

テーマ 6: 古環境から探る北極環境の将来

要旨

北極域の温暖化が氷床や海氷、凍土、植生、大気エアロゾル等を与える影響や、それらによるフィードバックが注目されているが(図 21 参照)、変動の時間スケールが万年以上におよぶ北極気候システムの全容を理解することは、現在や近代的観測データのある過去百数十年を対象とした研究のみでは不可能である。過去数千万年には、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が現在よりはるかに高く氷床が存在しなかった時代や、北極気温・氷床が地球軌道要素に伴って周期的に大きく変動した氷期-間氷期サイクルなどがあり、それらの研究を通じて北極気候システムを解明し数値モデルを検証することができる。ここでは、モデルとデータの連携により北極古環境の復元とメカニズムの理解を目指すため、5つの Questions を挙げた。

- 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?
- 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?

- Q3: 過去の北極海の環境はどのようなものであったか(特に、海氷と生物生産について)?
- 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?
- Q5: 過去の北極における数年~数百年スケールの自然変動は現在と異なっていたか?

研究手法としては、データについてはアイスコア(氷床や氷河を鉛直に掘り出した柱状の氷)や海底コアの採取と分析、陸上および海底の地形地質調査などであり、モデルについては気候と氷床、植生、固体地球等の多要素を結合した地球システムモデルの開発と長期間・多数のシミュレーションである。過去に起こった温暖期の環境を復元し理解することが特に重要だが、氷期や退氷期に繰り返された突然の気候変動や、数年から数百年スケールの自然変動など、気候システムの不安定性や変動性に関する研究も重要である。

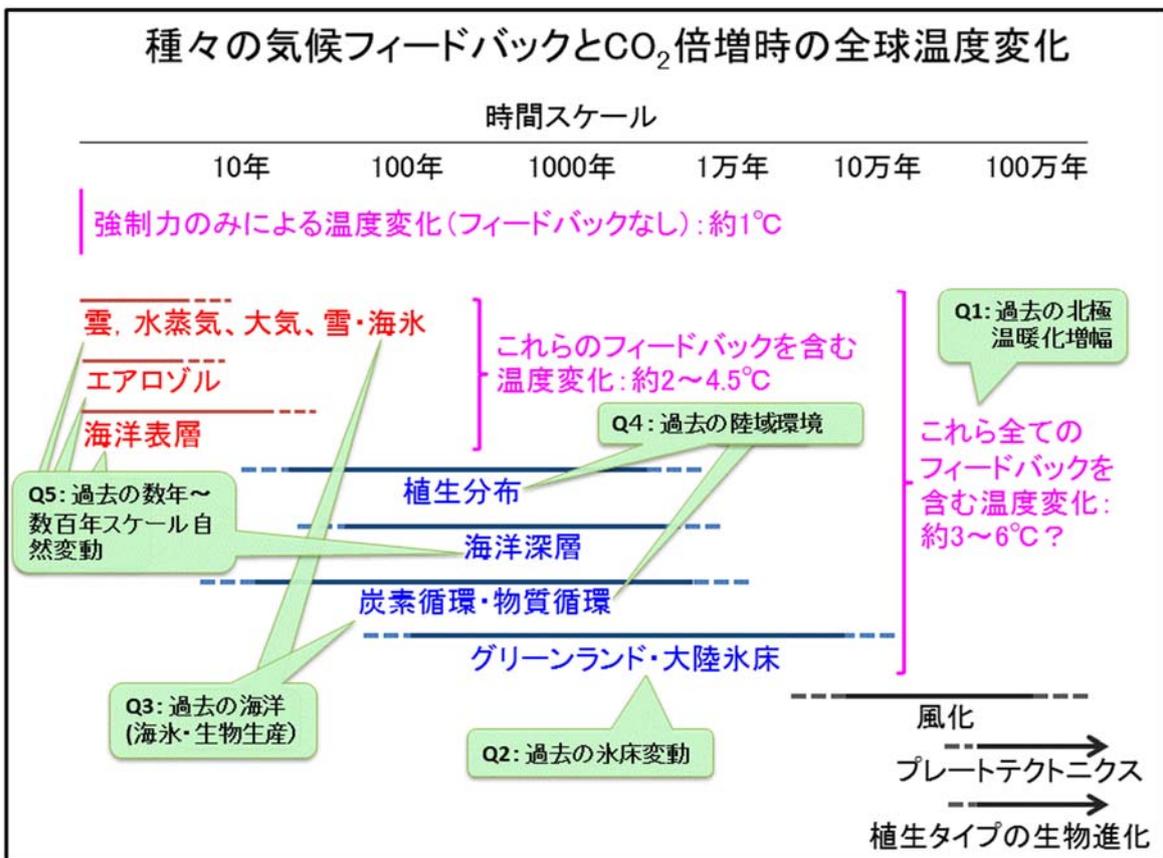


図 21 種々の気候フィードバックと、それらによる CO<sub>2</sub> 倍増時の全球温度変化。各気候要素の時間スケールや、各設問と気候要素との主な対応関係も示す。

## はじめに

地球大気の CO<sub>2</sub> 濃度は時代により大きく異なり、約 5500 万年前には 800 ppm 以上の高値であった(表 1)。温室効果により地球表面気温は高く、北極海の水温は 18°C 以上、亜熱帯性シダ類の繁茂した時代もあった。さらに時代が下り、鮮新世では CO<sub>2</sub> 濃度は 330 ppm 以上あり、カナダ北極諸島に巨木の森林が広がっていた。12.5 万年前の最終間氷期や 1 万年前の前期完新世には高い夏季日射を反映して北極域のツンドラは消失し、タイガ林が北極海に面して広がっていた。他方、繰り返し起きた氷期には、北極域の広い範囲で氷床が成長し、北極海は棚氷と海氷に覆われた。CO<sub>2</sub> 濃度や日射量の違いは地球全体の気候に影響を及ぼしたと考えられるが、北極域の変化はどこよりも大きかった。

現在、北極域の温暖化が進行中である。北極域には温度変化に対して敏感な海氷、凍土、ツンドラ植生などが広範囲にひろがり、その気候変化の増幅に果たす役割が注目されている。この役割を明らかにするうえで、過去の北極域の環境を復元し、CO<sub>2</sub> 濃度や日射量と環境条件の関係を明らかにしてゆくことは、重要なアプローチになりうる。

古環境研究は、過去の気候、環境を復元し、その変動メカニズムを明らかにすることを目的としている。海底、陸上、氷床に含まれる物質を様々な手法により分析し、年代を与え、環境変遷を間接的に復元、解釈する(p76、ボックス 1 参照)。また、メカニズムを明らかにするためのコンピューターシミュレーション(数値モデリング)も進展してきた。古環境研究は、過去の現象に関する知見を与えるだけでなく、気候モデルの検証や高度化など、将来予測に関する意義も大きい。とりわけ、氷床や植生、炭素循環など、変動の時間スケールが数年

から数万年までと極めて幅が広い要素の変動を復元し、そのメカニズムを理解することは、たかだか 100 年程度を対象とした現在気候の研究では不可能である。そのため、気候科学が社会的要請に応えるためにも、古環境研究は重要である。こうした北極域での古環境研究の進展には、1990 年代に始まった地球圏-生物圏国際協同研究計画(IGBP)傘下の古環境変遷研究計画(PAGES)による推進力が寄与している。日本においても、PAGES の設立当初から日本学術会議 IGBP 分科会 PAGES 小委員会により大きな貢献を行ってきた。また、多くの国際研究プロジェクトに国内のコミュニティや個人が貢献してきた(アイスコア掘削研究、北極海海底掘削、古気候モデル比較など)。

