

## テーマ 11: 表層環境変動と固体地球の相互作用

### 要旨

固体地球内部の熱対流活動により、海洋底の拡大や沈み込み等の大規模な地球表層活動が生じ、新たな海洋の形成や大陸の衝突等の現象を引き起こす。このような固体地球内部の熱対流活動に伴う、地球表層の海洋と大陸の配置変化は、大気・海洋循環の変化をはじめ、氷床の発達といった地球表層環境変動の転換をもたらす大きな要因となる。一方、気候変動を原因とする地球表層における氷床と海水量の体積や地理的変動は、海水準の変動にとどまらず固体地球の変形も引き起こし、地殻の変動や地球内部のマントル流動を引き起こす。このように両者は、様々な時間と空間スケールで相互に影響を与えていると考えられてきたが、そのメカニズムはまだ十分に明らかにされておらず、地球システムを総合的に理解する上で必要不可欠な課題となっている。特に、氷床荷重変動に伴う現在の地殻変動現象や、大陸の成長・離合集散といった数十億年スケールの現象まで様々なスケールの相互作用が現れている北極域は、この課題を理解する上で鍵となる重要なフィールドである。そこで、本テーマでは、様々な時間と空間スケールでの固体地球と表層環境変動の相互作用を理解するため、今後実施すべき、北極域での異なる時空間スケールを有する固体地球の変動に関する研究について以下の四つの Questions を設けた。

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？

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？

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？

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？

一つ目の設問 Q1 は、海氷下に存在し、現在活動している中央海嶺の一つで、未だ研究が進んでいないガッセル海嶺の熱水系を対象とする。この研究は、

ガッセル海嶺熱水系の探査により、その成因、熱水系の生物相、および海洋循環の影響等を明らかにするものである。

二つ目の Q2 は、時間スケールで数万年、空間スケールで数千 km に及ぶ極域固有の現象で、氷床荷重変動に伴う現在の地殻変動現象に関する研究観測が対象である。この研究では、グリーンランド氷床やカナダ等の地域、およびその周辺海域での、地形地質および測地学的調査を軸とし、これにモデル計算を組み合わせることで、氷床変動メカニズムの解明や地球内部の粘性構造を明らかにすることを目指している。

三つ目の設問 Q3 は、数億年スケールでの北極海形成発達史の解明と、これに伴う大気－氷床－海洋の相互作用の変遷を対象としたものである。大部分が海氷に覆われている北極海の海底は、調査が困難な事から、未調査の海域が多く残されている。そのため、固体地球物理・地質学的調査等により北極海の海底拡大史を解明することに主眼を置き、さらに、堆積物採取による古環境、古気候の復元、北極海発達過程に伴う氷床拡大時期の推定等、北極海の発達史と大気－氷床－海洋の相互作用の関連を明らかにする事を目指すものである。

最後の設問 Q4 は、数十億年スケールでの固体地球

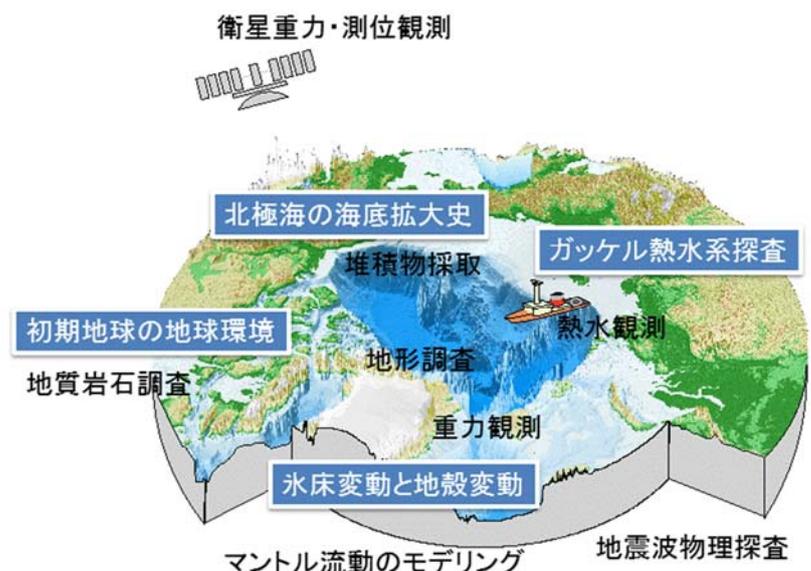


図 42 表層環境変動と固体地球の相互作用に関する重点研究課題

の変動に関するもので、北極域の大陸を中心とした地質学的調査を軸とした地殻研究により、30～40 億年という時間スケールでの地球表層環境変動の解析を主眼とするものである。カナダ北極圏やグリーンランド西岸等

には、40～38 億年前の地球初期の記録を持つ地層が分布しており、主に地質学的調査により、地球初期から現在までの長い地質学的時間スケールでの地球環境変動史の研究推進を提案している。

## まえがき

固体地球では、大気、海洋等の流体圏の変動にともなう固体地球の表面の荷重変化により引き起こされる変動や、超大陸の形成や分裂といった変動等、様々な時間・空間スケール変動が複合的に生じている。大陸分裂による海洋の形成や超大陸の形成といった、数億年から数十億年スケールの地球表層の大陸と海洋の配置の変化は、海洋循環や大気循環等の転換をもたらし、表層環境を大きく変動させた。一方で、氷床荷重変動に伴う固体地球の変動のように、表層環境の変動に対する固体地球の応答現象も存在する。北極域には、プレート境界である中央海嶺での現在の活動から、極域固有の数万年スケールの氷床荷重変動に伴う地殻変動現象から、大陸の成長・離合集散といった数十億

年スケールの現象まで、様々な時間、空間での固体地球と表層環境変動の相互作用を理解する上で絶好のフィールドである。本テーマでは、様々な時間と空間スケールでの固体地球と表層環境変動の相互作用を理解する上で不可欠であり、今後北極域で重点的に展開していくべき、異なる時空間スケールの固体地球の変動に関わる四つの設問に対する研究観測の展望について、以下に記載する。これらの四つの設問をもとに研究を推進し、結果を統合する事により、様々な時間・空間スケールの総和としての固体地球変動と表層環境変動との関係を明らかにし、地球システムにおける固体地球圏サブシステムと大気・海洋圏サブシステム等との相互作用の解明を目指す。

