分解能で分析するには、測定機器や分析技術、分析体制を整備・維持する必要がある。従来から運用されている分析機器(質量分析計、液体クロマトグラム、ガスクロマトグラム、粒子分析計、黒色炭素分析計等)に加えて、気体(温室効果気体、希ガス等)やエアロゾル(硫黄、カルシウム、ストロンチウム、鉛等)の高精度同位体比測定による起源・輸送経路の推定や、複数指標の組み合わせによる定量的な推定を可能にするための分析機器が必要となる。また、アイスコアの環境情報を高時間分解能で大量に取得する手法として、連続融解技術が実用化されているが、まだ歴史が浅く今後の継続的な開発が重要である。レーザーの吸収や散乱等を応用した雪氷試料の分析や空気抽出など、連続融解と組み合わせた分析技術の革新も継続する必要がある。

(3) 永久凍土

凍土を構成する氷の研究では、氷河・氷床研究と同様に長期運用可能な観測拠点、移動手段、基本データとしての気象観測設備が必要である。特に深部の地温観測においては時定数が長いため、観測拠点を長期間安定に維持することは必須であり、また、活動層など浅部観測では空間的な広がりカバーするために多点展開を可能にする移動手段を備えるべきである。現状の凍土掘削技術には改善の余地があり、新たに多点掘削を念頭に置いた、研究者が扱える規模で機動性の高い凍土掘削システムや、船舶から海底・湖底に存在する凍土を不攪乱で採取できるシステムの開発が必要である。凍土氷融解のプロセス理解、凍土地温からの古

環境復元には、融点付近の温度測定精度を上げるための小数点第 2 位での精度をもつ地温センサとロギングシステムの開発や、不凍水量を現地測定するための観測技術の開発などが必要になる。また、活動層内土壌のアイスレンズ(再凍結した氷層)や有機質分布、土壌構造に対応した熱的パラメータ測定装置の改良が必要である。

(4) 降水・積雪観測

北極域の降水観測で最も重要なのは、冬季降水量の高精度測定である。固体降水捕捉率のキャリブレーションに利用される Double Fenced Inter comparison Reference (DFIR) の WMO 基準測定に加えて、重量式、光学式などの多様な冬季降水(降雪)センサの開発と比較観測によって、観測精度の向上を進める必要がある。降水レーダーを用いた水蒸気(雲)ならびに降雪粒子の時空間変動観測を利用し、降水衛星データ(GPM/DPR およびその後継機データ)との比較によって、空間的な降水観測精度の改良も重要である。積雪については、地表の積雪被覆や積雪水量、雪質、積雪不純物、北方林の樹冠着雪量や昇華量など、衛星光学センサおよびマイクロ波センサに対応したアルゴリズムの開発改良のための地上校正検証の観測技術の開発改良が必要である。

(5) 陸域水文過程

陸域水文過程の解明には、降水・積雪観測に加えて、土壌水分や蒸発散量、流出量の詳細な現場観測が必要である。特に、今後の大きな変化が予想される季節進行に関して、雪解けの春季と積雪の秋季の観測が重要となる。蒸発散量の観測には水・熱フラックスのタワー観測に加えて、植生の観測を同時に行う必要がある。土壌水分は、凍土融解深や地温とも関連しており、それらの現場観測は簡単ではないが、多点観測などによる空間的な把握が求められる。これらの観測と合わせてドップラーレーダー観測が行えると、雲・降水システムを含むローカルな水循環の解明が期待できる。土壌水分量水循環トレーサーとして、水安定同位体のレーザー測定手法が開発利用されつつあるが、降水、降雪、土壌水、植物体内水、水蒸気などを一体として測定できる、野外サンプリングと分析手法の確立も必要である。