北極域における気候変動や気候感度の特徴について、古気候データとモデリングの両面による研究が進められており、IPCC 評価報告書でも多くの紙面が割かれている。過去数千万年の間には、現在より明らかに高温であった時代や、気候モデルの検証に利用できるイベントは豊富にある。とりわけ、今後加速しうる北極の温暖化やその影響の理解を深めるには、過去に起こった温暖期の理解を深めることが重要である(表 1)。例えば、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が現在より有意に高く氷床が存在しなかった時代や、北極気温や氷床が周期的に大きく変動した氷期-間氷期サイクルの中の間氷期がある。また、氷期や退氷期における氷床変動や突然の気候変動などは、将来起こりうる気候システムの不安定性の発現に関する知見を与えるため、これらの時代も重要である。最近の 1000 年間にも温暖期があり、年々から数十年スケールの気候や温室効果気体の復元に加え、太陽活動や火山活動の復元、全球気候モデルによる再

表 1 北極古環境復元の温暖期ターゲット

時代	年代	CO <sub>2</sub> 濃度	日射	北半球高緯度域気温
暁新世末期	5500 年前	800-2000 ppm	現在と同じかより高い	現在より 18-35°C 高い
鮮新世温暖期	350 万年前	330-380 ppm	現在と同じかより高い	現在より 11-16°C 高い
間氷期	40 万年前、 12.5 万年前など	270-280 ppm	現在より高い	現在より 5°C 高い
前期完新世	1 万年前	270 ppm	現在より高い	現在より 2°C 高い
中世温暖期	1000 年前	280 ppm	現在とほぼ同じ	現在より 0-5°C 高い

現実験も活発に行われるようになってきた。

しかし、定量的かつ空間的に密な古環境復元や、古環境データとモデルとの連携には、まだ課題も多く残さ

れている。以下では、北極古環境に関する主要な問いを挙げ、研究の現状と課題を整理する。

## 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？

### a. 研究の重要性と現状

数千万年間をさかのぼって長期的な気候の変遷をみると、大気中 CO<sub>2</sub>濃度の高い時代には気温や海水温が高く、CO<sub>2</sub>濃度が低下するにつれて氷床が出現し発達してきたことが分かる。北半球氷床の拡大とともに、夏の日射量の変動ともなう氷期-間氷期サイクルが発現

し、その振幅が拡大してきた。この間の気候変動の要因は様々であるが、現在までに得られているデータから、いずれの場合にも極域気温増幅が存在していたことが分かっている(図 22)。

ロモノソフ海嶺で 2004 年に行われ、日本も参加した北極海掘削計画<sup>86</sup>により、北極点近傍において過去

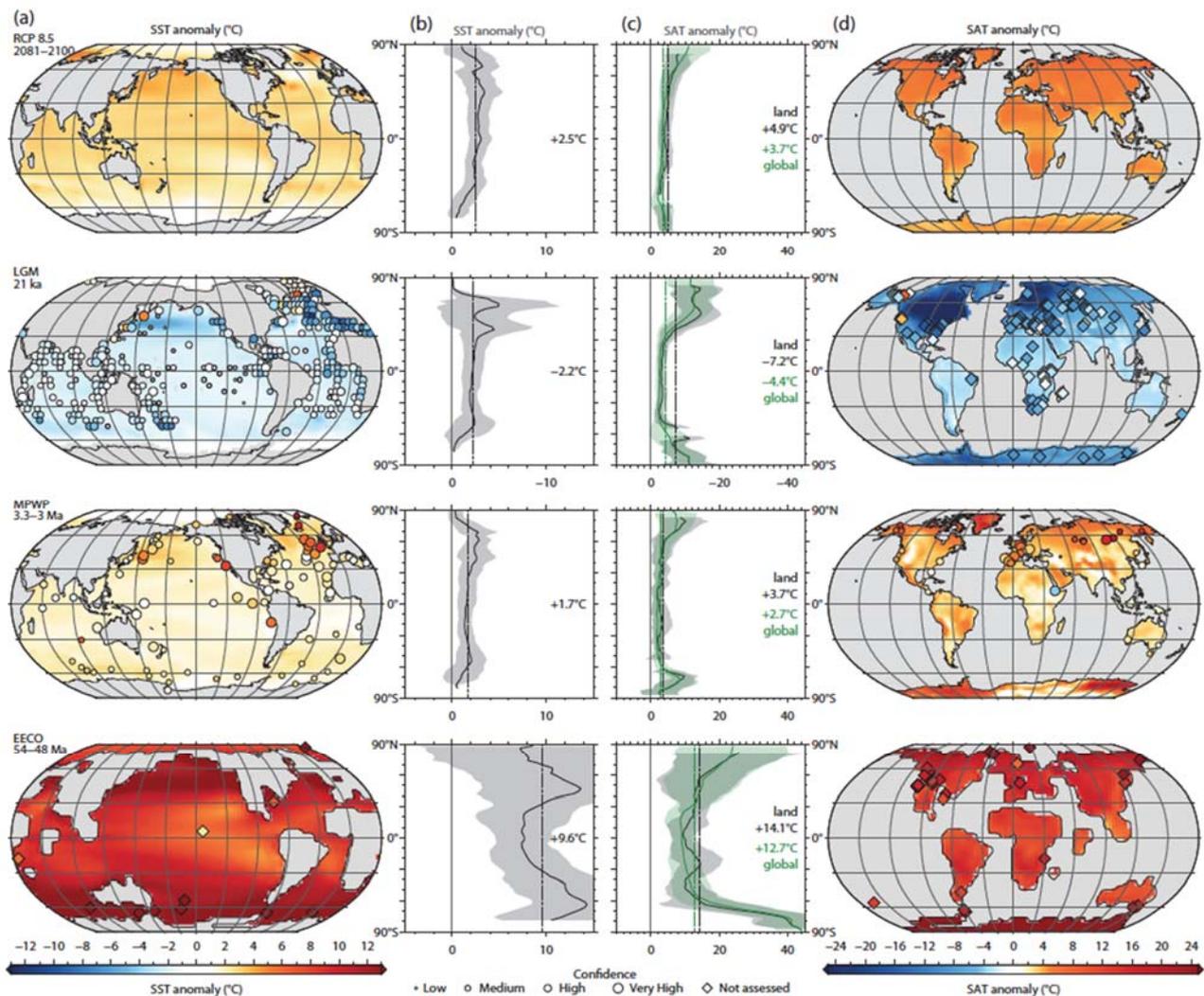


図 22 始新世(Eocene)、鮮新世(Pliocene)、最終氷期最盛期(LGM)の気温(SAT)と水温分布(SST)のデータ-モデル比較 (IPCC AR5 Box 5.1, Fig. 1, Comparison of data and multi-model mean (MMM) simulations, for four periods of time, showing (a) sea surface temperature (SST) anomalies, (b) zonally averaged SST anomalies, (c) zonally averaged global (green) and land (grey) surface air temperature (SAT) anomalies and (d) land SAT anomalies. The time periods are 2081-2100 for the Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 (top row), Last Glacial Maximum (LGM, second row), mid-Pliocene Warm Period (MPWP, third row) and Early Eocene Climatic Optimum (EECO, bottom row).)

