

## 全球の気候変動及び将来予測における北極域の役割の解明

杉本敦子<sup>1</sup>、野沢徹<sup>2</sup>、浮田甚郎<sup>3</sup>、榎本浩之<sup>4</sup>、青木周司<sup>5</sup>、高田久美子<sup>4,6</sup>

<sup>1</sup>北海道大学・大学院地球環境科学研究所、<sup>2</sup>岡山大学・自然科学研究科、<sup>3</sup>新潟大学・自然科学系、<sup>4</sup>極地研究所・国際北極環境研究センター、<sup>5</sup>東北大学・大学院理学研究科、<sup>6</sup>国立環境研究所・地球環境研究センター

北極域では急激な温暖化が進行しているが、土壌、植生、雪氷、大気、海洋の炭素や水、そしてエネルギー循環がどのように変化し、そして全球にフィードバックするか、観測の困難さなどから不確実性が極めて大きい。GRENE 戦略目標 2 に対し、大気・海洋における温室効果ガス、陸域の生態系および積雪・氷河・氷床の観測、大気・エネルギー輸送に関する解析とともに、モデル研究を課題 1～5 で実施した。陸課題を中心としてこれまで長期にわたる観測が継続されてきた地点の観測データに基づき、課題を超えてモデル-観測間の連携を進め、モデル研究者間の連携とモデル-観測研究者間の連携体制を構築した。これらの研究成果により北極域で現在どのような変化が進行し全球に影響を及ぼすのかが少しずつではあるが明らかになってきた。北極域の変化が全球に及ぼす影響として、炭素循環、積雪変動、熱輸送、氷河・氷床の変化に分けて述べていく。

まず、高緯度域では大気 CO<sub>2</sub> 濃度は大きな季節変動を示すことが知られている。その季節変化の振幅は近年小さくなっていることから高緯度陸域の CO<sub>2</sub> 吸収が強まっていることが示唆されている。課題 5 の大気 CO<sub>2</sub> の観測に基づくインバージョンモデル、および課題 2 の陸上での CO<sub>2</sub> フラックス観測の結果は、北東ユーラシア陸域は現在 CO<sub>2</sub> の吸収源として機能していることを示している。一方で、その変化傾向は地域毎に異なる可能性が明らかとなった。

北極海を囲んで広がる周極域の生態系は、永久凍土の有無および状態や植生が地域毎に異なる。高緯度帯の生態系で CO<sub>2</sub> の吸収に大きな役割を担っていると考えられる高緯度森林生態系は、樹木年輪の解析により過去の生長速度の変化傾向を知ることができる。陸課題が観測を実施したサイトのうち、ヨーロッパの森林帯、東シベリアタイガ林 2 サイト、東シベリアタイガ-ツンドラ境界、カナダ森林帯と森林ツンドラの 6 サイトの樹木の年輪幅指数の過去 50 年の変化傾向は、ヨーロッパ (エストニア) とカナダ森林ツンドラでは上昇、東シベリアでは低下を示した。年輪幅が低下を示した東シベリアの森林帯の 2 地点では、気温が高いと樹木の生長が悪くなる傾向を示し、近年の温暖化により樹木の生長が低下していることを示している (Tei et al., 2013)。一方、これら 6 サイトの植生動態モデル (SEIB-DGVM) による過去 50 年間の計算結果は、エストニアとカナダ森林ツンドラでは樹木年輪幅の傾向と同様、樹木の純一次生産量は上昇傾向を再現したが、東シベリアの各サイトに対しては、樹木年輪幅と気温に見られた負の相関を再現できなかった。ITRDB (The International Tree-Ring Data Bank) の年輪幅データを用いて環北極全体を見ても、地域毎に特徴が見られ、東シベリア、アラスカ、カナダの内陸部で生長量の低下が見られた。

CMIP5 将来予測実験の MIROC の出力を用いた植生動態モデル (SEIB-DGVM) の 2100 年の予測結果は、北極域全域で純一次生産 (NPP) は増加となったが、一方で呼吸量も全域で増加するため、収支量として計算される CO<sub>2</sub> 吸収量である生態系一次生産 (NEP) は北極と北米西部で負 (CO<sub>2</sub> 放出) となった。東シベリアの森林帯では大きな生産量の増加が予想され、NEP も増加するという計算結果となったが、すでに述べたように、東シベリアは、現時点のモデルで気温上昇による NPP の低下が再現できていない地域である。現時点では北極域森林帯は CO<sub>2</sub> の吸収源として機能しているが、この機能が将来低下し、吸収源としての機能が弱まる可能性がある。東シベリアでは気温上昇に伴い、すでに NPP の低下が始まっている。

