

## ユーラシア大陸の気候メモリ効果が北極温暖化に伴う冬の寒波を強める

～長期気候変動におけるフィードバックメカニズムの一端を解明～

### ポイント

- ・温暖化シミュレーションの結果から、陸域のメモリ効果を定量的に見積もる手法を開発。
- ・北極海の海氷減少に伴う寒波の記憶が蓄積され、翌年の寒波をさらに強める効果があることを解明。
- ・日本を含む中緯度において、異常気象の発生頻度の長期的な傾向の予測に役立つことが期待。

### 概要

北海道大学大学院地球環境科学研究院の中村 哲博士研究員、山崎孝治名誉教授、佐藤友徳准教授、新潟大学大学院自然科学研究科の浮田甚郎教授の共同研究グループは、温暖化時の北極海の海氷減少を想定した気候変化のシミュレーションを行い、陸域の土壌温度や積雪を介したメモリ効果<sup>\*1</sup>の寄与を定量的に見積もる手法を開発しました。海氷減少は近年増加傾向にある中緯度の寒波<sup>\*2</sup>の一因であると指摘されていますが、本研究により、寒波の記憶がユーラシア大陸に蓄積されることで、翌冬、翌々冬の寒波をさらに強めるという、増幅（フィードバック）効果を持つことがわかりました。このメモリ効果は、海氷減少によって生じる寒波の強さを約2倍に強めます。

本研究では、陸域のメモリ効果がどのような物理的プロセスで生じているのか、詳細に調べました。日本で強い寒波が発生する際には、ユーラシア大陸全域が寒冷で、積雪が多い傾向があります。多量の積雪が春の雪解けの時期を遅くすることで、日射による地面の温度上昇が妨げられ、寒冷なシグナルが土壌温度に記憶されます。夏場の大気状態の影響を受けにくい土壌温度の寒冷なシグナルは秋まで持続し、初冬の積雪時期を早めます。積雪は日射を強く反射して地面付近が温まることを妨げるため、早い冬の到来となり、強い寒波が形成されやすくなります。このような季節サイクルの繰り返しが蓄積されることで、持続的に強い寒波をもたらす気候状態を作り出しています。

急速な温暖化が進む北極と、その影響を受ける中緯度の気候変化の予測には、大きな不確実性があるとされています。本研究の成果で得られた陸域のメモリ効果は、一旦ある方向に向かった気候状態をさらに推しすすめるような正のフィードバック効果があることを示しています。陸域の状態を調べることで、長期的な傾向の予測に役立つことが期待されます。

本研究は、文部科学省北極域研究推進プロジェクト「ArCS: Arctic Challenge for Sustainability Project」、及び科学技術振興機構「ベルモント・フォーラム CRA InterDec」の一環として行われ、Nature Communications 誌にて、2019年11月8日（金）19時にオンライン公開されました。

## 【背景】

北極域は、ここ数十年でもっとも温暖化が進んだ地域であり、特に北極海の海氷減少は、北極圏の生態系や気候状態に大きな変化をもたらしています。一方で、日本を含む中緯度域では冬季に強い寒波が頻繁に観測され、北極の気候状態の変化との関係が示唆されてきました。

このような北極の温暖化と中緯度の寒冷化の関係については、過去数十年の観測結果では、強い相関関係があることがわかっていますが、気候シミュレーションによる再現性には大きな不確実性があり、気候変化の予測精度向上の大きな妨げとなっていました。

そのような不確実性をもたらす要因として、大気循環よりもゆっくりと変動する、海洋や陸域、さらに成層圏との相互作用があるのではないかと推測されます。特に陸域では積雪や土壌温度、土壌水分などが、大気状態の変化を記憶するメモリ効果があることは知られていましたが、温暖化に伴う気候変化において、陸域の役割はこれまでほとんど確かめられてきませんでした。

## 【研究手法】

本研究では、温暖化による海氷減少時の大気状態を再現する気候シミュレーションを行い、その中から陸域のメモリ効果を評価する手法を開発しました。観測データを元にした多氷・少氷状態を境界条件として与え、再現される気候状態を持続させた実験（海氷+陸域の変化に対する応答）と、毎年夏に気候状態をリセットした実験（海氷の変化のみに対する応答）をそれぞれ100年分のシミュレーションを行いました。両者を比較することにより、陸域に記憶された変化、及びそれに伴う気候状態の変化を見積もりました。