<sup>86</sup> 北極海掘削計画: Arctic Coring Expedition(ACEX)

5500 万年前に遡る記録が得られた (Moran et al., 2006)。堆積物の有機化合物の分析により、北極海の水温が 5500 万年前の暁新世・始新世境界前後では 18°C であり、温室効果気体が短時間に放出された境界温暖極大期では 24°C に達したことが示された。この約 5000 万年前の始新世前期温暖期と、約 350 万年前の鮮新世中期温暖期の 2 つの時代では、日本を含む 5 つ以上の研究グループによって、モデルとデータの比較が行われた。その結果、低緯度では、モデルはデータに比べて気温を過大評価し、極域では逆に過小評価していることがわかってきた。特に、極域における不一致については、データとモデルの双方に課題があることがわかってきた。データについては、代理指標から海水面温度への較正曲線を季節によって変更する必要性が指摘されている。一方、モデルについては、極域の雲の放射過程や、海洋による熱輸送過程の妥当性を精査する必要がある。また、陸上植生についてもデータとモデルの整合性を精査する必要がある。

過去 100 万年間の氷期-間氷期サイクルの中の間氷期は、グリーンランド以外の北半球氷床が消失した時期である。最近 5 回の間氷期の中には、現在より温暖かつ 10~20m も海面が高い時期もあったが、CO<sub>2</sub> 濃度は 280±10 ppm 程度と同程度であり、放射強制の主な違いは軌道要素の変動による日射の分布の違いによる。

例えば、最終間氷期における北半球の夏至の日射量は 126,000 年前に最大となったが、その値は完新世の最大値より 1 割程度も大きかった。この時期には、特に北半球陸域で現在より気温が高く、森林が北上し、海面が現在より 5~10 m 高かった(氷床が縮小していた)ことを示す証拠が見つかった。また、中部北極海が季節氷域であった証拠があり、夏季気温が現在よりも高かったと推察される。日本が掘削と解析に参加した最新の国際氷床コア掘削プロジェクト (NEEM 計画) の成果によると、グリーンランド内陸北西部の年平均気温は現在より 8±4 °C も高かったと推定されている (NEEM project members, 2013)。

最終間氷期について、日本を含む 16 の気候モデルが参加した国際データ-モデル比較プロジェクトが行われ (IPCC AR5 の図 10.9)、日射と大気組成などの時間変化を考慮した実験も 7 つのモデルにより行われた。その結果、海面水温にはデータとモデルの結果に有意な差がないが、12 月~2 月の陸上気温には有意な差があるため、気候モデルの結果は高緯度の陸上における年平均気温の復元データを大幅に下回っていることが

明らかになった。このようなデータとモデルの食い違いの要因として、モデルの雲や海氷、植生などのプロセスの表現が不十分な点や、海水の縮小による水蒸気源の移動が氷床コア同位体による気温復元に考慮されていない点などが挙げられている。

現在の間氷期 (完新世) における北極域は、大陸氷床が最後まで残った北米大陸の一部地域を除いて前期に暖かかった。これは、夏季日射量が現在より大きく、海氷などの雪氷圏に影響したためであると考えられる。過去 2000 年間の北半球の気候変動は、西暦 950~1250 年頃の中世温暖期と、1450~1850 年頃の氷期で特徴づけられ、北極域の変動幅は北半球平均と比較して顕著に大きかった。過去 2000 年については、温室効果気体や太陽放射、火山といった主な放射強制力が時間的に密に復元されている。それらを入力データとして、大循環モデルによる時間発展型の数値実験が可能になっており、日本も参加中の古気候モデル比較プロジェクトが国際的に推進されている。北半球平均気温においては、気候モデルの結果は、復元データの不確実性の範囲に入っているが、北極域におけるモデル間やデータとモデル間の整合性は低い。また、放射強制力や気候復元データの不確実性も大きいと、北極における気候感度を強く制約することは現時点では難しく、今後の大きな課題とされている。

## b. 今後の研究

堆積物やアイスコアにより、過去の気温や水温の復元が進められてきており、気候モデルによる再現実験も増加してきている。しかし、代理指標データから温度に換算する過程で生じる誤差や、気候モデルにおいては氷床・気候間の相互作用を考慮しないなど、発展途上の段階にある。また、古気候情報を用いた気候感度の推定研究は存在するが、北極に着目した研究例は少ない。極域気温増幅や、氷床による海水準変化について定量的復元と要因分析を行うため、古環境 (温室効果気体、エアロゾル、氷床、海洋海氷等) に関する代理指標データの取得と、地球システムモデリングによる古環境再現実験との連携が不可欠である。

これまで多くの古気候時代断面について、データとモデルの比較を行ってきており、それらを通じて見えて来た課題が多々ある。データについての課題は、代理指標から温度への較正曲線の季節依存性や気候依存性の考慮をしつつ、新生代の北極海海底コアやグリーンランド氷床コアのデータ不足期のサンプル取得と分析増

強である。一方、モデルについての課題は、特に極域の雲－エアロゾルの放射過程や、海洋－海氷による熱輸送過程や成層形成過程の妥当性、そして植生や陸面／氷床表面過程と言った素過程の精査と気候モデルへの反映である。これらのデータとモデル双方の改良と時代毎の比較を繰り返して行くことが不可欠である。

放射強制力と気候の関係を示す古気候データを解釈する際には、氷床を初めとする雪氷圏や植生による気温へのフィードバックを考慮することが、不可欠である。温暖化に対する氷床や植生の反応は、数百年、数千年と長期に及び、その北極気温増幅や全球平均気温への影響も長期間持続する。このような長時間スケールのフィードバックも含めた(CO<sub>2</sub>濃度増加に対する)温度変化は、「地球システム気候感度」と呼ばれ、短い時間スケールの気候フィードバックのみを考慮した「気候感度」<sup>87</sup>より大きな値を取る(図 21)。気候モデルと古気候データの比較に基づく研究によると、地球システム気

候感度が気候感度の 2 倍に達する時期もあり、その値は気候状態によって異なる (PALEOSENSE Project Members, 2012)。今後、長期の古気候情報を将来予測に定量的に役立てる際には、地球システム全体を考慮にいたした気候モデリングと古気候指標による統合的研究が必要である。特に、気候モデルのパラメータや構造、境界条件など全ての不確実性を考慮したモデル再現性の評価が重要となる。そのためには、過去の境界条件の精緻な把握や、多くの時代を対象として気候モデルによる再現実験、そのための計算資源の確保が不可欠である。多点かつ長期にわたる試料の取得(氷床・氷河コア、孔温度、海底堆積物、凍土試料など)や、プロキシ・分析手法開発、それらを駆使した大量かつ高分解能のデータ取得、プロキシデータ同化による解釈などが必要である。また、古環境と現在をつなげるために、西暦 2000 年代以降をカバーする環北極古環境アーカイブの取得も必要である。

## 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？

### a. 研究の重要性と現状

#### (1) 氷床変動メカニズムと将来予測

氷床の盛衰は、海水準や大気・海洋循環等の変化を通じて地球環境に大きな影響を与える(テーマ 4 参照)。気候変化に対する氷床の応答は、気温上昇と低下について異なる「しきい値」があり、それらを超えると大きく形状や体積が変化するヒステリシス構造を示す。氷期－間氷期サイクルの数値シミュレーションから、温暖化による急激な氷床後退の推定には、氷床ごとに異なるヒステリシス構造を解明し、モデルで再現することが極めて重要であると分かった (Abe-Ouchi et al., 2013)。また、氷床の応答時間スケールは非常に長いため、過去の気候変化が数百年以上にわたって影響を及ぼす懸念がある。実際、国際モデル比較 SeaRISE (Bindschadler et al., 2013)から、過去 13 万年の気候変動への氷床応答の履歴の考慮の有無が、今後 100 年の氷床体積変化の推定に 40%もの違いを生む可能性が示された。

