

先駆的なブレークスルー研究には、観測とモデリングの手法の革新的な展開がきっかけとなる。プロセス研究と相互啓発するモニタリング、システムモデリング、データ同化が重要である。現状のギャップを特定し、効率的

に研究を進めると共に、研究基盤の必要性につなげる。北極圏の複雑さとデータ取得の難しさによるハンディキャップを乗り越え、全球規模研究に貢献する。

## テーマ A: 持続するシームレスなモニタリング

### 要旨

北極環境研究に関わるモニタリングは、現場観測と人工衛星をはじめとするリモートセンシングを両輪として行われている。北極域の環境変化は地球規模での影響が大きく重要であるが、現場観測は北極圏の環境の厳しさゆえに、様々な分野で観測密度の小ささ、空白域の多さが指摘される。人工衛星によるモニタリングは、近年の進展により従来はわからなかった情報の取得が可能になってきたものの、現場観測が必要な項目も依然として多い。モニタリングで最も重要なことは、代表性のあるデータを継続して集めることである。そのためには国際的な協力体制を敷くことが肝要である。その中で日本も役割を果たし、さらに独自性を発揮していくことが求められる。

モニタリングの対象を、便宜的に海洋圏、雪氷圏、大気圏、陸域圏に分けると、日本がこれから長期的に取り組んでいくべき重点課題として、それぞれ以下のようなものが挙げられる。海洋圏では、衛星および自国砕氷

船を用いた通年の海氷変動、海洋生態系、物質循環のモニタリング。雪氷圏では、グリーンランド氷床、環北極圏の山岳氷河の質量収支とそれに関わる諸量、凍土の掘削孔管理と融解に伴うサーモカルストや海岸浸食。大気圏では、気候に関わる大気微量成分、雲・降水量の高精度な長期観測とそれによる時空間変動の把握。陸域圏では、植生変動、陸域生態系のモニタリングと熱・水・炭素フラックスを含む気象・水文観測を行う総合的な観測点(スーパーサイト)の整備と維持。これらの課題に関して、現場観測、リモートセンシングを両輪とするモニタリングが期待される。

ここでは、海洋圏、雪氷圏、大気圏、陸域圏に区分してモニタリング構想を述べる。

- Q1: 海洋圏モニタリング
- Q2: 雪氷圏モニタリング
- Q3: 大気圏モニタリング
- Q4: 陸域圏モニタリング

### まえがき

長期的な高精度の観測の継続、モニタリングが重要である。対象とする現象を具体的に定めず、モニタリングを行うのは研究の動機として説得力を欠くとの意見もあるが、短期的な観測では観測された現象、状況の普遍性がわからない場合も多い。10年、20年にわたって観測することによって、はじめてその現象、状況の位置づけが明確になってくる。よく知られる大気中二酸化炭素濃度の増加についても、1958年にキーリングがハワイで始めた精密な観測データが長期間蓄積されたことにより、科学的に議論できるようになった (Keeling et al., 1976)。近年の北極海氷の激減は、30年以上にわたって行ってきた衛星観測によって、定量的に明らかにされたものである。現象の変化の時間スケールが長い

ほど、モニタリングを続けるべき時間も長くなるのは必然である。北方針葉樹林帯や凍土の変動などは数10年以上の連続観測が必要になってくる。

北極域において長期にわたりモニタリングが必要な項目は、多岐にわたる。そこで、海洋圏、雪氷圏、大気圏、陸域圏に分け、各モニタリングについて、まず、国際的なネットワークの現状や問題点を述べる。続いて、今後必要なモニタリングについて、詳しく述べる。北極域、特に雪氷に関わるモニタリングについては、雪氷圏に関する統合地球観測戦略 (IGOS-P Cryosphere) によって、現状認識と提言が述べられている (Key et al., 2007)。これらもふまえ、ここでは日本が取り組むべきモニタリングに関わる研究構想を記す。

a. 衛星リモートセンシングによる海氷のモニタリング

人工衛星から観測される一番基本的な海氷の物理量は、氷量の水平分布(密接度)である。衛星による観測がはじまる以前は、現地での情報を収集して海氷分布が推定されてきたが、人工衛星による観測、特に 1970 年代から始まったマイクロ波放射計による観測は、全球の海氷域の連続的なモニタリングを可能にした。それにより、北極域における海氷面積の減少の様子などが明らかになった(Comiso and Nishio, 2008) (図 57)。マイクロ波放射計の現在の主力は日本の AMSR シリーズである。これは、それまでの主力だった SSM/I の約 2 倍の分解能を持つ世界最高性能のセンサであり、海氷モニタリングのために広く利用されている。

一方、現在もっとも必要とされているのは海氷の厚さのモニタリングである。厚さ変化を伴う海氷の変動過程は現在でもきちんと理解されておらず、気候モデルの中での海氷変動の表現も不十分なままである。海氷変動の基本的な量である海氷域の熱収支や海氷生成融解量の推定、海氷の力学的変形が海氷の厚さ変化におよぼす影響の把握のためには、海氷の厚さの空間分布と時間変化の観測が不可欠である。そのための空間解像度は、数十キロメートル以下であることが期待され、時間間隔は数日、可能であれば毎日の厚さ変化が把握できることが望ましい。現在、米国(NASA)や欧州(ESA)ではそれぞれレーザーとレーダーの高度計により、海氷の

表面の高さを計測し厚さを推定している。これらの観測が将来有用になると考えられるが、精度や頻度の点でまだ十分とは言えず、推定に必要な積雪深や積雪や海氷の密度など不確定な要素があるなど、今後の改良の余地が大きい。

この他にも、合成開口レーダーや高分解能の可視観測衛星など多くの地球観測衛星が現在も観測を行っている。これらの高解像度なデータは、マイクロ波放射計では捉えきれない氷盤の大きさ分布や細かいスケールでの海氷の力学的変形、さらにそれらが広域規模の海氷変動に及ぼす影響を知る上できわめて有用であり、今後さらに有用に活用してゆく必要がある。

