

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

生態系は地球温暖化に加え、さまざまな自然に起きる環境変化と開発による影響を受ける。生態系の仕組みと

影響を記述し、その上に立って多様性の状態と変化を述べる。

テーマ 8: 陸域生態系と生物多様性への影響

要旨

北極陸域生態系とその生物多様性は、地球温暖化などの強い人為的な影響にさらされ、いま重大な変化を遂げようとしている。熱帯や温帯など世界のその他の生態系と比較しても、北極陸域における環境変化は特に大きい（IPCC 第五次評価報告書）、その影響についての知見を増進し整理することで、将来予測につなげることは急務である。にもかかわらず、北極陸域生態系に関する研究は、他の生態系とくらべて特に遅れているため、今後の重点的な推進が求められている。

テーマ 8 では、北極陸域生態系、その特に重要な構成要素である生物多様性、さらに、これらの変化が地域社会や世界的な気候変動に及ぼす影響について考察する。北極陸域生態系は、気候変動のみならず外来種や農林業など人間の引き起こす深刻な変化に直面しており、これらを理解するためのフィールド観測や実験、そして、スポット的なフィールド研究を統合して、広域での将来予測を行うためのシミュレーション研究と、リモートセンシング研究の必要性について言及する。北極陸

域の生物多様性は、地域の広さから研究と現状把握はあまり進んでいないが、さらなる調査の拡大と調査結果のネットワーク化、さらには、生物多様性を念頭に置いた環境変化への応答性についての研究などが必要となる。生態系の変化は、そこに暮らす哺乳類、鳥類といった動物の多様性にも多大な影響を及ぼす。また、広大な湿地に大量の有機炭素を蓄積する北極陸域生態系が全球の炭素循環に及ぼす影響も大きいため、これらに関するフィールド研究と、適切な将来予測を行うために必須である生態系プロセスを明示的に再現するシミュレーションモデル研究が重要となる。

このテーマで取り上げる Questions は以下の 3 つである。

- 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？
- Q2: 生物多様性はどのような影響を受けるか？
- 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？

まえがき

陸域生態系とその生物多様性は地球システムの重要な要素であり、ローカルには農林業の生産力と深く関係し、グローバルには炭素循環などを通して全球の気候へおよぼす影響も大きい。このように重要性の高い陸域生態系であるが、近年、人間のくらしや活動が直接、または間接に与える影響が深刻化しているため、現状を正しく把握し将来に備える必要がある。北極陸域における生態系と生物多様性に対する人間の影響は多岐に及ぶ（図 31）。直接的なものとしては、北極域の人間活動（土地利用変化と農林業・狩猟・鉱工業など）が与える影響があるが、間接的なものとしては、気候変動が引き起こす環境の変化（気温の上昇・降水量の変化・凍土の融解や林野火災など）などがある。本テーマで検討する内容は、北極域の人間社会への直接的な影響（テ

マ7参照）のみならず、物質循環の変動が引き起こす全球的な気候変動（テーマ 3 参照）を介してグローバルな人間社会に与える間接的な影響を考えるうえで欠かせないバックグラウンドとなるものであり、われわれ日本人をふくむ人類すべてにとって重要性と緊急性が高い。

本テーマの記述は、以下の 3 つの Questions に沿ってまとめられる。Q1 では、人為的な要因で起こる環境変動の影響が北極陸域生態系に及ぼす影響について概説する。Q2 では、そのなかでも特に生物多様性についての理解と求められる研究や対策について論じる。Q3 では、陸域植生の変化が生態系の高次消費者である動物に与える影響および植生変化による気候へのフィードバックについて述べ、本テーマから報告書全体へのアウトプットとする。