将来の氷床変化を正確に制約するには、過去実際に起こった氷床変動の様相や駆動要因を明らかにし、

モデルによる再現を高度化することを通じて、外部強制力に対する氷床応答の不確実性を低減することが重要である。特に、過去から将来を通じて、氷床の消滅をもたらす気候や CO<sub>2</sub>濃度のしきい値を正確に把握することが不可欠であり、そのためにはヒステリシス構造の把握につながる古気候の数値実験とデータが今後必要である。

#### (2) 過去の氷床分布の復元

陸上や海底に残された地形・地質学的証拠(氷河浸食地形など)や、氷床の痕跡の調査から、過去の氷床の縁辺位置と年代を特定することで、氷床の拡大範囲を復元できる。氷床が縮小していた間氷期については、海底堆積物コアと陸上地質分布との対応関係に基づいて氷床分布を推定できる。氷床体積の復元には、世界各地の相対海面高度データから氷河性地殻均衡モデル<sup>88</sup>を用いてインバース法によって求める方法が主流である(テーマ 11 参照)。

また、北極海では、氷期の海面低下により大陸棚が露出し氷床で覆われていた時期もあり、水深 1000 m ま

<sup>87</sup> 気候感度: 海洋表層や雲、水蒸気の変化など、全体の応答が数十年程度で完結するフィードバックのみを考慮した温度変化。通常は、CO<sub>2</sub>濃度を 2 倍にしたときの地球平均地上気温変化を指す。

<sup>88</sup> 氷河性地殻均衡モデル: Glacial Isostatic Adjustment (GIA) モデル

での海底に、過去の氷山による侵食痕や氷河性の線状構造、氷河運搬物質による堆積地形などが存在することが分かっている。ロモノソフ海嶺とチュクチ海周辺での調査により、氷塊が大陸から中部北極海に広がっていたことや、東シベリア海の大陸棚上に氷床が存在した可能性も指摘されているが、証拠は断片的である。これらの氷床分布を気候-氷床モデルにより再現し、氷床変動プロセスの理解につなげようとする研究が盛んに進められつつある。

### (3) 過去のグリーンランド氷床

約 300 万年前に始まったグリーンランド氷床の拡大と CO<sub>2</sub> との関係や、氷期-間氷期における北半球氷床（北米やユーラシア西部、グリーンランドの氷床）の軌道要素や CO<sub>2</sub> に対する応答について調べられつつある。特に、現在より海面が 5~10m 高かった 12.5 万年前の最終間氷期や、2 万年前の最終氷期最盛期から現在にかけての氷床融解の時代は、氷床分布や体積、変動要因となる気候状態を復元するための記録が比較的多く得られ、気候-氷床結合モデルによる再現も始まっている。

日本も参加したグリーンランドのアイスコア掘削・解析や、南部の海底堆積物コアの解析によれば、最終間氷期の NEEM 地点(図 23 の”NE”)の気温は、現在より 8±4℃も高く表面融解が多発していたが、氷床縮小量は海面換算でたかだか約 2m 以下と見積もられた (NEEM community members, 2013)。氷床モデルによる再現はモデル間の相違が大きく(図 23)、それら

の優劣を判定するためのデータも不足している。一方、約 40 万年前の間氷期には、夏の日射は弱かったにもかかわらず海面が現在より 10~20m 高く、グリーンランド氷床が大きく後退し植生が存在したことが、アイスコア解析から示唆されている。モデルでの再現は成功しておらず、氷床後退の要因は謎である。

最終氷期のグリーンランド氷床は大陸棚まで拡大したと考えられているが、海底探査による証拠は南部の一部に限られており、陸上の証拠も断片的である。氷床後退期の旧汀線高度データに大きな誤差が含まれている可能性が示されており、データとモデルで整合的な結果は得られていない。

### b. 今後の研究

今後、モデルとデータの連携により解決すべき問題としては、下記が挙げられる。

- 過去のグリーンランド氷床の拡大と後退、しきい値決定メカニズムの把握。
- 約 100 万年前の北半球氷床の卓越周期の変化(10 万年周期から)の解明
- 北極海周辺の氷床はいつどのようなプロセスで存在したか。
- 40 万年前の間氷期の海面はなぜ著しく高く、グリーンランド氷床は大きく後退したか。
- 氷期サイクル、退氷期の北半球氷床およびグリーンランド氷床の詳細再現、しきい値把握。
- 氷期における氷山大規模流出イベントの発生条件と周期、規模の決定メカニズムの把握と再現。

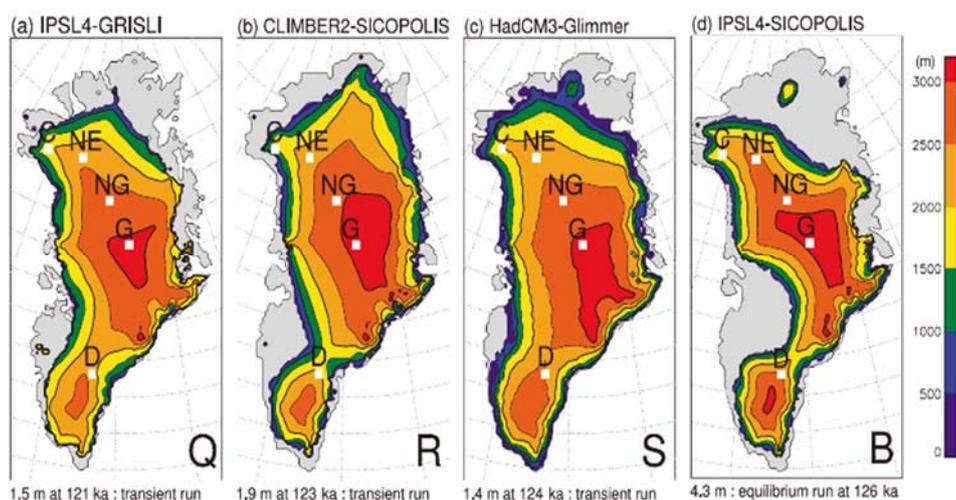


図 23 最新の氷床モデルで計算された最終間氷期のグリーンランド氷床の分布 (IPCC AR5, Figure 5.16, Simulated GIS elevation at the Last Interglacial (LIG) in transient (Q, R, S) and constant-forcing experiments (B).)

### (1) 氷床－気候モデル

過去の氷床の謎を解き明かすには、日射や温室効果気体といった外部強制力に対する気候と氷床の非定常応答を、氷床－気候結合モデルによる数値実験で再現し、データとの比較検証を通じてメカニズムを理解する必要がある。モデルの高度化の課題は、(1)氷床と海洋との相互作用、(2)底面プロセス、(3)大気－表面質量収支プロセス、(4)氷床－固体地球相互作用の高度化、(5)モデルの高解像度化などである。また、氷床モデルを他のモデル(大気、海洋、GIA、植生等)と直接／間接に工夫して結合する必要がある。古気候データを活かした実験のため、膨大な計算機資源と基盤整備が必要である。

### (2) 地形地質調査を軸とした氷床分布の復元

過去の間氷期の海底堆積物と陸上地質との対応関係を、氷床が存在したと考えられる地域(特にグリーンランド)の大陸棚において、多点で精査する必要がある。陸上に残された氷床縮小の痕跡を調査し、氷床末端位置や氷床底環境、隆起海浜地形などを広域かつ詳細に復元する必要がある。最近では、衛星観測による重力場の時間変化と GIA モデル計算による氷床変動が議論されており、現在の氷床変動の成分との分離が課題である。詳細な海水荷重の GIA モデル化には、海水準変動に対する地球回転変動の効果の導入、地球内部粘性構造の考慮、測地データと氷床モデルの密接な連携が不可欠である。