マイクロ波放射計について今後もっとも必要なのは、観測を継続し、長期の安定したモニタリング体制を作ることである。観測の維持を最優先とした上で、高解像度化も期待される。観測解像度が 1 から 2km 程度になれば、沿岸の薄氷域(沿岸ポリニヤ)や氷縁の海氷分布の詳細なモニタリング、変化の激しい海氷表面状態(メルトポンドなど)の把握、数十キロメートルスケールの渦など海氷変動に関わる細かい現象を全天候で観測することが可能になり、データの有用性を大幅に高めることができる。海氷厚測定のための高度計については、現在は直下しか測定できない海氷表面高を軌道と直交する方向にも観測するなどして、観測頻度を大幅に増やすことが期待される。そして、気候変動への海氷の応答を把

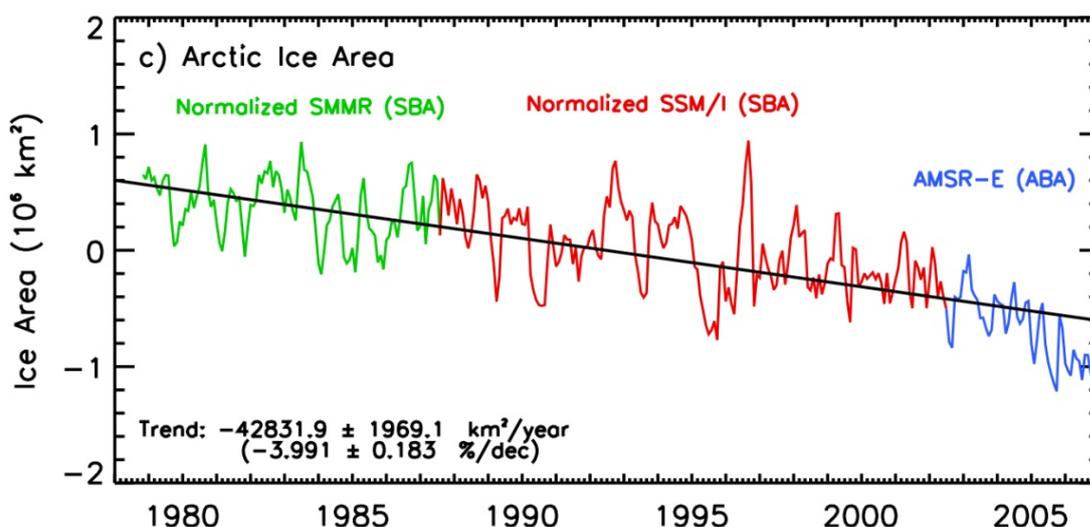


図 57 マイクロ波放射計によって観測された北半球の海氷域面積偏差の変化(Comiso and Nishio, 2008 より)

握するには、そのような観測を持続していくことが必要である。さらに、高解像度画像等の既存のデータを有効利用することは、新しい観測を行うのと同様に意味のあることである。運用機関やフォーマットの異なるそれらの衛星データを統合する機関を作りデータセットを管理・整備するとともに、衛星データを利用する研究者・技術者を増やすことで、衛星データを用いた北極域の研究が急速に進展すると考えられる。

## b. 海氷下の海洋のモニタリング

気候システムを理解する上で、大気－海洋間の熱収支を変化させる北極海の海氷変動メカニズムは、解決すべき喫緊の課題である。これまで海氷激減は、太平洋水による海洋温暖化が著しい太平洋側北極海のノースウインド海嶺付近で主に観測されてきた。しかし現在では、ノースウインド海嶺付近だけでなく、太平洋水が分布しない海域にまで季節海氷域化が進行している。季節海氷域化の進行は、海洋が大気と接する面積の増加とその期間の拡大を意味する。その結果、短波放射、大気擾乱が海洋表層の流れや鉛直混合に、そして海洋からの熱フラックスが大気場に変化をもたらす。したがって、現在から今後の大気－海氷－海洋間の熱収支は、海氷がまだ現在のように薄くなく、夏季の面積も小さくなかった 1990 年代後半とは大きく異なることが予想される。つまり、北極海の海氷変動と気候システムへの影響の将来予測を精度よく行うには、融解期だけではなく結氷期～冬季における大気境界層から海洋表層混合層の各物理素過程と、それらの海氷変動に対する寄与を定量的に明らかにすることが必須である。しかし、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にて行われてきたが、それぞれに観測時期、海域、人員、予算等の制約の中で実施してきたのが現状である。一方、海氷設置型漂流ブイによる観測が通年で展開されてきたが、分厚い海氷にのみ設置することや観測域が海氷移動に依存することから、データ頻度の空間分布に偏りがあり、一定期間で同一の海域を観測することができない。また、係留系観測では、多年氷を避けて観測をするように設計されるため、海面～深度 50m 程度までは測器を設置できず、流速以外は測定が困難である。

そこで、ここでは耐氷船や他国砕氷船で観測が困難な「結氷期～冬季の大気－海氷－海洋間の熱収支観

測」を自国砕氷船により実施することを提案する。具体的には、すでに季節海氷域化した太平洋側北極海のノースウインド海嶺～マカロフ海盆において、砕氷船による現場観測(氷上も含む)、有人観測ステーションの展開を行い、結氷期の大気－海氷－海洋間熱収支を広域で捉える。また、定点を海氷激減域に設定し、砕氷船越冬観測による大気－海氷－海洋の熱収支観測を実施する。これらにより、大気－海氷－海洋の熱収支過程における海氷運動、海洋潮汐(内部波)、大気擾乱による熱輸送およびそれらの結氷・融解過程への寄与を定量的に明らかにする。また、融解期には既存の耐氷船による広域観測、無人観測ステーション(係留系、漂流ブイ等)の展開を行い、開放水面における海洋表層の貯熱量、海洋混合層の時間変化、結氷前のプレコンデーションを明らかにする。このように砕氷船と耐氷船の時間差観測によって、通年の大気－海氷－海洋間の熱収支に関する素過程を明らかにする。

## c. 海洋生態系および物質循環のモニタリング

北極海における海洋生態系は、低温と海氷環境に適応した種により構成される独特の生態系である。1990 年代より観測されている夏季の海氷の激減と水温上昇は、北極海生態系と、それに深く関与する物質循環を大きく変化させる可能性が指摘されている。また、100 年スケールでの地球温暖化は海氷だけでなく、陸域の凍土や氷床の融解を引き起こすため、北極海への淡水流入を増加させ、それに伴って物質循環と沿岸生態系を大きく変化させるであろう。したがって、北極海を取り巻く生態系と物質循環を効率的にモニタリングし、その変化をいち早く明らかにすることは非常に重要な課題である。しかし、これまで北極海の生態系・物質循環研究で明らかになった事実の多くは、夏季の開放水面域における観測データに基づくものである。従って、冬季の生態系や物質循環に関してほとんど明らかにされておらず、海洋生態系・物質循環の変動・変化の過程を捉えられていないのが現状である。また、観測はアクセスが比較的容易な沿岸域を中心とした一部海域に偏っており、全域をカバーする研究はほとんどなされていない。

