

テーマ 3: 物質循環と生態系変化

要旨

大気中での温室効果をつかさどる CO₂ やメタン、雲の形成や日射量を左右するエアロゾル、それから海洋生態系を育む栄養塩などは、大気-陸-海洋を巡るさまざまな物質の循環に密接に関係している。北極域では、さらに海氷、氷床、積雪、永久凍土が物質循環に対して大きな役割を果たすとともに、そのプロセスを複雑にしている。ここでは、環境変動と表裏一体の関係にある物質循環変動について要となる以下の 4 つの Questions を挙げ、10~20 年将来の長期的な研究の展望を述べる。

- 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？
- Q2: 陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？
- Q3: 陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か？
- Q4: 海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？

大気に関しては、観測データが著しく乏しいシベリア地域に新たに観測拠点を設け、大気微量成分の通年観測を実施する一方で、海洋域では人工衛星データの利用や、定期的に船舶を活用したエアロゾルなどの観測を

実施することが必要である。陸域生態系に関しては、長期調査プロットを設定し、100 年スケールの植生の種、構造などについての継続的データの取得を行うとともに、衛星観測によって植生変動のシグナルを明らかにし、さらに植生動態モデルで長期変動について信頼性の高い予測を行う一方で、土壌有機炭素の分布の把握と蓄積・分解のメカニズムを理解することも重要である。陸から海洋への物質輸送に関しては、北極域における広範囲の河川と沿岸に観測網を整備し、海岸浸食、氷床融解、および土壌侵食や凍土の融解に由来する、汚染物質、炭素、栄養塩、微量金属などのモニタリングを行う必要がある。海洋生態系に関しては、地域的にも季節的にも空白の無い観測データを取得する必要がある。例えば、冬季の氷上キャンプでの観測やセジメントトラップ・係留系による通年観測を通じてデータを取得し、海洋構造や物質循環・生態系の季節変化を把握する必要がある。また、それらのデータと培養・飼育実験や数値モデリング結果を比較・融合することにより、物質循環過程と生態系との関係や酸性化の仕組みと実態を定量的に評価する必要がある。

まえがき

世界的に関心を集めている近年の地球温暖化は、大気中の CO₂ 濃度の増加が主因であることがほぼ確実となっている。CO₂ は人為的に大気中に放出され続けてきた一方で、陸や海洋が吸収することによって、大気中の濃度の増加は抑えられてきたことも事実である。IPCC の第 5 次評価報告書 (IPCC, 2013a) を参考に計算すると、年間で見ても化石燃料の燃焼などによって大気中に放出された CO₂ の約 4 割を陸が、約 2 割を海洋が吸収していると見積もられる。このように、大気中の CO₂ 濃度を理解しようとした場合、大気-陸-海洋をめぐる炭素の循環として考える必要があることがわかる。図 9 に北極域における環境中の物質循環の模式図を示す。北極のような寒冷圏の場

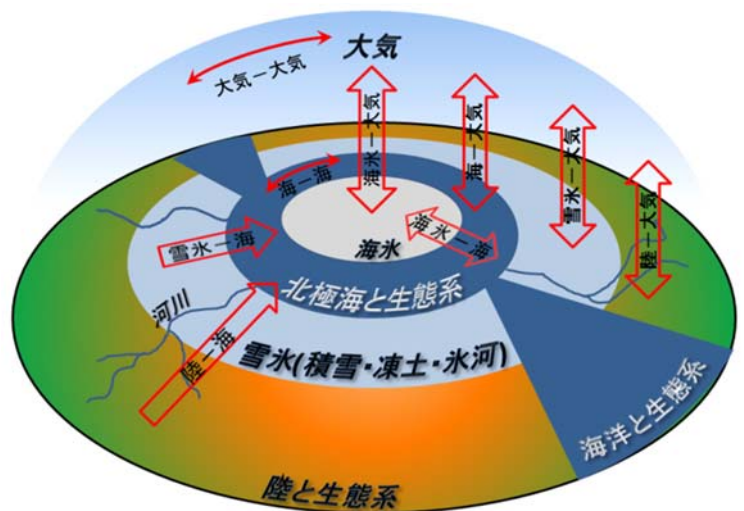


図 9 北極域における物質循環の概念図

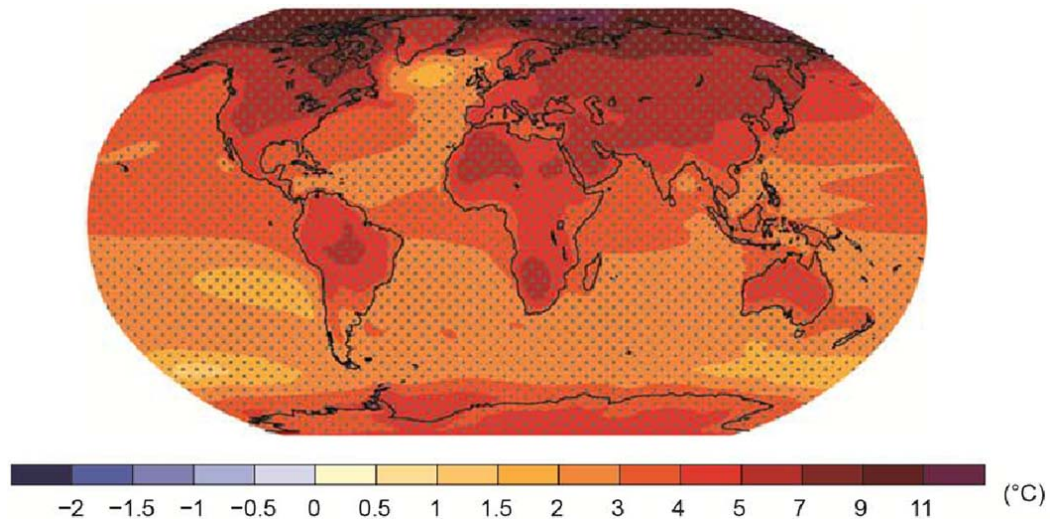


図 10 IPCC がまとめた地球温暖化の予測(シナリオ RCP8.5)。1986～2005 年の平均気温から、2081～2100 年の平均気温が何度(°C)上昇するかを表している。特に北極付近の温暖化が激しいことに注目したい。この原因は、温暖化に伴う雪氷域の縮小によるアルベドフィードバックと考えられる。(IPCC, 2013b, Figure SPM.8. Maps of CMIP5 multi-model mean results for the scenarios RCP2.6 and RCP8.5 in 2081-2100. (a) annual mean surface temperature change.)

