

地球環境変動予測に向けた北極域の変動とその全球的影響の解明

課題責任者

小室 芳樹 海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研究センター

著者

森 正人^{*1}, 大石 龍太^{*2}

^{*1}九州大学応用力学研究所, ^{*2}東京大学大気海洋研究所

キーワード：大気－海洋－海氷相互作用, テレコネクション, 氷床変動, 古気候, 将来予測

1. はじめに

北極域の気候変動は環北極域を含む周辺地域だけでなく全球的な気候へもその影響が波及することが指摘されている。同時に、北極圏外における気候変化は、北極の環境変化を加速する可能性がある。すなわち北極域とそれ以外の地域の気候変動には水平方向の相互作用が存在する。急激な速度で温暖化が進行している北極域の現状を踏まえ、本課題ではこのような相互作用系の理解を深めるために、各種の気候モデルを用いた実験を行ってきた。以降の節では、大気-海洋-海氷結合モデルを用いた実験から明らかにされた結合系の重要性や、古気候実験を通じたグリーンランド氷床と温室効果ガス濃度との関係に関する調査結果を報告する。

2. 大気－海洋－海氷結合による北半球冬季テレコネクションパターンの選択的増幅

同じ地域で繰り返し現れる大洋スケールの大気循環変動パターンであるテレコネクションパターンは、偏西風の蛇行や強化をもたらすことから、その地域での異常天候の発現と密接に関係している。エルニーニョ現象などの熱帯海洋変動がテレコネクションパターンの形成や持続に影響を与えることはよく知られているが、中緯度海洋や北極海氷変動の役割は未だ十分に理解されていない。特に、テレコネクションパターンに伴う風によって変わった海面水温 (SST) や海氷分布が、どのような影響をテレコネクションパターンに返すのかという、双方向作用 (大気海洋結合と呼ぶ) の影響は長い間謎のままだった。そこで本研究では、最新の大気海洋結合モデルによる large-ensemble 実験を用いてこの問題を再検討する。

MIROC6 結合モデルの historical run (2014 年まで) ならびに SSP5-8.5 scenario run (2015 年以降) (以下 C-run) から得られた月平均の SST、海氷密接度ならびに海氷厚を MIROC6 大気モデルに与え、C-run と同じ外部強制の下で、1979 年から 2022 年の期間で積分した (以下 A-run)。C-run の 50 のアンサンブルメンバーそれぞれに対して 1 メンバーの A-run を行った。両実験で月平均の SST、海氷密接度ならびに海氷厚は完全に同一であるが、モデルの各タイムステップでの大気-海洋間あるいは大気-海氷間の相互作用が A-run には含まれていないため、両実験の差は sub-monthly scale の大気-海洋-海氷間の結合効果を表していると解釈できる。

冬平均 500hPa 高度場 (Z500) 偏差の経年変動の分散を C-run と A-run で比較すると、変動の極大域で C-run の方が分散が大きくなることが分かる (図 1a, b)。どのような大気循環偏差がこのような分散の違いをもたらしているのかを明らかにするために、変動モードに展開した。その結果、上位 3 モードである太平洋・北米 (Pacific North/American: PNA) パターン、大西洋域で卓越する北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation: NAO)、ユーラシア大陸上で卓越する北極暖気・中緯度寒気 (Warm Arctic-Cold Eurasian: WACE) パターンが結合効果によって選択的に増幅されていることが明らかになった。これらの上位 3 モードのみで Z500 偏差を再構築し、その分散を C-run と A-run で比較すると (図 1c)、全変動の差 (図 1b) の特徴をよく説明することが分かる。

このような結合効果 (各モードの説明分散の差) は、膨大な数のサンプルを用いることで初めてロバストに特定され、結合効果は大気の内部変動に比べれば十分小さい (S/N 比が小さい) ことを意味している。しかしながら、結合効果は PNA、NAO、WACE の全分散のそれぞれ約 13%、11%、10% を説明しており、無視できるほど小さくもなく、これらのモードが卓越変動であることに貢献していることを意味している [1]。

