

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

小室 芳樹^{*1}, 芳村 圭^{*2}

^{*1} 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, ^{*2} 東京大学 生産技術研究所

キーワード: 北極海, 海水-海洋モデル, ネストモデル, 大気海洋結合モデル, 安定同位体, 水循環

1. はじめに

北極域の環境変化とその全球的影響を精緻に理解するためには、北極域を中心としたモデルの高解像度化に加え、全球規模の相互作用系を適切に再現しうる高度なモデルの構築が求められる。本課題では、このような背景のもと、海水-海洋モデルにネスティング手法を導入して北極域に高解像度領域を設定し、時間的に連続した物理場データセットの作成に向けたモデル開発を進めた。さらに、水の安定同位体を組み込んだ大気海洋結合モデルについても、質量保存の厳密化と計算効率の向上を図った。これらの改良モデルによる実験結果は、多様な観測データとの比較を通じて検証され、北極域研究や古気候復元など今後の研究展開に資する重要な進展が得られた。以降の節では、それぞれのモデル設定、実験内容、および検証結果について詳述する。

2. 高解像度北極域データセット作成に向けた海水-海洋モデル設定の構築

北極域の環境変化とその様々な影響を理解・評価する上で、数値モデルによるシミュレーション研究は主要な手法の一つである。特に気候モデル・地球システムモデルは、過去から将来にわたる北極域および全球の様々な環境変化を理解するために不可欠な実験ツールである。

本研究では、北極域を中心とする海水-海洋物理モデルの新たなデータセットを作成する。地球シミュレータの計算性能と局所的な高解像度化を可能とするネスティング手法を用いて、北極域で十分な水平解像度を確保する。また、気候変動に伴う生物種交代や沿岸浸食・いわゆる海洋プラスチックの実態把握などの北極域における今日的な課題に取り組む基盤となるよう、物理モデルの計算後にオフラインで駆動する各種モデルへのインプットとして利用できることを想定した実験を行う。

実験設定は以下の通りである。用いるモデルは 2-way nest 版の COCO[1]である (以下、ネストモデルと表記)。空間解像度 1/4 度の全球モデルを外モデルとし、北緯 50 度以北に空間解像度 1/12 度の内モデルをネストする。これにより全球で一貫した物理場を計算しつつ、北極域やその近傍においてはより高解像度の場を効率的に得ることができる。鉛直方向は 62 層 (層厚は海面 2 m、最深層 660 m、上層 500 m のなかに 31 層を配置) で、海底境界層パラメタリゼーションは採用していない。実験期間は現

在を挟む過去及び将来の一定期間で行うことを計画している。境界条件として JRA55-do データセット[2]を基に、過去の期間はそのまま、将来期間は CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6) モデルの将来予測結果から各大気変数の長期変動成分を求め JRA55-do データセットに上乗せしてそれぞれ与えることで、長期間にわたり連続した物理場データを作成する。

今年度は 2000-2019 年の 20 年間の実験を実施した。初期条件は、COCO を用いた CMIP6/OMIP2 (Ocean Model Intercomparison Project phase 2) 実験[3]の 1957 年末物理場を本モデルの外モデルに補間し、外モデルのみを用いて 1999 年末までスピニングアップした場をさらに内モデルに補間して作成した。その他のプロトコルは、海面塩分の観測値への緩和を含め CMIP6/OMIP2 を踏襲した。実験期間の前半 10 年間はスピニングアップ期間とみなし、後半 10 年間 (2010-2019 年) を対象として結果の解析を行った。

解析対象期間で平均した、モデル第 29 層 (388 m 深) 流速および表層 200 m 平均 EKE (Eddy Kinetic Energy) の空間分布を図 1 に示す。ここで EKE は渦など流れ場の変動の大きさの指標であり、本解析では流速の水平成分

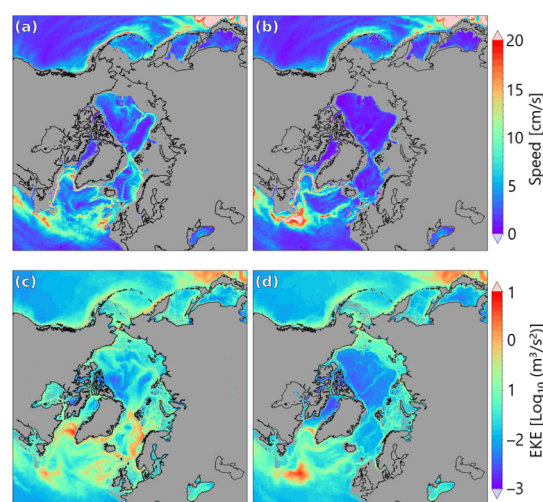


図 1: 2010-2019 年平均の、モデル第 29 層 (388 m 深) における流速 (単位 [cm/s]) ・ 表層 200 m 平均 EKE (単位 [$\log_{10} (\text{cm}^2/\text{s}^2)$]) 場。(a) ネストモデル、流速。(b) 1/4 度モデル、流速。(c) ネストモデル、EKE。(d) 1/4 度モデル、EKE。