北極海生態系と物質循環の全体像を把握し、変化とそのプロセスを明らかにするには、地域的、季節的差異を考慮しなくてはならない。単一国のみで複数地域かつ異なる季節の観測を行うことは、物理的、経済的にほ

ば不可能である。日本はこれまでチャクチ海及びカナダ海盆域で、「みらい」や「おしよる丸」を用いて数多くの夏季観測を実施し、生態系から物質循環変化を明らかにしてきた。しかし、北極海の生態系及び物質循環像を把握するには、より広い地域での観測が必要であり、それには国際連携が必須である。現在、国際共同観測である DBO<sup>123</sup>の観測を日本も担当して成果を上げている(Grebmeier et al., 2010)。今後は、ロシア、カナダとも関係強化し、ポーフォート海、カナダ海盆、チャクチ海、東シベリア海観測を戦略的に行うことが重要である(図 58)。国際連携のもと、北極海においても、例えば、10 年に一度のスケールで行われる WOCE<sup>124</sup>のような高精度かつ多項目の海洋モニタリング観測を実施することも重要であろう。また、データの効率的運用のためには World Data System (WDS)などの国際データ機関とも連携し、積極的なメタデータの集約と公開を行うことが必要不可欠である。

また、これまで日本の北極海観測は夏季の開放水面域に限られてきた。これだけでは物質循環像と生態系変化の把握には不十分である。国際連携の一環において日本もしかるべき場所(例えば、観測の空白域であるカナダ海盆域やチャクチ海)において越冬観測が可能となるような研究砕氷船を将来的には整備し、季節変動を含めた物質循環及び生態系の観測を行うことが重要である。また、近年は係留系、音響機器や水中グライダーといった遠隔観測技術が急速に進歩しており、アクセスが容易でない北極海においてはこれらを最大限に活用すべきである。中でも係留系は、生物の通年観測には強力なツールであるため、国際連携のもと、適切な海域に複数の係留系を設置することが必要不可欠である。人工衛星データも生態系や物質変動を時空間的に把握するために、重要なツールである。可能な限り高分解能な海氷、雪氷、海色の長期モニタリングを行う。AMSR2 の後継機や、Sentinel-3A・PACE(両者ともに打ち上げ予定)は、生態系関連パラメータの時空間変動の把握にとって非常に重要な観測基盤となることから、多くの研究者が簡便に利用できる体制が構築されることを強く希望する。

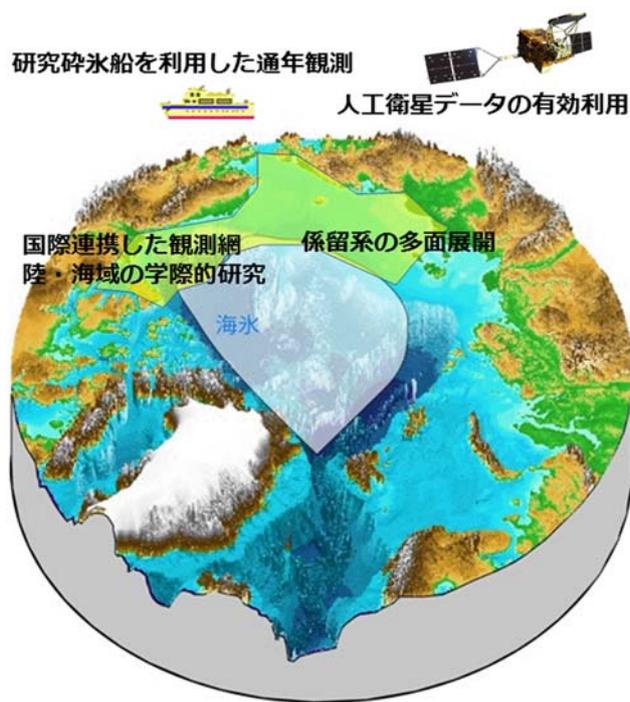


図 58 今後の海洋生態のモニタリングに必要な要素(概念図)

さらに、海洋生態系と物質循環の変化には陸上からの淡水及び物質供給が深く関与している。大型哺乳類から底生生物まで、多くの生物が棲息する沿岸域は北極海生態系のホットスポットと言える。沿岸域の環境変化を知るためには、学際的な連携を強化し、河川から海洋までシームレスなモニタリング観測を展開する体制を構築する必要がある。

#### d. 海氷域の放射フラックスのモニタリング

北極域の熱収支において、短波・長波放射フラックスは大変重要な役割を果たしている。北緯 70 度以北の北極域の大気全体の熱収支を、大気上端における正味短波・長波放射フラックス、中緯度からの極域へ輸送される熱フラックス、海氷の結氷などに伴う表面からの熱フラックスの流入の総和として見積もると、年間を通して絶対値として最も寄与するのは正味長波放射フラックスであり、特に、短波放射が消失する冬季においては正味長波放射フラックスが支配要因となる。夏季においては短波放射と長波放射は同程度の寄与があり、ともに北極域の熱収支を考える上で要と言える。

一方、海氷の成長、融解に直接関わる地球表面にお

<sup>123</sup> DBO: Distributed Biological Observatory

<sup>124</sup> WOCE: World Ocean Circulation Experiment

ける熱収支に着目すると、基本的には表面における正味放射フラックスで生じた過不足分を、乱流フラックス（顕熱フラックス+潜熱フラックス）と雪や海氷を通しての熱伝導フラックス、あるいは、表面の雪や海氷の融解潜熱とで補填するというバランスとなっており、海氷の成長・融解量を知る上で短波・長波放射フラックスを正しく見積もることの重要性が伺える（Serreze et al., 2007）。しかし、極域ゆえに長期的なモニタリング観測の困難さを伴い、データは非常に限られている。現在、WCRP<sup>125</sup>傘下のBSRN<sup>126</sup>の一環として北極域では1992年以来、比較的広域を覆うバロー（北緯71度）、ニーオルソン（同79度）、ティクシ（同72度）の3箇所放射フラ