d. 陸域生態系・物質循環

陸域生態系は、炭素・窒素・水などの循環に強い影響を及ぼすため、今後モニタリングに力を入れる必要がある。大気の項に記載されているとおり、フラックスタワー観測を充実させ、長期間にわたって安定した観測を行えるような体制を整えることは重要であろう。また、人工衛星を利用したリモートセンシング観測の充実に加え、陸域生態系を精密に観測するための次世代センサ(ライダーや高精度ハイパースペクトルカメラ¹⁵⁷)を搭載した航空機による観測も望まれる。ライダー観測によって森林を構成する樹木の構造を把握できるようになるうえ、高精度ハイパースペクトルカメラで分光反射画像情報を分析することで、葉などの化学組成(葉緑素をはじめ、リグニンやセルロースなど)が分析可能となり、物質循環にとどまらず、種構成に踏み込んだ生物多様性の研究も可能になる。さらに、植生の変化とその季節性を観測するため、インターバルカメラを環北極域に多数設置しデータを蓄積するという大規模な機器網の整備も提案する。

また、広大かつ未踏の原野の広がる北極陸域における観測の効率を上げるため、以下の提案を行う。すでに海洋の観測のための導入例のあるホバークラフトを陸域の観測にも利用することで、雪のために海との境界が不明瞭な湖沼や湿地を経て内陸部へ広がるツンドラ域などでの観測に威力を発揮するはずである。水面と湿地の入り組んだこのような地域では、徒歩、車両、船舶いずれによるアクセスも困難なため、ホバークラフトを用いた観測をシベリア沿岸部などで構想すべきであろう。また、遠隔地に設置された観測機器から日本へのデータ転送機器の開発と導入が切に求められている。現在も衛星を用いたデータ転送は行われているが、フラックスタワー観測データや画像データといった大容量の転送は普及していない。今後、遠隔地から大容量データを転送するシステムと通信衛星のさらなる整備が進むことによって、莫大な労力と旅行費用を要するデータ回収が飛躍的に容易になるであろう。データ転送に用いられる通信衛星の整備は、動物の移動を追跡する動物生活史の研究や、陸域の研究のみならず大気・海洋などの観測の発展にも有効である。

e. 海洋

北極圏は、全球的な環境変動の影響が顕著に現れると同時に、北極圏の変動は、大気・海洋循環や雪氷圏の変化等を通して、逆に全球的な気候システムに大きな影響をもたらすと考えられている。全球的な気候システムを含む地球システムそのものを理解する上で、北極圏のシステムの解明は不可欠であり、その基礎となる現場での観測データは必須となる。中でも、北極圏は中央に広大な北極海を有する事から、海洋域での観測が要となり、海洋域での海底から大気にかけての鉛直的かつ面的に広範囲な観測や、長期的なモニタリング観測等の実施が必要である。また、北極海においても、中緯度や低緯度において観測船等により実施される観測と、少なくとも同等程度の時間・空間変動を把握できる調査等が期待される。特に、地球システムを理解する観点から、北極圏海洋域での通年観測による季節変化やより長期的な変動、大気—海氷—海洋モデルの精緻化等に必要なデータ取得が求められる。

しかし、北極海での観測は、海氷の存在により、未だ観測が立ち後れており、観測の空白域と言っても過言ではない。今後、北極海での観測を進展させるには、高い砕氷能力を有し、多岐にわたる観測が可能な砕氷観測船は必須であるが、それとともに観測機器自体も海氷域で観測可能な機器開発等が必要となる。以下では、今後の北極海での海洋観測に向け、海氷域において技術的な課題を有し、開発等が必要である観測機器等に関して記載する。

(1) 船上観測機器

ここでの船上観測機器は、船上に設置し航路上等で、大気や海洋観測を実施する機器である。ほとんどの観測機器は、海氷域でも船上での観測である事から、大きな障害がないと考えられる。しかし、音響を利用した観測機器は、船による音響ノイズは最小限に抑制する事は当然であるが、さらに海氷域での砕氷に伴う音響ノイズ対策を考慮する必要がある。このような音響を利用した観測には、低周波領域の地層探査装置やマルチナロービーム測深機や、高周波超音波領域のマルチ周波数音響プロファイラー等が挙げられる。周波数帯も広範囲であるが、砕氷に伴う音響ノイズの周波数特性の調査と、その対応を検討する必要がある。また、観測船

