

要旨

テーマ 5 では、気候システム研究の中で注目を集め始めている北極・全球相互作用について議論する。これまでの研究においては、北極・全球相互作用に関しては、あまり関心を払われない傾向にあった。しかし、最新の研究により、北極域の大気・海洋などの循環が、他地域へ様々な面で重要な影響を及ぼしうる事が明らかになりつつある。例えば、近年、北極域の海氷減少が冬季東アジアモンスーンに与える影響についての議論が活発化しており、異常気象などの季節予測の改善に寄与する可能性がある。また、数年から数十年以上の時間スケールの気候変動(地球温暖化も含む)のメカニズムを理解するためにも、北極・全球相互作用のプロセスを理解する必要性が、様々な視点から指摘されるようになってきている。

ここでは、まず、気候システムを形成している対流圏・成層圏大気、海洋、陸域及び超高層大気のそれぞれの圏で起きている北極・全球相互作用を取り上げる。対流圏・成層圏大気の研究では、北極を取り巻く偏西風及び極渦の様々なテレコネクションパターンや気候変動モードの力学的過程の解明などが重要となる。これは、大気と他の圏(海洋、陸域、超高層大気)との相互

作用や、今世紀に予測される気候変動などを考える際に基礎的な知見を与える。

海洋分野では、大西洋・太平洋間の海水循環、深層水形成、中緯度海洋大循環などの研究が重要になると思われ、そのために、研究船等の観測インフラの整備や高解像度モデルの利用とそれによる検証が必須であろう。陸域の研究分野では、積雪の変動による広域エネルギー・水循環への影響や、植生や凍土を含む土壤の変化による炭素収支等の物質循環への影響などを定量的に評価するための研究が注目を集めている。これまでも現地観測やプロセスモデルによって精力的に研究が進められてきたが、中低緯度を含む広域での陸域プロセスの気候影響を定量的に評価するには、陸域プロセスの広域評価手法の確立も含めて、更なる基礎的な研究が必要とされている。超高層大気分野では、宇宙空間から極域へのエネルギー流入に起因する中低緯度の超高層大気変動、温室効果気体の増大に伴う超高層大気の寒冷化、及び、極域超高層大気の下層大気に及ぼす影響等の研究が重要になると思われる。超高層大気の気候システムにおける役割については、発展途上の興味深い研究テーマが様々な存在し、広域

地上観測ネットワークや複数機の人工衛星等によるグローバルかつ多角的な観測の整備や光化学過程を含めた数値モデルの利用等により、さらに理解を深化させねばならない。

次に、古くて新しい難題として我々に残されている、それぞれの圏の間に見られる相互作用(すなわち多圏相互作用; 図 17)の研究を取り上げる。対流圏大気は、その存在の物理的位置から、相互作用において重要な役割を果たす。すなわち、成層圏、または超高層大気など「上方」とも相互作用しうるし、または海洋や陸域などの「下方」とも相互作用しう

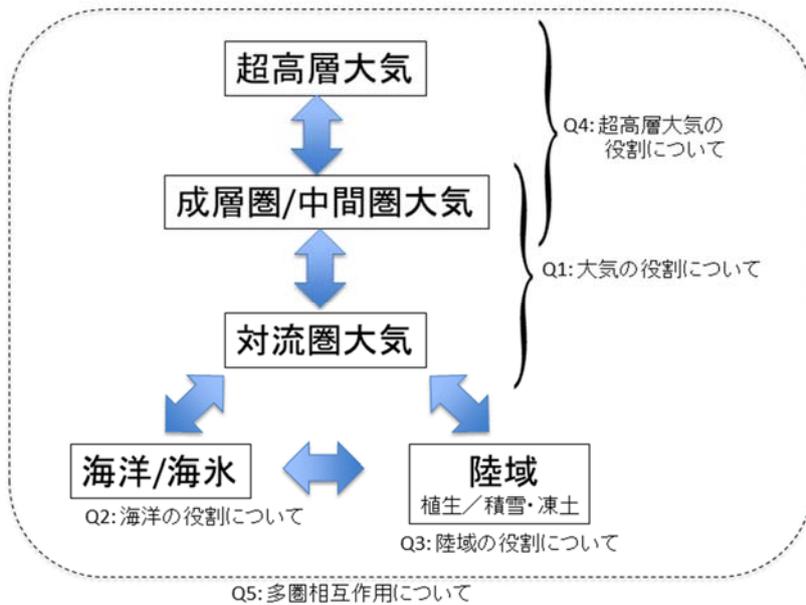


図 17 大気・海洋・陸域等の複数の圏の相互作用の模式図

るという事である。その一例として、上で例に挙げた北極海氷の減少に伴う冬季東アジアモンスーンへの影響の研究があるが、他のテーマに関しても研究のさらなる発展が期待される。

北極域の変動の影響がまず現れるのは、気候変動のシグナルが大きく現れ易い極東域などの中緯度域であり、このテーマにおける日本の研究コミュニティが果たすべき役割は大きい。実際、例に挙げた、北極海氷が大気循環に及ぼす影響の研究に関しては、日本の研究者による貢献が非常に大きいという事実がある。これらの蓄積などを基にして、我々は気候システムの中での北極気候システムの役割の理解を進めていくべきであろう。その結果として、将来の北極域のみならず全球気候予測の高度化・高精度化が達成されると考えられる。

ここでは、次の 5 つの鍵となる科学 Questions を取り上げる。

まえがき

ここでは、北極・全球相互作用について議論する。これまでの気候変動、または地球システム研究では、エルニーニョ/ラニーニャに代表されるような熱帯循環から全球への影響に注目が集まる傾向にあった。しかし、近年の北極域での急速な海氷減少や環境変化が進行するにつれて、冷源としての北極域の役割とその中低緯度への影響に注目が集まり始めている。実際、北極海の海氷減少の遠隔影響が、大気循環の変動を通じて冬季東アジアモンスーン活動に現れているとする研究が近年複数発表される等、北極と他地域の各々の

Q1: 大気の役割について：北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？

Q2: 海洋の役割について：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？

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？

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？

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、海洋のどれを経由する影響が大きいのか？

循環の相互作用研究が日本を中心に盛んになりつつある。このような研究は、異常気象や気候変動の解明と密接に関係する事から、学術的な関心にとどまらず、社会的な関心も高い課題であり、今後の研究の進展が期待される。以下、大気、海洋、陸域、超高層大気のそれぞれの圏における北極・全球相互作用を、科学的疑問(Q)に答える形で議論する。さらに Q5 では、各圏間で見られる相互作用を議論する。このテーマ 5 の議論が、北極と全球のそれぞれの循環の相互作用の概要を捉える研究指針の一助となる事を期待する。

