

る。たとえば、現地で撮影した画像や衛星画像から特定の種を自動で検出することも可能かもしれない（Takaya et al., 2022; Watanabe et al., 2020）。

北極圏における資源開発に注目が集まるなか、自然環境の保全にも配慮する必要がある。とくに、気候関連財務情報タスクフォース（TCFD）や自然関連財務情報開示タスクフォース（TNFD）に賛同する日本企業は増加しており、投資家からの関心も高まっている。言語的な障壁を考慮した場合、日本企業と日本の研究コミュニティが連携する事例が増加すると考えられる。そのため、現段階から日本の研究グループが現地で研究活動を開始し、将来の資源開発が北極の環境に与える影響を適切に評価する必要がある。今後、国際的な企業活動をする上で避けては通れないネイチャーポジティブを実現するためにも、日本の研究者が経済界に適切な助言を行うことで、北極の自然環境を保全する仕組みを構築することが求められる。

1-4-3 物質循環 Biogeochemical Cycles

佐藤永

1) 研究の現状

寒帯・亜寒帯地域の景観と炭素循環の概要

寒帯・亜寒帯地域の陸域（Arctic-Boreal Region、以下 ABR と呼称する）は、主に常緑性針葉樹林帯、落葉性針葉樹林帯（カラマツ林帯）、ツンドラ、および寒帯砂漠や氷床によって被覆されている。このうち、針葉樹林帯については、林野火災などの大規模攪乱が生じた後に、まずは落葉性広葉樹林が発達し、徐々に針葉樹林へと遷移していくことが一般的であり（Youngblood, 1995）、景観レベルでは、しばしば広葉樹林帯、針葉樹林帯、針広混交林帯がモザイク状に分布する。そして、針葉樹林か広葉樹林のどちらに覆われているかに応じて、隣接した区画であっても、大気-陸面間相互作用に差が生じることが知られている（Liu and Randerson, 2008）。たとえば、針葉樹は広葉樹よりも蒸散速度が低いため、夏季の潜熱フラックスが低い。加えて、針葉樹は広葉樹に比べてアルベドが低く正味放射量が大きいため、顕熱フラックスが大きくなる傾向がある。

また植生は、陸域における炭素循環の主要プレイヤーであり、その変動は大気中 CO_2 濃度を通じて気候変動に影響をもたらす。ここで炭素循環とは、地球上のさまざまな場所（生物圏・岩石圏・水圏・大気圏）と状態（大気中 CO_2 ・海中の溶存 CO_2 ・生物量・土壌有機炭素・炭酸カルシウムなど）の間で炭素が循環することである。陸域における炭素循環は、光合成による大気中 CO_2 の植物生物量への変換、枯死・落葉落枝・植食にともなう植物生物量の枯死物への変換、枯死物や土壌炭素の分解にともなう CO_2 放出により主に駆動される（図 1-4-4）。これら各コンポーネントにおける炭素貯留量は炭素プール、各コンポーネント間の炭素移動量は炭素フラックスと呼ばれる。また、陸域においては、炭素と共に窒素やリンも循環する。

ABR の植物生産性は一般に、低い年平均気温、短い植物成長期間、不足しがちな可給態窒素によ

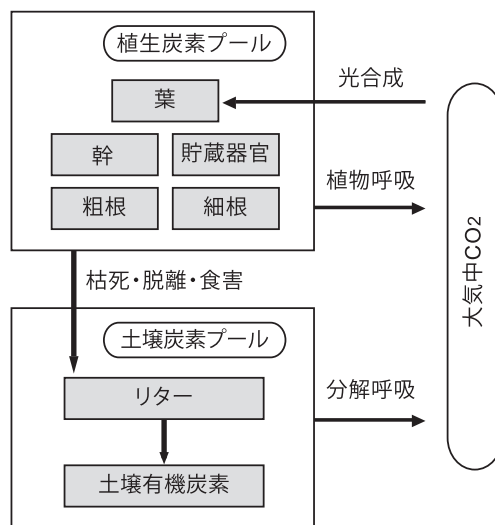


図 1-4-4 植生における炭素循環の概略。細根と粗根は回転速度が大幅に異なるため、異なる炭素プールで表現されることが多い。動物生物量は、植物生物量に比較して数桁小さいため炭素プールとしては省略したが、食植者は植物生物量から枯死物へのフラックスの増大として炭素循環に影響する。佐藤ほか（2018）より改変。