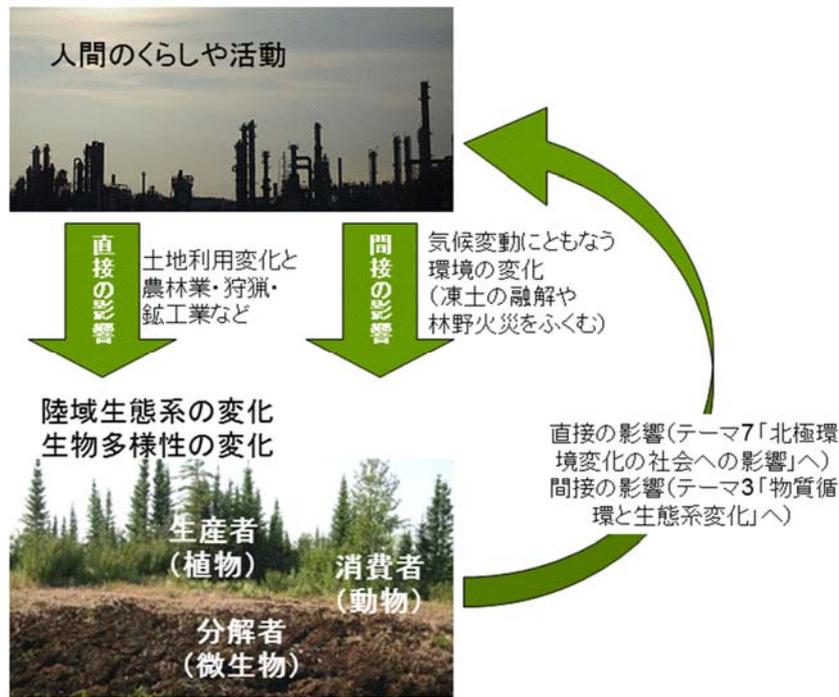


図 31 北極陸域生態系と生物多様性は、人間のくらしや活動と密接なかかわりを持っている。それは極域に暮らす人々だけの問題ではなく、気候変動を通して世界の人間社会との相互作用を持っている。

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？

a. 研究の重要性と現状

亜寒帯・寒帯の陸域生態系(以降、北極陸域生態系と呼ぶ)は、ほかの生態系と比較してさまざまな特徴を持っている。きびしい環境制限(低温、積雪、短い夏季など)に対応した、特有の生物種と生態系が特徴である。気温などの環境の季節変化が特に激しいため、季節的に群れで移動したり、一時的に北極陸域を利用する動物も数多い。また、北極陸域生態系は、森林であるタイガと、高木の存在しないツンドラというきわめて対照的なふたつの生態系によって構成されているため、科学的な理解を得るために必要な情報は多岐にわたる。北極陸域生態系は、その特異さゆえに環境のわずかな変化にも敏感であり、また、気候変動は特に北極陸域で激しくなると予想されていることから、生態系について理解しその知識を保全に活用するためにも、迅速かつ重点的な研究の推進が求められている。

地球温暖化をはじめとする人為的な環境変動は、北極陸域生態系に強い影響を及ぼしており、それは今後さらに強まっていくと考えられている。人為的な環境変動の要因は多岐に及ぶが、ここでは代表的なものを挙

げ、その影響の深刻さと現時点における科学的知見について考察する。まず、温室効果気体の排出に由来する気候変動は、気温や降水など北極陸域生態系が成立する基礎的な条件を大きく変化させつつある。また、鉱山、油田、水力発電など北極陸域に埋蔵される資源の開発が行われる際には、大気、水質、土壌などの汚染が深刻な問題となっている。人間活動は意図するかわりにかかわらず多くの外来種の流入を招き、在来種によって構成されていた生態系に影響を及ぼしている。気候変動によって南方生態系の種が侵入すること、たとえば森林限界の北上によるツンドラへの木本の侵入なども警戒されている。近年対策のめどが立ったとはいえ、極域における影響が特に大きくなるオゾン層の破壊による、有害な紫外線量の増加がもたらす生態系への影響も考えられる。

気候変動を介した影響と人間活動の直接の影響の両方がかかわる問題もある。林野火災は北極陸域生態系に甚大な影響を及ぼすが、その発生要因は多様なこともあり、メカニズムの総合的な解明はすすんでいない。林野火災は落雷などの自然着火のみならず、人間

活動が原因となることも多いことが、複雑性を高めているのも一因である。また、林野火災の深刻度は、気温、風速、土壌水分量などの物理条件によって大きく左右されるため、気候変動の影響を含めた林野火災発生のメカニズムの理解と将来予測が重要となる。さらに、林野火災が気候変動に与える影響は多岐におよび、現在の科学的知見では、それは総合的に温暖化を増幅する正のフィードバックになるか抑制する負のフィードバックになるかすら分かっていない(図 32)。