## 【研究成果】

海氷減少時の気候変化を再現した実験では、北極域で気圧上昇・高温化、中緯度域で気圧低下・低温化という、シーソーパターン、いわゆる負の北極振動パターン<sup>\*3</sup>が現れ、これは最近数十年で観測された変化をよく再現しています。この応答を、海氷のみに対する応答と、陸域のメモリ効果による応答とに分離したところ、両者はほぼ対等に、負の北極振動的なシーソーパターンを作り出していました（図1）。

このような変化を生じる力学的な要因を調べました。変形オイラー平均<sup>\*4</sup>された大気循環場から、大気波動のエネルギー伝搬の変化を見てみると、それぞれ海氷減少が顕著な北極域及びメモリ効果が生じる中緯度域の地表付近の波源から、北緯60度付近の対流圏上層へ波動が伝搬している様子がわかります。これらの波のエネルギーが作用した結果、北極海沿岸の緯度帯におけるジェット気流の蛇行が強まり、中緯度の暖かい空気を北極へ、北極の冷たい空気を中緯度へ押しやる循環パターンとなります（図2）。この循環パターンは中緯度の寒波を強化するだけでなく、（すでに条件として与えた）北極の温暖化をも強化します。このようなフィードバック効果が海氷減少によって生じることは知られていましたが、陸域に記憶された寒冷なシグナルによっても同様に生じることが明らかになりました。

季節を超えるメモリ効果の仕組みを明らかにするために、シミュレーション結果を解析しました。冬のシベリアにできる寒気（海氷減少の直接的効果）は、ユーラシア大陸上の積雪面積を拡大します。その結果、春の雪解けが遅れ、夏の日射による地面の温度上昇が抑えられるため、土壌に低温な偏差が記憶されます。低温な土壌は秋から初冬の大陸上の気温低下を早め、早期の積雪をもたらします（図3）。大陸上の積雪は太陽光をよく反射し、地上気温の低下をより強めます。このようなサイクルが毎年蓄積されることで、メモリ効果は、海氷減少だけで説明できる中緯度の寒冷化を85%増幅することがわかりました。同時に生じる大気循環は、北極への熱輸送効果を持ち、メモリ効果がない場合に対して北極の温暖化が、20%強化されていることもわかりました（図4）。

## 【今後への期待】

地球温暖化の影響が顕著に現れている中、日本のみならず北半球各地で冬季の大寒波が頻繁に観測されています。本研究では、陸域のメモリ効果は、寒波の情報が陸域に記憶され、年を経るごとにその効果が増幅されていく効果があることが示されました。同時に北極温暖化も強化することで、北極

温暖化増幅\*<sup>5</sup> がさらに強まる可能性を強く示唆します。陸域のメモリ効果を正確に把握することで、長期的傾向の予測精度向上が期待されます。そのためにもユーラシア大陸での広域なモニタリングがより重要となります。

実際に、夏季のユーラシア大陸では、近年、凍土層の顕著な融解が観測されています。北極圏の陸域環境が大きく変化した際に、メモリ効果がどのように働くのかは、まだよくわかっておらず、今後の研究による進展が注目されます。

## 論文情報

論文名	Memory effects of Eurasian land processes cause enhanced cooling in response to sea ice loss (ユーラシア大陸のメモリ効果による北極海の海氷減少に伴う寒波の強化)
著者名	中村 哲 <sup>1</sup> , 山崎孝治 <sup>1</sup> , 佐藤友徳 <sup>1</sup> , 浮田甚郎 <sup>2</sup> ( <sup>1</sup> 北海道大学大学院地球環境科学研究院, <sup>2</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科)
雑誌名	Nature Communications
DOI	10.1038/s41467-019-13124-2
公表日	2019年11月8日(金)(オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学大学院地球環境科学研究院 博士研究員 中村 哲 (なかむらてつ)

T E L 011-706-2372 F A X 011-706-4867 メール nakamura.tetsu@ees.hokudai.ac.jp

U R L <http://www.oes.hokudai.ac.jp/people/nakamura.tetsu/index.html>

北海道大学大学院地球環境科学研究院 名誉教授・学術研究員 山崎孝治 (やまざきこうじ)

T E L 011-706-2768 F A X 011-706-4867 メール yamazaki@ees.hokudai.ac.jp

U R L <http://www.oes.hokudai.ac.jp/people/yamazaki/index.html>

北海道大学大学院地球環境科学研究院 准教授 佐藤友徳 (さとうともり)