## 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？

### a. 研究の重要性と現状

中央海嶺や背弧拡大系は、活動的な火山の連なりであり、これらに沿ってこれまでに多くの海底熱水系が発見されている。海底熱水系は、地球内部のエネルギーや硫化水素、メタン、水素等の還元性ガスを放出する場であり、熱水鉱床の形成等、地球の熱や物質の循環を考える上で重要であり、そこで噴出する熱水の化学組成はその場の海底の岩石種や熱源等によって異なり、それぞれ異なるタイプの生態系を支えていることが明らかになっている。

ガッケル海嶺は、北極海のほぼ中央に位置する北米プレートとユーラシアプレートの境界を成す現在活動している中央海嶺系の一つであり、北極海の海氷下に存在し、調査の難しい地域である(図 43)。ガッケル海嶺は、超低速拡大(<12 mm/年)に分類され、その拡大速度、地理的な位置、構造等から、世界の中央海嶺系の中でもユニークなエンドメンバーとされている。

ガッケル海嶺では、これまでも観測船、航空機、潜水艦等による調査がいくつか行われている。2001 年に

実施された米国とドイツとの共同計画である AMORE<sup>110</sup>での観測船による調査の結果、超低速拡大であるガッケル海嶺の海嶺軸上に多数の熱水活動が高密度に分布している事が推定されている(Edmonds et al., 2003、図 44)。一般には、低速拡大の海嶺軸では、マグマ活動も低く熱放出量も小さいと考えられており、同様の超低速拡大の海嶺軸である南西インド洋海嶺では、ガッケル海嶺のような高密度の熱水活動は見つかっておらず、低速拡大である大西洋中央海嶺ですら、これほど高密度の熱水活動は確認されていない。南西インド洋海嶺や大西洋中央海嶺では、断層が熱水活動に大きく関与していると考えられているが、ガッケル海嶺の熱水活動はそれだけでは説明できず、熱水系周辺の岩石の種類にも関係している可能性が示唆される(Michael et al., 2003)。また、生物学的には、高密度の熱水活動が存在する特異なガッケル海嶺の熱水系で、新しい化学合成生物群集の発見も期待されている。

2007 年には、米国主導のもと、AGAVE<sup>111</sup>航海として、スウェーデン、ドイツ、日本の 4 ヶ国共同の AUV<sup>112</sup>

<sup>110</sup> AMORE: Arctic Mid Ocean Ridge Expedition

<sup>111</sup> AGAVE: Arctic Gakkel Vents Expedition

<sup>112</sup> AUV: Autonomous Underwater Vehicle、自律型無人潜水機

を利用したガッケル海嶺の熱水系調査が行われたが、残念ながら熱水噴出孔を発見するに至らなかった。しかし、85° E の約 4000mの非常に深い海嶺軸周辺の調査から、爆発的な火山活動を示唆するデータや (Sohn et al., 2008)、低温域で生育する黄色のふわふわしたバクテリア・マットの存在等が明らかになっている (Shank et al., 2007)。またその後、ガッケル海嶺の南のモーンス海嶺で初めてブラック・スモーカーを伴う熱水系が発見されており、さらに熱水系に伴う生物相が、これより南の大西洋中央海嶺の生物相とは異なる事が確認されている (Pedersen et al., 2010)。AMORE 航海においては、ガッケル海嶺で多数の熱水活動の高密度分布が推定されているだけであり、世界の海嶺系の中でもユニークなこの海嶺の未だ実際に確認されていない熱水噴出孔の分布と熱水活動の成因や、それに伴う生物群集等を探るためには、より詳細な海嶺軸上の探査が必要である。さらに、ガッケル海嶺の熱水活動による熱フラックスの海洋循環への影響は、熱水活動が高密度であると推定されているがスポット的な寄与であるので、それほど大きくないと推定されるが、これらも実際の観測データによる検証が必要である。

### b. 今後の研究

ガッケル海嶺の熱水噴出孔の特定には、ROV<sup>113</sup>や AUV 等の海中ロボットを使用した調査が必要である。ガッケル海嶺が海水下に存在する事から、海中ロボットを使用するには、砕氷船は必要不可欠であり、海中ロボット探査には、砕氷観測船による事前の船上での海底地形や海洋観測等が必須である。また、海中ロボットによる海水下の探査においては、未だ実際の探査事例も少ない事