森林を構成する樹木などの植物は生態系の基礎生産を担うものであり、植生の変化は動物相や微生物相への影響をもたらす。植生の変化にも、気候変動を介するものと森林伐採など直接の人間活動によるものがある。これらは生物多様性のみならず、炭素蓄積など幅広い生態系サービスに影響を及ぼす。気候変動を介した動物への間接的な影響については Q3 で述べるが、直接的な影響としては、森林伐採や道路・鉄道などの建設による生息地分断化(habitat fragmentation)の影響も無視してはならない。北極陸域生態系には大型ほ乳類など広域を移動する動物が多く生息するため、生息地の総面積だけでなく、その形状にも注意を払う必要があるためである。また、伝染病や虫害についても、気候変動がもたらす感染地域の拡大に加えて、人間の移

動に伴う流入という要因も考慮しなければならない。

都市開発や農地開発にも注意が必要である。従来、北極陸域(特に、内陸部)は、人口密度が低く農業などの産業活動はあまり行われてこなかったのだが、温暖化によりその環境が産業活動に好適となることで、今後人間活動が高まることも考えられる。スカンジナビア半島などで見られる泥炭地を人工的に水抜きすることによる農地化などの今後についても、注意が必要である。このように北極陸域生態系の変化は多岐にわたり、その影響は甚大であると思われるが、これらについて観測し、現状を把握し、そのすべてを総合して予測するシステムの開発は遅々として進んでいない。そもそも生態系における生物プロセスは理論の一般化が難しいため、統合的かつ広域に適用可能なモデルの開発はあまり進んでおらず、そのようなモデルの必要性がやっと論じられ始めた段階にある(Purves 2013)。北極陸域では観測環境の厳しさから、そのようなモデルの妥当性を裏付けるデータ取得も他の地域に比べて困難であることが多く、モデリングおよび観測研究の両面での強力な研究推進が望まれている。

b. 今後の研究

北極陸域生態系の変動の理解と生物多様性の保全

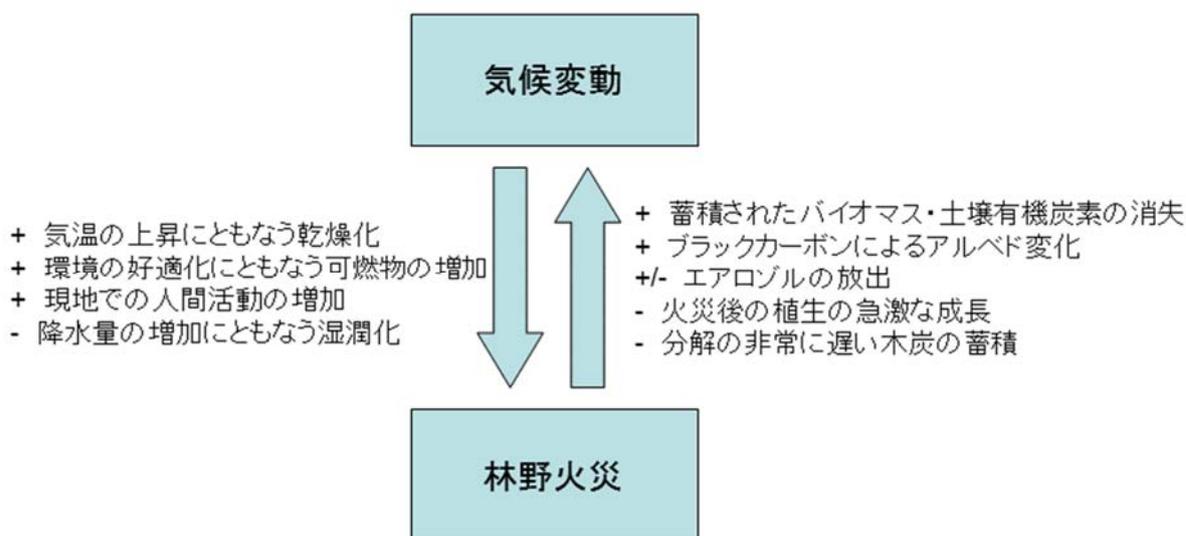


図 32 気候変動と林野火災は複雑なフィードバックを形成している。+が正のフィードバック、-が負のフィードバックを表している。気候変動によってどの程度林野火災の影響が増大するか、そして林野火災は気候変動を加速するか抑制するか、総合的な理解が求められている。