## 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

### a. 研究の現状

北極の気候を理解するうえで、海氷アルベド・フィードバックを評価することが重要であり、このためには、過去の海氷分布を正確に知ることが必要である。過去の氷床の分布が過去の北半球の大気循環に及ぼす影響は、気候モデルにより検討が行われてきたが、海氷が及ぼす影響については検討が少ない。これは、過去の海氷分布が詳細には明らかにされていないためである。海氷プロキシをさらに洗練し、多数の地点で冬季と夏季の海氷縁の分布を復元することにより、冬季と夏季の大気循環を規定している海面上の条件を明らかにすることが必要である。

海洋堆積物の漂流岩屑(IRD)、粒度分布、酸化鉄

さらに、長期の氷床縁位置と後退過程の復元には、シベリアの大陸棚および大陸斜面での砕氷船による海底調査とマルチビーム地形データ解析が重要である。また、氷河地形の形成時期を押さえるため、海底堆積物コアを採取し層序対比を行う必要がある。未だ知られていない氷床範囲など北半球氷床発達史の新知見をたらし、古気候モデリングの検証にとっても価値が高いであろう。

### (3) アイスコア

グリーンランド氷床の変動史を明らかにしていくためには、選ばれた地点における深層掘削および多点における浅層掘削の両方が必要である。特に、大規模かつ速い流れを持つ北東部の氷流や、最終間氷期から現在にかけての連続気候記録、氷床底部氷の解析による氷床被覆開始の年代同定などが重要であり、日本としてもこれまで同様に今後の国際掘削計画への積極的参加が必要である。

氷床と気温の変動をアイスコアから精度よく見積もるには、水同位体データの正確な解釈が欠かせず、そのためには氷床変動・流動変動の考慮が不可欠である。同時に、氷床変動の精度よい復元には、復元される古環境の情報が重要な要素であり、お互いに依存している。同化手法等を用いてそれぞれの最適な再現を目指すことが今後重要である。そのためにも、グリーンランド氷床や環北極氷帽・氷河の多点における浅層・中層掘削を展開して行く必要がある。

粒子、微化石(珪藻、渦鞭毛藻、底生有孔虫、珪質鞭毛藻)、バイオマーカー(特に、IP25)、カルサイト酸素同位体比、希ガス、水銀同位体比から海氷の広がりを復元することが試みられている。また、北極海の沿岸の堆積物、流木化石、鯨化石、貝化石、波による侵食地形も海氷の分布に関する情報を提供する。さらに、陸上堆積物から得られる陸上植生に関する記録や、アイスコア記録から海水分布を間接的に推測することも行われている。アイスコアは、高時間分解能の解析が可能であり、氷の酸素同位体比、ナトリウムイオン濃度、メタンスルホン酸濃度、ハロゲン濃度を用いた海氷プロキシが提案されている。

ロモノソフ海嶺で 2004 年に行われた深海底掘削

IODP ACEX により、北極点近傍において過去 5500 万年前に遡る海氷記録が得られた(図 24 にとりまとめ、Moran et al., 2006)。IRD の出現から、海氷の形成は 4700 万年前前後に始まったことが明らかになった。1600 万年前から 1300 万年前にかけて多年氷が形成された。300 万年前以降の寒冷化に同調して、北太平洋、北大西洋、ノルウェー海では海氷が広がった。12.5 万年前の最終間氷期では、中部北極海でも季節海氷域に生育する浮遊性有孔虫が見いだされた。グリーンランド海岸の流木記録や、カナダ北極諸島沿岸のホッキョククジラの骨化石、北西航路の堆積物コア中の IP25 から、約 1 万年前の前期完新世は、多年氷が現在よりも少なかったことが示唆された。他方、チュクチ海では、渦鞭毛藻シストの群集組成から、前期完新世で海氷が多いことが示され、北極海内での海氷の消長が一様ではないことが示唆された。

北太平洋の代表的な季節海氷域であるオホーツク海やベーリング海の陸棚域は、世界有数の高い生物生産の海域として知られる。完新世の初期から中期にかけて、ベーリング海とオホーツク海では円石藻が比較的多く、完新世の後期に珪藻が卓越するようになった。この変化に伴い、生物ポンプもダイナミックに変化したと推測される。しかし、その変化要因は不明である。

北極海の海氷の復元には、北極海掘削計画(ACEX)が大きな役割を果たした。この ACEX は日米が主導する国際統合掘削計画(IODP)の一環として、

欧州コンソーシアムが実施主体となり行われた。2009 年には九州大学の高橋孝三教授らにより IODP の一環でベーリング海の掘削が行われた。他方、北極海掘削に向けて、IODP に対して日米欧の研究者が掘削提案を提出中であるが、掘削に必要な事前情報が十分に得られていないため、提案は受理されていない。北極海古海洋学研究は従来、欧米の国々が推進してきたが、近年は中国と韓国が砕氷調査船による海底地形、構造調査、堆積物コア採取を進めている。我が国独自の調査としては 2000 年代に「みらい」により海底地形、堆積物調査が行われた。2010 年代に入ってから、韓国極地研究所と北海道大学の研究者間の共同研究として砕氷調査船「アラオン」を用いた調査が行われた。今後も継続的に北極海古海洋研究を進めてゆくためには我が国も砕氷調査船を建造し、活用してゆくことが不可欠である。

#### b. 今後の研究

北極海における将来の海氷分布を予測するため、現在よりも温暖な時代の海氷分布を復元することが急務である。具体的には、中世温暖期(1000年前)、前期完新世(1万年前)、最終間氷期(12.5万年前)、鮮新世(350万年前)が研究ターゲットとして挙げられる(表1)。

海氷分布を復元するには、海底堆積物コアを採取し、海氷プロキシを用いて、海氷の状態を復元する。中世温暖期の海氷については、ノルウェー海とカナダ北

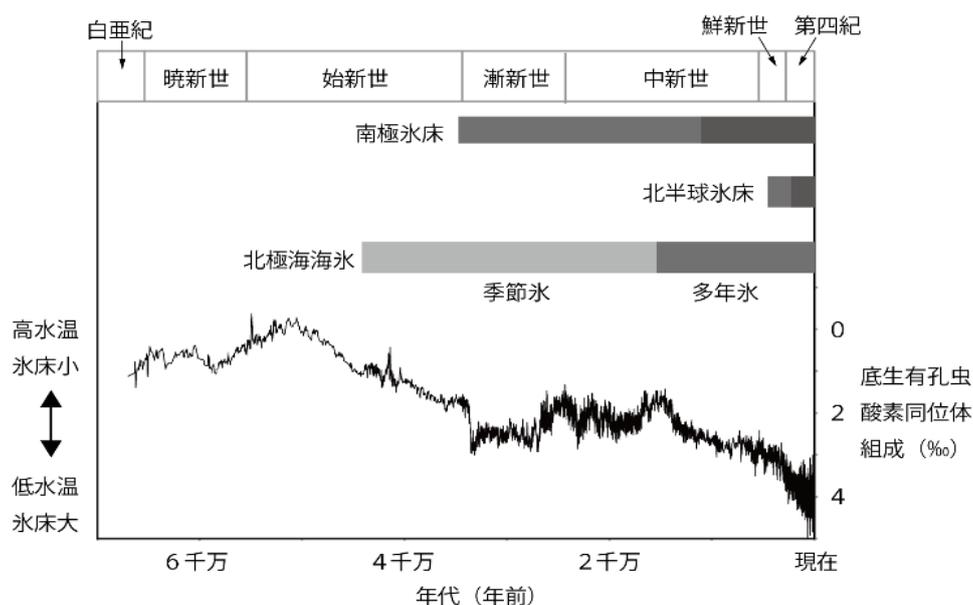


図 24 新生代における底生有孔虫酸素同位体組成の変化、南北両半球の氷床の形成、北極海海氷形成(酸素同位体データは Zachos et al., 2001 より)。

