

要旨

北極域における氷床・氷河の変動は、地域の気候変動や水循環に影響を与え、海水準上昇やアルベド変化など全球規模の環境変化をもたらす。その変動メカニズムを解明し、将来変動の予測精度を向上するには、現場観測・衛星観測とモデリングの強い連携が重要である。また、これまで十分に考慮されていなかった海洋との相互作用や、雪氷生物のアルベド影響、氷河地震などの理解を進めていくことが必要である。

永久凍土表層(活動層)の変化は、温暖化に加え、積雪深や土壌の湿潤度とも強く関係している。活動層が凍土氷(地中の氷塊)の層まで達すると、氷の融解に伴う地形沈降(サーモカルスト)が不可逆的に進行し、生態・水文過程の変化を介して気候システムにもフィードバックする要因となる。これらの変化過程の解明には、既存の凍土観測網と地表面環境変動の観測を統合し、衛星や陸面モデルの援用も合わせた研究体制の構築が必要である。

北半球大陸上の積雪は、積雪期間が減少傾向にあり、特に春季の積雪面積減少が顕著である。しかし、その量的、質的变化の情報は現在も十分ではない。高精

度な冬季降水量、雪質や不純物・微生物効果などの観測精度を高めるため、現場観測と衛星データ観測を組み合わせ、積雪モデルの改良と合わせた統合的な研究体制の構築が望まれる。

陸域(河川)、大気、海洋に対する北極域の水(淡水)循環研究は、各分野での理解は進みつつあるが、相互関係の理解はまだ十分ではない。凍土や積雪、植生、河川水、気象の変化が環北極陸域の水文過程や北極海の海水生成、物質循環へ及ぼす影響を解明するには、現地と衛星の観測を継続し、陸面-気候-水文-海洋モデルが連携した包括的な研究推進が必要である。

ここでは、次の 4 つの鍵となる科学 Questions を取り上げる。

- Q1: 氷床・氷河の変化は加速するか?
- Q2: 永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するか?
- Q3: 北極域の降積雪はどう変化しているか?
- Q4: 環北極陸域の水文過程はどう変化するか?

Q1: 氷床・氷河の変化は加速するか?

a. 研究の背景

(1) グリーンランド氷床の質量変化とそのメカニズム

グリーンランド氷床の氷の量は、地球に存在する氷の約 10%(海水準の 6~7 m)に相当する。1990 年代は横ばいにあった氷床体積が、2000 年以降に明瞭な減少傾向を示し、その後 2010 年まで質量損失が加速している。2000 年から 2011 年にかけての質量変化は 200 Gt a⁻¹の減少であり、年間約 6 mm の海水準上昇に相当する(Shepherd et al., 2012)。氷床質量の変化は、主に、①降雪による涵養量、②融解量、③カービング氷河末端での氷損失量(氷山流出と海洋による融解)の総和によって与えられる。近年の観測から、気温上昇による②の増加が顕著であり、氷河の流動加速によって③が増加していることも明らかである。その一方で、①は増加傾向にあると考えられているが、②と③の増加を補うには十分でない。

(2) 氷河・氷帽の質量変化とそのメカニズム

北極域の氷河・氷帽(放射状に流動する氷体)は、北極圏カナダ、グリーンランド沿岸部、アラスカ、北極海のロシア領群島、スバルバルに広く分布し、その氷全量は、海水準に換算して 200~300 mm 程度と見積もられ、グリーンランド氷床と比べれば小さいが、その変動の速さから北極域の環境変化では重要である。特に、北極圏カナダ、グリーンランド、アラスカ 3 地域における 2003~2009 年の質量損失は著しく、同時期に全世界の氷河・氷帽で失われた氷の半分以上に相当する(Gardner et al., 2013)。氷河・氷帽の質量変化は主に降雪と融解のバランスで決まるが、カービング氷河では氷河末端での氷損失が消耗量に加わる。北極域には海洋へ流入するカービング氷河が数多く存在するが、これらは末端が陸地にある通常の氷河よりも急激な変動を示

し、近年の氷損失に大きな役割を果たしている。

(3) 数値モデルによる氷床・氷河の現在状態、変化過程の再現の試み

氷床・氷河変動を再現する数値モデルは、通常さまざまな過程のサブモデルの組み合わせであり、目的や対象、支配的な過程に応じて要素を単純化することが多い。近年は国内研究者らの取組で Full Stokes の高解像度氷床流動モデルが実用的になってきたが、氷期-間氷期サイクルなど長い時間スケールの計算を行うのは困難であり、現状では力学的な近似を仮定した比較的軽いモデルで長期計算を行っている。氷床・氷河の流動計算において、不確実性が大きな過程は、底面滑りや末端でのカービングなどである。いずれの過程も観測が困難であり、経験的なパラメタリゼーションを用いているのが現状である。

(4) 雪氷微生物の繁殖が氷床・氷河に与える影響

氷床・氷河の融解量に影響する表面アルベドは、雪水中の微生物の繁殖が原因で大きく低下することが明らかになってきた。氷河表面には、低温環境で繁殖可能なシアノバクテリアや緑藻等の光合成微生物が生息している。これらの微生物によって生産された有機物は、分解をうけて暗色の腐植物質に変化し、鉱物粒子や微生物とともに氷河上でクリオコナイトと呼ばれる黒い物質を形成する。氷河消耗域の裸氷表面では、このクリオコナイトの堆積量が大きくアルベドに影響する (Takeuchi et al., 2001)。微生物によるアルベド低下は、日本の研究者を中心にアジア山岳域で研究が進め



写真1 グリーンランド氷床から海へ流出するカービング氷河 (撮影:杉山慎)

られてきたが、近年グリーンランド裸氷域でも顕著な変化が観測されて注目を集めている (Yallop et al., 2012 など)。

(5) 氷河地震活動の増加

氷河地震 (Glacial Earthquake) は、グリーンランド氷床、特にその縁辺部での氷の流動・崩壊、流出に伴う振動現象である (Ekström et al., 2006)。21 世紀に入りその発生頻度が増加し、また、季節変動が見られることから、氷河底面に流入する融解水量の変化、氷河流動やカービングの活発化を反映した現象と考えられる。その頻度は 2005 年に最大となった後 2005 年以降減少したが、その後は再度増加している。日本の研究者も参画する観測ネットワークの結果によると、特に最近グリーンランド北西部での増加が顕著である。

b. 鍵となる科学 Question: 氷床・氷河の変化は加速するか?