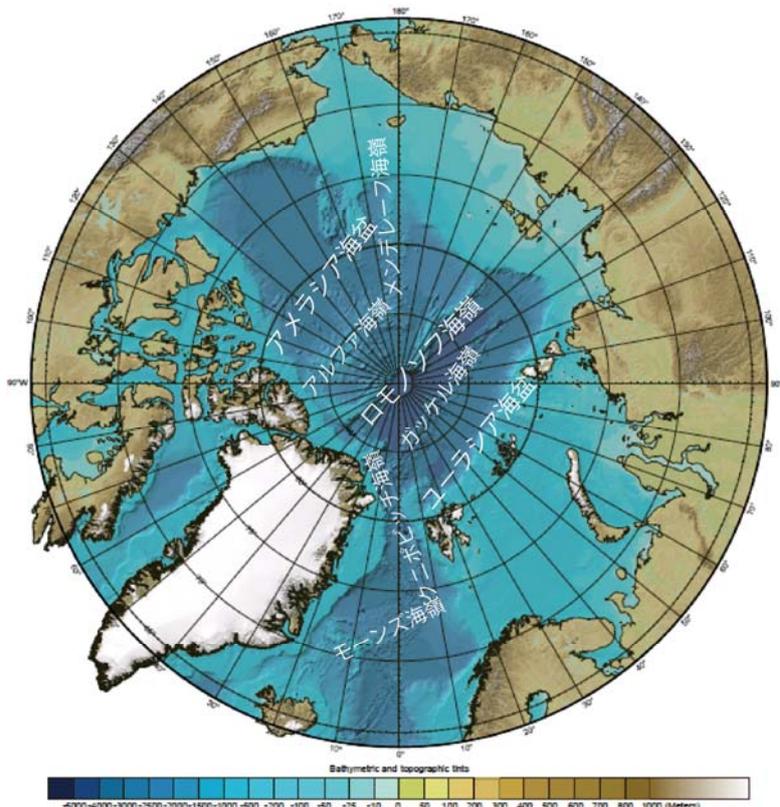


図 43 北極海の海底地形図。Jakobsson et al., (2008)に加筆。

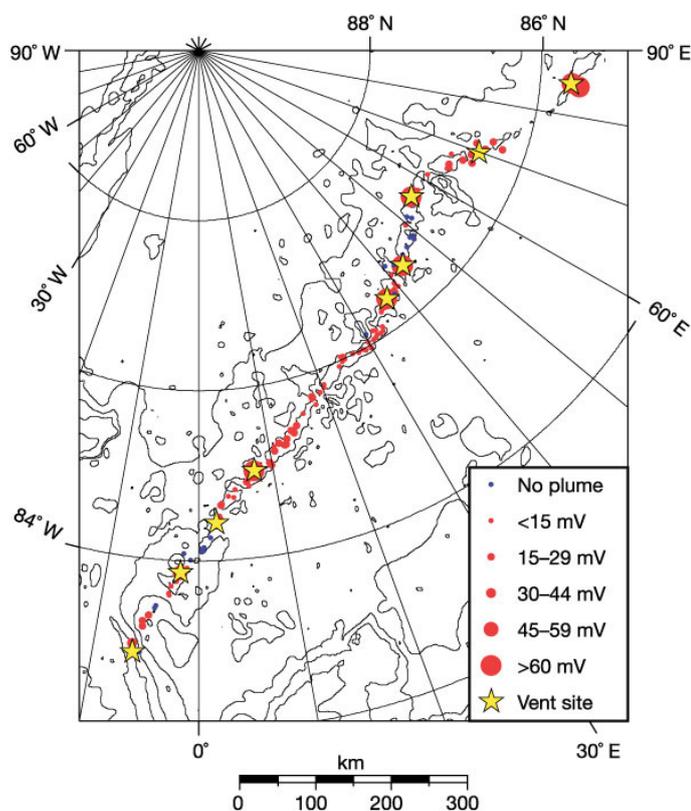


図 44 ガッケル海嶺で熱水活動が示唆される地域 (Edmonds, et al., 2003)

<sup>113</sup> ROV: Remotely Operated Vehicle、遠隔操作無人探査機

から仕様や運用形態等の検討も必要である。熱水噴出孔の特定は、観測船による海底地形等の音響探査から調査対象範囲を絞り込み、詳細な物理・化学的計測により熱水の兆候を捉え、熱水域の存在とおおよその位置を推定し、最終的に海底観察、調査を行うという方法で行う。熱水活動の成因や、それに伴う生物群集等の探査では、熱水噴出孔の特定後、ROV 等による熱水

噴出孔およびその周辺の観察と、岩石や生物の観察を実施する。さらに、熱水活動の成因を探るには、熱水噴出孔周辺の地震探査、電磁気探査や地磁気探査等を実施し、海底下の構造等を明らかにする必要がある。また、熱水域の熱や物質フラックスの変動等の推定には、熱水域の海洋物理・化学的調査の長期変動モニタリング計測も必要となる。

## 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？

### a. 研究の重要性と現状

本 Question では、数年から数万年スケールにおよぶ氷床の変動が引き起こす固体地球の変形現象を対象とする。氷床の荷重は地球表面に圧力として働く表面力（表面荷重）の一つであり、氷床の変動は、氷床質量と、例えば氷床が融解し海中に流入した場合には海水の質量変化を伴い、海水準の変化をもたらす。これによって生じる表面荷重の変化は固体地球の変形を生じさせる。このような現象を氷河性地殻均衡<sup>114</sup> (GIA) と呼び、その様子は、荷重変化の時間的・空間的スケールにより異なる。地球は、短い時間スケールの荷重変化には、『弾性的』に応答し、数千年を超える時間スケールの荷重変化には『粘性的』に応答することが知られている。本 Question で対象とする氷床変動は、長いものは数万年に及ぶ時間スケールの現象で、空間スケールも数 1000km に及ぶため、固体地球に対してグローバルで、かつ粘性的な変形と弾性的な変形の両方をもたらす。

北極域における GIA 研究は主に、地形地質調査、測地観測、数値モデル計算の 3 つのアプローチで進められている。これらは、最終氷期終了後の地殻隆起、すなわち、後氷期地殻隆起<sup>115</sup> (PGR) を対象としている（例えば、Peltier, 2004）。PGR とは、最終氷期最盛期<sup>116</sup> (LGM) に北米や北欧を覆っていた大陸氷床のほとんどが約 6 千年前に融解消滅し、その後も継続して地殻が浮力でゆっくり隆起しているという粘性的な変形現象である。また近年、現在進行中の地球温暖化の影響として、グリーンランド氷床やカナダ北極群島の氷河の急激な減少が報告されているが、これらの氷床変動によっても固体地球の弾性的な変形が生じていることが明らかになってきた。

氷床変動に伴う地球変形研究で最重要課題は、LGM 以降の氷床の分布の拡大縮小や増減の歴史（氷床融解史）を明らかにすることである。この氷床融解史が高精度で求められると、氷床融解に伴う地球変形が海水準変動に与える影響についても精度よく求めることができ、現在進行中の地球温暖化に伴う海面上昇を予測する精度を向上させる上で重要な貢献となる。過去から現在に至る固体地球の変形の大きさや分布が詳細にわかれば、それから逆に LGM 以降の氷床融解史を復元することが可能となることから、氷床変動に伴う固体地球の変形を調べるという本 Question の重要性をご理解いただけたらと思う。

地形地質学的アプローチとしては、貝化石やサンゴ礁の分布、海浜地形や氷河地形地質調査、海底堆積物調査などによって、過去の相対的海水準高度を明らかにすることで、過去数万年にわたる海水量（氷床量）の変化と地殻の隆起・沈降の歴史が推定されている。それをもとに、地球の粘弾性変形を考慮した GIA モデルの計算値と比較することで、過去の両極の氷床分布変動が復元されている（例えば、Peltier, 2004）。しかし、地域毎の氷床分布については、まだ提案されている各モデル間の違いは大きい。例えば、約 1 万 4 千年前の急激な気候変化に伴う氷床融解イベントに対する各氷床の寄与については、まだ決定的な結論は出ていない。