ックスの観測が実施されているが、今後はこれを継続および補強する観測体制が強く期待される。

また、表面における正味長波放射フラックスは、年間を通してマイナス値（上向き、 $-20 \sim -40 \text{ W m}^{-2}$ ）を取るが、変動に寄与するのは下向き長波放射フラックス、特に雲の有無が $70 \text{ W m}^{-2}$ 以上もの差異を生み非常に重要な要因であることが北極海表面熱収支観測プロジェクト（SHEBA、脚注15参照）等の観測から指摘されている。このように雲（特に、下層に出現する層雲）は、北極域の熱収支に重要な役割を果たしているため、短波・長波放射フラックスと併せて北極域での今後の長期モニタリングが必要と考えられる。

## 雪氷圏モニタリング

### a. グリーンランド氷床上の気象・雪氷観測と雪氷中の光吸収性エアロゾル・雪氷微生物のモニタリング

グリーンランド氷床全体の質量収支は、涵養量、表面融解量、氷河からの流出量の結果として決まる。これに氷河の流動が加わった結果、氷床表面高度が決まる。氷床表面高度は近年、衛星からのレーザー高度計観測によって精度よく見積もられるようになってきた。また、氷床の質量変化も重力場を測定する衛星から見積もることができるようになり、近年における氷床質量減少の実体が明らかになってきた。しかし、氷河流動や氷の流出については衛星観測が可能なものの、氷河の内部構造については現地観測が必要であり、また、涵養量や表面融解量の変化は現地観測に頼らざるを得ない。このため、氷床上に設置された自動気象観測装置（例えば、Steffen and Box, 2001）による観測が非常に重要と言える。氷床全体の質量収支変動監視の精度を上げるためには、衛星観測の充実と現場観測、そして自動気象観測装置の地点数を増やし、空白域を埋める努力や長期の施設維持が必要である。

一方、表面融解に最も重要な要素の一つとして雪氷面のアルベドが挙げられる。氷床表面のアルベドは涵養域では、積雪粒径と雪に含まれる光吸収性エアロゾル（ブラックカーボンやダスト）に依存し、消耗域では雪氷微生物の濃度にも大きく依存している（Wientjes et al., 2007）。このため、涵養域における積雪中光吸収性不純物測定、積雪断面観測による積雪粒径測定、消耗

域における雪氷微生物サンプリングやクリオコナイト観測を、アルベド観測と同期して実施する必要がある。また、浅層コア掘削を様々な場所で行い、季節変化を含む高時間分解能で、過去における光吸収性不純物濃度及び雪氷微生物濃度変動を復元する必要がある。

### b. 環北極圏の山岳氷河における質量収支および気象の長期的観測

北極域の氷河の研究を進める上で、質量収支変動の把握は重要なテーマの一つである。北極域は、近年の温暖化傾向の影響が強く現れている地域であるにもかかわらず、世界の氷河と比較すると質量収支データのある氷河は少ない（Vaughan et al., 2013）。今後、衛星画像等によるデータ、現地観測による長期データの収集が必要であり、各国と協力して進めていく必要がある（テーマ4 および次節「グリーンランド氷床と周縁の氷河氷帽における質量収支の継続的観測」参照）。

今後、日本が実施する方法として以下が考えられる。  
①これまでに観測のない氷河で空白域を埋めるべく新たに観測を開始する、②わずかに過去のデータがある氷河のモニタリングを再開する、③他国が実施しているモニタリングに協力する。以下に、北極域で氷河が存在し、今後の観測が必要な主な国や地域（カナダ、アラスカ、ロシア）での現状と可能性について記述する。アラスカ、カナダは、海水準変動への影響が大きい上、特にブルックス山脈等アクセスの悪い氷河で観測が欠落し

<sup>125</sup> WCRP: World Climate Research Programme

<sup>126</sup> BSRN: Baseline Surface Radiation Network

ている。エルズミア島、バフィン島等のカナダ北極域の島では、観測開始年が早い、質量収支の長期データは不足している。ロシアは、過去に質量収支観測のあった氷河でも長期データが欠落しており、近年の観測が必要とされる。また、気象データも旧ソ連時代には充実していたが、近年は急激に少なくなった。

質量収支観測と同時に、質量収支を決定する気象要素の観測を行う必要がある。気象観測に関しては、NOAA などの整備されたデータベースが利用できる。再解析データは、北極域では観測値との差が大きいため今後のさらなる整備が重要となる。観測では低温な環境での測器の不具合が考えられるため、研究計画と同時に測器の開発や動作確認を行うことが重要である。観測効率を上げるには北極域での気象観測に関するワークショップで議論するなど、他国と協力して行うことが必要である。

### c. グリーンランド氷床と周縁の氷河氷帽における質量収支の継続的観測

氷河・氷床の質量変動において、表面質量収支は最も重要な観測項目のひとつである(テーマ 4 参照)。近年では、人工衛星での観測が進歩しているものの、降雪量や融解量を衛星データから測定することは難しい。衛星観測で得られる標高変化の検証やメカニズム解明のためにも、現地での質量収支測定が重要となる。質量収支をつかさどる降雪量と融解量は、年々の気象条件によって大きく変化する。したがって、短期間、または隔年での観測では意味を成さず、長期間にわたって連続的に測定を行うことが重要である。現在のところ、グリーンランドにおける質量収支の連続データは限られているが、組織だった取組として、デンマークが主導する PROMICE<sup>127</sup>による観測ネットワークが挙げられる。

今後、広大なグリーンランド氷床や、広い範囲に分布する山岳氷河、氷帽において質量収支データを増やすためには、世界各国の協力が必要である。日本が担当する地域を設定してデータを提供することで、世界の北極研究コミュニティに貢献することが重要である。具体的なモニタリング対象地としては、GRENE プロジェクトで観測を開始したグリーンランド北西部が挙げられる。沿岸のカービング氷河から氷床内陸まで、また、独立した氷帽を含めた多様なデータが集まりつつあり、今後の

継続と発展が期待できる。長期間にわたって質量収支を測定するには、遠隔地で毎年のフィールドワークが必要であり、人員と予算の継続的な確保が必要となる。長期的な観測実現のためには、現地の協力者の養成も検討すべきであろう。