極諸島水路において海氷状況が復元されているが、他地域はまだであり、海氷の分布を描くことができない。空間的に記録を拡大する必要がある。堆積速度の速い縁辺海の窪地を狙い、堆積物コアを採取し、海氷プロキシを用いて海氷を復元してゆくことが必要である。

前期完新世については、北極海のかんりの地点で渦鞭毛藻化石を用いて海氷の復元が行われ(de Vernal et al., 2013)、対象とする4時代のうち、もっとも研究が進んでいる。渦鞭毛藻以外のプロキシを用いて、海氷復元の精密化を進めることが必要である。最終間氷期については、ノルウェー海と北極海大西洋セクターを主に、いくつかの海域で海氷復元が行われたが、共通プロキシを用いた系統的な分析が行われておらず、地点間の比較を行うことが現時点ではできない。共通のプロキシで系統的にデータを取得する必要がある。また、分布を把握するには堆積物コア数が不足しており、大陸斜面域から堆積速度の大きい地点を狙い、海底コアを採取し、年代を決め、プロキシ記録を得る必要がある。年代決定には、コア間対比が有用であるが、海域ごとの層序を確立するため、絨毯爆撃的にコアを採取し、分析してゆくことが重要である。鮮新世については、ACEX コアと偶然に鮮新世の地層が得られたコアについてしか情報が無い。ロモノソフ海嶺やメンデレーフ海嶺など鮮新統が分布しているような海域で数百メートルスケールの深海掘削を行い、鮮新世の層準を得ることが重要である。このような掘削は統合国際深海掘削計画(IODP)の一環として行われることが望ましいが、計画の実現には、有望な掘削地点の海底地形と海底構造の調査、ピストンコアの分析による予察的成果が不可欠

である。

過去の海氷分布には海氷プロキシを用いるが、新たなプロキシの開発、従来のプロキシの洗練が重要である。多数の地点で冬季と夏季の海氷縁の分布を復元することにより、冬季と夏季の大気循環を規定している海面上の条件を明らかにすることが期待される。

アイスコアは、海氷変動を高時間分解能で記録するアーカイブであるため、今後の活用が望まれる。既存のプロキシ記録を再解釈し、新規プロキシの開発とその適用が必要である。アイスコア記録から、生物生産量の復元を行うことができる可能性が指摘されており、今後の研究の進展が期待される。

ユーラシア大陸北東部に面したチャクチ海、東シベリア海、ラプテフ海などは、1990年代から2000年代にかけて特に海氷減少に伴う沈降粒子フラックスの増えている海域であり、今後の海氷激減に伴って生物生産の上昇が見込まれるホットスポットである。過去に遡った気候と生物生産ならびに物質循環の関係性について明らかにすることが期待される。

さらに、大気海洋海氷結合モデル(テーマ B)を用いた各時代のシミュレーションを実施し、古海洋データ(海氷や海洋生態系)の再現性を確認するとともに、それらの決定プロセスの理解を進めることが極めて重要である。各時代の海氷や生態系の再現実験には、大気と海洋の両方を緻密に計算する必要があり多大な計算コストがかかるため、まだ断片的にしか行われていない。古気候データの解釈を将来予測に活かすためにも、計算機資源と計算環境を整備し古気候実験を強力に進める必要がある。

#### 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?

##### a. 研究の重要性と現状

植生をはじめとした地表面状態(陸域環境)の過去の状況とその変動は、当時の気候状態を知る有力な手がかりになるうえ、気候モデルの境界条件や検証材料として用いることで気候モデルの正確さを向上させるためにも欠かせない。しかし、北極域で利用できる陸域古環境の記録は、温帯、熱帯と比較して乏しく、一部の湖沼堆積物の解析結果以外は、散点的な花粉記録や大型植物遺体記録、湖沼堆積物、あるいは氷河地形から得られる断片的・定性的な情報に留まっていた。しかし近年、永久凍土の地温プロファイル、あるいは氷と有機物

を多く含むエドマ層(テーマ 12 参照)を利用した同位体分析、マルチプロキシ分析などを用いた古環境復元の可能性が見出されている。永久凍土の消長は、気候変動への正のフィードバックをもたらすと考えられているが、永久凍土の規模や構成物質の含有量、その変化のスピードはよく理解されておらず、気候変動予測に大きな不確実性を与えている。しかし、永久凍土層を陸域環境のアーカイブとして捉え、凍土を取り巻く環境変化と気候変動との関わりを理解する試みは始まったばかりである。

アイスコアは北極域の情報をグローバルな情報と共

に保持しているため、エアロゾルや温室効果気体など、陸域に端を発した諸物質の変化を復元するのに優れ、北極域の古環境を復元する良い制約情報を与える。近年は、エアロゾルの金属同位体やブラックカーボン、有機エアロゾルなど、測定可能な項目が増えてきているうえ、従来から計測されてきたメタンや水溶性エアロゾル等も連続融解による高分解能解析が可能になってきた。アイスコアのエアロゾルやガス分析研究では日本は世界をリードしている。

数値実験による陸域古環境の再現は、近年では植生分布の変化による物理的・化学的フィードバックが導入された全球気候モデルを用いた実験が主流になってきており、古気候モデル間相互比較プロジェクト(PMIP)でとりまとめを行っている。図 25 に最終氷期最盛期<sup>89</sup>における一例を示す。モデル結果は、観測と直接の比較ができないため、過去の植生分布が確定できていない場所も多く、また、“緑のサハラ”のように、現在の気候モデルでは再現できていない課題もある(PMIP、Joussaume et al.,1999)。しかし、植生フィードバックを導入することで、広域平均した気温変化を示す古環境指標の再現性が向上するなど、気候形成における植生変化の重要性が定量的にも示されつつある(O'ishi and Abe-Ouchi, 2011)。極域気温増幅の影響により、氷期-間氷期サイクル等の古気候変動に伴う北極域の陸域環境は大きく変化したはずであり、その正確な復元とメカニズムの理解が地球気候を考える上で極めて重要である。

## b. 今後の研究

モデルによる過去の植生再現研究に関しては、平衡

状態の植生だけでなく、時間的な変遷についても検証対象として進めていく必要がある。そのためには、大気・海洋モデルと結合させるだけでなく、炭素や窒素、リンや硫黄といった植生生育の制約条件となる元素の循環とそれらとの相互影響も加味した地球システムモデルを用い、軌道要素や火山活動などを固定しない長期積分実験を進めていく必要がある。陸域環境のうち、植生分布、土壌水分、地表面風速は、ダストアロゾル発生に寄与するため、気候モデルにおけるこれらの再現性をアイスコアや海底コア等が示すダスト変化を制約条件として向上させることが期待されている(Lambert et al., 2013)。ダストの主要な発生源は、中低緯度の乾燥域であるが、高緯度は極域増幅によって気候変動幅が大きいため、過去と将来にどの程度のダスト発生源となり得るかも重要な問題である。また、永久凍土に関わるプロセスを地球システムモデルに組み込む必要もある。

氷河・氷床による情報が得られない北東シベリアやアラスカ陸域では、永久凍土による古環境復元を推進する必要がある。エドマ氷には雪氷学的な手法を、堆積物にはバイオマーカーなどを利用して永久凍土堆積層を分析する。例えば、地下水の年代測定と水安定同位体比から、更新世後期から完新世にかけての環境が復元されており(Meyer et al., 2010)、これを時空間的に広げる必要がある。永久凍土に関連した地形(周氷河地形)に基づく古環境復元は、復元精度が低く時間分解能が粗いことが問題であるが、地域的な分布に関する制約条件を増やす上で有用であり、今後再検討されるべきである。また、永久凍土の地温プロファイルに基づく地表面温度履歴の復元(Pollack et al., 2003)は、古環境データの少ないシベリアなどで意義が大きい。同