Q1: <大気の役割について> 北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？

a. 研究の重要性と現状

テレコネクションパターン(「テレコネクション」と呼ぶ事もある)は、全球規模の大気循環変動に見られるある特定のパターンの事であり、北極を取り巻く偏西風及び極渦の変動モードとの解釈も可能である。以下に挙げるように、様々なテレコネクションが過去に報告されており、これらは異常気象の発生と密接に関係しているとされている。また、数年から数十年規模の気候変動にもテレコネクションが重要な役割を果たす可能性が指摘されて

おり、気候変動モードと密接な関係があるとする研究者もいる。テレコネクションのうち、北極振動⁸²(AO)、または北半球環状モード⁸³(NAM)は過去 15 年ほど最も研究者の注目を集めてきたものの一つであろう。加えて、北大西洋振動(NAO)、北太平洋・北アメリカ(PNA)パターン、西太平洋(WP)パターンなどが異常気象や気候変動との関連で注目される事が多い。また、それと関連し、対流圏・成層圏力学結合の研究も最先端の研究テーマの一つとして浮上している。それまでの常識で

⁸² 北極振動: Arctic Oscillation(AO)

⁸³ 北半球環状モード: Northern Hemisphere annular mode(NAM)

は、成層圏循環は対流圏循環から一方的に影響されるのみと思われてきたものが、逆のプロセスも注目されるようになった事は画期的であろう。一方、海氷減少や積雪変化などにより引き起こされる大気変動の研究、例えば冬季東アジアモンスーンへの影響の研究なども最近注目を集めている。

b. 今後の研究

これから必要とされる研究とはどのようなテーマが考えられるだろうか。AO、WP パターンなどのテレコネクションパターン(または気候変動モード)の力学的過程は、まだ不明な部分が多く、それらの解明が大気循環のより高度な理解や予測可能性の向上に必須である。例えば、熱帯域の海水温変動とこれらのテレコネクション(または気候変動モード)との関係という基本的な問題ですら我々は答えを持っているとは言いがたい。また、これらのテレコネクション(または気候変動モード)の研究に加え、最近注目を集めている「北極低気圧」、夏季ポーフォート高気圧、北極上のストームトラック、及び成層圏突然昇温の頻度(の将来予測)などの循環要素(素過程)の解明も重要であろう。

最近注目されている、バレンツ海などの北極海海氷の変動(減少)が、冬季東アジアモンスーンなど大気循環に与える影響についての力学的理解もまだ十全とは言えず、以下のような重要な課題が残されている。例えば、北極海海氷の減少に伴う地表付近の熱的条件の変化する領域の水平スケールは、大規模大気循環の水平スケールと比較すると相対的に狭小である事が多い。また、極域・寒冷域の下部対流圏の西風は一般的に非常に弱い。双方の条件とも、大気にロスビー波応答を引き起こすには不利な条件であるのにも関わらず、なぜ海氷変動が大規模大気循環を引き起こす事ができるのか、その力学についての解明が待たれる所である。また、対流圏下層の渦位(PV)分布など基本的と思われるテーマについても十分に調査されていない部分がある事も、海氷から大気への力学的影響の理解を妨げている可能性がある。さらに、現在気候に見られるとされる「北極海氷減少が大気循環変動(例えば、日本付近の寒冬)に繋がる」現象が、将来気候においても変化する

のか(または、しないのか)、また、変化していくとするとどの様に変化していくのか、という視点も重要な研究課題となろう。加えて、近年北部ユーラシア全域に見られがちな異常寒波や、2014年冬季の北米の異常寒波などの現象に対し、どの程度、北極域の循環変動が影響を及ぼしているのかも興味ある課題である。

上記のような海氷の影響に加え、陸域の変化が大気循環に与える影響の調査も今までそれほど注目されておらず、今後の発展が期待される。例えば、近年及び将来の暖候期の大陸上の積雪減少が、その後の北極域、低中緯度の気候にどう影響するか、もしくは熱波やブロッキング高気圧などの発生頻度に影響しうるか、などという研究課題が考えられる。

対流圏・成層圏力学結合の研究もさらに深化させる必要がある。対流圏から成層圏への影響の研究では、今まで注目されてきたロスビー波の鉛直伝播のみならず、等価順圧的な大気循環変動も惑星ロスビー波の鉛直伝播に影響を及ぼす事が明らかになりつつある。しかし、その研究は緒に就いたばかりの状況である。力学結合に関して一つキーワードとなりうるのは、「惑星ロスビー波の変調」であり、これは北極関係の研究のみならず、ENSOの中高緯度への影響や、またはその影響の「季節内シフト」(intraseasonal shift; 例えば、Fereday et al., 2008 や Ineson and Scaife, 2009 など)などの研究でも重要となろう。また、成層圏から対流圏への影響の力学過程の解明も大変重要である。そのためには、大気循環のラグランジュ的循環(物質循環)の解明が大事な要素の一つとなると思われ、それを記述できる理論の発展やモデルの開発が必要となる。加えて、成層圏よりもさらに上層の中間圏以上も考慮に入れた上下結合の解明も重要である。中間圏を考察する際に重要なのは重力波であり、その活動度及び基本場とのフィードバック研究が進展する必要がある。

北極海海氷変動の大気循環変動に与える影響の研究では、日本の研究者による貢献が大きい。これに代表されるように、日本の研究者による対流圏／成層圏大気の北極・全球相互作用に対する関心は大きいと思われ、今後とも研究の発展に日本の研究コミュニティが果たす事のできる役割は大きい。

Q2: <海洋の役割について> 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？

a. 研究の重要性と現状

北極海から海洋を通じた全球との相互作用を考えると、北大西洋深層水の形成と循環、および、太平洋から流入し北極海の中で異なる水塊と混ざりながら大西洋に流れ出る経路が主たるものである。さらに、海洋は循環が大気の状態に大きく影響されるだけでなく、海面水温などから大気にフィードバックもするはずである。これらの要素について、将来起きる可能性にも仮説を含めて言及し、研究方針を提起する。

(1) グリーンランド海における北大西洋深層水形成

図 18 に北極海循環を模式的に示す。北極海の表層(200m 深程度まで)とその下の中層(700m 深まで)では、太平洋起源の海水に河川水を加えた低塩分水が表層(北極海面混合相)とその直下であり、中層に北大西洋から流入する高塩分水との密度差によって駆動される流速場を形成して、風応力による移動も合わせ、海水分布を決める主要要素となっている。北極海で形成した水塊が大西洋に多く流出すると、グリーンランド海における北大西洋深層水を低塩化し形成量を減らす。この変化は長い時間スケールを持つものの、大西洋ではすでに検知されており(Dickson et al., 2002)、全球海洋にも徐々に広がるであろう。