¹⁵⁷ 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。

の喫水が深ければ、ノイズ源から少しでも遠ざけられる事から、新たな観測船を建造する場合は、この点の検討も必要であると考えられる。

(2) 水中ロボット

ROV¹⁵⁸や AUV¹⁵⁹といった水中ロボットの活躍が、海氷下の探査では期待される。特に AUV は、外界の認識や行動決定を自ら行う無索の無人海中探査機であり、海氷下での鉛直方向や広域の調査に適した探査機である。一方、ROV は、有索で潜水機の運動を制御する無人潜水機であり、操作が船上から制御できる事から、詳細な海氷下や海底面の観察や、試料採取等を可能とする。さらに ROV は、海氷域における係留系等の海中敷設・回収や、AUV の非常時の回収等に利用可能であると考えられる。

水中ロボットの海氷域での運用にあたっては、船上での低温対策や音響ナビゲーションシステムを用いた潜航体の位置決め、特に AUV は確実に回収可能な運用形態等を検討する必要がある。北極海の平均深度は 1,330m であるが、その中央部には水深約 4,000m の深海平原が存在する事から、これらの水中ロボットの耐圧が 4,000m 以上であれば、ほとんどの海域が網羅可能となる。一方で、水中ロボットは、可能な限り小型で扱いやすいものが望まれる事から、耐圧、観測機器用のペイロードや投入するムーンプールの大きさ等のバランスを考慮して開発を行う必要もある。

(3) 係留系等の海中設置観測機器

海氷域定点での、超音波氷厚計 (IPS)、超音波ドップラー式多層流向流速計や水温塩分深度計等を用いた、海氷の動態、変動や、海水の物理・化学的な変動を連続観測可能な係留系観測も必須である。また、海底下構造や堆積物—海水間の物質循環プロセス等を推定するための海底地震計や海底圧力計、各種化学センサ等による、海底敷設型機器による観測も期待される。これらの機器やシステムも海氷下での観測に適した開発が必要であり、特に連続観測を可能にするには、ROV 等による機器の回収・設置を視野に入れるとともに、音響データ通信や、潮流発電や海中燃料電池等の適用も検討する必要がある。海中設置観測機器の電源問題は、極域特有の問題ではないが、回収・設置が難

しい海氷域でこそ解決していくべき問題であろう。その他、物理・生物・化学センサを搭載した、ある深度帯から海氷直下まで観測可能な、耐水型プロファイリングフロートの開発も望まれる。プロファイリングフロートの開発にあたっては、海氷域では GPS による位置決め・衛星を介したデータ送受信が困難なため、海氷下での音響ナビゲーションシステムやデータ伝送ネットワークの構築といった解決策を用意しておく必要がある。

(4) コアリング等

古環境・古気候研究のための堆積物採取に関しては、通常のピストンやグラビティコアラーに加えて、60m 以上の堆積物採取が可能なジャイアントコアラーや、海底鎮座型掘削装置の開発が期待される。特に、海底鎮座型掘削装置は、回転式の掘削装置であるので、堅い岩盤層等の掘削も可能となる。

(5) 海氷の観測機器

北極圏の気候システムを理解するにあたっては、大気や海洋に加えて海氷特性の観測も重要である。特に必要とされるのは、海氷の質量収支および形態のモニタリングと考えられる。

質量収支は、北極海海氷の激減が注目される今、現況を正しく把握する上で重要であり、北極海における熱力学的な生成・融解量と北極海から流出する氷量を見積もる必要がある。前者を正しく見積もるためには、現場気象観測と氷厚分布のデータが必要となる。このため、船舶搭載型の観測に加えて、できれば無人観測ブイが望ましい。従来、北極海では国際北極ブイ計画で氷上に設置された機器により気象観測等が実施されてきたが、氷量減少に伴い氷上設置ブイで北極海を広範囲に覆うことが難しくなっている。氷厚分布は航空機観測や衛星データからある程度推定することとし、気象観測は海洋上に設置可能な耐久性があつて強固なブイを製作することなどにより観測領域密度を保つ努力が必要であろう。一方、後者の見積もりには流出海域に当たる Fram 海峡に IPS などを設置して氷厚分布と漂流速度を定量的に見積もることが必要である。