炭素収支の見積もりを精緻化するためにはモデルの改良が不可欠である。陸課題を中心に推進した GTMIP (Miyazaki et al., 2015) (GRENE-TEA Model Inter-comparison Project) に参加する生態系モデルと課題 5 の大気インバージョンモデルの NEP の計算結果を観測スーパーサイトであるヤクーツクのフラックス観測結果と比較した。月別のモデルのアンサンブル平均は概ね観測値と一致したが、インバージョンモデルでは冬期に CO<sub>2</sub> の放出となり年間の値が小さく見積もられた。また生態系モデルは現時点で植生または土壌有機物の分解のどちらかを重視して開発されており、光合成が卓越する夏期間は前者のモデルが、土壌呼吸が卓越する秋季は後者のモデルが観測結果を良く再現した。しかしながら、NEP を計算していくためにはどちらのプロセスも必要である。

CO<sub>2</sub> に次いで重要な温室効果であるメタンは、2000 年代に入って大気中の濃度の上昇が止まっていたが、2006 年頃から再び上昇が始まった。濃度上昇に伴い、大気メタンの炭素同位体比が低下を示したことから、この濃度上昇が放出量の増加によるとすれば、湿地からのメタンの放出量が増大したことを示している。また、メチルクロロホルムの南北半球間の濃度差と濃度比の関係から、OH ラジカル濃度がこれまで考えられていたものとは異なり、

南北半球間でほぼ同じであるという結果が得られた (Patra et al., 2014)。この結果は、メタン放出源の大きさを再考する必要があることを示している。

雪氷課題では、MODIS と AVHRR を用いて積雪面積と湿雪面積のデータセットを作成することに成功した。その結果 1982～2013 年の積雪面積の変化トレンドは地域により異なり、ユーラシアの西半分で積雪期間の顕著な短縮が明らかとなった。特にヨーロッパでは、1 ヶ月以上の積雪期間の短縮が見られる地域が広がっている。積雪期間の短縮は生長期間の延長をもたらす可能性がある。ITRDB の年輪データはヨーロッパの広い範囲に樹木の生長が良くなった地域が広がっている。多くの地域で夏の降水量と年輪幅指数が正の相関を示し、夏の降水量が多いと生長が良いという関係が見られる。一方、春の気温との関係を見ると、3～5 月の気温とも正の相関を示しており、このことは、融雪の早まりが生長を促進した可能性を示唆している。

北極域の変化が全球に及ぼす影響の一つとして、全球の熱収支構造の変化がある。中緯度帯から高緯度域への熱輸送は、課題 1 の研究成果から示されたように、北極域温暖化の原因の一つであり、近年この熱輸送量が増大している。課題 3 の解析結果は、80 年代から 2000 年代に増加した熱輸送は、定常 (長期) 成分の乾燥静的熱輸送であることを示している。また、緯度 70 度における年間の熱輸送量は、年々変動を示し、その変動は定常・乾燥静的熱輸送成分の変動によることがわかった。つまり、北極域の温暖化は、気温が上昇することだけではなく、温暖化によって大気循環場が変化することで全球の熱収支構造を変化させていると言える。このような大気循環場の変化は極端現象の原因にもなり得るため、生態系にも大きな影響を及ぼし、炭素循環を変化させて全球に影響を及ぼす可能性がある。

北極域の氷河・氷床融解は海水準を上昇させると考えられる。これまで、比較的不安定で数が多い山岳氷河の融解による淡水供給が重要であることが示されているが、近年グリーンランド氷床の融解による変化がこれに加わっている (IPCC, 2013)。グリーンランド氷床の変化のうち、力学過程がよくわかっていない氷河末端のカービングについて、観測データの収集とモデルの改良を行った。また、氷床表面の融解を促進する不純物や微生物の観測も行われた。グリーンランド氷床モデルの比較実験にも参加した。

## References

- Miyazaki, S., et al., The GRENE-TEA model intercomparison project (GTMIP): overview and experiment protocol for Stage 1, *Geoscientific Model Development*, 8(9), 2841-2856, doi:10.5194/gmd-8-2841-2015, 2015.
- Patra, P. K., et al., Observational evidence for interhemispheric hydroxyl-radical parity, *Nature*, 513(7517), 219+, doi:10.1038/nature13721, 2014.
- Tei, S., A. Sugimoto, H. Yonenobu, T. Ohta, and T. C. Maximov, Growth and physiological responses of larch trees to climate changes deduced from tree-ring widths and delta C-13 at two forest sites in eastern Siberia, *Polar Science*, 8(2), 183-195, doi:10.1016/j.polar.2013.12.002, 2014.