u, v とその 35 日移動平均値 $\bar{u}, \bar{v}$ を用いて $EKE = 0.5[(u - \bar{u})^2 + (v - \bar{v})^2]$ で定義した。比較のため、初期値作成に用いた外モデルのみの構成（以下、1/4 度モデルと表記）のままで 2000 年以降も計算を続けた結果を共に示した。

ネストモデルでは 1/4 度モデルと比較して、北極海や Nordic Seas など流速の増加傾向が見られる。特に北極海盆では、陸棚斜面だけでなくロモノソフ海嶺などのより深い地形に沿った流れが表現されていることが見て取れる。また、EKE の比較では、ネストモデルにおいて北極海盆を中心に値が増大している。これは、ネストモデルでは高解像度化に伴って中規模渦等の流れの変動がより活発になっていることを示している。さらに、北極海と周辺の海域をつなぐ代表的経路での流量を見ると、北極海からカナダ多島海・Davis Strait を経由する流出量は 1/4 度モデルでの 0.4 Sv に対してネストモデルでは 1.1 Sv、Bering Strait での流入量についても 1/4 度モデルでの 1.3 Sv に対しネストモデルで 0.9 Sv と、観測推定値（それぞれ 1.6 ± 0.5 Sv[4]、 1.0 ± 0.5 Sv[5]）比で改善傾向が確認された。

今後は各種オフライン実験での使用に耐えるより高い再現性を求めて設定の見直し等を進めつつ、より長期の過去再現実験・将来予測実験を行う予定である。

3. 大気海洋結合同位体大循環モデルの開発

本研究では、第 6 世代大気海洋結合モデル MIROC6 に安定水同位体を組み込んだ同位体対応完全結合気候モデル MIROC6-iso を用い、大気・陸面・海洋・海氷を含む水循環および同位体過程を統合的に扱う数値実験を実施した。2023 年度の ES4 利用報告では、モデル結合および同位体実装の初期段階として、主に再現性の予備的評価を報告したが、本年度は計算効率および質量保存の両面においてモデル構成を大幅に改良し、長期結合シミュレーションに耐えうる頑強な計算体系を確立した。特に、大気・陸面・海洋・海氷間における淡水および同位体フラックスの交換処理を見直すことで、同位体質量保存が結合系全体で厳密に満たされることを確認するとともに、計算安定性およびスループットの向上を実現した。

改良後の MIROC6-iso を用いた性能評価では、降水同位体比 ($\delta^{18}O_p$) の全球分布および観測データとの比較において、GNIP 観測点、氷床コア、鍾乳石記録と良好な一致が得られた（図 2）。 $\delta^{18}O_p$ と気温の空間関係についても、モデル結果は観測に基づく回帰関係を高い精度で再現しており、同位体を通じた気候応答の表現が物理的に妥当であることが示された。一方、南極域では依然として暖偏差に起因する過大評価が見られるものの、その影響範囲や要因は定量的に把握されている。

海洋における海水同位体比 ($\delta^{18}O_{sw}$) については、表層分布および鉛直構造の双方において、既存の全球観測・準観測データと高い整合性を示した（図 3）。太平洋および大西洋における鉛直プロファイルでは、表層から深層に至るまで安定した再現性が確認され、海洋内部における

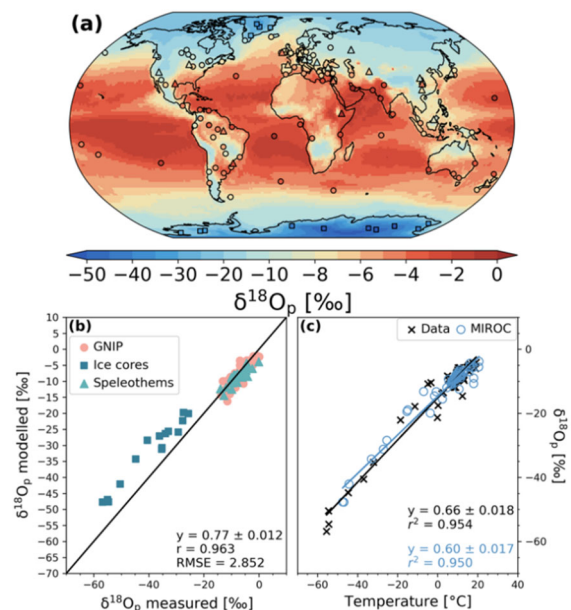


図 2 : MIROC6-iso による降水同位体比 ($\delta^{18}O_p$) の再現性評価。(a) 年平均 $\delta^{18}O_p$ の全球分布 (背景) と観測値 (GNIP、氷床コア、鍾乳石) の比較。(b) モデル値と観測値の散佈図。(c) $\delta^{18}O_p$ と地上気温の空間関係に関する回帰比較。