一方、北大西洋深層水に起源を持つノルウェー海深層水は、フラム海峡からナンセン海盆、アムンゼン海盆の下層に流入し、北極海下層の水質を支配する。ただし、地球化学トレーサーに基づいて推定したところ、中層の大西洋水に加えて太平洋水の影響も示唆されてい

る。北極海下層から流出する水塊は上部北極海深層水とよばれ、ノルウェー海深層水と入れ替わる。

地球温暖化の進行に伴い、さらに海氷と低塩分水の流出およびグリーンランド氷床の融解が促進されることによって、深層水は低塩化し深層下部まで到達しなくなる。北大西洋深層水は 50 年前から低塩化しており、これが続くとグリーンランド海の下層から北極海下層にあふれ出る海水は密度が低下し、その流れも弱くなる(図 18 の青色流)。それに伴いカナダ海盆からマカロフ海盆に出てくる流れ(図 18 の黄色流)も弱くなるのが想定される。最初はその直上にある上層・中層にも大西洋から北極海に向かう流速が加わるだろうが、中層に流れ込んでいる大西洋水(図 18 の赤色流)と表層に流れ込む太平洋水(図 18 の緑色流)は北極海で滞留する傾向となり、北極海の上層・中層の密度分布とそれに伴う流れを変えてしまう可能性もある。十年以上の時間で起こる変化に関する仮説のひとつとして考えられるのは、上層・中層の密度分布の強化により、北極海・大西洋間の海水交換が増加し、下層の海水交換の役割が低下することである。この場合に大西洋水による北極海蓄熱量は増加し、一部は下層と混合するであろうが、上層と混合することも考えられる。その結果として、海氷を減少させる可能性があり、その定量化に向けた取り組みが求められる。一方で、全球海洋コンベアベルトに乗って流れる北大西洋深層水はさらに低塩化することにより、大西洋を南下する時、その上部に位置する水塊との混合が盛んになると、コンベアベルトを特徴づける水質が見つけにくくなることも考えられる。

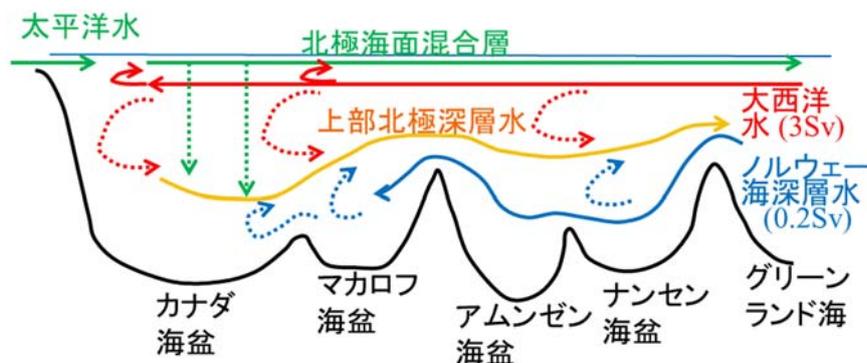


図 18 ベーリング海峡から Fram 海峡に至る断面における北極海循環。全水深は 4000m ほどであり、赤線の Atlantic Water が 300~700m を占めている。実線は明瞭な海流、点線は弱い流れと海水の混合が混在していることを示す。点線で示された海水の振る舞いが特に解明されていない。

(2) 太平洋から大西洋への海水通過

ベーリング海峡は幅わずか 85km で、北極海への太平洋水の平均流量は 0.8Sv ($1\text{ Sv}=1\times 10^6\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ 、黒潮流量の約 3%) でありながら、北極海や大西洋の気候システムにおいて重要な役割を持つ。例えば、最終氷期の急激な気候変動であるダンスガード・オシュガーサイクルは、ベーリング海峡の閉鎖に伴う北極海—太平洋間の淡水フラックスの遮断で起きることが示唆されており (例えば、Hu et al., 2012)、また、太平洋水がもつ熱量が太平洋側北極海における海水激減の主要因であることが報告されている。

この太平洋水の流入には、「太平洋・ベーリング海」と「北極海内部・大西洋」との海面力学高度差に起因する長周期変動 (Steel and Ermold, 2007) と、ベーリング海峡沿岸部における地衡流調節 (海上風に対する海の応答) に起因する短周期変動がある。主な駆動源である海面力学高度を変化させる要因には、グリーンランド氷床融解や海水流出に伴う北大西洋への莫大な淡水加入、降水量・蒸発散量の変化による各大洋の貯淡水量変動、海洋貯熱量変動、大気循環の変化が挙げられる。地球温暖化の結果として、太平洋からの流入を増加・減少させる要因が混在しており、今後の変動とその要因を解明するには、大気—海水—海洋—陸面を網羅的に扱う分野横断的な観測研究およびモデル研究が必要である。

(3) 中緯度の気候海洋大循環を介する北極へのフィードバック

北半球に現れる大気循環の変化、そしてそれが影響を及ぼす中緯度海洋の大循環を通じたフィードバックに注目する。数年から数十年の周期を持つ大気変動 (AO、PDO 太平洋十年規模振動、PNA など) が地球温暖化の進行に伴ってどのように変化するかについては、いくつかの異なる見解が示されている。例えば、AO が正に偏り (北極海上空の極渦が強まり) 中緯度域が暖冬になるとするモデル予測に対し、21 世紀に入って負になることが多いデータ解析結果も報告されている。AO のように自然変動が大きい現象については、モデルと観測データを合わせた慎重な検討が必要な段階である。さらに、このような大気循環変動は海洋循環を変動させるので、中緯度から亜寒帯に広がる海水の北上が数十年周期で変動することになり、北極海まで影響を及

ぼす可能性に留意する必要がある。

地球温暖化実験に参加したモデルの間で共通に示されているのは、今世紀後半の気圧変化として、ベーリング海上の気圧低下、および北大西洋亜寒帯域の気圧上昇である (Chapman and Walsh, 2007)。ベーリング海上の気圧低下は上記 (2) につながる。大西洋では、海面水温の上昇が陸面より遅れるため、地表面気圧は上昇傾向を示す。その結果として、メキシコ湾流の流量が増加し、高温海水が現在より北上すると予想される。しかし、今世紀後半に北極海上の大気が非常に温暖化していると、大西洋水の北上する量が増えたとしても、北極海流入水の熱的効果は増大しないであろう。また、高塩分の大西洋水がフラム海峡近くまで北上するため、大西洋・北極海の海水交換は塩分差によって駆動され続けるという仮説を立てて、今後の研究の方向性を探ることに役立つ。

b. 今後の研究

上に示した原理的な推定と将来予測モデルに準拠する仮説に対して、「水温の急激な上昇によって水温駆動循環になる」など、いくつかの異なる仮説も提案されるであろう。モデル研究はモデルの精緻化だけでなく、仮説を立て確かめることによっても発展することを考え、客観的な視点を忘れることなく大胆に進めるべきである。海洋と陸域の温暖化応答が異なることにも注目する場合は、大気と海洋だけではなく陸域の植生や積雪の表現を適切に含む地球システムモデルの利用が必須である。