合、陸上の雪氷や海氷の果たす役割の大きいことが、他の地域には無い特徴である。また、気候変動は、亜寒帯、寒帯の陸域において特に顕著になると予想されている(図10; IPCC, 2013b)。気候変動が亜寒帯・寒帯の陸域の生態系(以降、「北極陸域生態系」と呼ぶことにする)に与える影響を的確に把握することは、物質循環を通じた気候へのフィードバックの理解のために欠かせない。

北極域では、陸上を広く覆う亜寒帯林や海洋の植物プランクトンなどの一次生産(光合成)が、大気中のCO₂濃度を支配する大きな要因のひとつとなっており、全球炭素循環に対する役割も大きい。温暖化が特に顕著である北極域の炭素循環の変動とその生態系への影響を定量的に把握することは、地球の将来の気候を予測する上で非常に重要である。

気候変動に関わるのはCO₂だけではない。永久凍土が温暖化によって湿地化することによって増加する可能性のあるメタンの大気中への放出、北極海の海底永久凍土からのメタンの放出も気候に大きな影響を及ぼすだろう。さらに、亜寒帯で頻発する林野火災によって生じるブラックカーボン(BC)⁵³などのエアロゾルも雲凝結核となるほか、大気や雪氷面の放射過程を変化させ、その結果気候を変化させる。河川や海岸から海洋に注ぐ陸起源の物質や、大気によって輸送され海面に降りそぐ物質も、海洋生態系にとって欠かせないものである。

陸-大気-海を巡る物質の挙動は、気候や環境に対して決定的であり、現場や衛星観測をはじめ、モデルによって気候変動に対するその動態と生態系の役割を明らかにしていくことが、長期的に重要であろう。

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？

a. 研究の重要性と現状

図 11 に模式図を示したように、大気中に存在する微量成分(温室効果気体、短寿命気体⁵⁴、エアロゾル)は、大気中の放射収支過程を通して、気候変動に大きな影響を与えている。北極域は、北極海のほとんどを占める海水域、莫大な生物生産量を有する海洋域、広大な永

久凍土帯や森林帯が分布する陸域で構成されている。これらの領域は、大気微量成分にとっては、ソース、シンク両方の役割を担うため、大気微量成分の循環過程と密接に関係している。大気微量成分の循環過程やトレンドを明らかにすることを目的として、日本を含め各国がニーオルスン(スバルバル諸島)、バロー(アラス

⁵³ ブラックカーボン(BC): ブラックカーボンは、強い光吸収性を示す“グラファイト状の微小構造を持つ黒色の粒子状炭素”である。

⁵⁴ 短寿命気体: 反応性が高く、大気中での化学的な寿命が1日未満～数週間と短い気体(例、O₃, NO_y, SO₂, 揮発性有機物など)のことを示す。

カ)、アラート(カナダ)を拠点として長期的な観測が継続している。近年、北極域では、気候変動の影響とされる変化、例えば、夏季海氷面積の急激な縮小などが観測されている。このような急激な環境変化は、大気微量成分の分布や濃度変化に大きな影響を及ぼすことは間違いない。環境変化による大気微量成分の分布の変化やその影響を理解するには、起こり得る環境変化に対応して、観測的研究を進め、大気中の物質循環過程の変化に関して知見を蓄積していくしかない。

季節海氷域と開水域の拡大により、これまでと比べると、CO₂の交換過程、エアロゾル前駆物質⁵⁵(DMS: 硫化ジメチル)など短寿命(1日未満~数週間)気体の大気への放出、海塩粒子の放出が活発になることが考えられる。CO₂交換海域の分布やその季節変化については、大気中のCO₂循環過程を理解する上で非常に重

要である。また、海洋表面からはエアロゾル前駆物質や海塩粒子の放出が促進されるため、開水域の拡大はエアロゾル数濃度増加の要因となる。エアロゾル数濃度の増加は、雲凝結核⁵⁶の増加をもたらし、最終的には雲過程を通して間接的に放射収支に影響を及ぼし得る⁵⁷(Lubin and Vogelmann, 2010)。大気中の海塩粒子の増加は、エアロゾル粒子上の不均一反応と海塩粒子の沈着過程により、人為起源の酸性ガス(SO₂, NO_yなど)の効率的な除去を促進させるため、一部の短寿命気体の循環過程と密接に関係する。また、冬~春季の季節海氷上に形成されるフロストフラワー⁵⁸は、海氷起源海塩粒子のソースとなる。季節海氷域からの海塩粒子放出は、冬~春季の北極海上のエアロゾル分布を変える可能性がある。フロストフラワーや海氷起源海塩粒子上の不均一反応は、高反応性ハロゲン成分を大気に

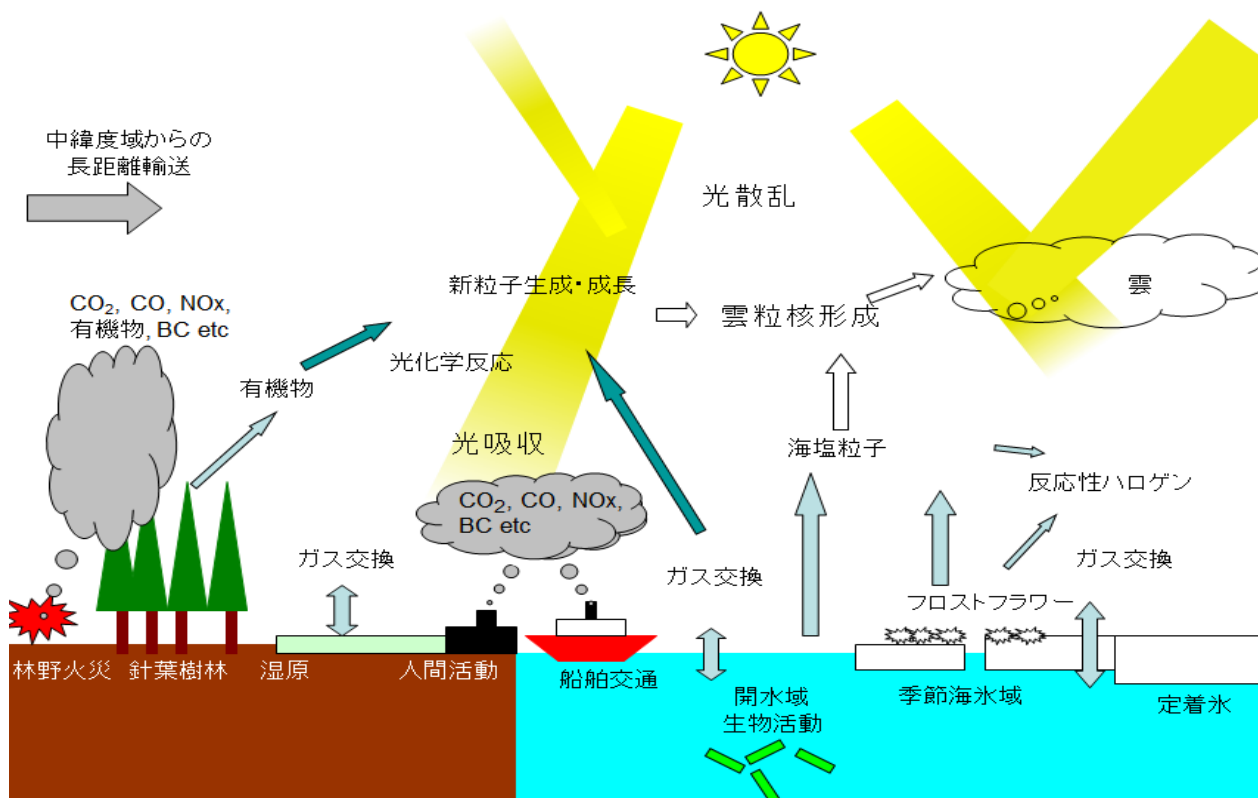


図 11 大気を中心とした物質循環の模式図

⁵⁵ エアロゾル前駆物質: 大気中では気体として存在し、気相中の酸化反応を経て蒸気圧が低い成分に変換され、新粒子生成過程や既存粒子への凝縮過程を経て、最終的にエアロゾル粒子となりうる気体や、既存粒子に凝縮後、エアロゾル粒子上の化学反応を経て、エアロゾル粒子成分へ変換される気体のことを示す。