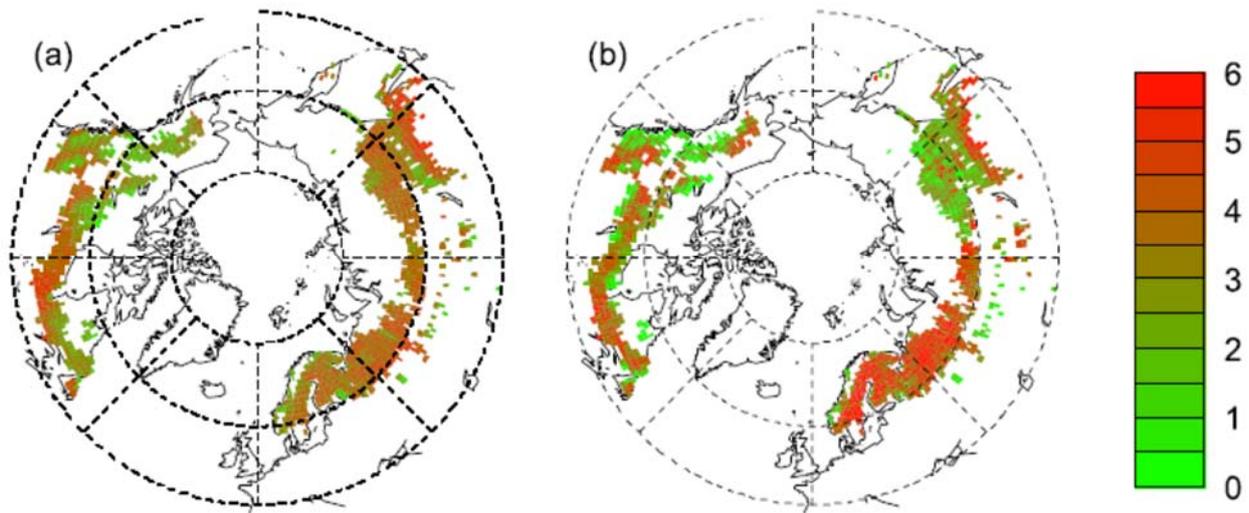


図 33 環北極陸域における葉面積指数。(a)MODIS による観測データからの推定値。(b)陸域生態系モデルによるシミュレーション (Ise and Sato 2008)。このように、植生のタイプとサイズの分布を適切に見積もる研究を推進することで、北極陸域生態系のメカニズムや生物多様性の理解が促進される。

のためには、まず植物・動物生理や環境変動への応答や適応など生態学的基礎研究が重要である。そのためにフィールドにおける継続的な観測が必要であると同時に、衛星リモートセンシングを活用した広域でのモニタリングと、シミュレーションによるメカニズム再現と将来予測が今後ますます重要となる。

中長期的には、観測システムの一層の安定化、広域化、低コスト化、リアルタイム化が望まれる。そのため、定点観測カメラなど自動観測機器の活用やネットワーク化に重点を置くべきであろう。フィールド観測によってリモートセンシングデータの解析を最適化することで、生態学的変数をより高精度に推定することが可能となる。また、図 33 が例示するように環北極陸域全域を対象としたシミュレーションモデルの高精度化、および観測とのデータ同化を行い、適切な将来予測研究の実施を進めていくことが肝要である。これまでに行われたアラスカやヨーロッパの北極陸域生態系に関するシミュレーションの先行研究をふまえ、環北極陸域全域での植物生理生態、個体群動態、群集動態、物質循環といった将来予測に必要な各要素のモデル開発と改良を推進していかなければならない。

生物多様性の保全については、さまざまな生物種や

生態系を総合的、客観的に評価したうえで、それぞれの保全についての優先度、緊急度を示すことが望ましい。これにより、鍵となる生物種 (keystone species、鍵種)、鍵となる生態系 (hotspots) を見極め重点的な保全を行ううえで、激変が予想される北極陸域生態系をより効果的に保護することが可能になる。また、日本の研究者としては、現地の研究者や研究機関と密接なコミュニケーションを保ち、互恵的な関係において研究をすすめていくことが今後さらに求められる。国際的な枠組みとして、IPBES⁹⁶や CAFF⁹⁷や GEO BON⁹⁸などに積極的に協力することも必要である。