測地観測に関しては、過去 100 年以上にわたる潮位観測から、PGR が進行している地域での地殻の隆起が平均潮位の下降という形で観測され（例えば、Barnett, 1984）、スウェーデンでは長距離の水準路線において高さや重力の変化が測定されており（図 45）、マントル粘性についての推定も行われている（例えば、

<sup>114</sup> 氷河性地殻均衡: Glacial Isostatic Adjustment (GIA)

<sup>115</sup> 後氷期地殻隆起: Post Glacial Rebound (PGR)

<sup>116</sup> 最終氷期最盛期: Last Glacial Maximum (LGM)、約 2 万年前

Ekman and Mäkinen, 1996)。Global Navigation Satellite System (GNSS)などの宇宙測地技術による地上観測が普及した 1990 年代後半になると、極域の数多くの点で宇宙測地技術を利用した地殻変動の連続観測が行われるようになり、現在では北米やグリーンランドなどではかなりの高密度で GNSS による地殻変動のモニタリング観測が実施されている(例えば, Sella et al., 2007, 図 46)。また、2000 年代に入ると、衛星重力ミッションや衛星高度計を利用した氷床量の変動観測が行われ、PGR による変動量も推定されるようになった (Barletta and Bordonni, 2009)。近年の衛星測地観測は高解像度、高時間分解能での観測を可能にしたが、一方でマントルの粘性構造を反映した現象は、その変動速度が遅く、変位量が小さいという特徴があるため、GIA に伴う地殻変動速度の正確な検出には、現在の最先端の観測技術をもってしても 10 年程度の観測値の蓄積が必要である。そして、これらの観測値には上述のように、過去の氷床変動に伴う地殻変動(粘性的な変動)と現在の氷床変動に伴う地殻変動(弾性的な変動)が含まれており、氷床融解史の復元やマントル粘性率の推定には主に前者が必要であることから、これらの分離も大きな課題の一つである。

マントルの粘性率は、プレートテクトニクスに関連した地球内部の動きを決める重要なパラメータであるが、マントルの粘弾性構造を現象に基づいて推定する方法は少ない。高解像度、高時間分解能の地上および衛星による観測値と様々なマントルの粘性構造を考慮した数値モデル計算との比較研究より、マントルの粘性率や分

布をより正確に推定することが可能になれば、地球内部物理学の研究分野にも重要な貢献となりうる。

極域の GIA 研究に対する日本のコミュニティの貢献としては、まず南極域では、日本南極地域観測隊により昭和基地および周辺露岩域において、地殻変動観測や重力測定、地形地質調査が組織的に実施されている。その結果、昭和基地およびその周辺では現在 2~3mm/年の割合で地殻が隆起し、それに相当する重力変化も生じていることや、LGM を含む 4.5 万年前以降、昭和基地近傍では氷床に覆われておらず、北半球の氷床拡大とは必ずしも同期していなかったことを明らか

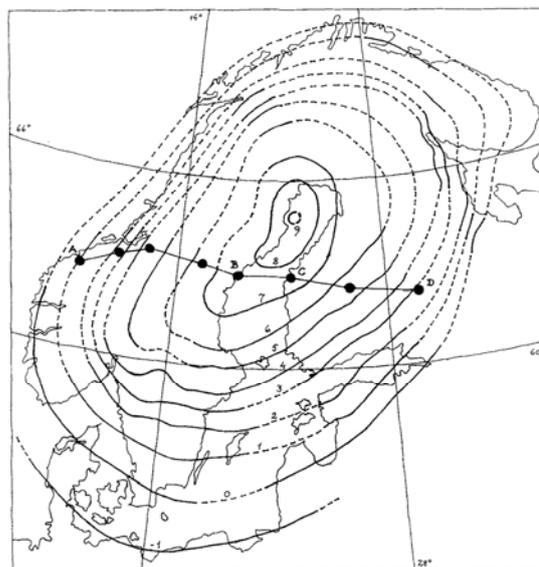


図 45 1892 年~1991 年にかけて観測されたスカンジナビア地方の後氷期隆起(単位は mm)と重力測定線 (Ekman and Mäkinen, 1996)。

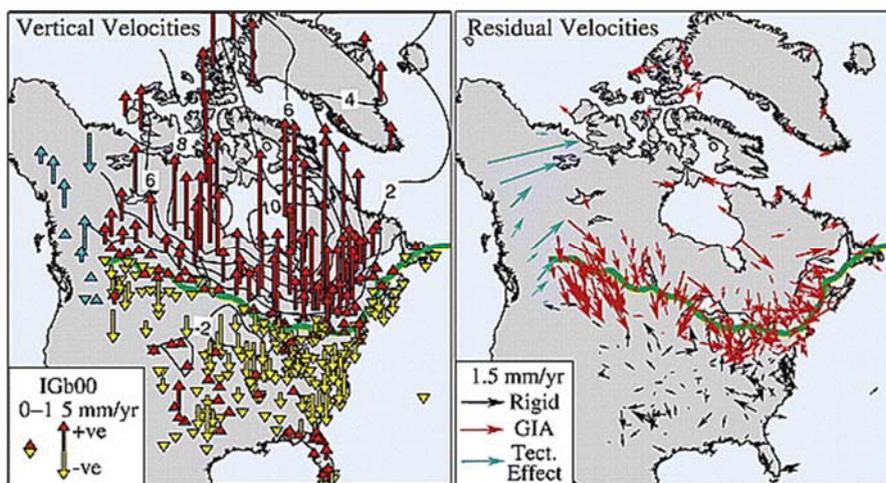


図 46 GPS で観測された地殻変動。(左)上下方向、(右)水平方向 (Sella et al. 2007)。

にしている。一方、北極域では、組織的ではないものの、ノルウェーのニーオルスンや、アラスカにおいて地殻変動観測や重力測定が実施されており、ニーオルスンでは年間 5~7mm の隆起が観測されている。