⁵⁶ 雲凝結核: Cloud Condensation Nuclei (CCN)

⁵⁷ エアロゾルと雲形成と気候に対する影響: 大気中に存在するエアロゾル粒子上に水蒸気が凝縮して雲粒となり、雲が形成される。エアロゾル数濃度の増加(減少)は、雲粒濃度の増加(減少)、雲粒径の減少(増加)をもたらす、雲の寿命と光学特性を大きく変化させる。これらの変化は放射収支と密接に関連しており、気候変動に大きく影響を与える可能性がある。

⁵⁸ フロストフラワー: 低温条件下で、海氷形成時に海氷表面に形成する氷の結晶であり、海氷上のBrine(濃縮海水)がしみ上がるため、フロストフラワーの塩分濃度は非常に高い。フロストフラワー上での化学反応過程や、強風による破碎により、反応性の高い成分や海塩粒子が大気へ放出される。

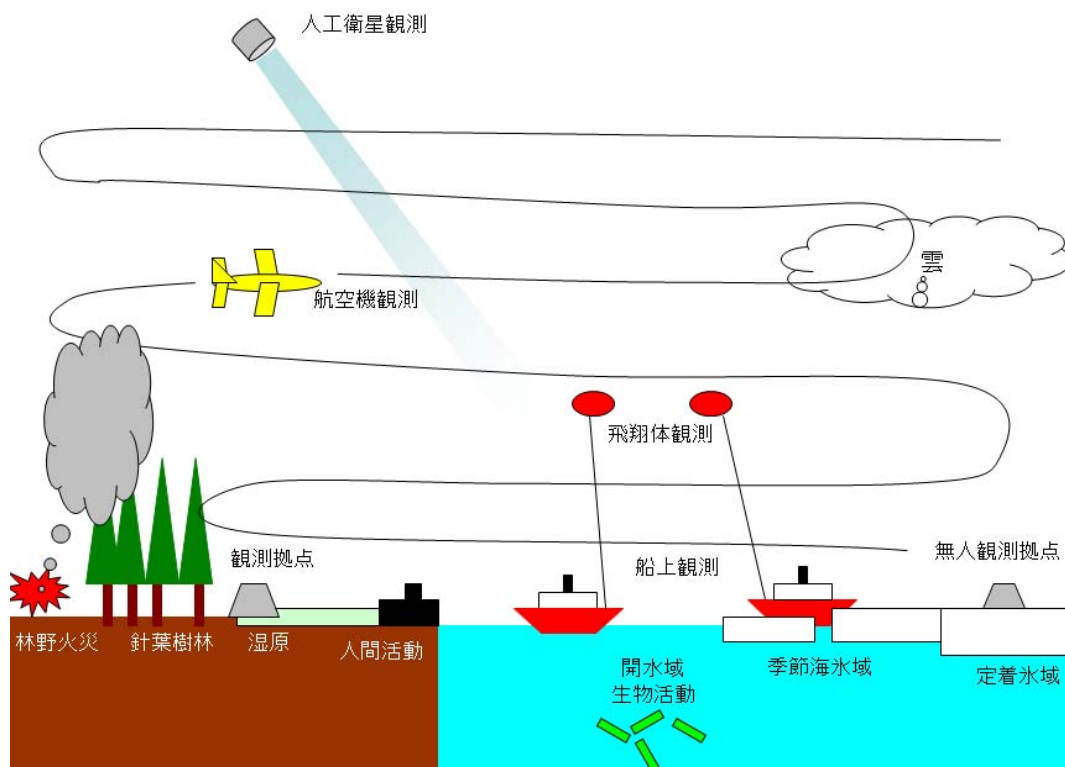


図 12 大気を中心とした物質循環の観測の概念図

放出するため、日射条件下(特に polar sunrise 時期)の大気化学過程(たとえば、短寿命気体の酸化、 O_3 消失現象、 Hg 除去過程など)とも密接に関係している。

陸域においては、土壌環境の変化や植生の変化により、湿地帯からの温室効果気体放出量、森林からの短寿命気体(揮発性有機化合物(VOC)など)の放出量、林野火災発生領域の分布に変化が起こる可能性がある。これまでの北極域の温室効果気体と関連気体成分の観測から、経年・季節変化は化石燃料消費、森林消失、林野火災、湿地帯からの放出との関係が示唆されている(森本ほか、2010)。なかでも、林野火災による影響は、温室効果気体の放出だけではなく、 BC やブラウンカーボン(BrC)⁵⁹などの光吸収性エアロゾルの重要なソースでもあり、雪氷面への BC 、 BrC の沈着により雪氷表面のアルベドに大きな影響を及ぼす。さらに、北極航路の利用や北極域の資源開発による人間活動の拡大が、一部の気体微量成分(CO 、 CO_2 、 NO_x 、 BC など)の濃度レベル、空間分布、気候変動に与え得る影響も今後の研究対象に含めるべきであろう。北極圏内の温室効果気体やエアロゾル長期観測から、北極圏外からの人為起源物質の長距離輸送の寄与も指摘されて

いる(Quinn et al., 2007; 森本ほか、2010)。北極大気中の微量成分の循環やその及ぼし得る影響については、これまでの精力的な研究により、その一端に関する科学的な知見は得られてきてはいるが、大気中の微量成分がかかわる相互作用や全体の変動メカニズムについては、依然として大きな不確実性が含まれており、多くの未解明な点が存在している。

b. 今後の研究

北極大気中の温室効果気体、短寿命気体、エアロゾルの循環過程とその気候変動への影響を理解、検証するには、それらの時空間分布の観測を長期的に、かつ、高精度に把握することが重要である。大気を中心とした物質循環に関する観測の概略を図 12 に挙げた。対象となる観測領域は、海氷域、海洋域(開水域)、陸域、上空と広域に亘るため、観測する対象や地域に合わせて、日本の研究コミュニティが中心となり、地上観測、船舶、航空機、飛翔体、衛星を用い、大気微量成分濃度、同位体比、エアロゾル数濃度・粒径分布、雲などの観測を展開することが重要である。

地上観測では、これまでの観測データとの比較のた

⁵⁹ ブラウンカーボン(BrC): ブラウンカーボンは、強い光吸収性を示す“グラファイト状の微小構造を持つ黒色の粒子状炭素”である。ブラウンカーボンは、光吸収性を示す粒子状有機化合物である。いずれも燃焼によって大気へ放出される。