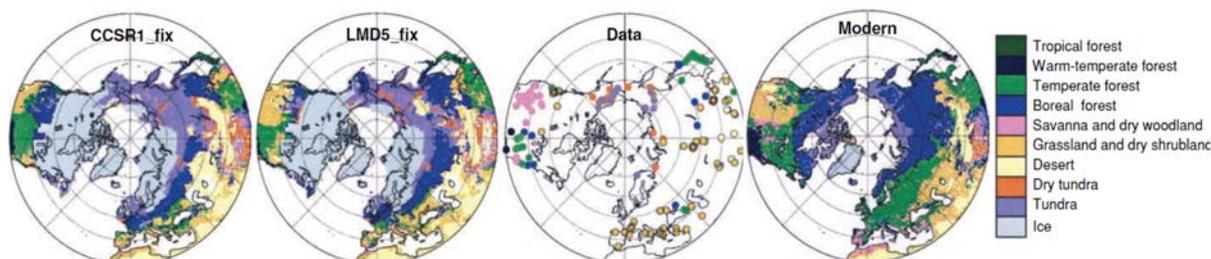


図 25 動的植生モデルによる LGM および現代気候の植生分布再現実験の例(Harrison and Prentice, 2003)。左から 3 つはそれぞれ日本とフランスのモデルそして古環境観測データに基づいて推定された LGM における土地被覆タイプを示し、右は現代気候における土地被覆タイプを示す。

<sup>89</sup> 最終氷期最盛期: Last Glacial Maximum(LGM:約 2 万年前)

様に、永久凍土の深さ情報からも過去の地表面温度復元に制約を与えることが可能と考えられる。永久凍土が存在する場所の多くは、ヘリコプターやスノーモービル以外ではアクセスできないため、凍土掘削や路頭調査は強力なロジスティクス支援を必要とする。

メタンの生成と消滅は、関与するプロセスが限定的であるため、モデルにおける炭素循環の制約条件として用いることができる見込みがある。アイスコアから得られるメタン濃度を制約条件として、特に高緯度における湿地帯と植生、土壌有機炭素の分布の再現性向上が期待できる。一方、エアロゾルの同位体比は、その起源や輸送過程を知る手がかりとなる。例えば、硫酸エアロゾルの硫黄同位体比は、石膏・火山・海洋生物などの起

源や輸送過程によって値が異なり、ダスト(シリカ鉱物など)のストロンチウム・ネオジウム同位体比はダストの起源となる大陸や地域で値が異なるため、起源推定に有効である。近年の分析技術の向上により、従来より高時間分解能・高精度での同位体比データが得られつつある。また、有機エアロゾルには起源が限定された化合物が多いため、アイスコア分析から、森林火災や土壌ダスト、生物、人間活動を起源とするエアロゾルの変遷を、分離して復元できる可能性がある。アイスコアに含まれる硫酸イオン濃度と硫黄同位体比、有機物組成とその炭素同位体比を組み合わせるなどのマルチプロキシ解析や、気体成分の同位体による放出源推定等もさらに進展の必要がある。

## 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？

### a. 研究の現状

現在、北極域での大気循環の経年変動では AO が卓越しているが(テーマ 5 参照)、海水輸送や太平洋から北極への暖水流入などには、その他の変動モードの重要性も指摘されている(テーマ 1、テーマ 2 参照)。将来の気候を考える上で、数年～数百年スケールの自然変動を理解することは非常に重要であるが、長期間にわたるその統計的特性や変動メカニズムはよくわかっていない。その一つとして、測器観測データの短さがある。また、観測データには温室効果気体の増加など人間活動による影響も含まれており、原因の特定は複雑である。過去数千年に遡る古気候復元や古気候モデリングはこうした問題を克服する手段を提供し、太陽活動や火山噴火に対する応答を含めた自然変動の理解につながる。その上で人間活動による影響を特定することによって、将来予測に役立つであろう。

北極振動(AO)は、本来約 10 日程度の時間スケールを持つ大気循環の内部変動(モード)であるが、数年～数十年といった長期的な変動も示す。たとえば、20 世紀末には数十年の冬のトレンドが見られ、21 世紀の将来予測では、正の AO トレンドが見られる。より長期の変動特性を調べるために、過去数百年にわたり代理指標を利用して復元を試みた研究がいくつかあり、北大西洋に特化した北大西洋振動(NAO)については比較的多くの時系列データが復元されているものの、北極域全体の AO としての復元は数が限られている。

気候モデルを用いた研究は、最近千年にほぼ限られる。これは、計算機資源の問題もあるが、気候モデルを駆動する太陽活動と火山噴火の外部強制力データの不確実性が大きいことも原因として挙げられる。IPCC 第 4 次評価報告書が出版された 2007 年には、比較的簡易な気候モデル(EMIC)が中心であったのに対して、第 5 次評価報告書では大気海洋結合大循環モデル(AOGCM)による結果が多く掲載され、複数モデルを用いた時空間変動パターンの解析も可能になってきた。その背景には、国際プロジェクトである第 3 期古気候モデリング相互比較プロジェクト(PMIP3)が強制力データを整備した上で実験設定を提案し、第 5 期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)がこれを後押ししたことがあった。日本の AOGCM も過去千年実験に参加し、CMIP5/PMIP3 に計算結果を提供・公開している(Sueyoshi et al., 2013)。単一モデルを用いた研究では、太陽活動と AO の関連性や火山噴火と AO や太平洋十年規模変動(PDO)との関連性が既に示唆されている。このような背景の下、マルチ(複数)モデルの解析が本格的に始まりつつある。

グリーンランドの気温変動が NAO に影響されることが知られており、古気候の分野でも、グリーンランドアイスコアの酸素同位体比が NAO の指標とよく一致することが報告されている。また、日本を中心とした研究チームにより、数十年から百年規模のグリーンランドの気温変動が、太陽活動によって引き起こされた NAO 様のパタ

ーンによって北半球傾向からずれていたことが提案されている(Kobashi et al., 2013)。

## b. 今後の研究

気温などの気候変数は、全球的な気候変動と地域的な気候変動の両方の影響を受けるため、大気循環の変動など地域的な気候を復元するには、空間パターンを意識したうえで多地点から代理指標を取得することが望ましい。これまで代理指標データの取得は、主に北半球中緯度に限られ、北極域については十分に行われてこなかった。PAGES の下で行われている過去 2000 年を対象とした 2k プロジェクトなどに積極的に参加し、北極域をカバーする多地点統合データセットを構築することが重要である。

長期観測データが乏しい北極域においては、アイスコアから得られる古気候・古環境情報が非常に有用である。グリーンランドでは、これまでの氷期-間氷期サイクルのような長期変動の復元を目的とした深層コア研究に加え、数百年の環境復元を目的とした多点での浅層コア研究が、米国やドイツを中心に行われている。NAO とその影響については、グリーンランド、カナダ、スバルバル諸島などでアイスコアの掘削と解析を進め、数十年規模の NAO の地域的なパターンや原因を明らかにすることが重要である。