(1) 将来の氷床・氷河・氷帽の質量変動の不確実性

グリーンランド氷床の将来変動は、降雪量、融解量、およびカービング氷河からの氷流出量の変化で決まる。今後も北極域の気温上昇や氷床表面のアルベド低下が予想され、融解が進行する可能性が高い。一方で、降雪量とカービング氷河からの氷流出が今後の氷床変動に与える影響は不明瞭である。温暖化する気候下で降雪が増加して、融解量増加の一部を補う可能性がある。また、現在進行しているカービング氷河の流動の加速と後退は、いずれ収束に向かうとの見方も示されている。さらに、海洋の水温や循環がカービング氷河末端部に与える影響も、将来変動を考える上での不確定要素である。

氷河・氷帽においては、北極域の気温上昇のもとで、氷の減少傾向が続くと予想される。氷河・氷帽は氷床よりも気候への反応速度が速く、近年の温暖化傾向をより直接的に反映すると考えられており、今後の変動速度の見積もりが重要課題である。近年の変動がより激しいカービング氷河においては、氷床同様に海洋との相互作用を含めた不確定要素が大きく、現在の急激な縮小傾向が今後継続するかどうかは明確ではない。

(2) 海水準変動への影響の不確実性と予測の試み

山岳氷河が、氷体体積の大きい氷床と比較して、海水準上昇により大きな影響を与えていることが早くから

指摘されてきた。その正確な見積りは難しい課題であったが、GRACE 衛星による重力測定、氷・雲・標高観測衛星 IceSat による標高測定に基づいて、より信頼性の高い数字が報告されている(Gardner et al., 2013)。その結果は、北極域の氷河・氷帽が海水準に与える影響が非常に大きいことを示しており、特に北極圏カナダ、アラスカ、グリーンランド沿岸の氷帽は、世界で最も氷質量減少の激しい地域となっている。今後は山岳氷河の海水準変動への寄与を精度良く監視し、将来変動を予測することが課題である。近年では質量収支の地域性、氷河面積と体積との関係などをパラメータ化し、予測される気候変動下での氷河質量変化を全球で計算する試みがなされている。

グリーンランド氷床の海水準上昇への寄与も、近年増加傾向にあることが衛星観測等から示されている。モデルの将来予測は、気候モデルでの表面質量収支計算に基づくもの(通常氷床分布を固定)や、氷床流動モデルを用いたものがある。例えば、Yoshimori and Abe-Ouchi (2012)では 1980 年から 2099 年までのグリーンランド氷床融解が、海水準に換算して 2~13cm と見積られている。また、氷床モデルの比較プロジェクト SeaRISE では、RCP8.5 相当の温暖化シナリオ下で、2100 年までに 16cm の海水準上昇に寄与すると見積られている。

(3) 氷床-海洋・固体地球の相互作用と氷床流動変動への影響

グリーンランドのカービング氷河が、急激に加速、後退したことを受けて、氷床と海洋との相互作用の理解が求められている。これまでに、海水温度の上昇がカービング氷河の変動を駆動した可能性が指摘され、氷床周辺で新しいデータが得られつつある。また、グリーンランドからの融解水流入による海洋循環の変化は、古くからその重要性が認識されており、氷河末端から流出される土砂や化学成分が、海洋生態系に与える影響も大きい。今後の氷床変動を左右する鍵のひとつは、棚氷底面の融解過程や潮汐といった海洋から氷床への作用であり、氷床質量の減少が続けば、氷床から海洋への作用も顕在化するであろう。

グリーンランド氷河地震は、21 世紀になり確認され、未説明の点が多い現象である。この発生メカニズムの解明は、氷河地震活動の時間的推移と氷河末端部のダイナミクスに新たな指標を与えることが期待される。現在

進行中の気候変動と氷河地震頻度の時間的推移とを関連づけたり、他の雪氷学・気象学・地球物理学的なデータとの比較により、新たな知見が得られる可能性がある。気候モデリングや氷床古環境研究との対比・連携により、気候変動がグリーンランド氷河変動に及ぼす影響評価の精度向上が期待される。

(4) 氷床・氷河の生態系変動と気候変化因子(アルベド)・流動変化への影響

氷床・氷河の消耗域のみならず、涵養域や季節積雪の表面でも緑藻類の繁殖による赤雪現象がアルベド低下を引き起こし、積雪の融解を加速する可能性がある。このような雪氷微生物由来のアルベド低下は、黒色炭素や鉱物粒子に比べて定量的な理解が不足しているが、北極圏の氷床・氷河の変化を加速させる可能性がある。温暖化のような環境変動が、氷床・氷河上の生態系とくに生物地球化学過程に与える影響、およびその結果としてのアルベド変化について定量的解明が必要である。

c. 今後の氷床・氷河変動研究

(1) 現地データと衛星データによる氷床・氷河変動の定量化とメカニズム解明

グリーンランド氷床、氷河・氷帽ともに、人工衛星データによる変動測定が有力な手段となっている。従来からの氷河末端位置や面積変化の画像判読に加えて、可視画像や合成開口レーダー(SAR)データから作成した数値標高モデル(DEM)や、人工衛星に搭載された高度計のデータを使って、氷表面高度の経年変化を精密に測定可能となった。また、画像相関法や InSAR による流動速度の測定、重力衛星による氷質量変化の測定などが、近年の研究において強力な武器となっている。日本による衛星観測がこれらの技術発展に貢献しており、今後も解析手法の高度化、衛星搭載センサの開発など、次世代の衛星観測手法へと展開することが重要である。