め、現在の拠点における観測を国内外の研究機関と共同して継続させる。観測データが著しく乏しいシベリア地域では、新たに観測拠点を設け、大気微量成分の通年観測も実施する。海洋域では、開水域から海氷域上の分布を把握することが必須となるため、定期的に船舶を活用したエアロゾル・短寿命気体の観測を実施する。これまでの船舶による観測は、夏季の開水域で実施されることが多かったため、砕氷船を用いた海氷域、冬季北極海での観測、海氷上に設けた無人気象・エアロゾル観測拠点での通年観測も必要である。また、大気微量成分(特に、短寿命気体やエアロゾル)の動態を理解するには、陸上から北極海上の観測に加え、航空機や飛翔体を駆使した集中観測を定期的 to 実施し、地上近傍から対流圏上層にかけての鉛直分布、陸域ー開水

域ー海氷域にかけての水平分布を捉えることが重要である。さらに、船舶、航空機による空間的な観測の展開は制約も多いため、人工衛星観測により、温室効果気体、短寿命気体、エアロゾル、雲の空間的な構造の把握も行う。これらの観測結果から、大気微量成分の時空間分布、陸面と海面からの気体成分・エアロゾルの発生、吸収、沈着量分布、その季節変化、それらの経年変化を高解像度、高精度で明らかにする。得られた観測結果に基づき、大気組成・輸送モデルを駆使し、陸面や海面と大気との相互作用のメカニズム、及び、北極域大気中の大気微量成分(温室効果気体、短寿命気体、エアロゾル)の挙動や動態を解明し、より高精度の気候変動の予測を目指す。

Q2: 陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか?

a. この研究の重要性と現状

気温や降水量の変化は、北極陸域生態系に強い影響を与える。植生については、光合成量と呼吸量の変化、バイオマスの変化、植生タイプの変化などが起こる。また、大気中の CO₂ 濃度の上昇がもたらす生態系に対する施肥効果⁶⁰の影響も大きく、CO₂ 濃度が 20 世紀後半の約 2 倍の環境下では全球の平均的な光合成量は 10~30%程度も増加すると考えられている。これに関連し、化石燃料の燃焼などによって人為的に大気中に放出される年間の炭素の約 4 割を陸がシンクとして吸収していると見積もられており(IPCC, 2013a)、これら炭素収支に対する北極生態系の寄与を適切に見積もることが重要であろう。北極陸域生態系は、気候変動の原因として大きな放射強制力を持つ CO₂、さらに CO₂ に次ぐ放射強制力を持つメタンの大きなソースになる可能性が高いため、これらのダイナミクスを正確に理解することが緊急な課題となる。

北極陸域生態系は気候から一方的に影響を受けて

いるわけではなく、生態系から気候に対する影響もあるため、複雑な相互作用を伴っている⁶¹(図13)。よって、陸域生態系と物質循環の変動を理解するには、北極陸域生態系が物質循環および地表面物理過程を通して気候に与える影響を考慮しなければならない。つまり、北極陸域生態系と環境変動をシステム科学の観点から理解することが重要である。しかし、現状では、北極陸域の関わるシステムの理解はなほだ不完全な状態である。システム科学の観点からの科学的理解を促進することにより、温暖化による植生動態への影響と、植生の変化によるアルベドや炭素循環を介した気候への影響など、不確実性の高いフィードバックの定量的理解が進められる。

北極陸域生態系に蓄積されている炭素の大部分は SOC(土壌有機炭素)の形で地表面近くに存在しているが、温暖化がもたらす熱・水環境の変化によって SOC の劇的な変化が生じることが懸念されている。今世紀末までに 4℃という比較のおだやかな温度上昇が泥炭地

⁶⁰ 施肥効果: CO₂ 濃度の増加によってこれを原材料とする植物の光合成効率が上昇する現象が知られ、施肥効果と呼ばれる。施肥効果によって大気中の CO₂ の吸収が促進されるため、気候変動を抑制する負のフィードバックとしてのほたらきを持つ。しかし施肥効果の定量評価は進んでおらず、その大きさは人為的な CO₂ 排出量の 5-30%と不確実性の幅が広く、今後の研究の進展が待たれている。

⁶¹ 陸域炭素循環にひそむさまざまなフィードバック: 気候変動を引き起こす温室効果気体の CO₂ とメタンはともに炭素を含む気体であり、これらは植物や微生物などの生理的ほたらきによって陸域生態系と大気を循環している。気候変動による環境の変化によって植物や微生物の生理的活性は大きく変化し、これにより炭素循環が変わることで気候変動とのフィードバックを引き起こす。このフィードバックは多様で、あるものは温暖化を加速する正のフィードバック、別のものは温暖化を抑制する負のフィードバックとして作用する。正のフィードバックを挙げると、土壌温度上昇にともなう微生物活性の向上が土壌有機炭素の分解を促進し、大気中へのさらなる CO₂ の放出につながる可能性がある。負のフィードバックとしては、気候の温暖化によって光合成量と植物バイオマスの増加が起こり、これが大気中の CO₂ を陸面に固定する効果を持つ。正確な将来予測を行うためには、これら相反する影響を持つフィードバック要素それぞれを理解し、モデル化する必要がある。

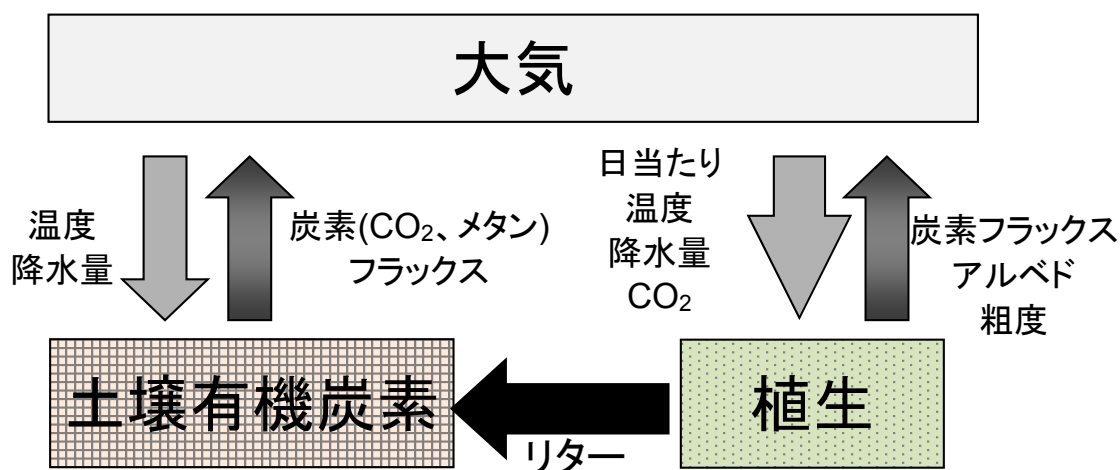


図 13 陸域生態系と気候は強い相互作用を持ち、お互いに影響を与えあっている。気候変動下でこれらの作用がどのように変化するか全体的な解明を行うために、複雑にからみあう要素やプロセスをひとまとめにしたシミュレーションモデルの開発・検証・適用が緊急に求められている。