海氷の形態については、北極海で季節海氷域の割合が増加している今、海氷の変形過程そのものが変化している可能性があり、数値海氷モデルで用いられてい

¹⁵⁸ ROV: Remotely Operated Vehicle

¹⁵⁹ AUV: Autonomous Underwater Vehicle

る物理過程を見直す必要がある。特に海氷表面の凹凸(リッジ)分布特性と融解期のメルトポンド分布特性が重要であり、航空機搭載型の2Dレーザースキャナーおよびビデオなどによる現場観測が期待される。

(6) その他(沿岸域での観測等)

観測船での観測以外では、沿岸域での観測装置の開発も必要である。沿岸域での係留観測では、冬季の海氷の発達によりシステムが引き摺られないような構造を検討する必要がある。また、紋別オホーツクタワーのような、冬季でも海氷下のサンプリングが可能な、より堅牢なプラットフォームの開発も重要である。さらに、海洋域での航空機を使用した電磁式の海氷厚測定や、地磁気・重力測定等も検討する必要がある。

f. 数値モデリング

急変する北極環境の総合的把握、全球気候における北極域の役割や日本に及ぼす影響の解明、さらに北極気候の将来予測のために、数値モデリングは欠かすことができない研究手段である。そのためには大規模計算資源や、モデルの入出力データおよび検証データを保管するための大容量ストレージが不可欠であり、さらにそれらを合わせ持つ基盤的組織体制の構築が必要である。

組織体制はプロジェクトによる時限付きのものではなく、長期的に維持されなければならない。現在 GRENE 北極気候変動分野において数値モデリング関連の研究が進行しているが、プロジェクト期間内にすべての目的が達成できるわけではなく、より精緻なモデルの開発やそれを用いた研究を継続して推進する必要がある。国際的には、季節～年々変動を対象とした北極域の予測可能性に関するプログラム(APPOSITE¹⁶⁰)が立ち上がっているが、日本では組織的な対応をしておらず、個人の努力に頼らざるを得ない状況である。また、北極域を対象とした領域気候モデリングに関しても、米国では Naval Postgraduate School などで開発が進められているものの、日本国内で具体的な動きはまだない。これらは基盤組織の欠如が大きな一因となっている。海外には大規模で継続性のあるモデリングセンター(NCAR、ECMWF、UKMO 等)やデータセンター(NSIDC 等)が研究基盤として存在する。同様のモデリ

ング研究基盤を日本も持たなければ、最先端研究において国際的に大きく立ち遅れる恐れがある。

計算資源については、国内の大学・研究機関にある大型計算機を公募プロジェクトや有償で利用する方法も考えられるが、他の利用者との競合になるので十分な資源を確保することは難しい。安定的な計算資源を保証するには、基盤となる組織独自の計算機の所有が望ましい。大型計算機やデータサーバシステムの管理・運用、大気・海洋・陸面・氷床など各プロセスのモデルを結合した大規模モデルの開発、モデルの高効率実行に向けた改良などには高度な専門知識が必要である。また、モデルの入力、検証データとなる観測・客観解析データの整備のような支援業務を行う人材も必要である。コーディングルール(プログラミングの方法)やデータ入出力フォーマットの統一化、解析手法およびソフトウェアの開発などを主導するようなコーディネーターも求められる。基盤となるべき組織には、高度な専門知識を持つ技術職だけでなく、研究職と技術職の中間的な立場を担う人材が長期的に雇用されることも重要である。

このようなモデリング基盤組織が率先して国際的な研究計画への参画を行い、数値モデルを用いた各種感度実験やアンサンブル実験の実行および管理を行う他、北極海氷況予測などの現業的遂行が望まれる。

¹⁶⁰ APPOSITE: Arctic Predictability and Prediction On Seasonal to Inter-annual Timescales

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