現場観測による循環と水塊のモニタリングを進めるには、研究船が必須であるが、我が国は研究砕氷船を持ったことがない。それに加えて、自動昇降型流速計、自動走行型採水装置などの開発が急務である。さらに、長い時間スケールを持つ変動をモニターするには、化学トレーサーの利用も進める必要がある。

北極海・大西洋間の海洋循環のように、中深層の流動が海底地形に大きく影響される海域では、高解像度モデルの利用と検証を格段に進展させる方針を立てるべきである。また、その結果を検証するには、鉛直密度勾配を持つ海洋内部の流速分布を基本的な鉛直モードに展開するなど、海洋物理学の基礎となる理論に基づいた考察も重要である。希少データによるモデルの客観的な検証が鍵となる。

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？

北極・全球相互作用における陸域プロセスの影響は、植生や凍土を含む土壌の変化による炭素収支・物質循環の変化や、積雪・植生の変動によるエネルギー・水収支の変化が、大気の循環場や広域エネルギー・水循環を変化させ(図 19)、他地域や中低緯度の気候に影響を及ぼすことになる。従って、その影響を定量的に解明するには、地表面状態を広域的に把握するとともに、広域スケールで重要なプロセスを特定することなどが必要になる。しかし、地表面状態は水平の非一様性が大きいので、現地観測に基づく物理量の変動特性や相互作用プロセスに関する知見を広域的に定量評価すること(スケールアップ)が困難である事が大きなボトルネックとなっている。スケールアップには、(i)プロットスケール(数 10 から数 100 メートルのスケール)における観測や詳細な陸面プロセスモデルを用いた鉛直 1 次元実験によるプロセスの解明、(ii)領域スケールでの広域観測網や衛星データなどを活用した実態解明ならびに多地点・多モデルによる比較検証、(iii)領域モデルや全球モデルによる相互作用を含めた感度実験による影響調査など、多様なアプローチを組み合わせる必要がある(図 20)。

a. 植生

(1) 研究の重要性と現状

陸域植生は、CO₂の吸収・放出に伴い全球の炭素収支や物質循環に影響を及ぼし、人間活動による CO₂ 排出の吸収源(シンク)として注目されてきた。また、北半球高緯度地域では、植生活動の季節振幅が大きいことから、全球の

大気中 CO₂ 濃度の季節変動にも大きく寄与しているとされる。植生動態の広域的な分布と変動については、衛星観測によるデータが蓄積されてきており、例えば、最近数 10 年間に於いて、アラスカの北極沿岸でのバイオマスの増大傾向なども指摘されている(Tape et al., 2006)。地球温暖化予測では、寒帯林の分布域が北進しバイオマスが増大すると考えられている一方で、2050

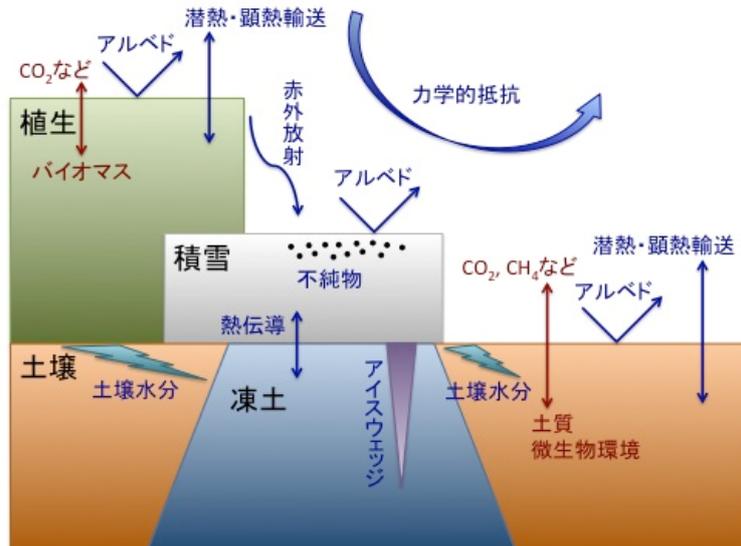


図 19 陸面プロセスが大気に及ぼす影響

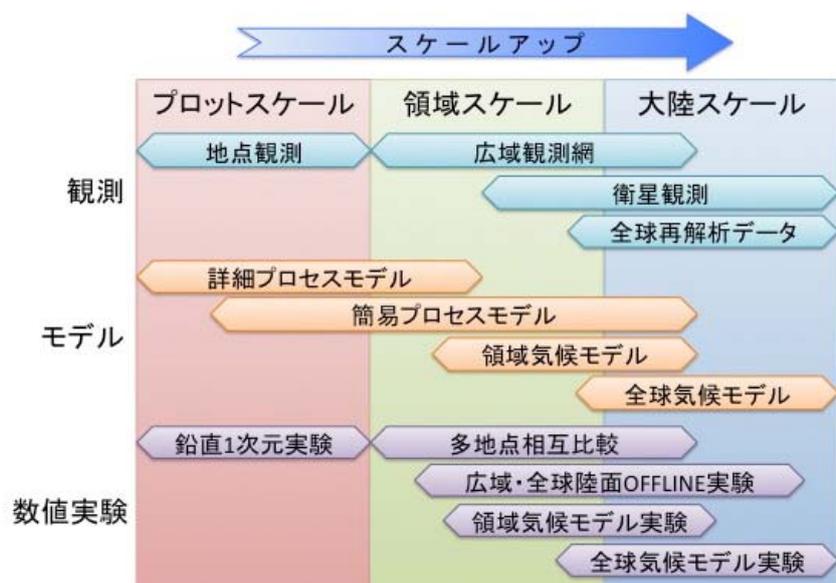


図 20 陸域プロセスのスケールアップ

年頃をピークに土壌も含めたバイオマスは頭打ちになるとする予測もあり、地域毎の変動傾向を含む定量的な評価にはまだ大きな不確実性が残っている。それ以前に、陸域において CO₂ のシンクがどこにあるのかさえ、はっきりわかっていない。