に蓄積される炭素量を最大80%減少させるという報告もあり(Ise et al., 2008)、SOC 動態の正確な把握は重要な課題である。これは、特に永久凍土表層の融解深が関係する場合、劇的な変化をもたらす可能性があり、特に、温暖化による永久凍土の湿地化はメタンの発生を助長する可能性もあることが指摘されている。また、林野火災は短時間で大量の CO₂を排出するうえに、地表面アルベドや植生の蒸発散量を変化させ、さらに雲凝結核となるエアロゾルを発生させるため、気候への影響が大きいと見積もられているが、その定量予測は現時点では困難である。

北極陸域生態系の物質循環を把握するには現地観測・調査が重要だが、アクセスが困難な地域が大部分であるため得られる取得可能な現地データは限定的である。よって、今後も貴重なデータをもたらす現地観測・調査を継続的に実施する必要があるとともに、観測を空間的に広げて広域での生態系の変化をとらえるリモートセンシングなどの技術のさらなる活用が求められる。そして、気候変動などの環境変動と陸域生態系の物質循環との相互作用を理解し、将来予測によって社会に貢献するには、これらの観測データやプロセスを明示的に再現するシミュレーションモデルの開発が不可欠であるが、ふくめるべき要素は多数におよび、それらの相互間のフィードバックはきわめて複雑であるため、統合的なモデル開発は遅々として進んでいないことが現状である。

b. 今後の研究

今後必要となる北極陸域生態系の研究テーマは枚挙にいとまがないが、ここでは特に広域・全球での物質循環の理解に直接貢献するもの、長期的視点で解明すべきものをいくつか列挙する。

植生バイオマスは全球炭素循環中の炭素プールとして機能していることから、物質循環の変動を知るには、その変動を把握する必要がある。陸上では長期調査プロットを設定し、植生種や植生構造について 100 年規模の継続的データの取得を行うとともに、衛星観測によって植生変動のシグナルを明らかにする。さらに、植生動態モデルで植生の長期変動について信頼性の高い予測を行うことが必要であろう。以上は、前述した全球炭素循環に対して陸が果たす炭素循環の役割を定量的に解明することにつながるだろう。具体的なフィールド観測の手法としては、広大な環北極陸域を効率的・戦略的にカバーするための非接触観測技術(プリズム法による胸高断面積計測や円周魚眼レンズ撮影データにもとづく葉面積指数計測など)の積極的な活用も重要となる。

特に、SOC は北極陸域生態系における最大の炭素プールとして機能しており、その分布の把握と蓄積・分解のメカニズムの理解の重要性は特筆すべきである。主に SOC が蓄積される有機質土壌は、SOC の増減によって土壌の厚みが変わり、それに伴って土壌の物理条件も変化するため、炭素循環と熱・水循環を同時にモ

デル化しなくてはならない。そのため、物質循環モデルと土壌物理モデルの融合を中長期的視点で推進すべきである。従来は学問分野の相違のため協力があまり見られなかった生態学的研究と地表面物理研究の統合化が求められる。また、メタンの動態を把握するためにも、観測に基づく土壌の物理環境の理解とモデルによる予測が重要である。物質循環モデルと土壌物理モデルを統合したモデルを構築することで、気候変動による永久凍土の深さ(活動層の厚さ)の変化を明示的に予測することができ、土壌の層ごとの微生物活性とCO₂およびメタンのダイナミクスを示すことが可能になる。また、陸域の統合モデルを構築することによって陸域の物質循環の定量的な理解と将来予測が達成されることによって、水循環とそれにとまなう陸域から海洋への物質の流れの解明にも貢献できる(くわしくは、Q3を参照)。

シミュレーションと並んで、衛星リモートセンシングは北極陸域生態系の理解と将来予測のための強力なツールである。特に近年はリモートセンシング技術の進歩により光合成ポテンシャルや植生バイオマス推定の実現が進められており(Suzuki et al., 2013)、これによりフィールド観測結果にもとづいた広域での炭素循環を把握するための研究を発展させるべきである。また、リモートセンシングは林野火災などの大規模で重大なイベントの観測にも活用できる。

データ同化技術の応用は、観測結果と将来予測をつ

なくための今後 10 年間の鍵といえるかもしれない。蓄積されつつある現地とリモートセンシングのデータを活用するために必要な、客観的・総合的な統計技術であるからだ。特に、アンサンブル・カルマンフィルターなどを使った 4 次元データ同化技術の応用により、フィールド観測とリモートセンシング観測による客観的なモデル改良という重要なテーマに変革をもたらす可能性が大いにある。これらのデータ同化技術はすでに大気科学や海洋科学では利用されているが、その陸域生態系研究への応用はほとんど存在しない。重要なのは統計理論と計算科学に熟達した研究者を養成することである。

これら今後の目標を達成するにあたり、日本の研究コミュニティをまとめること、また、国際的なプロジェクトやネットワークとの協働が不可欠となる。例えば、長期観測プロットに関しては、ILTER⁶²、地表面と大気間の CO₂ 交換の観測に関して FLUXNET や GEO GFOI⁶³などが挙げられる。従来は研究グループが個別に取得・管理してきたデータを一元化して利用を促進すること、オールジャパン的なモデル開発を行う体制を整えることが必要である。北極陸域生態系に由来する物質循環の変動は IPCC 報告書などでも大きく取り上げられており、海外の地球システムモデリングを行うグループ(NASA、GISS、Hadley Centre など)とのモデル相互比較を積極的に実施していくべきである。

Q3: 陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か?

a. 研究の重要性と現状

陸起源の物質は、主に河川や海岸浸食などによって海洋へ供給される。北極海には、全球河川の 10%に相当する河川水が流入し、多量の陸起源炭素などを海洋へ運んでいる。つまり、北極海は陸から海への物質輸送の要といえる。温暖化に伴って凍土表層の融解深の深化、氷床の融解、河川水量の増加、海岸浸食の加速などが進んでおり、北極海への陸起源物質のフラックスはさらに増すと予想されている。さらに、季節海水域の占める割合が多くなることで、陸起源物質の影響の及ぶ範囲と時期も拡大すると予想される。永久凍土に多量に含まれている有機炭素の行方は特に注目されており、海洋に輸送された際に沿岸域で沈降除去されるか、

あるいは無機化されて CO₂ やメタンといった温室効果気体として大気に放出されるかによって、気候へのフィードバックは大きく異なってくるのが指摘されている。また、人為起源 CO₂ 濃度の増加による海洋の酸性化は北極海で特に深刻であり、ここに陸起源炭素の流入量が増加することは、海洋酸性化をさらに促進し、北極の海洋生態系に深刻な影響を及ぼす可能性がある(テーマ 9)。

一般に、陸起源物質のうち、栄養塩、微量金属、溶存有機物は、海洋の低次生態系の生産を直接左右する因子である。また、陸起源の溶存・懸濁物質は表層における光の透過率を減少させることで、一次生産を制限する。しかし、これまで北極海の生物生産における陸起

⁶² ILTER: International Long Term Ecological Research

⁶³ GEO GFOI: Group on Earth Observation - Global Forest Observations Initiative

源物質の寄与は小さいと考えられており、あまり重要視されてこなかった。近年、北極主要河川における陸起源物質濃度の季節的、空間的変動が明らかになってきたこと、温暖化によって海洋へ輸送される物質の量及び質(無機物/有機物、易分解性/難分解性など)の変化が予想されること、季節海氷域の拡大や水温上昇など沿岸域の環境変化が進んでいることなどから、陸起源物質が北極の海洋生態系に与える影響について改めて注目が集まっている。