人工衛星データの重要性が高まっているとはいえ、野外観測データは引き続き非常に重要である。特に、氷床・氷河変動のメカニズムを理解するために、現地でのみ測定できる高い時間・空間分解能、高い精度を持ったデータが必要となるからである。また、氷河内部や底面での測定やサンプリングなど、野外観測でしか得られないデータも数多い。さらに、人工衛星データの校正

や、数値モデルの入力データを得るためにも、野外観測データの重要性は高い。既に国内の研究者による研究実績のあるグリーンランド北西部、ロシア、アラスカなどを中心として、より効率的で質の高い観測の実施が求められる。

(2) 氷床・氷河それぞれの数値モデリングの改良

氷河の数値モデリングは、その目的によって適切なモデルの開発と改良が重要である。北極全域の氷河が海水準に与える影響を見積もるためには、数多くの氷河変動を取り扱うための簡略化やパラメータ手法の開発が求められる。その一方で、正確な氷河変動予測やカービング氷河の急激な変動メカニズムを解明するには、プロセスモデルの精緻化やモデルの高次元化が必要になる。数値モデルの評価と改良のためには様々なデータが必要となるため、衛星解析や野外観測との連携も不可欠で、特に、氷河の基盤地形、表面質量収支、流動速度などの測定データを整備することが重要である。

氷床モデリングでは、着目する時空間スケールなど目的に応じて適切なモデル開発と改良が求められる。統一的なモデルによる過去・現在の氷床分布の再現と観測事実との比較による検証、表面質量収支過程の高度化、底面水文過程と氷流動との相互作用の高度化、海洋や固体地球も含めた地球システムのモデリングとの有機的な結合など、モデルを改良すべき点は多い。モデルの検証のために観測から得られる情報を最大限利用することが望まれる。また、全球規模の気候と氷床の変動を再現するには、気候が氷床に与える影響だけでなく、両者の相互作用を適切に表現することが重要である(Abe-Ouchi et al., 2013 など)。表面質量収支、氷河末端と海洋間の相互作用(棚氷下の底面融解)や固体地球との相互作用(氷床荷重変化に応答した地殻変形)を再現することが重要である。たとえば、観測データを活かして、グリーンランド用領域気象モデルの開発による表面質量収支過程の研究を進めることが不可欠である。(氷床・氷河モデルについてはテーマ B でも記述あり)

(3) 氷河上の生態系変動と気候変化因子への影響

雪氷微生物による氷河・積雪の融解加速過程について、微生物の繁殖およびそのアルベド低下効果についての定量化が必要である。微生物繁殖過程については、雪氷面の物理、化学条件との関係を明らかにした上でモデル化をおこない、さらに微生物生産物の光学特性を明らかにした上で、黒色炭素やダストと共に不純物として雪氷アルベド物理モデルに組み込み、氷河の熱収支や質量収支の計算につなげていく。実際の現象の把握のために、衛星による長期的なスペクトル反射率の観測、現地調査による微生物群集のモニタリングが必要である。

(4) 海洋と氷床の相互作用の実態と将来変化予測

グリーンランド氷床と海洋との相互作用についてその重要性が認知されつつある。しかし、氷床周縁部の海域で実施された観測は限られており、人工衛星と野外観測を組み合わせた観測体制の充実が求められる。特に、カービング氷河が流入するフィヨルド内の海水特性、海洋循環、海氷状態などが重要で、氷河の変動や融解水の流出との関係解明が急務となっている。極域での観測に実績を持つ国内の海洋研究者と協力して、係留系や観測船を使った観測やサンプリングを実施する他、人工衛星データによる観測を進め、精度よく数値モデルへの導入をする必要がある。

ポスト国際極年(IPY)における、グリーンランド氷床変動の長期監視に向けて、国際的な研究グループによるグリーンランド氷床の地震モニタリング観測計画⁷⁸が進行中である。我が国は平成23年度より米国地震観測網IRISとの共同で、氷床上に地震観測点(ICE-S)を設置している(Toyokuni et al., 2014)。この氷床上観測点で得られる地震データをGLISN計画観測網のデータと統合し、氷河地震活動を解析する。具体的には、正確な震源と震源メカニズムの決定により、氷床中の発生位置とその原因となる断層パラメータの決定を試みる。氷河地震活動と発生過程から、地球温暖化の影響を評価する研究計画は独創的であり、グリーンランド氷床の気候変動に対する応答メカニズムの解明と将来予測について、新しいデータセットと学際的視点をもたらすことが期待される。

⁷⁸ グリーンランド氷床地震モニタリング観測計画: The Greenland Ice Sheet monitoring Network (GLISN)

Q2: 永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？

a. 研究の背景

(1) 地球温暖化に伴う永久凍土変化

永久凍土は、少なくとも 2 年以上 0°C 以下を保つ土壌、または地盤とされ、全陸地の約 20% に存在するといわれている。また、季節凍土は冬季に凍結し夏季に融解する土壌であり、その分布域は全陸地の 60% にも及ぶ。最近の数十年の観測から、永久凍土は温暖化の影響を受ける傾向にある。高緯度に連続的に分布する寒冷な永久凍土ほど温度上昇量が大きく、ロシアや極北カナダでは 10 年で 1°C を超える上昇率を示す地点もある。南限の不連続と点在永久凍土帯では、顕著に地温上昇・凍土融解が生じており、その結果、連続と不連続永久凍土帯の境界が北進している傾向が示されている (Romanovsky et al., 2010)。