このほか、植生の変動はアルベドの変化を通じてエネルギー・水収支にも影響を及ぼすことが知られている。特に、雪面から突き出た植生によって地表面全体としてのアルベドが減少する効果は、広域エネルギー収支に大きな影響を及ぼすが、定量的な評価はまだ十分にされているとは言えない。また、植物体からの赤外放射によってその近傍の雪面の放射収支が変化したり、植生による吹きだまりの形成や融雪の促進などによって積雪深の非一様性が増大したりすることも知られている(例えば、Liston, 2004)。また、植生の力学的抵抗による大気循環への影響については、寒帯林を対象とした研究は非常に少なく、内部変動が大きい中高緯度の大気循環場に対する影響は十分に解明されていない。また、寒冷域での安定な接地境界層における顕熱・潜熱の乱流輸送に関しては、新しい観測手法や数値実験手法による実態解明の国際的な研究の取り組みがはじめられているものの、具体的な知見はまだ極めて少ない。このような植生から大気循環への影響と、大気循環から雲・降水過程を通じた植生への影響とを合わせて、植生・大気循環の相互作用について理解を進めていく必要がある。

(2) 今後の研究

植生動態のプロセス解明のために、現地観測や詳細なプロセスモデルによる研究が進められてきた。アジアや欧米では、広域観測網としての整備も進められつつあり、北極域でもそれらと協調できる観測網の整備が望まれる。植生構造(特にバイオマス)や構成種の変動に伴う炭素収支や物質循環の変動は応答時間が長く、全球の気候変動に対する北極域の生態系の役割を把握する上から、長期的な観測態勢とそのネットワーク(例えば、LTER: The Long Term Ecological Research)の構築が必要である。これらのプロセス研究の知見に基づいて、広域的な炭素収支や物質循環への影響を定量的に解明するには、広域評価で考慮すべきプロセス

の抽出と定式化、衛星観測データを用いた広域での比較検証、地球システムモデルによる相互作用を含めた影響評価が必要である。

植生による地表面アルベドの変化に関しては、衛星観測による植生分布や地表面アルベド等の広域データが蓄積されつつある中で、それらを活用して、植生と積雪の相互作用やその広域影響について、定量的な解明が進むことが望まれる。植生の地表面摩擦や乱流構造に対する力学的抵抗に関しては、安定な接地境界層のメカニズム解明を含めて、地表面付近の潜熱・顕熱輸送に関する基礎的な研究から見直す必要がある。その一つとして、乱流による輸送過程を直接計算する Large Eddy Simulation による研究(Beare et al., 2006)が近年注目されており、その推進も有効であると考えられる。

b. 積雪・凍土

(1) 研究の重要性と現状

積雪はアルベド・フィードバック⁸⁴によって北極温暖化増幅の中心的な要因とされているほか、モンスーンシステムなどの中高緯度の広域エネルギー・水循環に影響を及ぼすことが、これまでに多くの研究で指摘されてきた(例えば、Groisman and Davies, 2001)。積雪のプロセス解明もまた、植生と同様に、現地観測や詳細なプロセスモデルによって長年進められてきた。加えて、積雪域の広域変動も衛星データの蓄積によって季節変化を含む長期変動が把握できるようになってきており(例えば、Brown et al., 2010)、全球気候モデルの検証などにも利用されるようになってきている。積雪の気候影響の鍵となるアルベドには、積雪粒径等の雪質が影響することが知られているが、積雪中の不純物濃度(黒色炭素(Black Carbon: BC)、土壌粒子、雪氷微生物)の影響も近年注目を集めている。積雪アルベドに対する不純物濃度の効果については、現地での積雪・放射・熱・水収支の総合観測に基づくプロセス研究と並行して、衛星データによる広域的な地表面アルベドの定量評価が進められている。

積雪が大きな断熱効果を持つことはよく知られているが、それによって凍土の形成が大きな影響を受け、初冬の積雪深が夏の融解深と強い関係を持つことが、近

⁸⁴ アルベド・フィードバック: 雪氷面のアルベドが植生や土壌面のアルベドよりも大幅に高いことから、寒冷化(温暖化)して雪氷面が増大(減少)するとアルベドが増大(減少)して地表面に吸収される日射が減少(増大)し、寒冷化(温暖化)がさらに進行する、という正のフィードバック。

年指摘されるようになってきた(Zhang, 2005)。凍土のプロセス研究もまた、現地観測や詳細なプロセスモデルによって進められてきているが、凍土変動の広域的な影響として、凍土の融解深がCO₂、メタン等の温室効果気体(Greenhouse gas; GHG)の放出速度に影響を及ぼすことや、植生に利用可能な土壌水分を増減させることなど、炭素収支や生態系との相互作用も注目されるようになってきている。温暖化による凍土の湿地化は、メタン発生を引き起こす可能性があり、全球気候に対する影響も懸念される。しかし、凍土の変化による水文環境や炭素収支(メタンやCO₂の放出)の変化には、土壌の物理的・化学的性質や微生物環境など、多様な条件が関係しており、広域的な影響に関する定量的な議論には大きな不確実性が残っている。

(2) 今後の研究

積雪や凍土の広域的な気候影響を定量的に明らかにしていくには、プロットスケールでのプロセス理解を広域的な振る舞いの理解へと拡張していくことが要となる。積雪域については、衛星データによって広域変動が把握できるようになってきているが、積雪変動プロセスにおいて重要な雪質や積雪深、積雪水当量などについては、マイクロ波データ等から粒径や湿雪/乾雪の区別等の推計データが幾つか出されているものの、定量的

な信頼性については今後の検証が待たれる。地表水文プロセスにおいて鍵となる表層土壌水分も、広域の分布や変動の把握が望まれており、マイクロ波データによる推定が出されているが、植生の影響の除去など、定量的な信頼性は、まだ十分とは言えない。積雪物理量(粒径、積雪深など)や表層土壌水分などについて、衛星データが検証できるような広域的な観測を展開し、衛星データの信頼性を向上するとともに、広域変動の特徴やメカニズムの解明が望まれる。

凍土の変動とそれに伴う水文環境やGHGの放出速度等の変動は、植生や微地形などの局所的な地表面状態に加えて、土質、土壌水分、アイスウェッジ、土壌微生物などの土壌条件に強く影響を受ける。土壌条件は非一様性が極めて高い上に、植生の影響を受けるため衛星観測による広域把握が難しく、地表面の凍結状態に関する推計があるのに留まっている。炭素収支においても土壌は特に不確実性の大きい部分であり、現地観測に基づくボトムアップによる推計と、大気中のGHG濃度変動に基づくトップダウンによる推計との比較による研究の進展が望まれる。土壌・凍土過程による炭素収支や水文環境への影響を明らかにしていくには、プロセスの解明、評価手法の確立を含めた広域変動特性の把握、モデルを用いた感度実験による不確実性の定量評価など、様々なアプローチが必要であろう。