り制限されている。そのため、ABRの陸地面積（おおむね北緯55度以北）が世界の陸域面積の約17%を占めるのに対し、その植物生産性は全球陸域の8%を占めるに過ぎない（Rogers et al., 2021）。ABRにおける炭素フラックスの推定値の幅は極めて大きいものの、現状では、正味の炭素シンクとして機能している可能性が高い（Bradshaw and Warkentin, 2015）。ただし、この炭素吸収フラックスは、1980年代から2000年代にかけて減少したと推定されている。

ABRの一部地域（主に東シベリアと北米大陸のアラスカ、カナダ北端）には、永久凍土が発達する。永久凍土は、2年間以上にわたり継続して温度 0°C 以下となる土壤または地盤であり、地球上には高緯度帯を中心に、 $21 \times 10^6 \text{ km}^2$ の永久凍土地帯が存在すると推定され、これは氷床を除く全球陸面の約22%に相当する（Obu et al., 2019）。高緯度帯の永久凍土には約1,070–1,360 PgCもの有機物が含有されていると推定されており、これは全球の土壤炭素（永久凍土中の炭素を含む）とバイオマスの合計の約36%に相当する（IPCC, 2021）。この土壤圏に含まれる巨大な炭素蓄積が、周北極域における陸域炭素画分を大きく特徴付けている。

永久凍土帯においても、夏季には地表面付近が融解することがあり、この季節的に融解と再凍結を繰り返す層を活動層（active layer）と呼ぶ。永久凍土帯に生育する植物においては、この活動層が唯一の給水源となる。そのため、永久凍土上に広がる森林生態系（東シベリアのカラマツ林帯や北米大陸のクロトウヒ林帯など）においては、この活動層の厚さが、しばしば木本密度や植物生産を制限していると指摘されている（Beer et al., 2007; Kajimoto et al., 2007）。その一方で、東シベリアのカラマツ（落葉性針葉樹）優占エリアの南側境界は、永久凍土が存在する境界とほぼ重なることから、不透水層に近い性質を持つ永久凍土が土壤水を土壤表層付近に留めることで、年降水量が250 mm程度に過ぎない東シベリア一帯に森林帯を存続させているとも考えられている（Tchebakova et al., 2009; Zhang et al., 2011）。

気候変動にともなう植生変化と炭素循環の変化

ABRでは急速な温暖化傾向が観測されており、ABRの気温上昇幅は全球平均のそれに比べて、20世紀最後の20年間では2–3倍、21世紀最初の20年間では4倍以上を示している（Chylek et al., 2022）。この温暖化傾向の元で、北半球全体における春期積雪量の減少、1990年代以降に加速した氷河の後退（これは少なくとも過去2000年間で初めて生じた事象である）、そしてグリーンランドにおける2000年以降の大幅な氷床の質量減少、といった大規模な環境変化が生じている（IPCC, 2021）。この気温上昇の要因の約半分が大気中 CO_2 濃度の上昇によるものと推定されており、温暖化ガス排出が多いシナリオ共通社会経済経路（SSP）3-7.0では、2100年までに、全球平均気温は現在よりも約 3.1°C の上昇、そしてABRでは現在よりも 7.7°C の上昇が見込まれている（IPCC, 2021）。

一般にABRで植物種の分布限界を制限しているのは低温と短い成長期間であるため（Paquette and Hargreaves, 2021）、温暖化傾向の元では単純に植物生産性が高まり、そして森林生態系がより高緯度・高標高に移動するとも期待される。実際に、気温上昇と大気中 CO_2 濃度の増加は、近年ABRの多くの地域、とりわけ森林密度が低く土壤窒素が豊富で夏期温度の低い地域、で観測されている緑化トレンドを説明するかもしれない（Berner and Goetz, 2021）。またABRの植生が、近年の温暖化傾向にともなって、より早く展葉し、より遅く落葉する様子が衛星リモートセンシングによって観察されている（Piao et al., 2020）。多くのツンドラ域においては、低木の被度や生物量が一貫して増加する傾向が、近年数十年間にわたり観測されている（Myers-Smith et al., 2011）。