(2) 活動層の深化

永久凍土帯で、冬に凍結し夏に融解する地表付近の層を活動層という。活動層の厚さは、アラスカの連続・不連続永久凍土帯では各 0.5m、1.5~3m 程度、東シベリアの連続永久凍土帯のツンドラ域、北方林域で各 0.4m、~3m 程度になる。活動層深さは夏の気温(積算暖度)と冬の積雪深に大きく依存する。その長期的傾向は地域的に異なり、北米では気温上昇とは逆に活動層は浅くなっている。これは冬の積雪深減少が凍結を強め、夏の土壌水分の乾燥が融解を抑えるためと考えられている (Park et al., 2013)。一方、シベリアでは温暖化に加えて積雪深の増加によって活動層が深くなっている (Park et al., 2013)。このように、活動層の変動は積雪深や土壌水分などの地表面の水文状態にも大きく依存し、気温上昇とは異なる変動形態を示す。

(3) 活動層変動と水文・植生変化

活動層変動は様々な生態・水文過程の変貌の誘因となる。氷に富む永久凍土が融解し流出すると、サーモカルストと呼ばれる地形沈降が生じ、低平地が拡大して融解湖が形成される。連続的永久凍土帯では、融解層の深化による新たな融解湖の形成が、不連続永久凍土帯では永久凍土の消失による地下水位の低下や乾燥化が進行していると考えられている。北米の連続永久凍土

帯では、河川や海岸沿いの崩壊地形が近年急激に増えてきたことが報告され、この要因として凍土氷の融解と消失が指摘されている (Jorgenson et al., 2006)。

東シベリアでは、2000 年代に活動層が深くなった (Iijima et al., 2010)。これは冬の雪と夏の雨が共に過剰に増加した年が複数年続き、地表付近の凍土融解が進み、活動層内に過剰な水分が継続した特長的な現象である。その影響により、活動層が深く、過剰に湿潤状態となった森林では、根の生育環境が悪化しカラマツの枯死が進行した (Ohta et al., 2014)。

また、双子衛星間の距離変化を計測して重力分布を調べる GRACE 衛星の重力変化データから、2000 年代の東シベリアの陸水貯留量は、年間約 11mm の割合で増加したことが示されている (小川ほか 2010)。この経年変化は、サーモカルストで形成される北方林に点在する湖沼(アラス)の貯留水量と活動層内の土壌水分量の増加によると考えられている。

(4) 活動層の観測体制

活動層厚の変化は、環北極で測定されており、国際永久凍土学会の観測ネットワーク GTN-P⁷⁹や CALM⁸⁰としてまとめられている。その一方、活動層と地表面の気象・土壌水分・植生状態などを統合して観測する地点は非常に少なく、相互作用研究が可能なプラットフォームやそのネットワーク化は進んでいない。



写真 2 東シベリア・ヤクーツク近郊のアラス周囲の永久凍土融解斜面 (撮影: 飯島慈裕)

⁷⁹ GTN-P: Global Terrestrial Network for Permafrost

⁸⁰ CALM: Circumpolar Active Layer Monitoring Network

b. 鍵となる科学 Question: 永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？

(1) 活動層の変化(深化)の状況とその要因

気温上昇による活動層変化として、春に融解が進行し始める時期が早まることと、秋に再び凍結期へ移行する時期が遅くなるのが重要である。活動層の深さは、春の消雪時期や、夏の降水に伴う土壌水分変化も大きく影響する。また、活動層と永久凍土層との間では、析出した氷晶が成長しやすい物理環境にあるため、厚さ数十cmから1m程度の高含氷率の層が形成されていることが多い。この層は遷移層と呼ばれ、数年から数百年の周期で融解・凍結を繰り返すと考えられている(Shur et al., 2005)。

氷楔などの大型な凍土氷を含む永久凍土(エドマ)層と活動層の間には、この遷移層が存在する。氷楔が融解し地盤が沈下するには、高含氷率の遷移層が融解する必要があるため、サーモカルストは急激には起こりにくい。ただし、気候・環境変化で地表面からの熱伝導が増え、一旦活動層が遷移層を越えて深くなるとサーモカルストが進み、不可逆的な永久凍土融解に繋がると考えられる。しかし、これらの融解過程の観測は極めて少ない。

(2) 永久凍土表層の融解(活動層の深化)による影響

永久凍土が変動する時間規模を過去1、2世紀および今後数十年程度と考えるならば、“永久凍土の温暖化”や“活動層の深化”が、気候・環境変化に本質的な影響を与える現象と考えられる。環北極陸域における多くの環境変化(河川流量の増加、北方林の衰退、メタンの放出、サーモカルストの進行など)は、いずれも“活動層の深化”によって起こりうる現象であり、“活動層の深化”や“永久凍土の温暖化”を実証する観測的知見も数多く存在する。活動層の深化が進み、かつての永久凍土層上部がタリク(通年で未凍結な地層)化した事例はシベリア各地で報告されている(Hiyama et al., 2013)。また、近年の東シベリアのように、活動層が降水量増加で深くなり、気候偏差の極端な継続による北方林の衰退や、水域や湿原の分布域の変化に繋がる凍土—生態系—水文の連鎖過程の理解が、凍土変動が気候に与える影響として今後さらに重要になる。

(3) 活動層変化と広域的な水循環との関係

活動層の深さは土壌水分の鉛直分布を変え、ひいて

は陸面の水文特性も大きく異なるものになる。例えば、活動層の深化は地表付近の乾燥化を引き起こし、不連続永久凍土帯や凍土分布の境界で湖沼の面積や数が大幅に減少し、地域的な水循環や陸域生態系に大きな影響を及ぼすことが予想される。また、近年の気候変動は降水や蒸発散の変調をもたらし、活動層の熱的動態を変化させて陸域水収支にも影響を及ぼす。活動層を含む凍土表層は土壌水や地下水のバッファとなるため、大気と陸域との水収支の変動には位相と振幅が特徴的に連動、遅れがあるものと考えられる。例えば、上述のGRACE衛星の重力変化データでは、時間的に一ヶ月程度、空間的に数百km程度の分解能で、地表面、活動層での陸水貯留量変動が示されている。しかし、流域ごとの凍土分布の不均質性を理解できる現地観測がないことなどから、それらを検証する凍土—水文過程の理解は進んでいない。