Q4: <超高層大気役割について> 極域超高層大気は下層大気・超高層大気全球変動に及ぼす影響は？

a. 極域へのエネルギー流入に起因する中低緯度の超高層大気変動

(1) 研究の重要性と現状

極域超高層大気には、オーロラ現象などに伴って地球近傍の宇宙空間(磁気圏)から粒子及び電磁エネルギーが流入する。特に、磁気嵐に際して、極域電場や電気伝導度の増大による強いジュール加熱に起因して、全球的な熱圏循環の強化や大気波動の励起・伝搬が生じることが知られている。このように、極域へのエネルギー流入は中低緯度の超高層大気変動を引き起こす要因の1つであるが、定量的な理解や電離圏変動予報には至っていない。

(2) 今後の研究

広域な観測網を整備し、また、GCM(全球気候モデ

ル)シミュレーションにより、極域超高層大気は超高層大気全球変動に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。さらに、世界的には、複数機の人工衛星からの超高層大気観測が進められており、日本のコミュニティにおいても、複数機の人工衛星による超高層大気観測を実現する必要がある。テーマ10のQ4も参照のこと。

b. 温室効果気体の増大に伴う超高層大気寒冷化

(1) 研究の現状

夏季の極域中間圏に夜光雲と呼ばれる不思議な雲が出現するようになったのは、産業革命以降と言われている。夜光雲は、人間活動の影響が極域の上層大気に現れた顕著な例であると考えられる。

人工衛星軌道データを用いた超高層大気(特に上部熱圏)密度の経年変化推定、夜光雲の観測頻度や中

緯度での観測報告、数値シミュレーション等によって、下層大気(CO₂増加による)温暖化に伴って、超高層大気の寒冷化が進んでいると考えられている。下層大気では様々な大気変動現象があり、温暖化による気温上昇と他の大気変動による気温上昇とを区別することは困難である。一方、下層大気起源の大気変動は、振幅を増大させながら超高層大気へ影響を及ぼすものと考えられている。したがって、超高層大気の寒冷化を定量的に理解することは、下層大気の温暖化の程度を理解することにつながると考えられる。下層、中層の大気環境を映し出す鏡としての超高層大気役割を認識し、超高層大気の中期・長期変動について調べるのが望まれるが、中期・長期変動を議論するためのデータの蓄積が不足していることから、不確定さも多く含まれている。また、人工衛星軌道データからの超高層大気密度の経年変化推定量と、GCMシミュレーションからの推定には食い違いも見られる。

(2) 今後の研究

人工衛星軌道データの再解析など、過去のデータを再度吟味し、データ校正などを行う必要がある。観測、モデルの精度向上により、微小な寒冷化のシグナルをとらえることが望まれる。過去から現在まで継続して行われている観測を、さらに長期にわたって維持・発展させる必要がある。Q5も参照のこと。

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、海洋のどれを経由する影響が大きいのか？

ここでは、超高層大気、中層大気、下層大気、陸域、海洋/海氷等の間に見られる多圏相互作用、または、北極域と他領域の間で働くフィードバックの力学的過程や、エネルギー、水の輸送過程などに注目する研究方針を提起する。

a. はじめに:考えられる研究課題

地球上の多圏相互作用の解明には、対流圏大気と他の圏の相互作用の把握が一つの重要なテーマになると思われる。なぜなら対流圏の大気は、その下部境界としての海洋、海氷そして陸域と強く相互作用している一方、同時に上方に存在している成層圏や中間圏などの上層大気とも密接に相互作用して、その循環を形成

c. 極域超高層大気の下層大気に及ぼす影響

(1) 研究の重要性と現状

太陽プロトン現象やオーロラ現象に伴って、極域下部熱圏や中間圏では一酸化窒素(NO)が生成されることが知られている。このNOは下方へ輸送され、また、大気循環の影響により中低緯度へも広がると考えられている。輸送されたNOは上部成層圏のオゾン(O₃)破壊を引き起こすと考えられているが、どの高度でどれだけの破壊に寄与するかなど、定量的な理解は進んでいない。また、O₃減少が起こる領域の広がりも正しくは把握されていない。

(2) 今後の研究

成層圏から熱圏に至る大気領域の同時観測や、GCMシミュレーションにより、極域下部熱圏や中間圏で生成されたNOがさらに下方の大気領域に与える影響を定量的に評価することが望まれる。そのため、グローバルな観測ネットワークの構築や、人工衛星による超高層大気領域の大気微量成分、ダイナミクスの観測を実施する必要がある。さらに、精密な光化学モデルを構築し、超高層大気GCMへの組み込み、または連携した数値計算を実施する必要がある。テーマ10のQ3も参照のこと。

しているからである(図17参照)。すなわち、他の圏と比べ対流圏大気は相互作用の「相手」が多いと言える。もちろん、対流圏大気があまり関係しない相互作用(例えば海洋循環と陸域水循環の関係等)も地球システムの中で重要な役割を果たしている。これらの相互作用のテーマは近年ようやく取り上げられるようになったばかりであり、Question1~4でも一部例を挙げたような、様々な研究課題が数多く残されている。このような課題の解明は、気候システムの季節内、または数年から数十年以上の時間スケールの変動の理解をより深化させるだけでなく、季節予測などの予報精度向上にも繋がると思われ、今後の重要な研究課題となる。

最近の研究では、海氷減少がもたらす大気循環の変

動の研究に代表されるように、下部境界から対流圏大気への影響の研究が新しい方向として注目されつつあり(テーマ 5Q1 参照)、この方向性を今後さらに深化させる必要がある。その上で、逆の方向、すなわち、対流圏大気から海水、海水等の下部境界への影響の研究を併せ(例えば、Q2 参照)、海洋/海水-大気、または陸面-大気間の「相互作用」系としての描像に迫る事が重要である。

b. 大気と下部境界としての海洋・海水との相互作用

季節内の時間スケールでの、大気と下部境界との相互作用過程の解明は、季節予報の精度向上も期待できる興味深い研究テーマである。近年の研究では、例えば、バレンツ海の海水減少と冬季東アジアモンスーンとの関係の研究が注目されている(テーマ 5Q1 参照)。しかし、そのプロセス一つをとっても、低気圧経路が重要(Inoue et al., 2012)なのか、定常ロスビー波応答 - つまり偏西風の蛇行の励起 - が重要(Honda et al., 2009)なのか、未だに完全には判明していない。ましてや、他の海域の海水の大気への影響の研究はまだ緒についたばかりである。海洋(SST 偏差等)、または陸域(積雪分布等)の大気への影響の研究についても同様であり、これらの研究の進展が望まれる。