## b. 今後の研究

本 Question に対する解明をさらに進めるためには、観測空白域における観測研究を展開していくことが急務である。例えば、これまで調査地域は主に陸上に限られており、海底はほとんど観測空白域として残っている。当然のことながら、変動は大陸棚などの海底でも起こっており、大陸棚の詳細な地形観測は、氷床拡大域の拘束に貢献することが期待される。さらに氷床荷重域から離れた海底での地殻変動観測なども氷床モデルや粘性構造を拘束する上でも重要である。

まず、地形地質調査では、観測空白域としての北部グリーンランドやカナダ北極群島などの地域における現地地形調査や試料採取、堆積物掘削といった従来からの調査を行う必要がある。特に、グリーンランド沿岸部の過去の海水準高度データは、量、質ともに不足している地域があり、グリーンランド氷床融解史の復元の不確定性の要因となっている。このような観測を可能にするには、砕氷船を基地として、搭載ヘリコプターで対象となる地域の沿岸観測点まで移動可能とし、現地調査の利便性を図るとともに、地上レーザースキャナーの利用など新たな地形調査技術の導入が不可欠である。一方、大陸棚も含めた海底の調査では、ROV や AUV を用いて海底地形地質の調査や試料採取を行うとともに、海底堆

積物のコア採取技術の開発も進める必要がある。

次に測地観測であるが、陸上での観測はすでにかかなりの高密度で行われており、10~20 年先の方向性としては、海底での観測をめざすべきであろう。そのためには、北極域でも運用可能な海上 GPS と音響測距、海底観測装置を組み合わせた海底地殻変動観測システムを開発導入し、海底において 1cm の精度で地殻変動を検出できるようなネットワーク観測網の構築を推進すべきである。さらに、広域の氷床変動や地殻変動を求めするために、これまで以上に、衛星重力ミッションや衛星高度計、合成開口レーダーなどの衛星測地データを活用すべきであることは言うまでもない。

地球温暖化の将来予測の精度を上げるためには、モデルの不確定性を低減させることが不可欠である。このためには、さまざまな複雑性やプロセスを考慮したモデル開発も重要になる。例えば、地球内部の粘性率の水平不均質の影響や、氷床流動モデルとの結合などを、現在のモデルに組み込んでいくことが挙げられる。また、これらのモデル構築のためには、計算技術の開発や高解像度のデータ解析手法の開発も必要となってくるだろう。

観測・研究体制に関しては、この分野での北極域の観測は、少数の研究者による個人ベースの研究や観測にとどまっており、組織的な研究観測活動の取り組みが必要である。また、モデル開発研究でも同様な状況であり、古気候モデル分野等の他分野との連携を進め、携わる研究者の育成も含めて更なる枠組みの構築が急がれる。

## 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？

### a. 研究の重要性と現状

海洋底の拡大と沈み込み、それに伴う大陸の形成や分裂といった、地球内部の熱対流の活動により、地球表層の大陸と海洋の配置は変化し、海洋循環や大気循環等の地球表層環境に大きな影響を与えている。特に、海洋底の形成は海洋循環を大きく変動させる要因となる事から、現在の深層循環の出発点となる北極海の海洋底の発達史と古気候・古環境復元を組み合わせた研究は、北極海形成過程における海洋循環の変動史や大陸氷床の発達史等を明らかにし、大気-氷床-海洋の相互作用の時間的変化の解明に大きく寄与する。北極海は、海氷に覆われており、海底の調査が困難な事

から、海底下の地質構造等については未だ不明点が多く残されている。北極海は、ロモノソフ海嶺を境に、ユーラシア海盆とアメラシア海盆の二つに大きく区分される。ユーラシア海盆は、現在も続く北極海ガッセル海嶺の活動により新生代に形成された海盆であり、海底の年代同定に用いられる地磁気異常縞模様等からその発達史は比較的良好にわかっている。一方、アメラシア海盆は、中生代以降に形成されたと考えられているが、地磁気異常縞模様もカナダ海盆の一部で同定されているだけで (Vogt et al., 1982)、その発達史はほとんどわかっていない。特に、アメラシア海盆内のアルファ海嶺、メンデレーフ海嶺の成因については、1)大陸起源で、2)過去の

海底拡大軸、3) プルーム起源、または、4) 沈み込み、など未だ様々な説があり論争中の問題である。これまでの研究として、数は少ないものの地震探査等が行われており、アルファ海嶺は海洋地殻である事が示唆されており(Jokat, 2003)、一方、メンデレーフ海嶺には大陸地殻が含まれている可能性が示されている(Lebedeva-Ivanova et al., 2006)。その他にも、重力データ等を用いた研究による、アメラシア海盆下の構造を推定した研究も行われている(Alvey et al., 2008)。しかし、未だ調査が少なく、ユーラシア海盆を含む北極海の発達史の解明が望まれる。

一方、2004年にロモノソフ海嶺で実施された ACEX (Arctic Coring Expedition-IODP Leg 302) (Backman et al., 2006) では過去5500万年前に遡る記録が得られ、従来と異なり北半球高緯度も南極域と同調して始新世中期には寒冷化を開始したことが明らかになった(Moran et al., 2006)。このことは、ドレーク海峡の成立などのテクトニックなイベントによる地域的な気候変動よりも、北極海の成立などによる海底堆積物への固定有機物を通じた大気CO<sub>2</sub>濃度の

低下の方が、新生代における全球的寒冷化の主要原因であることを示唆する。しかし、北極海の発達過程と表層環境変動の関係、特に温暖化ガスの吸収と有機物やハイドレートとしての固定や、海洋循環の変遷と大陸氷床の発達史等との関係を解明するには、北極海のテクト