c. 今後の永久凍土表層変動研究

(1) 活動層の進化とサーモカルスト進行過程の理解

活動層の変化や永久凍土の融解に対する安定性を議論するには、活動層の土壌水分動態と永久凍土層の含氷率の空間的分布の把握が不可欠である。基本となる活動層の地温変化の観測は、活動層厚、遷移層と長期的永久凍土層上部を含む深度まで高密度に行い、活動層厚の変化に留まらず、その融解期の季節的な広がり捉える観測を増やすことが重要である。地温観測の展開・維持はもちろんであるが、さらには活動層の水分状態や凍土中の氷の測定も同時に展開する必要がある。永久凍土上層部でコア採取し、雪氷学的な分析と地下水の安定同位体比や年代情報の解析を様々な永久凍土地域に対して行い、過去の活動層厚の変動範囲と頻度を推定することが重要である。加えて、サーモカルストによる地盤沈下・地形変化の現地測量観測の展開はほとんどなく、早急な実施検討が望まれる。

(2) 活動層深化の地表面環境と水循環・気候変化への影響の理解

永久凍土表層(活動層)の変化が地表面環境、さらには熱・水・炭素収支の変化を介して気候にどのようにフィードバックするのかを理解するには、統合的な観測サイト(スーパーサイト)における継続的観測と、それに基づく陸面過程モデルの精緻化を連動して実施する必要がある。森林火災、気候変化(乾湿偏差)など、広域

に生じる活動層深化に繋がる現象の理解とその気候相互作用の評価のためには、衛星リモートセンシングと、領域的な陸面モデル適用が有効である。衛星データの利用に関しては、マイクロ波・光学センサを駆使して活動層深化に起因する植生荒廃域や、湖沼の面積や数の変動と分布を定量化することで、間接的な凍土融解の時空間的変動と気候との関連について追求することが有効であろう。しかし、活動層厚を直接的に観測可能な衛星センサは存在しない。今後、地表下の温度プロファイルを推定可能な新たな衛星センサ・アルゴリズムの開発が必要であるとともに、数値モデル、現場観測、衛星観測を融合させた活動層厚の統合的解析法の開発とそれによる水文気候学的研究も有効であろう。

(3) 活動層変動の統合的観測体制の構築

永久凍土温度の観測は、全球凍土モニタリングネットワーク(GTN-P)の方針に合わせて推進すると良いが、寒冷・遠隔環境の耐性と精度を備えた測定機器の開発を進め、大規模なサーモカルストが予測される永久凍土地域をカバーするように観測網を展開するとともに、観測様式の国際的な標準化も早急に進める必要がある。また、永久凍土表層の変化を決定する地表面の気象・生態・水文要素も併せて測定する観測デザインを確立する。そこでは、日本の研究者が主導している東ユーラシアや、連携実績のあるアラスカ、極北カナダなどが集中観測地域として担当すべき領域といえる。その際、アクセスとインフラ設備の制限に影響を受けないよう、二国間(または国際的な)科学協定に基づく観測サポートの体制強化が求められる。

Q3: 北極域の降積雪はどう変化しているか？

a. 研究の背景

(1) 環北極域の積雪

20世紀半ば以降、特に1980年ころから、北半球の春季の積雪面積には顕著な減少傾向が見られる。積雪面積は月毎の経年変化が異なり、特に春と夏の減少傾向が顕著であるほか、地域によって経年変化も異なる(Brown and Mote, 2009)。一方南半球では、過去40年以上にわたり、おおむね減少しているか変化がない。積雪の減少には、気温の上昇が降雪の減少と積雪期間を短縮させる支配的な要因となる一方で、積雪の増加には、ほぼ降水量の増加が要因となる(Lemke et al., 2007)。

(2) 高緯度降水量の観測精度

北極域では降水量の観測地点が少なく、また、観測精度が低いことから、気候データの信頼性は低く、改善が望まれている(Goodison et al., 1998)。2014年2月に全球降水観測(GPM)計画の主衛星が打ち上がり、北緯65度までの降水量推定の精度向上が期待される。特に、シベリア南部、アラスカ南部などの情報が得られるため、これらの地域で精度向上が期待される。また、降雪量と積雪深の観測精度の現状把握と改善を目指して、WMOが主導する固体降水比較観測⁸¹(Nitu,



写真3 シベリア北方林内のしもざらめ層が発達した積雪(撮影:飯島慈裕)

2013; Rasmussen et al., 2012)が2013~2015年を中心に実施されており、日本からも気象庁、防災科学技術研究所、国立極地研究所が、新潟県上越市及び北海道陸別町を観測サイトとして参加している。

グリーンランド氷床上では、衛星から表面高度や氷床質量の測定はある程度可能であるが、降雪量を測定する手段としては限られた自動気象観測装置によって積雪深の変化として見積もられている。また、降雪量の時空間変動はモデルに頼っているのが現状である。

⁸¹ 固体降水比較観: Solid Precipitation InterComparison Experiment (SPICE)

b. 鍵となる科学 Question: 北極域の降積雪はどう変化しているか？

(1) 積雪期間・積雪深・水量の時空間変動

積雪に関して、北半球全体で見れば積雪期間の短縮傾向は明らかである。しかし、地域毎には積雪深・積雪水量の年々変動は異なるため、より多くの地域を代表する観測網の構築が望まれている。地上観測点の配置、衛星観測による広域把握、それらとモデル予測降水量の同化が求められている。衛星観測では、積雪分布と融雪域の観測は信頼性が高いと考えられるが、積雪水量は長年のマイクロ波観測手法の開発にもかかわらず、時期・地域を問わず信頼できるものに至っていない。また、森林域での積雪量の把握は課題である。

(2) 積雪不純物・雪質・微生物効果の定量的評価

積雪不純物・雪質・微生物効果の定量的評価は幾つかの地点のケーススタディとして理解されており、北極域スケールでの現象を捉える観測に基づいた理解が望まれている。これを受けて、衛星データから、積雪不純物や粒径といった積雪物理量を抽出する研究が進められており、より多くの地上検証データの必要性が高まっている。