大気-海洋-海氷結合がどのように WACE パターンの振幅を増幅させるのかを明らかにするために、追加のアンサンブル実験を行い、エネルギー解析を用いて調査した。その結果、WACE の時間発展と共に、海氷との相互作用の様相や、それが WACE に与える影響が変化していくことが示された。

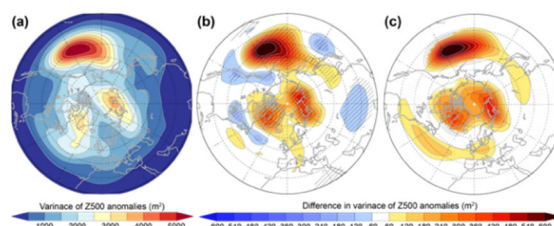


図1 冬平均 500hPa 高度場偏差の経年分散 [m^2]。(a) C-run, (b) C-run minus A-run. (c) (b) と同じだが上位 3 モードのみで再構築。

3. 氷床モデルと気候モデルを組み合わせたグリーンランド氷床の長期変動予測

現在進行する地球温暖化において、北極域はその進行が全球平均よりも早く進行し温暖化によって閾値を超える恐れのある Tipping 要素も多い。なかでもグリーンランド氷床の融解とそれによる海面上昇は予測の不確実性に幅がある。そのため、グリーンランド氷床が大きく後退して海面が上昇した過去の温暖な時代（13～12 万年前の間氷期（MIS5e）や 42～40 万年前の間氷期（MIS11））の知見や情報を将来予測の制約に用いることが鍵である。このような過去と将来のグリーンランド氷床の変動メカニズムを理解するためには、北極域のみならず全球の気候を理解する必要があり、大気・海洋・植生分布などを予報可能な気候モデルを用いる古気候再現実験と将来予測実験が有効な手法である。とりわけ温暖化の大きな陸上や海氷など植生分布の変化（北方林のシフトやツンドラの消滅など）のようにグリーンランド外の変化がグリーンランドの気温に与える影響を表現することが重要である。本研究ではこのような気候モデルの出力を氷床モデルの入力として考慮することで、過去から将来まで一貫したグリーンランドの氷床変動を理解することにより、将来予測の不確実性の幅を制約し精度向上することを目的としている。

本研究では、大気海洋植生大循環モデル MIROC4m-LPJ GCM[2, 3] と 3 次元氷床モデル IcIES[4] を用いる。IcIES の入力値は月平均の気温と降水量であり、GCM による各実験の基準実験からの差分を観測値に加算して与える。この際、GCM の地表面過程で診断される融解熱が気温に与える影響を除くために、地表面からやや上空（高度 500m）での気温差分を用いる。MIROC4m-LPJ 実験は古気候実験として MIS5e（127,000 年前）と MIS11（410,000 年前）、温暖化安定化実験として 400ppm、2 倍 CO₂（571ppm）、3 倍 CO₂（856ppm）、4 倍 CO₂（1141ppm）の長期積分（2000 年以上）を行った。本研究ではまず気温を通じた影響のみを反映した。

MIS5e については、古環境指標が示す過去の温暖期を説明するには植生帯のシフトやツンドラの縮小などの植生フィードバックの導入が不可欠であることが示されている[5]。本研究ではまず MIS5e の結果を IcIES の入力として用いることで、グリーンランド外での植生分布の変化によってグリーンランドの融解速度が大幅に加速することを示した。MIS5e と同様かそれ以上に氷床融解が進んでいた MIS11 についても MIROC4m-LPJ を用いた再現実験を行い、北米氷床の完全な融解が持続することが北極海の高氷減少や植生帯のシフトを通じて温暖期の形成に重要であることを示した[6]。これらの結果を入力として用いることで、過去の温暖期（MIS5e と MIS11）の IcIES 実験を行い、地質学的証拠と整合する結果を得た。さらに同様に MIROC4m-LPJ と IcIES を用いた温暖化実験を行った。その結果、夏のグリーンランド平均気温が約 3℃上昇を超えた場合には全融解する平衡状態が出現することが明らかになった。MIS5e と MIS11 と同程度の氷床後退はおおよ