グリーンランドを除く環北極圏の氷河・氷帽については、ICAPP<sup>90</sup>のもとで、1990 年代~2000 年代初頭に北極カナダ、北極ロシア、スバルバル諸島において日本を含む各国がアイスコア研究を行っていた。2000 年代以降に現れた急激な気候変動シグナルの復元、分析技術の発展によって測定可能になった新しい指標(ブラックカーボン、微量金属、有機物、 $\delta^{17}\text{O}$  など)による環境復元を念頭に、環北極圏の氷河・氷帽での再掘削が期待されている。高緯度山岳地域(カムチャツカ、北米(アラスカ、ユーコン、ブリティッシュコロンビア)、コーカサス、モンゴル、アルタイ)においては、日本を含めて各国が散発的にアイスコア研究を行ってきた。今後は、統合的なデータの理解、国際的な協力体制による戦略が必要となる。

アイスコア中で気温の指標として広く用いられている氷の酸素同位体比は、地域的な気温のみならず、水蒸気の輸送経路や起源の温度などにも影響される。水同

位体に代わる温度復元手法として、アルゴンと窒素の同位体比に基づく物理的な手法が開発されてきた(Kobashi et al., 2013)。この手法をさらに多くのコアに適応し、地域的な気候変動パターンを復元することが重要である。気体解析による気温データを、酸素同位体比データを同位体モデルによりデータ同化手法で解析する際の制約条件として用い、北極域の気温や大気循環の変動性を復元し考察を進める必要がある(Yoshimura et al., 2014)。気候モデル研究の解釈において大きな制約になっているものの一つに、モデルの入力データとなる太陽放射量や火山噴火エアロゾルの変動など、外部強制の不確か性が非常に大きいことが挙げられる。最近の気候シミュレーションでは、複数のデータセットが用いられているが、計算機資源の制約により必ずしも網羅的に実験が行われていない。気候モデル応答と観測データの有意義な比較をするには、外部強制データの精度向上が重要である。火山強制力は、南極の多数のアイスコアとグリーンランド NEEM コアを合わせた解析から、精度を大幅に向上させたデータセットが発表され(Sigl et al., 2014)、今後はさらなる定量的推定のためにグリーンランドのデータの拡充が待たれている。また、太陽活動や火山噴火は、成層圏の応答を通して対流圏の気候に影響を与えることが多くの研究から示唆されている。このため、成層圏を十分に解像するモデルでの実験が期待される。さらに、この時代は比較的外部強制が弱いと、有意な気候応答シグナルを抽出するには、多数の数値実験が必要であり、物理過程は共通しつつ、精緻な高解像度モデルと比較的計算機負荷の小さい中解像度モデルの併用などに向けた整備も必要である(テーマ B 参照)。さらに、数十年から数百年の変動に関しては、海洋深層(AMOC、北大西洋深層循環)が大きな役割を果たすと考えられ、国際的に研究が進められつつある。大気海洋結合モデルによる多数の実験と古気候データを活かした研究が必要であり、そのための計算環境の整備が不可欠である。

こうした研究により、過去において自然変動の強度や空間パターンが現在とどのように異なっていたのか、なぜ異なっていたのかを明らかにすることが期待される。

<sup>90</sup> ICAPP: Ice-Core Circum Arctic Paleoclimate Program

## 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

古気候学者は、様々な古気候アーカイブから得られたプロキシ(代理指標)を用いて過去の気候を復元している。古気候アーカイブには、アイスコア、海底堆積物コア、湖底堆積物コア、石筍、レス堆積物、サンゴ年輪、樹木年輪などがある。例えば、海底堆積物に含まれる底生有孔虫の酸素同位体比は、陸上氷床体積のプロキシである。古気候アーカイブの年代測定も重要であり、堆積物の年層計数や、放射性元素の分析(半減期を利用)、過去の日射変動(天体計算で求まる)との対比など、様々な手法がある。

プロキシは古気候研究に中心的な役割を果たしているが、プロキシ記録は測定誤差とキャリブレーション誤差を伴い、誤差評価自体が困難な指標も多い。今後は、プロキシ解釈の高度化のため、これまで以上にモデルとの連携が重要となってくる。重要課題としては、①現在におけるプロキシ形成・保存過程の観測研究(水蒸気や降水の同位体、大気組成、エアロゾルなど)、②エアロゾル同位体比(硫黄、鉛等)による起源推定手法の開発、③新たな化学成分や気体成分、同位体比データを得るための分析方法の開発、④高時間分解能の試料解析、⑤年代推定手法の開発、等が挙げられる。

以下では代表的なプロキシについて解説する。

#### a. アイスコアの古気候プロキシ

アイスコアの気温プロキシとして、水の酸素安定同位体比( $\delta^{18}O$ )が広く用いられる。しかし、 $\delta^{18}O$  は気温以外の要素(例:降雪量の季節性の変化)にも影響を及ぼすため、掘削孔温度や気体同位体比など別の手法によって校正する必要がある。つまり、 $\delta^{18}O$  による正確な気温推定には水循環システム全体の考慮を必要とする。最近では、酸素・水素同位体比と単純なモデルを用いて、アイスコア掘削点と水蒸気の起源の温度を同時に推定する試みも行われている上(Uemura et al., 2012)、同位体を組み込んだ大循環モデルで計算された降水の同位体比が観測データと合うように循環場の時空間分布を修正する、データ同化手法も有力視されている(Yoshimura et al., 2014)。

アイスコア中のエアロゾルは、固体微粒子や液滴など多様な化学形態をしている。通常のアイスコア分析では、氷を融解した溶液中のイオン濃度を測定するため、大気化学環境のプロキシとなる水溶性エアロゾルの化学形態が失われてしまう。近年、氷を昇華させエアロゾル粒子を直接分析する手法が開発され(lizuka et al., 2012)、グリーンランド NEEM コアにも応用され始めた。重金属や有機物、ブラックカーボンの各濃度、エアロゾルの同位体比による起源や輸送過程の復元など、新しい手法も開発されている。アイスコアの気体分析からは  $CH_4$  や  $N_2O$  の濃度復元が活発に行われ(NEEM community members, 2013)、最近では同位体も分析されつつある。窒素や希ガスの濃度や同位体比からは、気温復元や表面融解の検出が可能になってきた(Kobashi et al., 2013; NEEM community members, 2013)。

これらのプロキシ研究の進展には、同位体モデルや輸送モデルの開発とともに、現在の北極域での水蒸気・降水・雪・エアロゾル等の観測や、諸物質の氷中への保存プロセスの理解、多点におけるアイスコア掘削・分析など多面的な研究展開が必要である。日本においてもアイスコア連続融解システムによる氷や気体の超高分解能分析が実用化しつつあるが、多数のコアについて多成分の分析を進めるため、さらなる開発が重要である。

#### b. 海底堆積物の海氷プロキシ

堆積物の海氷プロキシとしては、海洋堆積物の漂流岩屑(IRD)、酸化鉄粒子、微化石(珪藻、渦鞭毛藻、底生有孔虫、珪質鞭毛藻)、バイオマーカー(特に、IP25)がよく用いられる。IRD は海氷や氷山により運搬された堆積物のことで、砂( $>63\mu m$ )よりも大きい粒子を含むので、ふるいで $>63\mu m$  粒子を分画し、その重さを量り、IRD 量とする場合が多い。酸化鉄粒子は北極海大陸棚に広く分布するが、場所によりその化学組成に特徴がある。酸化鉄粒子を磁石により選別し、その元素組成を分析することにより海氷の形成域を推測することが行われている。珪藻、渦鞭毛藻、珪質鞭毛藻などの植物プランクトンは海氷のないところで繁茂するので、その化石は季節的な海氷の消失を示す良い指標となりうる。底生有孔虫も海洋表層から沈降する有機物の多いところで繁殖するので、その化石は季節的な海氷の消失を示す指標である。IP25 は海氷下部に成長する微細藻類アイスアルジー(ice algae)に特徴的な脂質であり、その存在から海氷の融解が活発な海域を特定することができる。

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