(3) 積雪と土壌・生態系・大気(アルベド変化)との相互作用

春に積雪の減少が記録される一方で、冬季の降水量は減っていない。これは春の融雪期の短期間に集中して融解が起きることを意味している。また、冬季の降水の増加のため、冬から春の融雪水量の増加は、河川流量の増加に影響していると考えられている。さらに、積雪域からの昇華蒸発による大気水蒸気量の増加が極域沿岸分が多いことが指摘されている(Sugiura and Ohata, 2008)。積雪と土壌・生態系・大気(アルベド変化)との相互作用に関しては、現地での降水・積雪・陸面過程の統合的観測とモデル研究の連携による研究の進展が今後期待される。

c. 今後の降積雪変動研究

(1) 降積雪観測とモデル化

北極海上、ツンドラ、北方林、氷河、氷床、氷帽上で、精度の高い降水(特に降雪)量観測、積雪物理量観測を展開し、衛星データと組み合わせて北極域における長期データアーカイブを開始する。また、過去のデ

ータの補正方法を確立し、同データアーカイブに含める。これにより、降水量、積雪量の気候変化を評価し、気候モデルの境界条件作成及び検証、衛星データの解析アルゴリズム開発及び降雪・積雪観測用の衛星センサの開発に貢献する。全球降水観測計画 GPM での二周波降水レーダー DPR 等の新規降水衛星データや、大気データ同化手法の高度化等を組み合わせて、全球北緯 90 度から南緯 90 度までの衛星による降水量の推定に取り組む。

観測測器に関する技術開発の進展を背景に、強風域や森林域での水循環の各構成要素を高精度で観測して、雪氷圏の冬季水循環像を提示する。降雪に関しては、これまでより時間間隔の短い降雪量(時間、分を単位とする“降雪強度”)及び降雪粒子に関する自動観測の展開が開始される。積雪深の観測においても、レーザーを利用した自動観測点を増やす。また、近年普及し始めたインターバル撮影カメラの利用により植生の周りをはじめとした分布の不均一性などの地上観測から、生態系との相互作用の研究を進展させる。そのために、画像データを定量化する方法の構築が必要となる。

こうした高精度、多項目の観測データ及びそれらによって検証された数値モデルに基づいて、植生、土壌、積雪、降雪、大気の相互作用を解明する。数値モデルにおいては、特に積雪モデルの高度化を行い、気象、海洋、土壌モデルとの結合を進める。この際、雪質変化に関わる要因を明らかにし、積雪モデルに反映させる。衛星利用も積極的に進める必要があり、積雪パラメータ(水等量、樹冠着雪量、雪質、汚れなど)の標準プロダクト化を目指す。その地上検証として、積雪水量の推定精度向上、森林域での観測実施が望まれる。

(2) 海氷上の積雪

海氷上の積雪は、急変が報告されている海氷の成長、融解に関わる重要な要素であるが、積雪の役割、積雪・海氷の変質過程の理解とともに、広域積雪の観測手法の開発が望まれる。海氷上の積雪は見かけ上の厚さ、アルベド、熱伝導の点から重要な観測要素である。NASA による海氷上積雪の衛星観測手法は、開発が滞っており、新たな手法による進展が望ましい。海氷上の積雪は見かけ上の海氷の厚さの観測精度にも影響するため、現場・衛星両方での正確な観測法の確立が望まれる。

Q4: 環北極陸域の水文過程はどう変化するか？

a. 研究の背景

北極域陸域における水循環は、凍土と積雪、北方林が重要な役割を果たす。この地域の河川は、北極海への淡水と栄養塩、有機物の供給源である。河川流量の急激な増加は、春のアイスジャム洪水や夏洪水として住民に被害を与える一方で、栄養分を運ぶことで牧畜等の生業にとっては恵みとなる。また、河川氷や凍土の状態の変化は交通や住環境に影響を及ぼす。このように北極域の河川は地域住民の生活に大きく関わる。

河川流量変化は、淡水や陸源物質供給の変化をもたらす。北極海の海水形成や海洋循環、物質循環へ影響を与えることが懸念される。河川流量の変化には、大気循環変動に伴う降水量変化とともに、流域における様々な陸域水文過程が関わっている。気候システムにおいては、北極と中緯度の間に位置する陸域は中高緯度相互作用として無視できない。陸域水文過程の変化に伴う水・熱フラックスやアルベドの変化は大気下層の気温を変え、北極海とそれを囲む陸域との気温コントラストを変えることで、大気循環や気象への影響を及ぼすことが懸念される。

b. 鍵となる科学 Question: 環北極陸域の水文過程はどう変化するか？

(1) 北極海へ流入する河川流量の変化とその要因

北極海へ流入する河川流量は、近年増加傾向にある。これはシベリアの河川流量が2000年代後半に数年連続して多かったことに起因する。一方、北米の河川流量の変化は顕著ではない。流量の長期変化の要因として、ダムや凍土融解、森林火災の影響がこれまで検討されてきたが、現状の変化量に対する影響はいずれも小さい。河川流量は、主に正味降水量(降水量と蒸発散量の差)の影響を受けており(Zhang et al., 2013)、総観規模の大気循環や低気圧活動に伴う水蒸気輸送が変動要因となる。加えて、植生からの蒸散や凍土融解による土壌水分の変化などの陸域水文過程も、また、河川流量の変動要因となると考えられる。最近、東シベリアでは夏の基底流量の増加と活動層深化の関係が指摘されており(Brutsaert and Hiyama, 2012)、今後ますます陸域水文過程の調査が重要になるであろう。

気候モデルでは温暖化に伴って高緯度の降水量が増加すると予測されており、環北極域の河川流量も長

期的には増加すると予測される。よって北極海への淡水供給は増し、同時に熱や栄養塩、有機物の供給も増すと予想される。陸域水文過程の変化は、河川から流出する陸源物質のソース自体にも変化をもたらす可能性が考え得る(テーマ3)。しかし、気候モデルによる降水量増加の大きさやその地域分布は予測の不確実性が高く、また、陸域過程に関しては特に広域の調査がまだ不十分である。現状でのこれらの陸域過程の相互関係を解明しつつ、将来変化を検討する必要がある。