アラスカにおいて、北方林では 2004 年に発生した大規模林野火災後の群集回復過程を調査中であり、ツンドラではツンドラ火災後の回復過程を同様に調査中である (Tsuyuzaki et al., 2009)。今後、これらの結果を踏まえ、野外観測に加え火災実験等を組み合わせることで、火災の短期的・長期的影響を明らかにする計画が立案されつつある。また、衛星リモートセンシングと地上観測を対応させた広域での高い精度での炭素収支の推定を行うことが必要である。

⁹⁶ IPBES: Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services

⁹⁷ CAFF: Conservation of Arctic Flora and Fauna

⁹⁸ GEO BON: Group on Earth Observations - Biodiversity Observation Network

Q2: 生物多様性はどのような影響を受けるか？

a. 研究の重要性と現状

生物多様性についての研究と情報の蓄積は、北極陸域生態系の変化を把握し将来予測を行うために欠かせないものである(ボックス 2)。しかし、中低緯度地域の生態系と比較して、北極陸域生態系の生物多様性に対する関心は低く、調査も不足している。特に、現時点での日本の研究者による研究は限定的であるが、今後の調査・研究の発展が切に望まれる分野である。以下に研究の現状を具体的に述べ、それらを考慮して今後の研究の方向性について議論する。

北極陸域生態系の植物の種多様性に対する脅威として、絶滅危惧種と外来種の二つの問題がある。地域の絶滅危惧種を網羅的にまとめたレッドリストは各国、各地域で作成されつつあるが、具体的な保全策を考えるためには、さらに国をまたぐより大きなスケールあるいは小地域のより小さなスケールなど、多面的なリスト作成が必要である。外来種のリスト(ブラックリスト)作成はまだ遅れているため、一刻も早いデータ統合がのぞまれている。

(1) 生物多様性について

北方林の種多様性は熱帯林や温帯林に比べ低いが、その生態系の多様性は、熱帯林や温帯林に匹敵するほどの高さを持つと考えられる。北方林が存在する環境の特徴は低温と乾燥であるが、そのような環境下では光ストレス(光合成で利用できない光エネルギーが過剰となり活性酸素が生成され、植物の組織に傷害を与えるようなストレス)が増幅され、植物の生存にとっては非常に厳しい環境となる。このような環境で生存し繁殖するため、植物は多様な戦略を用いている。すなわち、種

子繁殖する樹木とクローン繁殖する樹木、広葉樹と針葉樹、常緑樹と落葉樹という戦略であり、この意味において北方林の多様性は高いといえる。しかし、北方林は地球上の全森林面積の約 1/3 を占めるにもかかわらず、その生物多様性に関しては例外的に調査・研究のすすんだ場所(植物生態学に関しては、シベリアのヤクーツク周辺やカナダの BOREAS サイトなどの、いわゆる「スーパーサイト」)を除いては詳しい調査・研究はほとんど行われていないのが現状である。

(2) 泥炭湿地について

亜寒帯から冷温帯に分布する泥炭湿地は、有機炭素蓄積系として全球の炭素循環の中で重要な位置を占め、地球環境変動に大きなかわりを有している(Clymo, 1983)。泥炭湿地は他の陸域生態系とは異なる生物相を有し、生物多様性の観点からも重要な生態系である。泥炭湿地生態系を個別に見ると、生態系が陸域と水圏の境界に成立しているため、これら両者の環境特性を併せ持つと同時に、水環境の変動に伴う時空間的に変動性の高い多様な環境が形成されているため、生物多様性が高い(Mäkilä et al., 2001)。泥炭湿地生態系における環境と生物多様性の関連を解析する研究は、多くの湿地で行われているが、空間的な不均質性が高い泥炭湿地生態系全域を網羅する研究や長期的な変動を解析した研究は、これまでほとんどなく、今後このような観点からの研究が必要である。

(3) 環境応答について

北極陸域で予期される環境変化の影響を適切に評価するには、生物の応答の多様性を検討する必要もあ

ボックス 2

生物多様性とは？

「生物多様性」とは、すべての生物(陸上生態系、海洋その他の水界生態系、これらが複合した生態系その他生態系又は生育の場のいかなを問わない)の間の変異性をいうものとし、①種内の多様性、②種間の多様性、③生態系の多様性という3つの異なるレベルでの多様性を含む概念である(1992年、リオデジャネイロ、「環境と開発に関する国際連合会議(地球サミット)における「生物の多様性に関する条約」)。種内の多様性とは、同一種の生物集団内における遺伝的多様性のことである。種間の多様性とは、どれだけ多くの生物種がいるか、といった種多様性のことである。そして、生態系の多様性とは、生態系におけるそれぞれの生物種の機能や相互作用などの多様性のことである。「生物多様性」という言葉から多くの人々がイメージするのは種多様性であるが、種多様性だけでなく、遺伝的多様性、生活史や適応の多様性なども考慮しなくてはならない。