T E L 011-706-2288 F A X 011-706-4867 メール t\_sato@ees.hokudai.ac.jp

U R L [http://www.oes.hokudai.ac.jp/people/t\\_sato/index-j.html](http://www.oes.hokudai.ac.jp/people/t_sato/index-j.html)

研究プロジェクトに関する情報

<https://www.arcs-pro.jp>

## 配信元

北海道大学総務企画部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール kouhou@jimuhokudai.ac.jp

【参考図】

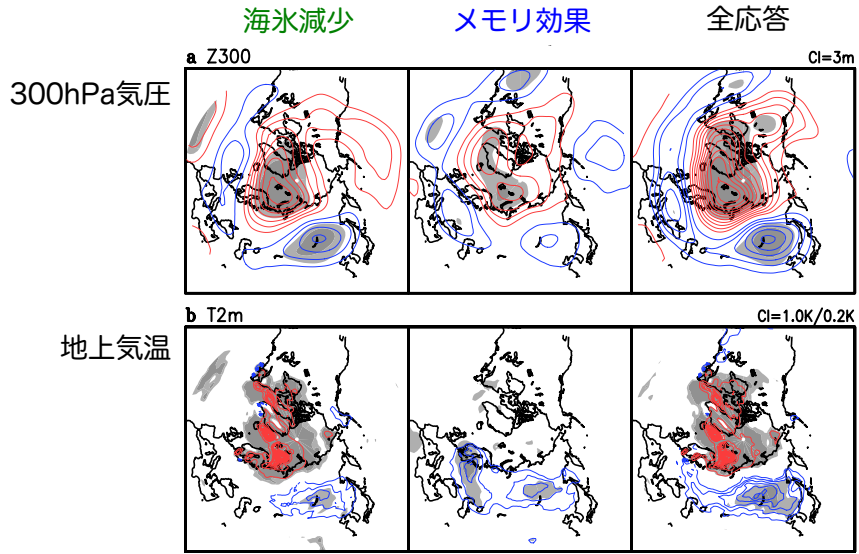


図 1. 気候モデルで再現された、北極海の海氷が減少した時の、冬季（12～2月）の対流圏上層の気圧（上段）と、地上気温（下段）の変化。赤が気圧上昇・高温、青が気圧低下・低温となる変化を示す。左から右へ、海氷減少に対する応答、陸域のメモリ効果による応答、両者の足し合わせとなる全応答を示す。

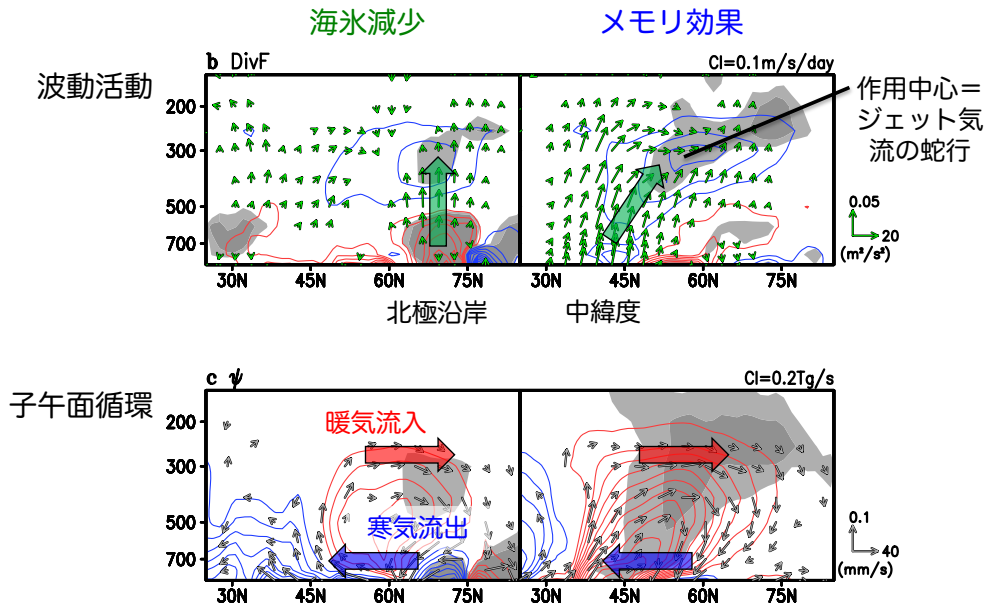


図 2. 変形オイラー平均された子午面上の波活動度フラックス（上段）と、残差平均循環（下段）のベクトルを矢印で示す。左図と右図はそれぞれ、海氷減少に対する応答、陸域のメモリ効果による応答を示す。