このような温暖化にともなった植物生産性の増大傾向が見込まれる一方で、気候変動にともなって乾燥化が予測される地域（たとえば北米の一部地域）では、逆に森林帯が衰退して乾燥耐性の高い灌木林や草原帯に移行する可能性も高い（Gauthier et al., 2014）。1982–2008年の間の衛星リ

モートセンシングデータの比較では、ユーラシア大陸、北米大陸共に、全体に高緯度側で植物生産力（総一次生産、GPP）の増加傾向、低緯度側で減少傾向が観測されている（Beck and Goetz, 2011）。Ree ら（2020）は、周北極域のタイガーツンドラ境界の 151 ヶ所における 20 世紀中の植生分布と気候の記録を調べ、これらの約半数において境界の北上が生じたことを明らかにしたが、それは気温上昇よりも降水量増加により強く相関していることを示した。

また、現在針葉樹が優占している多くの地域において、落葉性広葉樹と低木から構成される初期遷移種の被度が増す可能性が高い。その理由は、これらの樹種は気温の上昇や CO₂ 濃度上昇による植物生産性の増加幅が大きいからである（Way and Oren, 2010）。この予測と整合的な観測結果が、すでにカナダ国内における森林の長期観測データ（17,107 プロット、観測期間 1951–2016 年）から得られている。この研究では、攪乱イベントからの経過時間の影響を取り除いた条件において、カナダ国内の森林の構成が、後期遷移型の常緑針葉樹林から初期遷移型の落葉性広葉樹林へと移行しつつある傾向を明らかにしている（Hisano et al., 2021）。

このような樹種の交代は、まずは大規模な攪乱跡地で顕著に生じると考えられている。なぜならば、高緯度帯の森林は一般に寿命が長く、既存の樹種にとって気候環境が多少不得手な方向に変化したとしても、すぐには枯死せずに、より新しい環境に適応的な樹種への切り替わりを妨げるからである（Gillson et al., 2008）。よって植生構成の変化速度は、気候変化の速度に加えて、大規模な攪乱の頻度によっても強く規定される。

ABR における主要な攪乱要因として林野火災が挙げられるが、林野火災の頻度と強さは共に温暖化傾向の元で高まると見込まれている（Flannigan et al., 2009）。ただし林野火災は、森林帯の更新に必須である場合もある。たとえばカナダやアラスカの亜寒帯林に優占するクロトウヒは、成熟した球果を枝上に長期間蓄え、森林火災直後のみ球果が開き種子を散布する。このように、クロトウヒは林野火災に依存した更新機構を持つものの、定着して球果をつけるようになるまでの期間に繰り返しの林野火災に遭うなどと更新不良となり、広葉樹やバンクスマツが優占する森林へと推移してしまうことが知られている（Baltzer et al., 2021）。

温暖化傾向の元で、より強度が強まる可能性が高い攪乱因子としては、病虫害が挙げられる。ただし、その被害の規模は、食植者や病原体と植物との間の生物間相互作用によって決まるため、大きな予測不確実性がある。さらに、元々の自生地には存在しない病虫害が、気候変動と人間活動によって侵入してくる可能性もある（Gauthier et al., 2014）。

気候変動にともなう永久凍土と、含有炭素・窒素の変化

近年の温暖化傾向にともない、地表面付近の永久凍土の融解が生じている。永久凍土の融解にともない、ほぼ不透水層であった土壤が水を通わせるようになるため、融解した土壤水の移動にともなう地盤の不均一な沈降や、生じた窪地に土壤水が溜まることによる湖沼（サーモカルスト湖）形成などが生じている（Walvoord and Kurylyk, 2016）。同時に、凍結状態にあった土壤有機物が、土壤温度の上昇や、空気に触れるなどの環境変化を受けることで分解が促進され、CO₂ や CH₄ として大気へ放出されはじめている。永久凍土に含有される膨大な土壤有機物は、1,000 年スケールの時間をかけて徐々に蓄積したものである（IPCC, 2021）。高緯度帯の永久凍土地帯の土壤炭素のうち、永久凍土内に 1,070–1,360 PgC、永久凍土内の地下 1 m までの浅い層に 300–400 PgC が存在すると推定されている（IPCC, 2021）。永久凍土地帯は、これまでは炭素のシンクとして機能していた可能性が高いが、予測される気候変動の元において、地表面に近い永久凍土層はほぼ消失（融解する時期が毎年生じる）する可能性が高く（Lawrence et al., 2015）、それにともない永久凍土地帯における炭素蓄積量はほぼ確実に減少する見通しである（IPCC, 2021）。