る。気候変動に対する生態系の維持において、生態的応答の多様性の重要性が指摘されている(Elmqvist et al., 2003; Mori et al., 2013)。気候変動や攪乱に対する生態的応答の多様性が高いと、場所や生物種によって多様な反応が生じるため、生態系が環境の変化を許容できる程度(resilience)は大きくなると考えられる。よって、気候変動に対する生態系や種に特異的な応答の評価が必要である。

b. 今後の研究

上に記述した生物多様性に関する研究の現状と問題点を解決するための共通の基礎として、①散逸しがちな調査・研究結果と知見をデータベース化して公開すること、②現在はスポット的である調査・研究の広域化の2点が重要である。加えて、国内外における自然保護教育の積極的な推進も必要であろう。また、分類学的観点からの学名の整理についても考える必要があるだろう(ボックス3参照)。

気候変動に起因する生物境界線の移動の調査研究は特筆すべきである。たとえば、温暖化によって北方林がツンドラに進出することは生態系の大きな変化のみならず、物質循環や地表面物理過程の激変をもたらすため、温暖化予測研究への貢献は大きくなるだろう。このようなダイナミックで過渡的な変動を、時系列に沿って定量的に予測することが重要な課題である。

気候変動に伴う生物多様性変化と生態系機能の応答についても、今後の発展がもめられる。地球規模で急速に進行する気候変動は、生物群集構造を変化させるだけでなく群集がもたらす生態系機能にも影響することが懸念されている(Loreau et al., 2001)。近年、生物多様性とその生態系機能の関係性についての研究が進み、生物多様性の急速な消失は生態系機能の低下

をもたらすと考えられている(Cardinale 2012)。気候変動に対する脆弱性が高い生態系の特徴として、低資源で種多様性の低い生態系が挙げられている。こういった生態系では、種や機能特性の多様性のわずかな増減でも生態系へのインパクトは大きいと予想される。また、北極域における気候変動の影響(たとえば気温上昇による生育期間の延長)は、厳しい環境により定着が制限されてきた異なる生活型の種や機能の新たな侵入を可能にする可能性があるため、今後のモニタリングが重要である。

また、今後北極域で特に重大な影響をおよぼすことが懸念される、気候変動にともなう種の移入についての生態系の応答を検証する必要があるだろう。それには、北方林への温帯の種の進出や、ツンドラでの樹木の繁殖など、劇的な生態系の変化をもたらす可能性のある事象がふくまれる。これらを理解するには、北極域に侵入するポテンシャル種を抽出することや、種の侵入を想定した実験などにより生態系機能の変化を明らかにする必要がある。さらに、生物多様性の高い生態系の重要性は認識されているが、生物多様性の低い生態系に特異的な生態系機能やその重要性を示す必要もあるだろう。

日本の研究者としては、北海道など日本にも存在する亜寒帯の生態系をケーススタディとして研究することにも、重点を置くべきである。北海道の高山帯は、千島列島、カムチャツカ、サハリンなどのかかわりが強く見られることから、国内の研究結果を広大な環北極域の生態系を理解するためにもちいることも視野に入れるべきであろう。陸域生態系は、地域特異性が高いことが特徴であるため極端な一般化には注意を払いつつ、例えば外来種の優占や侵入種管理についての日本での研究蓄積を生かすことなどは、可能かもしれない。

ボックス 3

学名の不一致問題

国際協力による野外調査は進展しているが、いまだ国際的な「学名の不一致問題」が種多様性研究における課題である。植物種の分布に国境はないが、学名にはしばしば国境がある。同一種に対して国により異なる学名が使われることは頻繁にある。原因は、種認識が国・研究者により一致していない(クランパーとスプリッター)、タイプ標本・新分類群記載文のデータベース化とデータ公表が不十分であることなどである。分類者以外の生態学者、環境学者なども理解できる国際的な「学名の共通化」が必要である。本来、学名はこのような目的のために考えられたはずだが、実際にはしばしばこのようには機能していない。このために古い文献、タイプを含めた標本情報の国際交流が必要である。GBIFなどのネットワークを通じた、各国の保有する学術標本の国際間での利用の促進が求められるであろう。