### d. 人工衛星による氷河氷床変動の長期的な観測

近年の衛星観測技術の発展によって、末端位置や面積分布といった基本的な情報に加えて、様々な氷河変動観測が可能となっている。具体的には、①可視やマイクロ波画像による氷河末端位置と面積の測定、②可視画像の実体視や高度計データによる氷体積変化の測定(例えば、Bolch et al., 2013)、③画像相関法や干渉合成開口レーダー(InSAR)による流動速度の測定(例えば、Moon et al., 2012)、④重力測定による氷質量変化の測定、などが重要な観測として挙げられる。今後の北極域における氷河・氷床モニタリングでは、これらのデータと技術を活用し、発展させることが重要である。

①に関しては、より高い分解能の画像がより高い時間分解能で入手できるようになった。今後は、氷河周縁部の自動抽出などの技術を使って、より広い範囲で大量の画像を処理することが求められる。

②の手法は従来から存在する技術であるが、高分解能の画像が得られるようになって精度が上昇し、その重要性が増している。可視画像の実体視による手法では、コンピュータによるDEM自動生成アルゴリズムの改良でさらなる成果が期待できる。また、NASA のICESat に代表される高度計観測によって、広域で正確なモニタリングの継続が求められている。

③に関しては、流動が氷河変動に大きな役割を果たすグリーンランドのカービング氷河末端部で、これまでに大きな成果が挙げられている。今後は次世代の人工衛星や解析手法の進歩によって、より高い時間・空間分解能での測定が期待できる。

④は、GRACE 衛星による過去 10 年の観測で可能となった新しい技術であり、特に氷床質量変動に大きな力を発揮している。グリーンランド氷床のモニタリングはもとより、山岳氷河・氷帽スケールでの質量変化を広域で正確に監視するための解析技術開発が期待されている。以上どの観測においても、衛星搭載センサと解析

<sup>127</sup> PROMICE: Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet

手法の両面で著しい技術革新が進んでいる。新技術を利用するばかりでなく、将来の衛星観測と技術改良にアイデアを出して協力することで、北極圏の氷河・氷床研究に必要な衛星観測を発展させるよう努力すべきである。衛星観測の整備やセンサ開発に関しては、9章の記述も参照のこと。

#### e. 人工衛星による雪氷分布、雲分布、雪氷微生物分布など雪氷の量的変化と積雪粒径・アルベド等質的变化の監視

d.で述べた人工衛星を利用しての観測に加えて、グリーンランド氷床の消耗域では雪氷微生物で覆われた暗色域 (Wientjes et al., 2007) が近年拡大していることから、この監視が重要である。さらに、表面が雪で覆われていたとしても、その質的变化、すなわち、積雪粒径や光吸収性不純物濃度といったアルベドに関係する積雪物理量や温度、アルベドそのものの変化を衛星で監視することは、アルベド・フィードバックを解明し、モデル開発及び将来予測を行うという視点から重要である。このために可視・近赤外域のチャンネルを有する多波長イメージャー衛星からそれら積雪物理量を高精度で抽出する技術開発が重要である (Hori et al., 2007)。また、北極域における雲の存在は、放射収支にとって重要な要素であるため、衛星による雲分布、雲粒径、高度、厚さなどの情報を長期監視することが必要である。

#### f. 凍土の融解に伴うサーモカルストの分布の把握と長期モニタリング

永久凍土地帯においては、凍土の融解によって地表面が陥没してサーモカルスト地形が形成される (サーモカルストの進行に関してはテーマ 12 を参照)。このような凍土の融解は、気候変動と共に、局所的に発生する

林野火災による植生の消失などの地表面状態の擾乱によっても引き起こされ、急激な永久凍土の活動層厚の増加を招き (Viereck et al., 2008)、急激なサーモカルストの形成と発達を引き起こす。サーモカルストの形成は、周辺の水環境にも変化を生じる可能性があるため、その分布と変動を長期間にわたってモニタリングする必要がある。

このことから、アラスカ、シベリアを中心とした連続・不連続永久凍土地帯において、現地観測と衛星データを用いて、現在のサーモカルストの分布の把握を行う必要がある。サーモカルストは凍土の融解が (観察可能な) 現象として現れるものであり、このデータは将来的な変動の掌握のための基礎データとなる。地域ごとの凍土融解の原因を掌握し、局所的な周辺環境の変動を理解することにより、長期的な環境変動予測に資するものとなる。

#### g. 北極海の海岸浸食と地下水の変動に関するモニタリング

北極海沿岸の地表面近くには多量の地下水 (エドマ; テーマ 12 のボックス 8 参照) が存在する。海岸浸食によって表土が流出し、地下水が露出することによって融解が開始、進行するプロセスが現在も生じているが、気温上昇と海水準上昇はこのプロセスを加速すると予想される。このエドマ氷中にはメタンを多量に含むことが指摘されており (例えば、Fukuda, 1993)、また、融解は永久凍土中に固定されていた炭素の放出をもたらすため、温室効果気体の増加に寄与する可能性がある。一方、地下水の融解は地表面の陥没を引き起こし、建築物の崩落、海岸線の後退など人間生活に直接の影響を与えている。地域によっては、コミュニティの全体移動を招いている例 (アラスカ州シシュマレフ) もある。しか

### ボックス 9

#### 氷河質量収支の観測

氷河の質量収支の観測手法には、現地観測 (質量収支、末端など)、衛星画像解析 (質量変化、面積変化) 等がある。正確に把握するには、現地観測により直接測定する方法が望ましいが、広域な氷河や遠隔地では、衛星画像等を用いた複合的な方法が有効である。なかでも GRACE 衛星の活用が期待されているが、小さな氷河や誤差が大きいと判断される場所では面積変化や標高変化から質量変化を抽出する ICESat や ASTER などが活用できる。現地観測についても、直接観測に加えて末端位置の変化なども活用されることが期待される。末端位置の観測は世界の約 500 の氷河で行われている (Vaughan et al., 2013)。

し、エドマそのものの温度測定をした例はない。

このような背景から、海岸浸食の進行と海岸線の変動、地下水変動のモニタリングの重要性は高い。そこで、これまでほとんど実施されていないエドマの温度測定をはじめとする現地調査と合わせて、航空機による空中写真と人工衛星を用いて海岸線の変動を定期的にモニタリングする必要がある。特に、地下水の多く分布する地域において、その進行速度を評価する必要がある。なお、エドマ氷は古環境復元に利用できる可能性がある(テーマ 6 を参照)。