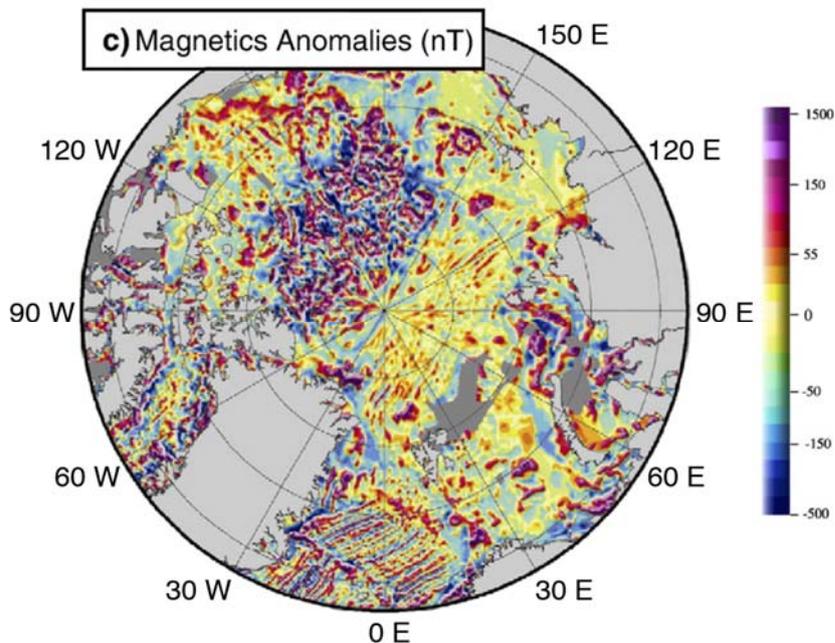


図 47 北極海の地磁気異常データのカラーイメージ (Verhoef et al., 1996 and Glebovsky et al., 1998)。

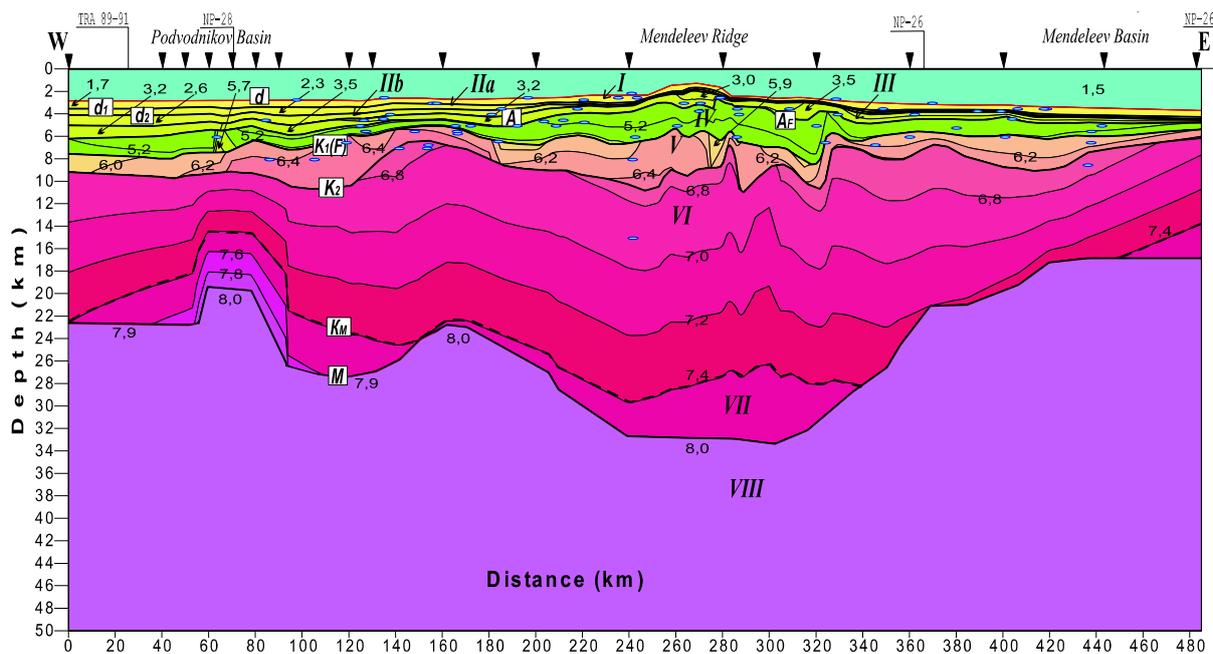


図 48 メンデレーフ海嶺付近の地震波速度構造 (Lebedeva-Ivanova, et al., 2006)。

ニクス研究とともに堆積物等を用いた詳細な古環境復元とその解析が必要とされる。

#### b. 今後の研究

北極海の発達史、特に、アメリシア海盆のテクトニクスを解明する鍵となるのは、アルファおよびメンデレーフ海嶺である。これらの成因等を明らかにするには、これらの海嶺とその周辺海域を対象とした、地震探査を含む可能な限り広域の固体地球物理探査および岩石採取等の地質学的調査を実施することが重要である。海洋底形成前の地質構造の復元および整合性等の検証を行うため、この海域周辺の大陸地質構造等の把握も必要となる。これらを基に、アルファおよびメンデレーフ海嶺、およびその周辺海域の発達史およびその成因を明らかにし、北極海全体のテクトニクスの解明を目指す。また、これらの発達過程に伴う表層環境変動を解明するために、堆積物採取による古環境、古気候の復元を行う。加えて、新生代以降の海洋循環等の変遷や氷

床発達史等を理解するために、ユーラシア海盆においても堆積物採取を実施する。最終的には、北極海全体のテクトニクスと、海洋循環の変遷や大陸氷床発達史等の古気候・古環境変動解析を組み合わせる事により、北極海形成過程に伴う大気－氷床－海洋の相互作用の変遷を明らかにする。

上記の観測等は、国際的な IODP 等の北極海域での将来の深海掘削計画へと繋がっていくものである。北極海域の深海掘削では、2004 年にロモノソフ海嶺で実施された ACEX に、日本人研究者が参加し大きな貢献を果たしている。しかし、現在検討されている IODP 等による北極海域での深海掘削計画に日本の研究コミュニティは組織的には加わっていない状態である。このような北極海域での国際的な掘削計画への、日本の参加および貢献が望まれるとともに、北極海域での固体地球科学に関する研究観測活動を活発にする事により、日本の研究コミュニティを育成していく事も必要である。

### 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？

#### a. 研究の重要性と現状

数千万年～数十億年といった比較的長い地質学的時間スケールでの地球環境変動の解明は地球科学の大きな研究テーマの一つである。北極海の形成発達は今から約 1～2 億年前に遡り、北極海の海洋底探査からこうした時間スケールでの情報がこれまで得られている(図 49)。