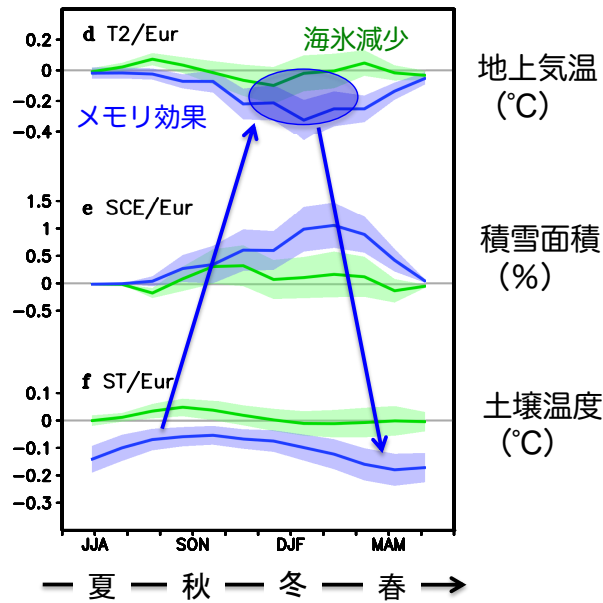


図 3. ユーラシア大陸で領域平均した陸面の諸変数の季節推移。縦軸は平年からの差を表す。緑色、青色はそれぞれ海氷減少に対する応答，メモリ効果による応答を示す。

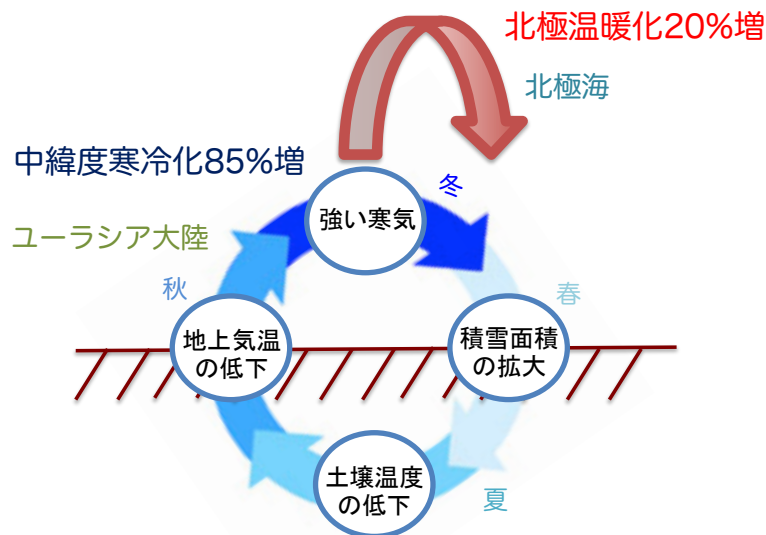


図 4. 陸域のメモリ効果とその影響の概念図。冬の低温偏差が春の積雪偏差，夏の土壌温度に記憶され，翌年の秋から初冬の寒気形成へとシグナルが持続し，中緯度の寒冷化を 85%増幅する。同時に生じる大気循環は北極の温暖化を 20%強める。

## 【用語解説】

- \*1 メモリ効果 … 海や陸などは、大気に比べてゆっくりした変動をする。ある大気状態（著しい高温や低温）が、海や陸の温度に記憶され、長い時間スケールで大気状態へ影響を与えること。
- \*2 寒波 … 平均的な気温に比べて著しく低温な状態が数日間継続すること。雪害を中心に社会的影響が大きい。北極やシベリアの非常に強い寒気が流れ込んでくると日本でも大寒波となりやすい。
- \*3 北極振動パターン … 北半球全体の大気循環変動の卓越パターン。北極と中緯度の気圧・気温のシーソーパターンとなり、負の位相時には、日本、北米、ヨーロッパで寒波が起こりやすい。
- \*4 変形オイラー平均 … 大気循環の子午面平均場を見るときにの操作。大気波動とジェット気流の相互作用を論じる際によく使われる手法。
- \*5 北極温暖化増幅 … 北極域が地球全体に比べて早いスピードで温暖化が進行していること。この傾向はこれまでの観測結果だけでなく、将来予測でも確認されている。