永久凍土の融解は、そこに含有される加給態窒素の開放をとともなう。ツンドラ域においては一般

に、維管束植物の生産性は窒素とリンにより制限されているが (Myers-Smith et al., 2011)、この土壌深部で開放される窒素は、そのような植物生産性の制限を緩めると指摘されている。実際に、グリーンランド沿岸部で行われた野外実験では、自生するすべての植物は新たに開放される永久凍土中の窒素を獲得できることが示されている (Pedersen et al., 2020)。またこの実験では、低木であるホッキョクヤナギが、同じ場所に自生する他の低木種や草本種に比べて、最も高い効率で新たに開放される窒素を吸収できることが示されており、このような土壌深部の栄養塩を巡る競争関係が、今後の周北極域における植生構成に影響をもたらす可能性がある。

ABR の温暖化傾向にともなう森林帯の拡大は、生物量の増大をとともなうため、ABR の植生帯の炭素シンクとしての機能を強化するはずである。しかし、それ以上に永久凍土中の土壌有機物の分解が進むことで、ABR 全体としては炭素のシンクからソースへと切り替わることが予測されており、カナダの西部やシベリアなどについて、すでにこのような切り替わりが生じていると考えられている (Gauthier et al., 2015)。しかしながら、気候変動にともなう永久凍土中有機炭素の消長については、最新の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第6次評価報告書 (AR6) においても、ごく少数の気候モデルのみが考慮している状況である (IPCC, 2021)。それらの気候モデルにおいても、温暖化にともなう活動層の深化と、それにともなう地下部炭素の分解促進を考慮するのみであり、サーモカルストの形成や、林野火災と永久凍土との相互関係などを考慮するモデルは存在せず、予測の不確実性をさらに大きくしている。

2) 長期研究戦略

以上で俯瞰したように、ABR の陸域物質循環を大きく制御するプロセスについても、その定量的な理解は不完全であり、これが現在の地球システムモデルに大きな不確実性を与えている。ABR の物質循環や気候フィードバックの予測信頼性の向上に資するために、長期的な視点を持って取り組むべきであると筆者が考える研究領域を3つ挙げる。なお、これら研究領域は密接に関連する。

a. 永久凍土の融解にともなう物質循環への影響

永久凍土の融解にともなう物質循環の変化は、気候、水文、植生、および攪乱 (林野火災や植食昆虫の蔓延による) プロセス間で生じる相互作用の結果として生じており、その複雑性から、現在の地球システムモデルでは十分に考慮されていない (Walvoord and Kurylyk, 2016)。また、全球が扱う粗い地理スケール (たとえば 0.5 度など) と、サーモカルスト湖の形成などが生じる地理スケール (10~数百 m 程度) との間のギャップをいかに埋めるのかについても、今後重点的な検討を進めるべき課題である。なぜならば、0.5 度間隔などの粗い格子スケール内の環境を平均場として扱うことは、ABR におけるシミュレーション出力を大きく歪めてしまうリスクがあるからである。たとえば、Sato et al. (2020) は、東シベリア全域の永久凍土地帯を扱ったシミュレーションにおいて、シミュレーション格子 (0.5 度) 内における土壌水の再配分を考慮しない場合、予測される今世紀末の気候条件下で、東シベリア全域のカラマツ林帯が過湿枯死すると予測されるが、シミュレーション格子内の土壌水の再配分を考慮した場合には、過湿枯死帯はグリッド内の排水の悪い画分のにみに集中し、景観スケールとしてはカラマツ林帯が維持される可能性を示している。