数年から数十年以上の気候変動の解明は、地球温暖化との関係もあり、今後も重要な課題であり続けられると思われるが、ここでも相互作用の解明が鍵となる。AO や NAO、PNA、PDO、AMO 北大西洋数十年規模振動等の気候変動モードの変化など興味深い研究課題が山積している。現在、または将来の気候変動が、自然変動の範疇なのかそれとも人為的な原因によってもたらされたものなのかを見極めるためにも、相互作用系の理解を含めたさらなる研究の発展が必要である。特に、上記の気候変動モードのように自然変動が大きい現象については、モデルと観測データを合わせた慎重な検討が必要である。

地球温暖化に代表されるような、数十年から数百年より長い時間スケールの気候変動の研究も重要である。例えば、Q2 で触れた Chapman and Walsh (2007) に代表されるような大気循環変動に伴う海洋循環の変動の研究や、または、その逆の影響の研究などが注目されるようになると思われる。

c. 大気と下部境界としての陸域との相互作用

陸域では、植生、積雪、凍土が相互作用しながら変動し、その結果、地表面-大気間のエネルギー水交換や物質交換などを通して、広域の気候変動に影響を及ぼしている。植生、積雪、凍土のプロセス解明は、現地観測や詳細なプロセスモデルによって着実に進められてきた。それらの広域的な変動を定量的に把握することが広域の気候変動への影響評価に必要なステップになる。植生分布や積雪域など一部の物理量については衛星データが蓄積されつつあり、広域変動の定量評価にも利用されている。しかし、広域評価の手法確立を含めた基礎的な研究が必要な物理量(土壌水分や土壌条件など)もある。また、個々のプロセスの役割をスケールアップして広域的な定量評価に繋げることが今後の課題である。

d. 対流圏、成層圏、中間圏、熱圏大気の相互作用

対流圏・成層圏力学結合や、または中間圏・熱圏大気とそれよりも下層の大気との上下結合の研究もまだ緒に就いたばかりである。Question1 で触れたような、対流圏/成層圏間の双方向の影響の理解や、ロスビー波と重力波双方の活動とその基本場への影響を考慮した研究、さらに Question4 で触れたような大気微量成分の輸送の正確な把握のための研究などが重要である。さらに、成層圏突然昇温に起因する中間圏・熱圏大気変動が、観測的にも GCM シミュレーションからも明らかになってきた。成層圏から中間圏・熱圏大気までの変動を引き起こす物理機構の解明などの研究テーマに関し今後の進展が期待される。

e. 陸起源物質の海洋流出に伴う水・物質循環の役割

以上では、大気に関係する相互作用に関し記述してきたが、大気を介さずに陸圏と海洋圏が直接持つ相互作用の研究も大きな課題となる。具体的には、気候システムにおける陸起源物質の海洋流出を介した水・物質循環の役割の解明などが、今後の大きなテーマになると思われる。河川などを通じた陸からの物質流出は、海洋の生物生産に大きな影響を与える(テーマ 3、9 参照)。栄養塩はもちろんのこと、金属元素も重要な役割を持っている。北太平洋亜寒帯域のように栄養塩は十分だが鉄が不足しているところでは、微量とは言え、鉄が河川および大気を経由して海域に入ることによって生産性を高める。鉄は溶存鉄として陸域に存在しており、その

形態は水環境や植生などに依存する。森林とその周辺の河川では、鉄と錯体を形成する溶存有機物が多量に存在するため溶存鉄が多く、河川から海洋に入ると植物プランクトンに利用される。しかし、自然環境であるか人為的な開発であるかにかかわらず、森林がない土壌から流出する鉄は海洋に入ってからすぐに粒状鉄として沈降してしまうので、生物に利用されない。気候変動により中緯度で特定の陸域の降水量が減ると、鉄化合物の形態が変わり、海洋生態系に影響を及ぼす可能性がある。

ルに大気変動パターン、それに影響される水循環、そして植生分布までを含めることにより、物質循環への影響も調査する事が重要である。

f. 北極域に影響を及ぼす領域の淡水収支

テーマ 4 で水循環を記述し、北極海の淡水収支を取り上げている。また、テーマ 2 では北極海上層の海氷・海洋結合システムの状況を詳しく説明している。テーマ 1 は北極域のエネルギー輸送に注目するものの、それに伴う水循環の仕組みも示している。本テーマでは、これらの取り組みと連携し、北極域河川の流域における正味降水量(降水から蒸発を差し引く)を推定するために、大気中の水蒸気輸送を精査すること、そして北極海と太平洋、大西洋の間の淡水輸送を解明する研究に力を注ぐ。北極域とつながる地域にも目を向け、大気中の水蒸気輸送と比較検討する対象として、北太平洋と北大西洋の正味降水量の調査研究を進める。その際に注目するのは、大気循環パターンの経年変動であり、Q1 に示した研究の焦点を踏まえることが基本となる。また、両大洋の亜熱帯、亜寒帯まで含めた塩分輸送の調査と解明を進める活動に際しては、全球海洋コンペアベルトのメカニズムにも注目した研究に取り組む。

g. 全体を通じた研究方針

上記の議論をふまえると、今後の研究方針は以下の通りとなる。まず、大気海洋結合系、大気陸面結合系などの多圏相互作用の振る舞いを解明することが、大きな軸となる。その解明なしには、例えば、南北熱水輸送の定量化等の課題に取り組む事は困難であると考えられる。AOMIP⁸⁵などのプロジェクトは、これらの問題の解明に大きな役割を果たしう。相互作用研究には、地球システムモデルの利用が重要な役割を果たすが、さらに、データ同化の適用によって、データ誤差も的確に考慮して各要素モデルを検証する。地球システムモデ

⁸⁵ AOMIP: Arctic Ocean Model intercomparison Project

北極環境研究の長期構想
(Long-term Plan for Arctic Environmental Research)

北極環境研究コンソーシアム
(JCAR, Japan Consortium for Arctic Environmental Research)

2014年9月 発行
2015年3月 改訂

連絡先: 北極環境研究コンソーシアム事務局
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3
国立極地研究所 内