また、北極海周辺の大陸域には先カンブリア時代(> 5 億年前)に遡る複雑な地殻発達の地質情報が記録されている。大陸の地質情報と海洋域の地殻物理探査を組み合わせた解析によって、北極海の形成プロセスと北極域の大陸と海洋の配置(古地理)の研究がこれまですすめられてきている(図 50)。

このように、大陸域と海洋域の両方の情報を組み合わせることで解析をおこなうことによってはじめて、北極域の過去の海洋と大陸の発達過程の復元が可能となり、また、数千万年から数十億年という時間スケールでの環境変動を考察する上で基盤となる情報が得られる。

さらに北極域の重要性の一つは、カナダ北極圏やグリーンランド西岸などに見られる地球創生期の 40～38 億年前の地層の存在である(例えば、Bowring et al., 1989; Nutman et al., 2007)。こうした時間スケールで

は、「北極域」という地理的制約はあまり意味を持たない。ここ Q4 で掲げる研究テーマは、上述の Q1～Q3 で記載したような「北極環境」研究を主眼とするものではなく、むしろ「北極域」に分布する地質情報を用いて「地球史」という時間スケールでの環境変動研究を目的とするものである。

こうした北極域に分布する地層の持つ重要性から、これまで多くの地質学的研究がおこなわれてきている。しかし、アクセスの容易な他の地域と比較すると、北極域から得られている地質データはまだ質・量ともに十分とは言い難い。過去の大陸の地質対比や形成発達過程についても、様々なモデルが提案されてきている(図 51)。

上述したように、これまでの研究の蓄積によって、北極域には様々な時代の地層が分布することが明らかになっている。その中でも特にカナダ北極圏の約 40 億年前の地球最古の岩石(アカスタ片麻岩)や、グリーンランド西岸イスア地域から見つかっている約 38 億年前の岩石の存在は、北極域が地球初期から現在までの非常に長い地質学的時間スケールでの地球環境変動の研究に適したフィールドであることを証左している。また、北極域に分布する大陸地域には、露出した深部地殻に相

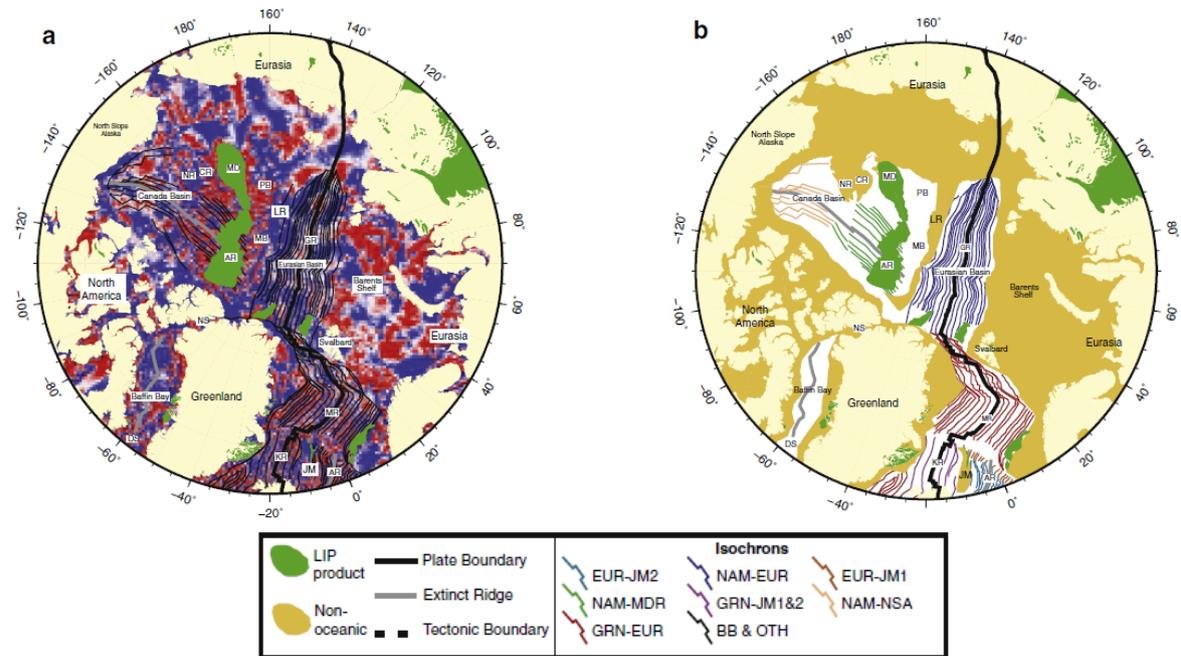


図 49 北極域の海洋底の地球物理および地質情報 (Seton et al., 2012)

当する高度の変成作用を受けた岩石や、変成作用をほとんど受けていない地殻浅所に由来する低変成度の岩石も分布する。特に後者は、こうした地球史の時間スケールでの地球の表層の環境復元に適した研究対象となり得る。すなわち、北極域の地殻研究を通して 30~40 億年という時間スケールでの地球表層環境変動の解析が可能である。また、同時期の露出した深部地殻(高度変成岩)との対照研究によって、地球表層環境変動と大陸地殻深部での現象との相互作用という視点での研究が推進可能である。

#### b. 今後の研究

ここで挙げた Question を解明するための方法として、陸上での地質調査と海洋域における地球物理探査によるデータを統合的に組み合わせることが必要である。具体的には、海洋底物理探査によって過去 1~2 億年前に遡る海洋底の発達史を明らかにする。近年の北極域の夏季の海氷の減少によって観測船のアクセスできるエリアが広がるとともに、無人探査船を用いた海中物理探査などによっても新たな情報を得ることが可能で