前述したように、ABR には巨大な土壌炭素蓄積が存在し、それは変化する気候環境の影響を大きく受けると考えられている。しかし、その蓄積量の見積もりには、次の理由により不確実性の幅が大きい (Yu et al., 2011) : ① 深さ 1 m 以内の土壌圏を対象とした観測が一般的であり、それより深い土壌層における土壌炭素蓄積量の観測は不十分である、② ABR には、最近の氷河活動によって土壌が薄くなっている地域があり、その地理分布を正確に考慮することが難しい、③ 高緯度帯には、高い炭素蓄積を持つ泥炭層が発達しているが、その地理分布は著しい非連続性を持つ。さらな

る観測によりその埋蔵量を的確に見積もることは、陸域の炭素収支の予測において重要である。

b. 過湿・乾燥・高温ストレス条件における木本死亡率のモデリング

永久凍土の融解は段階的に生じる。当初は、融解した永久凍土に含まれる水分により湿潤化が生じ、その後、融解することで土壌の透水性が高まるため、乾燥化が生じる (Jin et al., 2021)。したがって、今後予測されている地表面付近の永久凍土帯の消失にともなって、この地域に分布する森林生態系は、過湿・乾燥双方の要因による枯死が生じる可能性が高い。すでに永久凍土の劣化にともなった森林帯の過湿枯死については多くの報告がされている (カンバ林やクロトウヒ林から湿地への変化 (Baltzer et al., 2014; Jorgenson et al., 2001)、低木林からイネ科主体の草原への変化 (Christensen, 2004)、カラマツ林帯における過湿枯死帯の出現 (Iijima et al., 2014))。また、ABRを含む、世界のあらゆる森林生態系において乾燥と高温ストレスによる木本の枯死や成長不良が報告されている (Allen et al., 2010)。

しかし、このような乾燥や過湿枯死を的確に扱うことのできるモデルは存在しないのが現状である (Pugh et al., 2020)。その主な理由は、木本の死亡が、気候変動が木本の死亡を生じさせるための生理的限界に加えて、弱体化した木本が害虫の害を受けやすくなるなどの生物的相互作用も影響するなど、さまざまなプロセスが関与する複雑な現象であるためである。ともあれ、今後、環境変化が何らかの臨界点 (ティッピングポイント) を超えると木本死亡率が一気に高まる可能性もあり、このような気候変動にともない生じうる木本枯死は、地球システムにおける急激で非線形な変化、いわゆる「ティッピングエレメント」の1つとも見なされている (Lenton et al., 2008)。森林が成立しているか否かは、陸域の物質・エネルギー循環に支配的な影響を持つため、それを的確に予測できることは極めて重要性が高い。全球に適用可能な木本死亡モデルの構築に資するため、木本死亡率変化の全球的な観測ネットワークが構築されつつあるなど (Hartmann et al., 2018)、一定の努力が行われているものの、今後はこのような努力を継続すると共に、観測研究者とモデル研究者とのさらなる連携が必要とされる。

c. 植物生産力の広域推定

炭素循環の不確実性低減においては、広域における GPP の正確な推定が欠かせない。しかし GPP は、植生の種構成や樹冠構造によって、また気温・降水量・日射量といった気象条件によっても制御されるため、その広域における推定値には未だに大きな不確実性が存在する。とくに、ABR で広く優占する常緑針葉樹は、冬期には GPP がほぼ 0 に近づくものの、光合成有効放射吸光度・葉面積・葉緑体含有度といった、広域で推定可能な指標には季節変化がほとんど生じないため、広域における GPP 推定には技術的な難しさがあった (Magney et al., 2019)。