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か？

a. 研究の重要性と現状

北極陸域には厳しい環境に適応して独自の進化を遂げた様々な種が生息し、特異な生物相を形成している。例えば、北極陸域生態系の保全のシンボル種 (flagship species) となっているホッキョクグマやホッキョクギツネは、寒冷地に適した形態や生活史を進化させた種であり、年間を通して北極に生息することが可能である。また、トナカイや水鳥は長距離の渡りという行動様式により、北極陸域生態系の短い夏に出現する豊かな餌資源を利用し他種との競合を避け繁殖する。Q1 および 2 で考察したように、北極陸域生態系では温暖化や林野火災、土地利用変化等が主要因と考えられる植生変化が進んでいる。これらの要因は、直接的に、また、植生変化を通して間接的に北極陸域生態系に生息する動物の多様性に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

たとえば、ジャコウウシ、トナカイやホッキョクグマなどの行動の不安定化や分布域の縮小が報告されている (ボックス 4 参照)。また一方では、森林性の植食動物 (リス類、シカ類など) や肉食動物 (オオカミ、ヒグマなど) の北上、極域で繁殖するガン・カモ・ハクチョウ類の個体数増加や分布域拡大 (ボックス 5 参照)、タイガでの病虫害の大発生等も知られる (Post et al., 2013)。今後は、温暖化進行によるさらなる植生変化、競合や捕食圧の増加、渡り・移動の時期と餌食物の消長や融雪のタイミングのずれ、伝染病や外来種の拡大等が懸念される。このように北極陸域生態系は重大な変動にさらされているにもかかわらず、その程度や応答については未解明な部分が多い。動物の変化は人間社会に大き

な影響を与えるため (テーマ 7 参照)、北極陸域の生態系—動物の相互関係を明らかにする必要がある。

北極陸域生態系の植生変化は動物に影響を与えるだけでなく、炭素循環などのプロセスを介してグローバルの気候にも影響を与えている (テーマ 3 と関連: 大気へのフィードバック)。このようなフィードバックメカニズムを明らかにするため、陸域生態系モデル (生態系における炭素動態を扱う炭素循環モデルや、それに加えて生態系を構成する植物機能タイプの時空間変化も予測可能な植生動態モデルなど) を気候モデルに組み込んだ地球システムモデルがこれまでに開発され、予測に用いられている。しかし、主として物理学的な要因で説明される陸面過程モデルと比較して、生物学的な要因と関連する炭素循環モデル、植生動態モデルは不確実性が高いと言われている。温暖化は北極域で顕著であることがこれらのモデルにより予測されているが、温暖化が生物多様性に関連する植物種や植生分布にどのように影響し、さらにこれが陸域の炭素循環や水・エネルギー収支を介してどのように気候にフィードバックしていくのかという点については未解明な部分が多い。

また、北極陸域における永久凍土地帯では、閾値 (0°C 付近) で水の物理的特性 (流動性や熱慣性など) が大幅に変化する。このため、気候、凍土、積雪と深く結びついているこれら地域の植生が、気候変動にともなって急激に崩壊したり、不可逆的な状態へ遷移してしまうことが危惧されているものの、そのメカニズム解明や数値計算による予測は不十分である。また、フィールドベースの研究においても、北極陸域生態系の植生につい

ボックス 4

トナカイの生息変化

数千kmの季節移動で知られるツンドラトナカイは、周極地域に広く分布するが、各地で個体数減少や分布域縮小が報告され、東シベリアでも著しく縮小していることがわかった (例: タイミル個体群約100万頭→数万頭)。そこで、衛星テレメトリ法で約20個体を追跡したところ、初冬の氷雨やROS (rain on snow) による氷板形成、初春の河川解氷の早期化など、温暖化に起因する様々な行動阻害を受ける姿が浮かび上がった。これらの個体は、夏は温暖化の進行が最も遅いオレニョク川上流部 (シベリア高地東端) に集合していたが、移動ルートや越冬場所は定まらず、そして新生仔の割合は30年前の半分以下に落ち込んでいた。エヴェン、エヴェンキなど先住民狩猟者の協力で実施されたこの日露共同研究は、サハ共和国政府による保護区・猟区の見直しにつながり、新たなモニタリング手法として東シベリア各地の自治体に採用されている。