E-mail: jcar-office@nipr.ac.jp

ホームページ <http://www.jcar.org/>

北極環境研究の長期構想

目次

巻頭言	i
1章 報告書で目指すこと	2
2章 背景と内容	3
3章 北極環境の現在までと近い将来に起こりうる変化	4
4章 北極環境研究の歴史	7
5章 「現在進行中の地球温暖化に伴う北極の急激な環境変化を解き明かす」研究テーマ	9
テーマ1：地球温暖化の北極域増幅	9
Q1：下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送は、北極温暖化増幅にどう影響するか？	10
Q2：陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？	12
Q3：季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドの役割はどの程度か？	14
Q4：雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？	16
Q5：北極温暖化増幅はなぜ起こっているのか？ その予測と不確実性はどれほどか？ 北極域における放射強制力とフィードバック・プロセスはどう変化するのか？	17
テーマ2：海氷減少のメカニズムと影響	19
Q1：風のパターンや海氷の流動性の変化は海氷減少を促進するか？	20
Q2：海氷の熱的減少はどのように進むのか？	21
Q3：海氷減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？	23
Q4：海氷減少が海洋内部に及ぼす影響は？	23
10～20年後を見据えた戦略	24
テーマ3：物質循環と生態系変化	30
Q1：大気中の温室効果気体やエアロゾルなどの濃度はどう変化するか？	31
Q2：陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？	34
Q3：陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か？	36
Q4：海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？	38
テーマ4：氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環	42
Q1：氷床・氷河の変化は加速するか？	42
Q2：永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？	46
Q3：北極域の降積雪はどう変化しているか？	48
Q4：環北極陸域の水文過程はどう変化するか？	50
テーマ5：北極・全球相互作用	53
Q1：＜大気の影響について＞ 北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？	54
Q2：＜海洋の影響について＞ 大西洋・太平洋間の海水循環は強まるか？ 深層水形成は減るか？ 中緯度海洋大循環は変わるか？	56

Q3 : <陸域の役割について> 植生と凍土の変化による炭素収支や物質循環への影響は？ 積雪と植生の変動による広域エネルギー水循環への影響は？	58
Q4 : <超高層大気の役割について> 極域超高層大気が下層大気・超高層大気全球変動に 及ぼす影響は？	60
Q5 : <多圏相互作用について> 超高層大気、大気、陸面積雪と植生、海洋のどれを經由 する影響が大きいのか？	61
テーマ 6 : 古環境から探る北極環境の将来	64
Q1 : 過去の北極温暖化増幅は現在とどれほど異なり、その要因は何か？	66
Q2 : 過去のグリーンランド及び大陸の氷床はどう変動し、その要因は何か？ 気候変動 との関係と海面水位への寄与は？	68
Q3 : 過去の北極海の環境はどのようなものであったか。とくに海氷と生物生産について	70
Q4 : 過去の北極陸域環境は現在とどれほど異なり、大気組成や気候とどう関係したのか？ ...	72
Q5 : 過去の北極において、数年～数百年スケールにおける自然変動の強度や時空間 パターンは現在と異なっていたか？そのメカニズムは何か？	74
【ボックス 1】古環境プロキシや年代推定手法の開発と解釈	76
テーマ 7 : 北極環境変化の社会への影響	77
Q1 : 地球温暖化も含めた気候変動による影響は？	78
Q2 : 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は？	82
Q3 : 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響	83
Q4 : 太陽活動と北極超高層大気の影響	85
Q5 : 北極圏人間社会の対応	86
6 章 「生物多様性を中心とする環境変化を解き明かす」研究テーマ	89
テーマ 8 : 陸域生態系と生物多様性への影響	89
Q1 : 人為的な要因で起こる環境変動は北極陸域生態系にどのような影響を及ぼすか？	90
Q2 : 生物多様性はどのような影響を受けるか？	93
【ボックス 2】生物多様性とは？	93
【ボックス 3】学名の不一致問題	94
Q3 : 北極陸域生態系の変化が動物や気候に与える影響はどうなるか？	95
【ボックス 4】トナカイの生息変化	95
【ボックス 5】水鳥のモニタリング	96
テーマ 9 : 海洋生態系と生物多様性への影響	97
Q1 : 陸域・大気物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？	98
Q2 : 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？	99
Q3 : 北極海食物連鎖と生態系変化・多様性はどうか関係しているか？	101
【ボックス 6】表層-底層生態系のカップリング	102
【ボックス 7】バイオロジカル・ホットスポット	102
Q4 : 成層化、脱窒、および海洋酸性化は北極海の生態系・多様性にどのような影響を 及ぼすのか？	103
7 章 「北極環境研究の広範な重要課題」研究テーマ	105
テーマ 10 : ジオスペース環境	105
Q1 : ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？	107

Q2: 超高層大気が下層・中層大気に与える影響は？	108
Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？	110
Q4: 超高層大気を通した極域から中低緯度へのエネルギー流入は？	112
テーマ 11: 表層環境変動と固体地球の相互作用	114
Q1: 現在活動する北極海海嶺熱水系と海洋環境との相互作用は？	115
Q2: 氷床変動に伴い固体地球はどのように変形してきたか？	117
Q3: 北極海が形成されていく過程で、大気-氷床-海洋の相互作用がどのように変化 していったか？	119
Q4: 数千万年～数十億年といった時間スケールでの地球表層環境変動に北極海と周辺 大陸の発達過程はどのように影響を与えたか？	121
テーマ 12: 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	124
【ボックス 8】 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	127
Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか？	128
Q2: 永久凍土を構成する物質はどのような分布を持ち、どの程度の不均一性があるか？	129
Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？	130
Q4: 永久凍土-大気-積雪-植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？	133
8 章 「環境研究のブレークスルーを可能にする手法の展開」 テーマ	136
テーマ A: 持続するシームレスなモニタリング	136
海洋圏モニタリング	137
雪氷圏モニタリング	140
【ボックス 9】 氷河質量収支の観測	142
大気圏モニタリング	143
陸域圏モニタリング	145
テーマ B: 複合分野をつなぐ地球システムモデリング	148
Q1: 地球システムモデルについて開発課題は何か？	149
Q2: 大気モデルについての開発課題は何か？	153
Q3: 海洋・海氷モデルについての開発課題は何か？	154
Q4: 陸面・雪氷モデルについての開発課題は何か？	158
テーマ C: モニタリングとモデリングをつなぐデータ同化	160
北極圏におけるデータ同化研究の現状	161
【ボックス 10】 データ同化技術の解説	162
データ同化を北極環境研究に展開する方針	164
北極圏データ同化研究の実現に向けた環境整備	169
9 章 研究基盤の整備	173
砕氷観測船	173
衛星観測	175
航空機	177
海外の研究・観測拠点	178
データおよびサンプルのアーカイブシステム	181
人材育成	183
研究推進体制	185

	分野別研究機器等	187
10 章	長期にわたる方向性と取り組み体制のまとめ.....	195
11 章	資料	198
	引用文献.....	198
	執筆者等一覧.....	209