北米の河川およびシベリアの主要河川の炭素、栄養塩類その他の化学成分のフラックスとその季節・経年変動の基礎的情報は米国地質調査所 USGS や Arctic-GRO プロジェクトの観測により提供されている(例えば、Holms et al., 2012)。しかし、海岸浸食、土壌浸食、氷床融解、シベリアの中・小規模河川や地下水由来の物質についての定量的な把握は充分なされていない。温暖化に伴い、海岸浸食や氷床融解による粒子や有機物の海洋流出が増加することは確実である。河川においては、永久凍土の融解に伴って地下水の寄与が上昇し、主要イオン濃度およびリン酸塩やケイ酸濃度が増加すると予想されているが、一方、溶存無機窒素や有機物に関しては地域差が大きく、全体としての増減は不明である(Frey and McClelland, 2009)。植生の変化や農業などの人間活動による陸起源物質の質および量

の変化も不明である。また、重金属その他の汚染物質の陸から海洋への流入も増加すると考えられる。

海洋に流入した淡水の行方については化学トレーサーや衛星海色センサを用いた溶存有機炭素の分布解析によりある程度の推測がなされている。しかし、ほとんどの陸起源物質については、河川水中や沿岸域での変質・除去・分配過程およびこれらの季節変動が不明なため、その行方や海洋生態系、物質循環への影響を定量的に議論することは困難な状況にある。

b. 今後の研究

陸から海への物質輸送の重要性および温暖化に対する応答を明らかにするには、図 14 に示したように、河川から河口域・沿岸域までを総合的に観測するための観測網を整備し、陸起源の炭素、栄養塩、微量金属などの海洋への流入とその影響をモニタリングする必要がある。これらの成分の流入量や海洋での循環過程は温暖化に伴って今後顕著に変化する可能性が高いため、早急なモニタリングの開始と 10 年以上の長期的な継続が望まれる。他国の沿岸での観測は国際協力の体制を整備して実施する必要があるため容易ではないが、日本ではこれまでにシベリアや北米などでの陸上観測を継続して行ってきた。新たに沿岸観測と融合させることで、陸と海を繋ぐ新領域における研究の発展が大いに

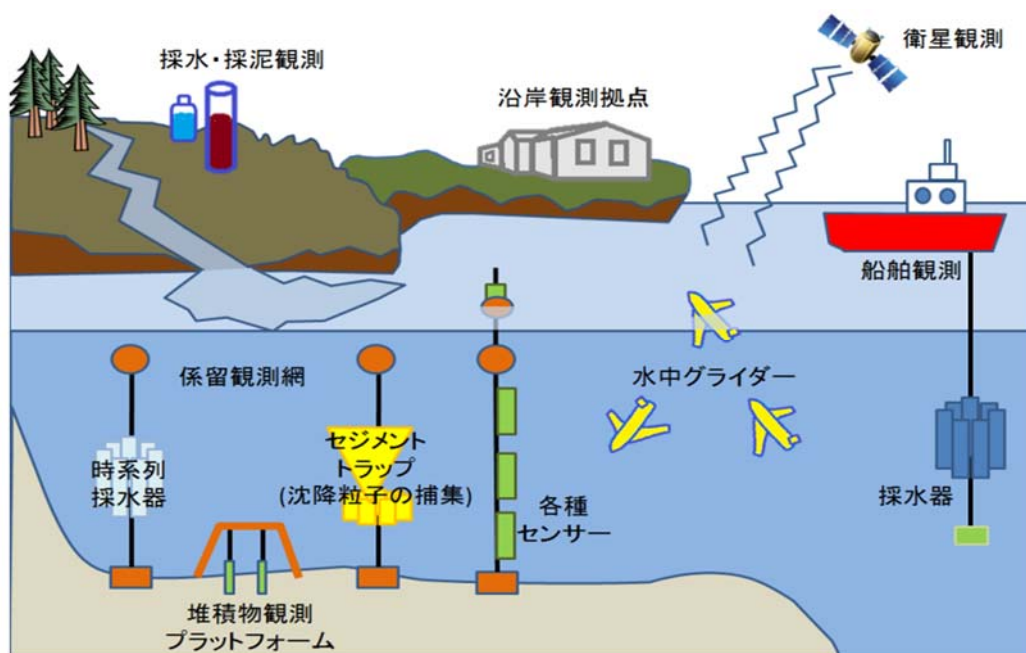


図 14 陸から海への物質輸送に関する観測の模式図

期待できる。

陸においては、中・小規模河川を含む様々な河川においては、センサの係留や定期的な採水観測により各物質の濃度やフラックスの季節変動や長期変動をモニタリングし、陸上の水文学的観測(テーマ 4)を併せることで、物質が河川を通じて海洋へ供給されるプロセスを定量的に解明することが重要である。また、温度や水分の変化が土壌からの物質溶出に与える影響を定量的に明らかにするための現場実験や室内実験などを行うことも、モニタリング観測結果の解釈や将来予測モデルの開発に必要であろう。さらに、土壌や採水試料について多種の化学分析を行い、新たな陸起源物質のトレーサの探索・開発を行うことは、陸起源物質の海洋での循環過程を定量的に把握する上で有用である。

河川以外の海岸侵食や氷床融解に由来する物質に関しては、陸域観測と沿岸の船舶観測により、その分布、海洋への供給の規模、頻度を把握する必要がある。

河口域および沿岸域での変質・除去・分配過程は、陸起源物質の海洋への影響を理解・予測する上での鍵となるが、現状では定量的な理解が大きく不足している。陸起源物質の影響が大きいと思われる主要な海域を選定し、陸域から河口域・沿岸域での物質循環を総合的にモニタリングすることが必要である。小型船舶による定期的な観測に加えて、係留型のセンサや時系列採水器、堆積物観測プラットフォームなどを利用するこ

とで、陸起源物質の分布、および光化学プロセスや生物による取り込みなどの詳細な季節変動や経年変化およびこれらの変化・変動と物理環境との関係を明らかにすることが望まれる。浅海域での係留観測には生物による汚染や海水による破損等の問題があるが、これらを克服することで、陸起源物質が沿岸の生物生産や海洋酸性化に与える影響や、陸起源炭素の除去・再無機化について詳細かつ定量的な理解が可能になるだろう。

また、北極海に入った陸起源物質は北大西洋に流出し、より広範囲の物質循環や生物生産に影響を与える可能性がある。このため、北極海周辺海域を含めた外洋域での観測も必要である。広域船舶観測に加えて、衛星海色センサを用いた溶存有機炭素の分布の把握、係留系やグライダーに搭載した各種センサや採水器による海水下の観測などによる3次元解析により、陸域起源物質の行方を把握することが望まれる。新たな陸起源トレーサの利用が可能になれば、海洋における陸起源物質の分布に関する知見を大きく広げることが期待できる。