ては、バイオマスや物質循環レベルの研究に比して、生物相や生活史レベルの応答に関する研究が遅れており、気候変動への応答は未解明な点が多い。さらに、動物相から気候変動への正負のフィードバックについても未解明な点が多い。

b. 今後の研究

広域スケールで動物の生息状況の実態を把握するには、データベースの整備と、そのためのモニタリング体制の構築が必要である(Q1、Q2、テーマ 7 Q2b と関連)。フィールド調査が困難な北極陸域生態系で効率的なモニタリングを行うためには、重点的に調査を行うべき種(指標種、鍵種)、生態系、地域の選定(Q1 と関連)や、現存するモニタリング地点・データ(例:CAFF サイトや水鳥のモニタリングサイト)の一元化と調査空白域の抽出、現地調査のみならず衛星追跡、航空機等による広域調査、人的ネットワークの構築(テーマ 7Q2b と関連)、移動性動物の長期個体数トレンドの解析(ボックス 4 参照)等が必要である。さらに、データベースを用いて、動物の広域的な分布と生息環境との関連性を分析する必要がある。例えば、統計学的手法で、気候・植生条件等を説明変数とし、動物の潜在的な生息適地を広域スケールで推定することが可能である。このように作成した生息適地図は新たな調査地の選定にも役立つ。また、例えば、植生動態モデルを用いたシミュレーションを行えば、温暖化シナリオ下での生息地変化を推定することも可能であろう(Q1、テーマ 3 と関連)。ただし、温暖化による生態系変化には未解明な点が多いため、文献調査による総合的なレビューを行い、気候-植生

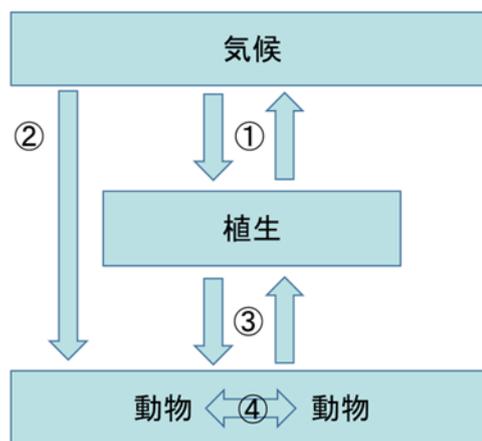


図 34 気候、植生、動物間の相互作用の概念図

間(図 34-①)、気候-動物間(図 34-②)、植生-動物間(図 34-③)、動物-動物間(図 34-④)等の関係について未解明プロセスの抽出を行い、これらの関係性を明らかにするためのフィールドベースの研究を数多く行っていく必要がある。

大気へのフィードバック(図 34-①)を明らかにするには、炭素動態モデルおよび植生動態モデルの高精度化が必要である。例えば、モデルのパラメータを調整するには、植生の観測データ(現地調査データや衛星画像データ)の取得とこれを用いたデータ同化手法の開発が必要である(Q1 と関連)。また、フィールドベースの研究により、未解明プロセスの解明を進め、モデルの改良を行っていく必要がある。生物相から気候変動への正負のフィードバックの実態についても明らかにしていく必要がある(例:トナカイの強い採食圧と積雪によるアルベド変化、図 34-③①、昆虫の大発生による植生への影響、図 34-③)。

ボックス 5

水鳥のモニタリング

水鳥の多くは北極陸域生態系で繁殖し、低緯度地帯で越冬するため、世界的なモニタリングが行われ、個体数変動の実態が明らかにされてきている。日本でも環境省や NGO による長期モニタリングが行われてきており、その結果シギ・チドリ類の多くは個体数が減少してきていること、ガン・カモ・ハクチョウ類は種によって増減傾向が異なり、そのうち北極陸域生態系で繁殖する種のいくつかは、個体数が増加してきていることなどが明らかとなってきた。温暖化により、一時的には繁殖環境が向上する場合もあるが、長期的には植生変化、渡りのタイミングと餌食物の発生時期や融雪のタイミングのずれ、捕食者・病気・寄生者・競合種等の北上によって繁殖地の環境は大きな影響を受けると言われており(Ganter and Gaston, 2013)、今後の個体数変動に注視していく必要がある。

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

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