#### h. 掘削孔観測による凍土温度状態のモニタリング

地温は、永久凍土環境の最も基本的な情報である。掘削孔による深部までの地温観測は、北極域の各国において様々な目的で様々な深度に対して行われてきているが、その維持環境は現在も利用可能なものから、放棄され場所すら不明となったものまで様々である。長期にわたる温度測定が可能な掘削孔を設置して維持することは、北極域における凍土の温度状態の長期モニタリングを可能とし、気候変動に対する凍土の応答を考察する上で重要となる。また、地温変動は、測定深度が深

いほど時間スケールの長い変動が(時間差を伴って)現れるため、気候変動における人為影響を評価する上でも深い掘削孔観測を維持することが重要となる。このような背景から、アラスカ、カナダ、シベリアを中心とした北極域で長期間維持可能な掘削孔を設置することが必要である。近年では観測ネットワークとして、国際永久凍土協会が主導する GTN-P<sup>128</sup>が挙げられる(このネットワークと測定値の変動に関してはテーマ 12 の Q3 の記述も参照のこと)。本プロジェクトにおいては、現存のネットワークの空白地域を優先的に選択し、観測地点とする。目標とする追加観測点は 100 点とする。

このような地域での掘削孔の設置・維持をするには、現地研究機関との協力関係は不可欠であり、既存の協力関係の維持発展、新たな協力関係の構築が必須である。一例として、アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター(IARC)では、長期にわたり日本との協力関係を築いている。また、IARC には日本人研究者はもちろん、カナダ、ロシアの研究者も多く、両国との共同研究を行う上でも重要な位置を占めている。この IARC を拠点として掘削孔観測を準備、設置、維持することは、長期地温観測を可能とするうえで有効であろう。

## 大気圏モニタリング

### a. 重要性和現状

温室効果気体、エアロゾルについて、北極域で広域代表性のある長期連続モニタリングを実施しているのは、アラスカ・バロー、カナダ・アラート、それにスバルバル・ニーオルスンであり、グローバルな観測網の一端として輸送機構や発生源、吸収源の推定に貢献している。しかし、北極海に面して広大なシベリア沿岸にはその観測点はなく、偏った配置になっている。さらに、観測のほとんどが地上基地で行われている。航空機などの飛行体を用いた観測は、アラスカやスバルバル周辺で実施されたことはあるものの、依然として対流圏中上部の観測データは非常に限られている。温室効果気体モニタリングは、特に高精度の観測を長期間継続することが求められ、国際的な協力で支えていく必要がある。

気象現象や大気微量成分(温室効果気体、短寿命気体、エアロゾル)の変化は、とりまく環境の変化に応答するだけでなく、放射過程を介して、気候に影響を及

ぼす(短寿命気体については、脚注 54 参照)。北極域は、北極海のほとんどを占める海氷域、莫大な生物生産量を有する海洋域、広大な永久凍土帯や森林帯が分布する陸域に区分され、北極圏内にも工業地域が分布し、大気微量成分のソース、シンク両方のプロセスが存在する。20 世紀初頭から気温の経年変化は観測されているものの、その変動要因については、海氷分布やアイスコアデータなどと比較し、検討されている(例えば、Yamanouchi, 2011)。

降水量の経年変化は地域により傾向が異なり、単純な増加、減少ではない。現在の北極域に関する降水量データは、まばらな雨量計データに基づくものである。近年、北極海にそそぐ大河川の水量は増加傾向にあるといわれ、流量の変化は降水量変化による可能性が高い。しかし、降水量のデータは観測点密度の低さと降雪の雨量計捕捉率の問題により、流量増加を定量的に説明できない状況にある。面的な降水量を知る上では人工衛星の活用が最も期待される。これまで、低緯度に関

<sup>128</sup> GTN-P: Global Terrestrial Network for Permafrost

しては TRMM により貴重なデータが取得されてきた。一方、中高緯度については、これまで継続的な降水量観測はなく、2014 年に全球降水観測計画(GPM)主衛星が打ち上げられ、大いに期待されている。しかし、降雪に関しては高精度の観測は難しいとされている。

温室効果気体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O など)については、年々の増加傾向、増加率の経年変化が確認されており、地球規模の人間活動の影響に加え、湿地地帯からの CH<sub>4</sub> 放出の影響も示唆されている(例えば、Morimoto et al., 2006)。エアロゾル中の nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、ブラックカーボン(BC)については、80 年代以降の排出量の削減により、年々の減少傾向が観測されているが、一部のエアロゾル成分(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)や散乱係数などについては、減少傾向は観測されない、あるいは近年増加傾向が観測されていることから(Quinn et al., 2007)、低中緯度域からの長距離輸送の可能性も指摘されている(BC については、脚注 53 参照)。放射収支に大きく影響を与え得る雲の分布とその経年変化については、衛星データなどから増加傾向が指摘されているが、未だ不確実性大きい(例えば、Wang and Key, 2005)(エアロゾルと雲の関係については、脚注 57 参照)。これらの経年変化は、北半球～全球規模の諸過程、北極圏内の人間活動や陸域、海洋の環境変化などの複雑

な要素が相互に関係している。長期にわたる北極域の環境変化を検出するには、気象、大気微量成分の主要要素の長期観測と観測体制維持が必須となる。しかし、現状では、観測の制約、困難さゆえに、観測データの空白時期、空白地域が依然として多く存在している。これまでに得られている科学的な知見だけでは、北極域の環境変化の理解には遠く及んでいない。

## b. 今後の研究

これまでの長期的な観測や研究の多くは、観測拠点での地上近傍の観測や気象定常観測に基づいている。北極域の環境の長期変動を検出し、その過程を検証するには、各基本パラメータの長期観測に加え、その時空間変動とその実態を把握することが重要となる。基本パラメータとしては、気温、水蒸気量、降水量、温室効果気体、短寿命気体、雲、エアロゾルなどが挙げられる。これらの大気中での寿命は、秒～年のスケールで大きく幅があるため、注目する現象、過程に応じて観測頻度や計測分解能を変える必要がある。北極圏の環境変化、気候変動と大気中の物質動態の変化と関係を検討するには、数年～数十年スケールの変動を捉える必要がある、また、環境変化に伴う大気中の各成分のソース、シンクなどの短い時間スケールの素過程とその長期