(2) 環北極陸域の水文過程の変化

21世紀に入り、環北極の広い地域で積雪深の減少(東シベリアのみ増加)が見られ、土壌水分量、河川流出量への影響が予想される。一方で同期間に北米とシベリアの土壌水分は、増加傾向にあることがGRACE衛星で検知された(Landerer et al., 2010)。積雪変動には、量の変化に加えて、積雪期間の変化も重要である。近年の気温上昇に伴い、秋の積雪の遅れと春の融雪の早まりから、積雪期間が短縮する傾向にある。積雪には、大気と土壌の間の断熱効果があるため、地温と土壌凍結(凍土)に影響を与え、さらに土壌水分や植生のフェノロジー(植物季節)、放射・地表面熱フラックスの変化を引き起こす。消雪の影響には地域性があり、西シベリアではアルベドの差異が初夏の放射収支に影響する一方で、東シベリアでは融雪水が夏の顕熱と潜熱の割合に影響を及ぼす(Matsumura et al., 2010)。



写真4 東シベリアのレナ川。広大な流域面積から集められた淡水が北極海に注がれる。(撮影:飯島慈裕)

温暖化に伴う環北極陸域の大きな昇温と降水量増加は、積雪期間の短縮や活動層深化、そして土壌水分、蒸発散量、植生活動などの水文過程の変化を引き起こすと予想される。昇温は積雪期間を短縮させ、昇温に伴う大気中水蒸気量の増加は東シベリアの乾いた大陸内陸での蒸発量と蒸散、昇華を変化させる可能性がある。実際、長期的な蒸発散量の増加が観測とモデル研究から示されている(Zhang et al., 2009)。また、東シベリアの消雪では融雪とともに昇華蒸発の重要性も指摘されている(Suzuki et al., 2006)。降水量の増加は、活動層深化と土壌水分の増加を進行させる可能性がある。これらの陸域過程は、雪氷が鍵であり、種々の水文過程に加え、陸域の熱収支に関わる諸過程の解明も重要であることを示している。

(3) 北極海の淡水収支と北極域の水循環

陸起源の淡水供給の増加は海洋表層の成層を強化し、また、塩分を低下させて海氷生成を促進する働きがある。北極海へ流入した淡水はやがて北大西洋に流出するため、淡水供給の増加は長期的に北大西洋での深層水形成を弱める働きをする。その解明には、北極海の海氷生成と海洋循環の変化を併せて理解することが重要である。

温暖化の進行によって海氷上の積雪量は増加すると予想され、これは海氷の生成・融解を大きく左右する可能性がある。また、気温上昇や季節海氷域の拡大によって海水へ直接流入する降水量が増加し、海洋表層の淡水化をもたらす可能性もある。しかし、海氷上の積雪に関する研究はほとんどなく、今後、海洋上や氷上での雲・降水・積雪過程の観測が必要である(テーマ 2)。これらを踏まえ、北極海とそれに接する陸域や太平洋、大西洋、上空の大気を含めた北極域全体で、水循環の理解と淡水収支の定量的な評価が望まれる。

c. 今後の水循環変動研究

(1) 水文過程を理解するための陸域観測サイトの充実

観測結果の統合的な利用には、モデルとの緊密な連携が推進されるべきである。そのためには、観測地点で長期運用管理した入力データセット(気象要素)、パラメータデータ(植生情報、土壌情報)、検証データ(地温、土壌水分、光合成量など)を作成する必要がある。これまで日本とロシアの研究者が中心となって東シベリア域

の現地観測が行われ、多くの陸域水文過程に関する成果が得られた。しかし、冬の間はデータの空白期間であった。通年観測を視野に入れて、基盤となる気象要素と熱・水・炭素フラックス、凍土・土壌水分変動を一体として測定できるスーパーサイトを整備し、長期的に維持できるように、二国間、多国間の協力体制と日本側の責任研究機関の設定が必要である。東シベリアを考えるならば、ヤクーツク近傍のスパスカヤパッド(Spasskaya Pad)、ウスチ・マヤ(Ust-Maya)近傍の Elgeei、そして Voluyi 川の Ol'okminsk 当たりが候補である。これらの観測データは、客観解析データや領域モデルによるダウンスケール、衛星観測データを組み合わせて、長期データセットとして構成し、水循環の極端現象などを検証できるようにするために、国内の共同研究体制が望まれる。

(2) 河川由来の淡水および有機物、熱輸送の観測と海洋モデル開発

河川を介した陸域水文過程と海洋過程との関係を解明するには、水文学的に異なる流域に観測点を設置し、河川流出の量やタイミング、水温、陸源物質などの測定が求められる(テーマ A)。降水量、蒸発散量、土壌水分に対する観測とモデルの研究を組み合わせることで、陸域から北極海への淡水と物質の流出量、流出場所、タイミングおよび質を決める要因を明らかにし、予測に繋げる。水の安定同位体比は様々なスケールや場所での水文過程の理解に適した指標であり、過去を復元する調査には有効な観測手法となる。北極域の流量観測は期間も場所も限られるが、今後も観測を継続し、水収支解析やモデル研究、古気候プロキシデータ解析と合わせて、変動要因の解明を目指すことが重要である。

河川流量変化による海洋への影響を評価するには、海洋観測と海洋循環モデルの利用が有用である。沿岸域での係留系の展開や小型船舶の利用により、淡水流入の時空間変化を捉え、陸起源の熱や物質と海氷生成量の関係を調べられる観測が望まれる。陸域水文過程の変化による北極海、大西洋への淡水供給や、海洋循環、物質循環、海洋生態系への影響を評価するには、主要河川だけではなく、小河川や氷床・氷河融解水、地下水などからの淡水や物質のピンポイントでの供給を考慮し、現実的な海洋循環場を再現できる高精度な海洋循環モデルの開発が必要である。