さらに、これらの観測や実験結果をもとに、陸から海までの物質循環モデルの開発・改良を行い、気温・水温上昇や季節海氷域の拡大などの環境変化の中で、陸起源物質の動態がどのように変化し、それが北極海ならびに全球の海洋生態系へどのような影響を及ぼすかの予測に繋げることも非常に重要である。

Q4: 海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか?

a. 研究の重要性と現状

近年、北極海で急激に進行しつつある温暖化や海氷減少によって、北極海の物質循環や生態系がどう変化し、CO₂ やメタンをはじめとした温室効果気体が大気-海洋間の交換にどの程度影響するのかを定量的に評価することは、北極圏、ひいては全球の気候システムを理解するうえで重要な課題である。図 15 に温暖化・海氷減少に伴う北極海の物質循環・生態系の変化についての模式図を示した。現在の北極海は年間 $66 \sim 199 \times 10^{12}$ gC の CO₂ を吸収すると見積もられており、これは全球の CO₂ 収支の 5~14%に相当する (Bates and Mathis, 2009)。このことから、北極海は全球的な炭素循環に大きな影響を及ぼしていると言える。しかし、この見積もりは限られた海域の春から夏に偏ったデータに基づくもので、より信頼のおける見積もりのために

は、大気-海洋間の CO₂ 交換の季節変動や海域による違い(縁辺海・海盆スケール)を明らかにしていく必要がある。また、北極海の水温上昇、淡水化、酸性化、一次生産(植物プランクトンによる CO₂ の取り込み)など、CO₂ の吸収や放出に影響を及ぼす物理・化学・生物プロセスを総合的に理解することも必要である。

他の温室効果気体やエアロゾルの大気-海洋間の交換と気候変動との関連については、本テーマの Q1 を参考されたい。特に、北極海から大気へ放出されるメタンについては、全海洋から放出されるメタンの約半分にも匹敵する量(年間 8×10^{12} gC)がシベリア沿岸から放出されていると見積もられているが、海底永久凍土の融解によりメタンの放出量はさらに増えると予想される (Shakhova et al., 2010)。

大気-海洋間の CO₂ 交換を左右する一次生産は、

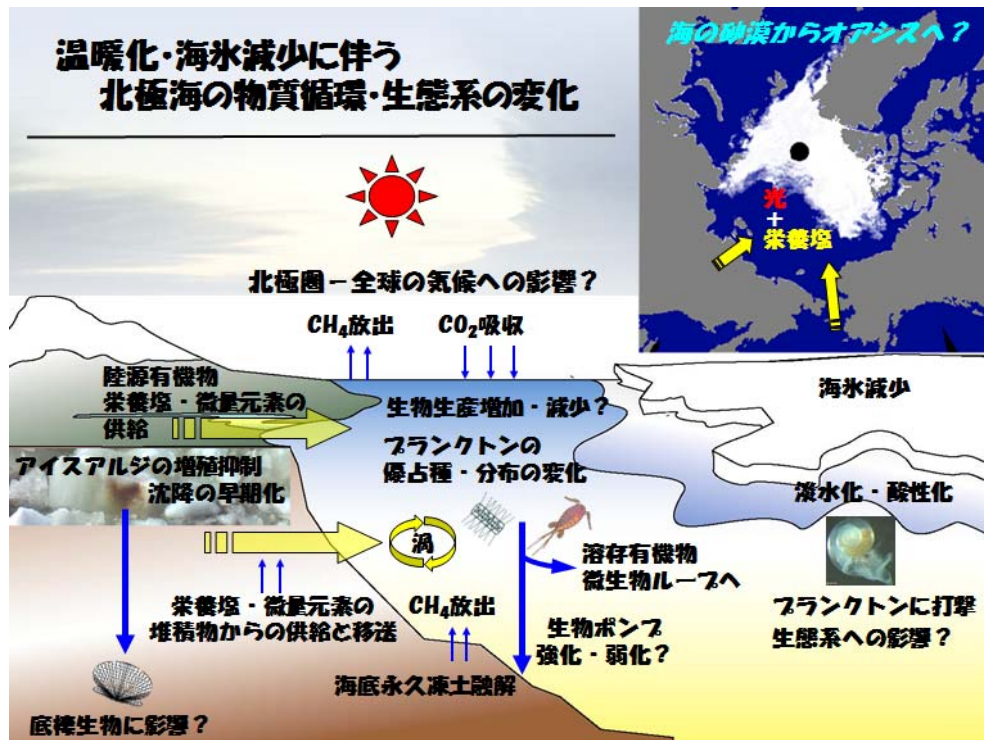


図 15 温暖化・海水減少に伴う北極海の物質循環・生態系の変化。右上の図は、Compiled by F. Fetterer and C. Fowler. 2006, updated 2009. National Ice Center Arctic Sea Ice Charts and Climatologies in Gridded Format. (<http://dx.doi.org/10.7265/N5X34VDB>) を元に加工した。

海洋生態系にとっても重要な要素である。近年の北極海の海水減少により、海水中への入射光量が増加し、一次生産が増加すると見られるが、場所によっては海水融解に伴う成層の強化や淡水蓄積による栄養塩躍層⁶⁴の深化のため下層からの栄養塩供給が抑えられ、一次生産が低下することも考えられる。また、表層栄養塩濃度が低下すると植物プランクトンが小型化するとの報告もある。一次生産による CO_2 吸収能を正確に評価するには、プランクトンのサイズ（群集組成）を把握する必要もある。一般に、より大型の（あるいは群体を形成する）プランクトンが優占すると、粒子の沈降フラックスが増加し、 CO_2 吸収能が大きくなる。表層栄養塩濃度の低下が著しい海域では、渦が陸棚域から栄養塩や有機物を運ぶ役割が相対的に重要性を増し、物質循環や生態系に影響を及ぼす可能性もある。また、近年北極域で観測される低気圧活動の活発化により、海洋の鉛直混合が促進され、栄養塩の表層への供給が一次生産や沈降粒子を増加させる可能性もある。一方で、海水減少はブライン⁶⁵中に付着して生息するアイスアル

ジー⁶⁶や海氷下でブルーム⁶⁷を起こす植物プランクトンのように、暗所に馴化した微細藻類の増殖を抑制する可能性がある。また、早期に海水が後退することにより、アイスアルジーが早期に深層へ沈降し、底棲生物の生態に影響を及ぼす可能性がある。

北極海で一次生産により生物に固定された炭素の 20～50%は、他の海域同様、溶存有機物を介して微生物ループと呼ばれる食物連鎖系に流れるものと推定される。また、北極海では、表層の一次生産とともに、次のような独自の有機物供給メカニズムが存在することに注目する必要がある。

- 1) 河川からの大量の溶存有機物の流入
- 2) 氷の融解に伴う有機物供給
- 3) 生産性の高い縁辺海からの有機物流入

特に 3) についてはアラスカ沖のカナダ海盆では、太平洋起源水が一次生産の高いチャクチ海陸棚域を通して有機物を運んでくるため、その層で細菌生産活性が高いことが分かってきたが、陸起源有機物の供給が多いシベリア沖の細菌分布や生産速度については、観測