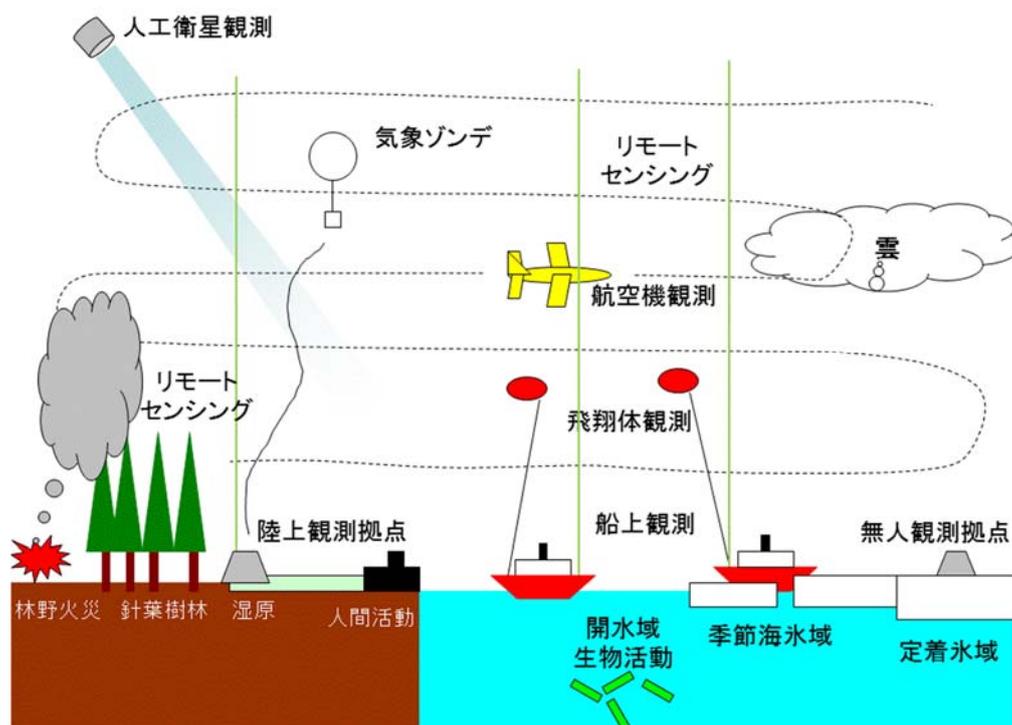


図 59 大気微量成分のモニタリングの概略

的な変化を捉えるためには、長期的な変動だけではなく、分～日～季節スケールの変化を議論していくことも重要である。

観測拠点が非常に限られている地域(北極海上やシベリア地域など)に、気象観測拠点を設置し、観測網として長期的な運用を目指す。特に、上空における基本的な気象要素(気温、水蒸気量など)の長期的な変動を把握するための高層気象観測網の整備と維持が望まれる。降水量は水収支の基本となる量であり、長期の時空間変動実態を把握する必要がある。地上観測だけではなく、全球衛星降水レーダーデータの取得、活用と、データ同化技術を駆使し、降水量データの高度化を行う。これにはリモートセンシング、レーダー、データ同化などの専門家との協力関係を構築する必要がある。地上観測に関しては、冬季の降雪観測技術の向上を図るとともに、観測地点数の維持、増加を目指す。

温室効果気体については、現在のモニタリング観測体制を維持し、新しい観測点を加えつつ、長期的な濃度変化を捉える。また、温室効果気体の放出源・吸収

消滅源に関する情報を持つ同位体比の高精度観測も、引き続き維持・発展させる必要がある。急激な北極圏内での人間活動の拡大による放出量増加に加え、北極環境変化に伴うフラックスの変化も予想されることから、陸域・海洋域での温室効果気体のフラックスを把握することは重要である。また、地上近傍のデータに加え、航空機観測や衛星観測データを活用し、温室効果気体の三次元的時空間変動を把握する。

短寿命気体、雲、エアロゾルの観測は、長期的な観測が行われている拠点に加え、長期的な観測データが得られていない地域(北極海上、シベリア域)にも観測拠点を設け、継続的な観測を維持することが望まれる。短寿命気体、雲やエアロゾルは時空間変動が激しいため、船舶、航空機や飛行体を使用した観測を定期的に展開し、各領域での雲、エアロゾルの物理的・化学的特性(光学特性、数濃度、粒径分布、組成など)、短寿命気体の時空間変動とそのトレンドを検証することも重要である。さらに衛星データも使用し、雲、エアロゾルの分布の空間変動を追跡する。

## 陸域圏モニタリング

### a. 同一の衛星による数10年以上の地表面の連続観測

現在、広域の地表面観測の衛星としては、NOAA 衛星の AVHRR センサに代表される過去 30 年以上のデータの蓄積があり、これらを用いた気候変動に伴う植生成長期間の伸長や植生量の変動に関する解析が進んでいる(鈴木、2013)。これらの衛星に関しては、センサの交替、軌道ドリフトの問題や、大気補正の問題などもあり、多くの不確実性があるとされている(鈴木、2013)。一方で、1998 年より観測が続けられている SPOT/VEGETATION データや、2000 年以降観測が続けられている Terra/MODIS データに代表される近年の中空間分解能衛星においては、大気補正の高精度化や観測波長帯の改良などによって、NOAA AVHRR に比較して精度の高い観測、アルベドの推定などが可能になっている。これらの観測データは約 10 年～15 年程度の蓄積があり、今後の観測が継続されることにより、植生量や植生活性度などの変動・トレンド検出が可能となる。

以上のような衛星搭載光学センサによる観測のほか、最近では ALOS PALSAR といった衛星搭載 L バ

ンドマイクロ波合成開口レーダー(SAR)による植生観測も盛んになってきた。亜寒帯林は熱帯林と比べれば地上部の材積量(バイオマス)が格段に小さく、SAR からの後方散乱強度が飽和しないため、そのバイオマスの推定に威力を発揮し、森林地上部バイオマスの推定研究に応用されてきた。今後も L バンドマイクロ波 SAR による長期にわたる観測が期待される。

衛星観測においては、陸域モニタリングの観点、長期変動抽出の重要性の観点から、最低でも 10 年以上の長期観測を目指した衛星観測網の構築が重要である。例えば、我が国で計画されている観測衛星についても、後継機の計画を含めた長期観測の視点が重要である。