そ CO₂ 濃度 400ppm の場合に相当し、大気 CO₂ 濃度 2 倍では約 5000 年、3 倍以上では 2000 年以内に完全融解することが示された。

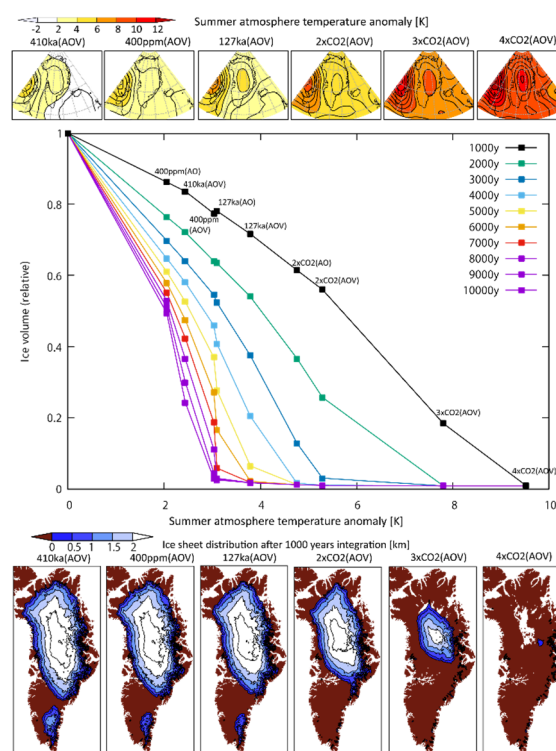


図2 (上) 入力として用いた MIROC4m-LPJ による夏の気温偏差[K]、(中) 各実験でのグリーンランド平均した夏の気温偏差[K]と、現在値で規格化した 1000 年毎の氷床量の変動、(下) 積分 1000 年時点でのグリーンランド氷床厚[km]。

謝辞

本研究は、文部科学省の「北極域研究加速プロジェクト（ARCS II; JPMXD1420318865）」、「気候変動予測先端プログラム（SENTAN; JPMXD0722680395）」の支援を受けて実施された。

文献

- [1] M. Mori, Y. Kosaka, B. Taguchi, H. Tokinaga, H. Tatebe, and H. Nakamura, “Northern Hemisphere winter atmospheric teleconnections are intensified by extratropical ocean-atmosphere coupling”, *Communi. Earth & Env.*, 5, 124, 2024.
- [2] H. Hasumi, and S. Emori, “K-1 Coupled GCM (MIROC) Description, k-1 Technical Report No. 1”, Center for Climate System Research (CCSR, Univ. of Tokyo), National Institute for Environmental Studies (NIES), Frontier Research Center for Global Change (FRCGC), Tokyo, Japan, 2004.
- [3] R. O’ishi, and A. Abe-Ouchi, “Influence of dynamic vegetation on climate change arising from increasing CO₂”, *Clim. Dynam.*, 33, 645–663, <https://doi.org/10.1007/s00382-009->

0611-y, 2009.

[4] F. Saito, A. Abe-Ouchi, K. Takahashi, and H. Blatter, “SeaRISE experiments revisited: potential sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice sheet”, *The Cryosphere*, 10, 43–63, <https://doi.org/10.5194/tc-10-43-2016>, 2016.

[5] R. O’ishi, W.-L. Chan, A. Abe-Ouchi, S. SherriFF-Tadano, R. Ohgaito, and M. Yoshimori, “PMIP4/CMIP6 last interglacial simulations using three different versions of MIROC: importance of vegetation”, *Clim. Past*, 17, 21–36, <https://doi.org/10.5194/cp-17-21-2021>, 2021.

[6] L. A. Hirose, A. Abe-Ouchi, W.-L. Chan, R. O’ishi, M. Yoshimori and T. Obase, “Arctic warming suppressed by remnant glacial ice sheets in past interglacials”, *Geophys. Res. Lett.*, 52, e2024GL111798, <https://doi.org/10.1029/2024GL111798>.