⁶⁴ 栄養塩躍層：水深とともに栄養塩濃度が急激に増加する層。

⁶⁵ ブライン：海水生成時に海水に含まれる塩分が排出されることで形成される高塩分で高密度の水。

⁶⁶ アイスアルジー：海氷底部に繁殖する藻類。

⁶⁷ ブルーム：海洋植物プランクトンの光合成活動が盛んになり爆発的に増殖する現象。

が少なく未知な点が多い。また、北極海における水温上昇が、細菌やその他の微生物に対して及ぶ影響についても不明な点が多く残されている。

海洋生態系にとって、もうひとつ重要な要素は、海洋酸性化である。北極海は、CO₂の吸収を妨げていた海水の蓋がとけて無くなったことで、酸性化が急速に進行した(Yamamoto-Kawai et al., 2009)。酸性化の進行により、すでに一部の海域で炭酸カルシウムが溶ける環境になっており、今後さらに拡大することは必至である。炭酸カルシウムの殻を持つプランクトンや底棲生物がダメージを受け、さらに食物連鎖網を通じてより高次の生態系に影響することが懸念されている。一方、チャクチ海や東シベリア海の陸棚底層では、生物由来あるいは陸起源の有機物の分解に伴い生成されるCO₂が海水をさらに酸性化している。今後予想される陸起源有機物供給の増加により、底棲生物への影響が深刻化する可能性がある。

チャクチ海や東シベリア海などの陸棚底層は、窒素や微量元素の循環を議論するうえでも重要な海域である。この海域の陸棚底層では脱窒素⁶⁸が起きており、そこを通過して北極海に流れ込む太平洋起源水は大西洋起源水に比べて窒素栄養塩が不足している。このため、太平洋側北極海の一次生産は、主に窒素栄養塩によって制限されている。一方、一次生産に必須の微量元素である鉄分は、冬季に陸棚上で海氷が生成される際に、海水中に高濃度で取り込まれ、海氷と共に移送されている。また、海氷生成に伴うブライン排出によってできる高密度陸棚水(DSW)⁶⁹にも、陸棚上の堆積物由来の鉄分が多量にとりこまれ、DSWと共に陸棚斜面に移送されている。微量元素は、また、エアロゾルによっても北極海に運ばれている可能性もある。このような窒素や微量元素の循環が、環境変動に伴ってどのように変化するかという点が、今後の太平洋側北極海における一次生産力を左右する鍵であると考えられる。

b. 今後の研究

北極海の炭素、窒素、微量元素の循環とその変動を明らかにし、北極圏—全球気候システムの理解に資するには、地域的にも季節的にも偏りの無い観測データを取得する必要がある。広域な観測データを取得するには、国際協力の下に複数船舶で観測を実施する必要がある。海洋渦等を分解できる中規模スケールの観測が望まれるが、時間的制約があるため、衛星観測や数値モデルの結果をもとに対象海域を絞る必要もある。これまでは、日本、米国、カナダ、ロシア、中国、韓国が、国際生物観測網⁷⁰を組み複数船舶でチャクチ海の繰り返し観測を行ったり、日本—カナダが共同でカナダ海盆の広域観測を行ったりして、前述のような研究成果に貢献してきた。

しかし、まだまだデータ空白域が多く、特にシベリア側の北極海は、生物地球化学的な変化が最もダイナミックに起きている海域にもかかわらず、ロシアEEZ内、あるいはそれに近接しているため、利用できるデータが非常に限られている。また、厚い海氷に阻まれて観測が困難であった多島海側の大陸斜面から海盆にかけてもデータが不足しているが、氷河・氷床融解による物質循環や生態系への影響を評価するために重要な海域である。さらに、冬季の氷上キャンプでの観測やセジメントトラップ⁷¹・係留系⁷²による通年観測を通じて、夏季の船舶観測だけでは得られないデータを取得し、海洋構造や物質循環・生態系の季節変化を把握する必要がある。また、培養・飼育実験や数値モデリングを行い、それらのデータと、船舶観測やセジメントトラップ・係留系等から得られる現場データとを比較・融合することにより、物質循環過程と生態系との関係や、酸性化の仕組みと実態を定量的に評価する必要がある。これらの研究活動は、今後計画されているRUSALCA⁷³やAODS⁷⁴等のプロジェクトと連携し、国際協力のもとにボーダーレスに実施することが望まれる。同時に、日本が得意とする多項目分析や高品質データの取得、また、日本が先導する衛星観測やモデル研究との連携により日本のオ

⁶⁸ 脱窒素：海底堆積物などに存在するバクテリアの働きで主として硝酸態窒素NO₃⁻が窒素ガスN₂もしくは酸化窒素N₂Oの形に還元されて大気中にガス状で放出される現象。

⁶⁹ 高密度陸棚水：Dense Shelf Water (DSW)。陸棚上で冬季に冷却を受け海氷生成時に形成される高塩分で高密度の水。

⁷⁰ 国際生物観測網：Distributed Biological Observatory (DBO)。

⁷¹ セジメントトラップ：海水中の沈降粒子を採取する漏斗型の捕集器。

⁷² 係留系：海底に沈めたおもりと海水中の浮き(フロート)を索でつなげ、主に水温や塩分、流速などを時系列で計測するセンサーを取り付けた観測システム。

⁷³ RUSALCA: Russian-American Long-term Census of the Arctic

⁷⁴ AODS: Arctic Ocean Drift Study

リジナリティを示すことが重要である。

新しい技術を取り入れ、化学・生物センサや観測プラットフォームの開発、および、衛星観測の高度化を進めることにより、新たな物質循環像や生態系の変動が見えてくることが期待される(9章 研究基盤の整備を参照)。化学・生物センサについては、係留系に取り付けることで観測パラメータの季節変動を把握したり、CTD⁷⁵や乱流計⁷⁶に取り付けることで、今まで捉える事のできなかった微細構造を計測し、新たな水塊の起源や形成過程を議論できるだろう。また、物理センサの計測と合わせて物質のフラックス等を見積もることにより、炭素・窒素・微量元素の循環の定量的な解析が可能となるであろう。プロファイリングフロート、水中グライダー、自律型無人潜水機⁷⁷等に化学・生物センサを搭載したり、採水機能を付けることにより、開放水域のみならず海水下の多様な化学・生物観測も可能となるかも知れない。海底堆積物と直上水間の栄養塩や、メタン、微量元素などのフラックスを観測できるシステムも、陸棚域での物質循環や陸棚-海盆間相互作用の理解に必要である。衛星からのデータ、特に Chl-a 分布は北極海の生態系の理解に欠かせない。しかし、雲によるデータの欠損や、河川から供給される有色溶存態有機物(CDOM)による Chl-a の過大評価、亜表層 Chl-a 極大の見積もりなど克服すべき問題がある。また、将来的には植物プランクトンのサイズ分布や一次生産などの時系列変化を広範囲に精度良く捉えることができれば、環北極海域の海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのかということに応えるための強力な武器となる。

⁷⁵ CTD: Conductivity Temperature Depth profiler の略で、海洋中の電気伝導度、温度、水深(水圧)を計測する測器。電気伝導度と水温、圧力から塩分を計算する。

⁷⁶ 乱流計: 海洋中の乱流混合の大きさを計測する測器。

⁷⁷ 自律型無人潜水機: Autonomous Underwater Vehicle(AUC)。

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