近年、太陽光誘起クロロフィル蛍光 (Solar-Induced Fluorescence, SIF) を利用した GPP 推定法が広く利用されるようになった (野田ほか, 2019)。SIF は、光合成系に吸収された光エネルギーの一部が放出された蛍光であり、光合成有効放射の吸光度などに基づいた従来の手法に比べ、より GPP に強く関連した指標とされている。実際に SIF は、常緑針葉樹林における GPP の季節変化とも強く関連することが示されており (Magney et al., 2019)、ABR における GPP の不確実低減に極めて有用であることが示されている。また、SIF による GPP の推定は、雲の影響を受けにくく (Frankenberg et al., 2014)、葉面積指数が高くなっても飽和しにくい (Magney et al., 2019) という利点がある。その一方で、①葉緑素が吸収した光が SIF として放出する割合が一定である、②葉から放出される SIF が葉群構造内で吸収されずにすべてが林冠から上方に発せられる、といった必ずしも適切でない仮定が置かれることが多く、技術的な課題が残存する (野田ほか, 2019)。

現在、複数の地球観測衛星が広域で SIF の観測を続けており、それをういて年間を通じた全球 GPP 推定が行われている (Li and Xiao, 2019)。それらでは、地球観測衛星から得られる粗い解像

度の SIF データ（たとえば、温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT および GOSAT2 では約 10 km）と、タワーサイトで測定したはるかに狭い地理範囲を代表する GPP 推定値との相関を元に、広域の GPP を推定している。アメリカ航空宇宙局は、北極域生態系の脆弱性を衛星・航空機観測やモデル解析で明らかにする大規模プロジェクト Arctic-Boreal Vulnerability Experiment (ABOVE) を、アラスカとカナダにおいて 2015 年より実施している。ここでは、GPP を継続的に測定している複数のタワーサイトを含む広域で SIF を空間解像度約 10 m で観測している (Miller et al., 2019)。今後は、このようなデータを活用することで、SIF による GPP 推定における、より適切なスケールアップ手法を研究することが求められる。

1-5 雪氷（アイスコアを除く）

1-5-1 降積雪と気象

(1) 気象・降雪

平沢尚彦

1) 研究の現状

北極域（北緯 70 度以北）の降水の主な形態である降雪は、20 世紀にその割合を減少させ (McCrystall et al., 2021)、多くの結合モデル相互比較計画 (CMIP5 と CMIP 6) はこの傾向が 21 世紀にも継続するとしている。降水量は 20 世紀に増加しており、21 世紀には増加の速度を増すと予想されている (Vihma et al., 2016)。この要因として、温暖化による水蒸気量の増加 (Bintanja, 2018)、海水減少による海面蒸発量の増加 (Bintanja and Selten, 2014)、北極域への水蒸気輸送量の増加 (Zhang et al., 2013) を指摘する研究が多い。北極域で最も降水の多い領域は大西洋から伸びるストームトラックに沿う。そこでは atmospheric river (AR) による水蒸気輸送が頻繁に発生する (Nash et al., 2018)。

降雪の地上観測には現在でも困難な課題が残されている (WMO, 2018)。たとえば、降水粒子捕捉率の低下、地吹雪の混入、測器内での蒸発、空間代表性などがある。衛星観測は全球降水気候計画 (GPCP) で計画されているように、降水量の空間分布測定が可能であるが、電磁波強度から水当量の換算における不確実性や地表面反射の混入などの改善が求められている。

2) 長期研究戦略

北極域の降雨・降雪の量や形成メカニズムについて、温暖化による影響を含めた長期変化傾向を理解するために、数値モデルと観測データを組み合わせた再解析データは今後も研究の基盤であり、さらに気候モデルのデータの重要度が高まっていくと考えられる。一方で、これらのデータの精度を継続的に向上させるために観測の充実が不可欠である。測器による降水観測の課題の把握と精度向上を目指した活動への参画（たとえば、世界気象機関 (WMO) 主催の個体降水比較観測 (SPICE)) や観測地点の増加の努力を続けることに加え、衛星と地上の観測を基盤とした空間分布の精度の向上、および総観規模大気循環に関わる水蒸気輸送や温度構造をより高精度に把握し、降水量の評価を改善するための高層気象ゾンデ観測（たとえば、WMO 主催の極域予報計画 (PPP) / 極域予報年 (YOPP)) や無人航空機観測の拡充を構想する意義がある。

(2) 積雪の期間と分布の変化

堀雅裕

1) 研究の現状

地球上の積雪分布観測は、人工衛星搭載光学放射計の観測データを用いて今日まで行われてきているが、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) が気象予報を目的として 1960 年代に作成を開始した 1 週