(3) 氷床・氷河、永久凍土、積雪、水循環の統合的把握

現地観測ではカバーできない広域な水循環変動の理解には、衛星観測や陸域モデル、客観解析データの利用が有効である。

北極域における大陸や流域を対象とした広域の水・熱収支の定量的な評価は十分でなく、陸域水循環の重要な研究対象といえる。GRACE 衛星による陸水貯留量や AMSR2 による積雪水量、今後の全球降水観測計画 GPM での二周波降水レーダー DPR による高頻度の降水観測、また、ALOS および ALOS2 による高分解能な水域抽出などの土地被覆分類は広域の陸域水文過程の把握と解明に役立ち、モデル実験の検証においても有益である。また、衛星プロダクトにとって現地地上観測データとの比較検証は必要不可欠であり、特に観測が少ない北極域での現地観測の継続が求められる。

陸域モデルにおけるより正確な水文過程の理解に

は、凍土に関わる土壌の透水や熱伝導に関する適切なモデル化や、積雪、吹雪過程の改良が必要である。さらに数 10 年以上の長期的な時間スケールでは、植生変動が蒸散、土壌環境に影響するため、凍土地帯に対応できる植生動態モデルが必要となる。これらのモデルの検証に使用できる総合的な地上観測は必須である(テーマ A)。

客観解析データは、気候変動研究にとって重要な基礎データの一つである。客観解析データの技術開発は、地上観測や数値モデルによる表現が制限されている北極域の気候研究にとって重要な意味を持つ。現在の客観解析データは、主に大気と海洋を対象としているが、陸域過程を考慮した大気海洋陸域結合データ同化技術を開発し、その客観解析データを用いて解析を進めることで、北極域水循環研究のブレイクスルーが期待される。

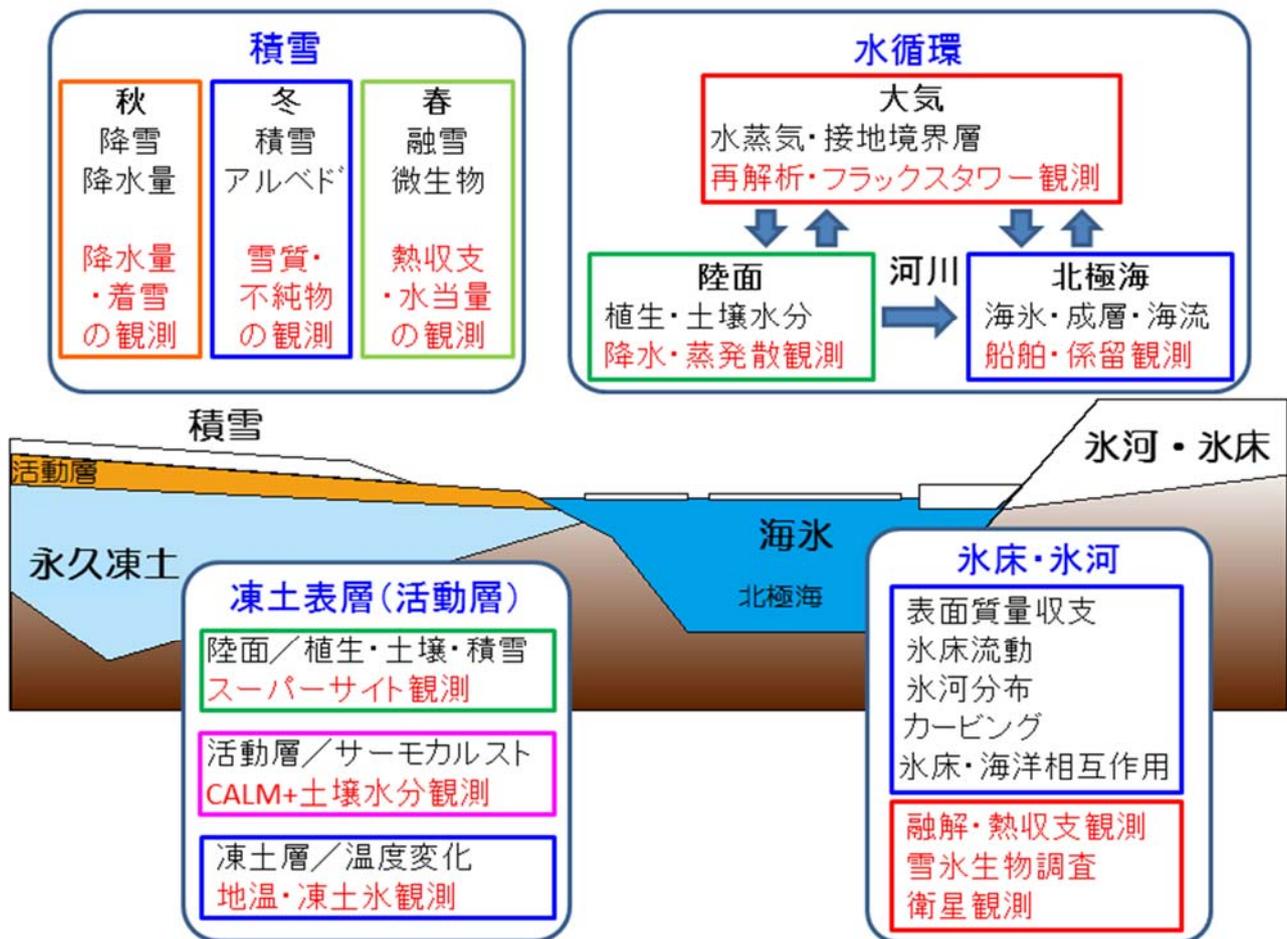


図 16 氷床・氷河、凍土(活動層)、降積雪の変動と水循環変化の研究全体像

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のか？	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のか？	48
Q4： 環北極陸域の水文過程はどう変化するのか？	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