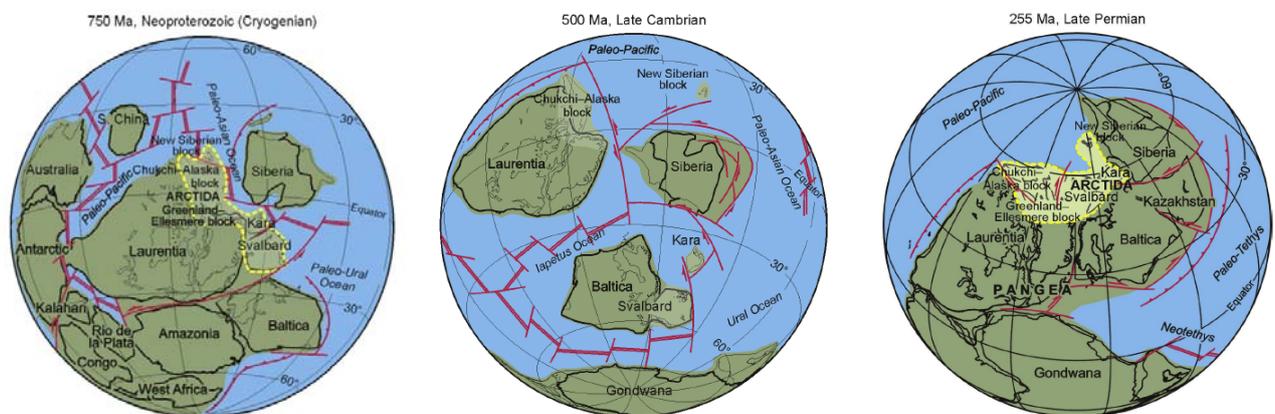


図 50 北極域の過去(750-250Ma)の大陸配置の変遷 (Vernikovsky et al., 2013)

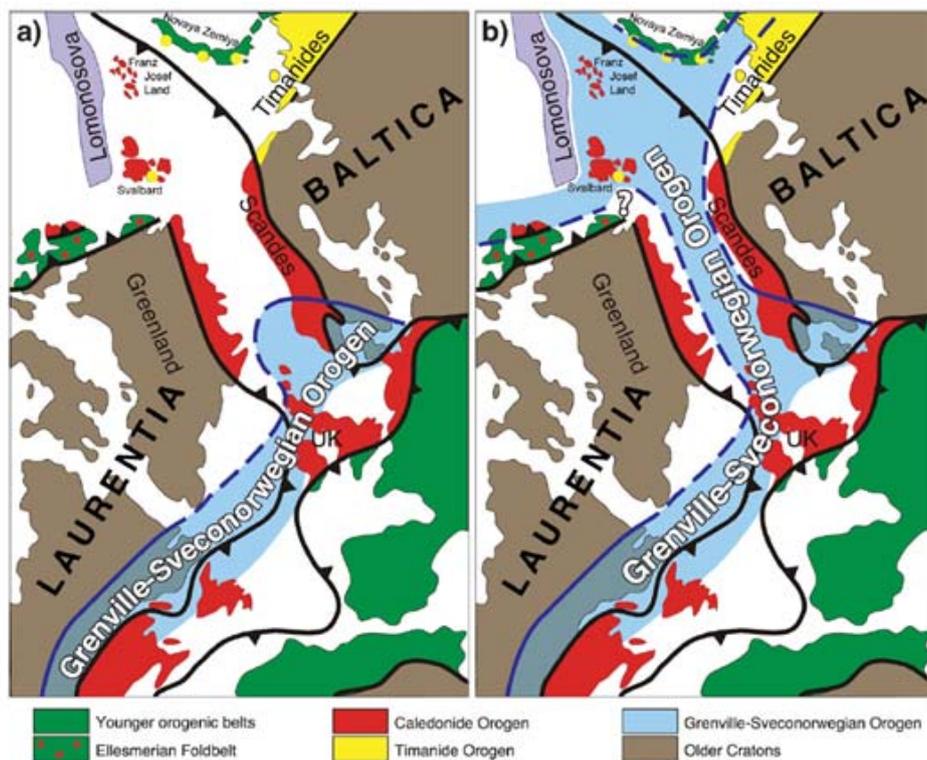


図 51 北大西洋域における過去の大陸配置の復元図 (Lorenz et al., 2012)

ある。また、陸域の野外地質調査によって、北極域の地殻を構成する物質の岩石学的、地球化学的、年代学的研究によって、地殻深部と表層地殻の地質学的時間スケールでの物質循環の解析が可能である。また、海洋域から得られた海洋底の発達史を陸域の地質対比によって、過去の大陸配置のより高精度の復元をおこなうことが可能となる。このような地質学的時間スケールでのプロセスを明らかにするには、高い精度で年代決定をおこなう分析手法や、過去の環境変動の指標となるような同位体(地球化学的トレーサー)に着目した同位体分析を組み合わせた解析が必須である。国立極地研究所に導入されている 2 台の二次イオン質量分析計はこうした物質科学的解析の柱となる。

また、地殻構成物質の研究をベースに、直接計測の難しい氷床下の大陸地殻ヒートフローの見積りなどの解析も可能である(例えば、Carson et al., 2014)。氷床下の地殻情報は地球物理探査(重力、地磁気)による解析が不可欠である。こうした物理情報と氷床縁辺に露出する岩石の情報を組み合わせることで、氷床下の地質を推定する試みがなされ得る。また、その際に、岩石の地球化学的情報や熱源となりうる放射性元素含有量を精密に見積ることで、氷床下地殻の熱流量の推定が

可能と考えている。このように、地殻構造推定データを地球物理探査データの解析と密接にリンクさせることで、北極域の固体地球圏の数千万年から数十億年という時間スケールでの特質を明らかにすることが可能となる。

研究の基礎データを得るための地質調査は、特別な装置や事前準備などは特に必要なく、機動的に現地調査を実施することが可能である。北極圏はアクセスならびに設営面の困難さから、南極とならんで野外調査データの蓄積の乏しい地域となっている。グリーンランドでの地質調査や、その地質延長と考えられるスコットランドやカナダ北極圏の地質研究などでは、これまで日本の研究コミュニティも少なからず貢献している。今後も 5~10 年内のタイムスパンで機動的に野外調査隊を組織して、さらに精力的に北極域での現地地質調査を含めた研究に取り組む必要がある。南極の調査で蓄積したノウハウをベースとして北極域での機動的な現地地質調査をおこなうことによって、Question の解明に必要な基盤地質データを取得する。

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きているのか？ 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