近年においては、衛星プロジェクトとしての地表面物理量プロダクトの構築に留まらず、各研究グループレベルにおいても様々な物理量プロダクトを提供することが可能になってきている。さらに、複数の衛星観測データを組み合わせることによる物理量プロダクトについても個々の衛星の利点、欠点を補完しながら、より高精度のプロダクトを構築できる可能性がある。衛星観測に加えて、これらの物理量プロダクトを構築するための基盤作

り、衛星開発プロジェクトに入らずともデータが構築、提供できる環境作りも重要である。

#### b. 気象、フラックス、植生フェノロジーの長期連続観測

これまでも様々な気象観測点が展開されており、それらを利用した広域のグリッドデータの整備もいくつかの研究機関で進められている(例: CRU データや APHRODITE 降水量データセット)。ただし、気象データなどが多く利用できる地域は限られており、例えば、シベリアにおいては、観測網が他の地域に比較して疎となっている。これらの地域における気象観測網や観測データの整備は重要である。

熱・水・炭素フラックスの地上タワーによる観測は、熱・水・炭素収支の時空間変動の最も直接的なモニタリング項目である。全球の水・熱・炭素フラックスを測定する目的で、1990年代から FLUXNET と呼ばれる地上観測ネットワークが展開されている。現在、世界で 500 地点以上が FLUXNET に登録されているが、北極域ではアラスカと北欧にそれぞれ 10 地点弱、広大な面積を占めるシベリアには 5 地点ほどしか存在しない。北極域は地球の炭素循環、熱収支にとって重要な地域であるにもかかわらず、自然条件の厳しさ、人口密度の低さなどから観測点がまばらなのが現状である。東シベリアのヤクーツク近郊にある観測サイトは、1997 年に GAME 計画の一環として開始され、日本、ロシア、オランダの共同で維持されている数少ないサイトである。フラックスデータは、陸面過程モデルの検証に必要不可欠で、その観点では気象、雪氷、水文、植生、土壌の観測が同一地点で行われるいわゆるスーパーサイトの地上観測が重要である。また、水収支の重要な検証項目として、観測点を含む流域の流量観測も欠くことはできない。陸面・植生環境の長期的な変動には地温・土壌水分が強く影響していると考えられ、これらの継続的な観測も重要である。スーパーサイトとなりうる観測点は北極域ではヤクーツク、フェアバンクスなど数えるほどしかないのが現状であり、長期にわたる総合的な観測地点の整備・維持が課題である(テーマ 4 も参照)。

フラックスの観測については、これまでの研究では、季節変動から経年変動などの比較的短期の変動を検出することに比重がおかれていたが、近年においては 10 年以上の観測期間を持つサイトが増えてきたことによ

り、10 年程度もしくはそれ以上の期間におけるトレンドの検出が試みられるようになってきた。これらの長期観測によって、気候変動に伴う炭素収支などの変動が検出されるようになってきた(Ueyama et al., 2014)。今後は、現在の観測を継続することにより長期観測が可能となる観測サイトの数も増えることが予想され、トレンド検出の信頼性を向上させる必要がある。さらには、変動の傾向が加速されるなど、将来の気候変動によって、大きな炭素収支の変動が予想される地域において、これらの変動を早期に検出するための観測網の整備が必要となる。

植生フェノロジーについては、魚眼レンズ付きカメラによる森林景観の定点写真撮影を行う PEN<sup>129</sup>に代表されるような観測網が展開されつつあるが、現状では観測サイトの数が非常に少ないことにより、より広範囲におけるサイトの展開が必要である。また、展葉などの時期の変動に関するトレンド解析を実施することにより、より多くのサイトで変動のシグナルを検出することが重要である。また、衛星観測データと融合することによって、広域のフェノロジー情報へとスケールアップされることが強く期待される。

#### c. 生態系・毎木調査森林プロットの増加と 100 年間を目指した長期維持

気候の変化に伴い、植生の変化の兆候が報告されている。アラスカのノーススロープでは、1950 年頃の写真を最近の写真と比べることで、ツンドラに低木が増加していることが指摘されている(Tape et al., 2006)。また、全球植生動態モデルでは、現在東シベリアに存在する落葉樹林が 2300 年には消失し、その代わりに常緑樹林の分布域が北上してくることが予測されている(Kawamiya et al., 2012)。このような、10 年スケール、さらには 100 年スケールの植生の変化を捉えるには、各地の植生調査プロットで、例えば、樹種構成、立木の数、その胸高直径と樹高などが数年間隔で 100 年以上測定され続けることが期待される。それには、植生調査プロットが 100 年スケールで維持される人的な確固たる仕組みを作ることが必須となる。さらに、そういったプロットが国内の JaLTER や国際的な iLTER といった長期生態系研究のネットワークに参加し、調査データが世界の資産として活かされることが望まれる。衛星観

<sup>129</sup> PEN: Phenological Eyes Network

測に対する地上検証サイトとしての役割も大きいだろう。

#### **d. 植生遷移帯を中心とする植生状況の長期モニタリング**

タイガとツンドラは植生状態の大きな違いにより、地表面のアルベド、粗度、土壌状態、積雪・着雪の状態が対照的であるほか、主役となる温室効果気体がタイガでは二酸化炭素、ツンドラではメタンという違いを見せる。このため、熱・水・炭素収支が異なり、タイガとツンドラの分布は気候に大きく影響を与える。植生の状態、水循環の解明などにとって、水、炭素、窒素などの安定同位体比の情報が大変有効である。タイガ・ツンドラ遷移帯の移行は重要であるにもかかわらず、情報が極めて不足している状態である。遷移帯の移行について、同位体を含めた現地観測および衛星観測によつて的確に監視していく必要がある。

#### **e. 蓄積炭素量(バイオマス、土壌有機物)**

フラックスの計測と同時に炭素蓄積量のモニタリングも重要である。特に、土壌中に含まれる炭素量は、将来の気候変動とともに放出が進む可能性が高く、これが潜在的にどの程度の大きさの炭素放出となり得るかを推定するためにも、現存量のより信頼性の高い見積もりが必要である。「雪氷圏モニタリング」で指摘したように、凍土の融解はメタンの放出などに強く関与している。凍土の変化は地域によって大きく異なるため、きめの細かい監視が求められる。また、メタンの放出は微地形による土壌水分の違いの影響も受ける。狭い地域内での空間的な相違も継続的に見ていく必要があり、自動観測のみならず、現場に入つての長期的な観測も重要である。

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