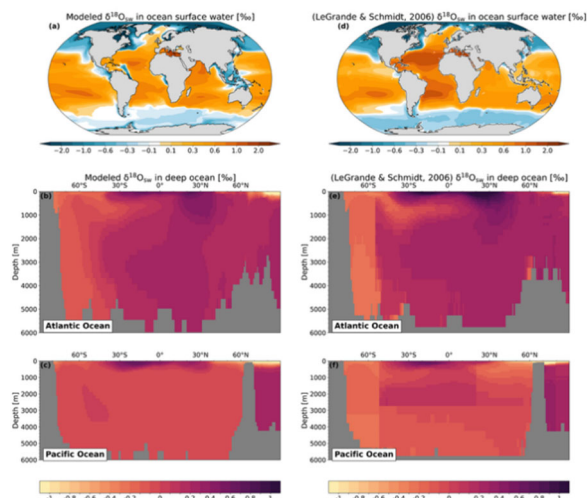


図 3 : 海水同位体比 ($\delta^{18}O_{sw}$) の表層分布および鉛直構造の比較。(a, d) MIROC6-iso および準観測データによる表層 $\delta^{18}O_{sw}$ 。(b, c, e, f) 大西洋および太平洋における年平均鉛直分布のモデル・準観測比較。

移流・混合・拡散過程を含む同位体輸送が適切に表現されていることが示された。これらの成果は、長期スピンアップおよび高解像度結合計算を前提とする大規模計算資源の利用によって初めて達成されたものである。

さらに、本研究では ENSO に伴う $\delta^{18}O_{sw}$ 変動の再現性に着目し、結合大循環モデル (CGCM) と大気大循環モデル (AGCM) との比較を行った。その結果、AGCM では海洋の

水平・鉛直移流や混合過程が表現されないため、太平洋を中心として $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ が系統的に過小評価されることが確認された(図4)。一方、海洋力学を明示的に含む CGCM では、再解析データとの差が顕著に小さく、ENSO に対する同位体応答をより現実的に再現できることが示された。この差異は、サンゴを用いた ENSO 復元や古塩分復元といった古気候応用において、完全結合モデルの利用が不可欠であることを定量的に裏付けている。

これらの成果を取りまとめた論文は *Journal of Advances in Modeling Earth Systems (JAMES)* に採択された[6]。本研究は、ES4 を活用した大規模計算によって、同位体対応結合モデルの実用的完成度を大きく高めるとともに、今後の古気候研究および気候変動メカニズム解明に向けた基盤を確立した。

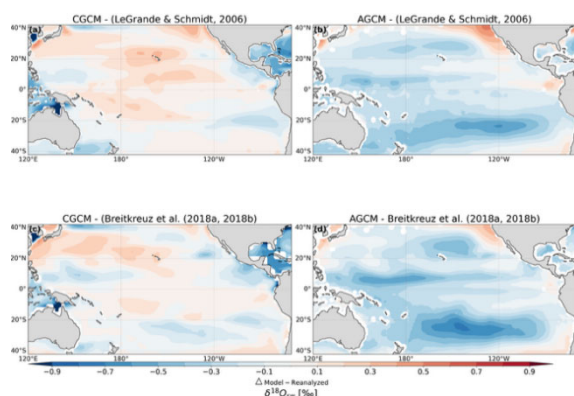


図4：太平洋における $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ のモデル再現性比較。

(a, c) 結合大循環モデル (CGCM) と準観測データとの差。(b, d) 大気大循環モデル (AGCM) と準観測データとの差。CGCM が AGCM より高い再現性を示す。

謝辞

本研究の一部は北極域研究強化プロジェクト (ArCS-3; JPMXD1720251001) において実施されたものです。

文献

- [1] Kurogi, M., Hasumi, H., “Tidal control of the flow through long, narrow straits: a modeling study for the Seto Inland Sea”, *Sci. Rep.* 9, 11077, (2019).
- [2] Tsujino, H. and others, “JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do)”, *Ocean Modelling* 130, 79-139, (2018).
- [3] Tsujino, H. and others, “Evaluation of global ocean-sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2)”, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3643-3708, (2020).
- [4] Curry, B., C. M. Lee, B. Petrie, R. E. Moritz, and R. Kwok, “Multiyear Volume, Liquid Freshwater, and Sea Ice Transports through Davis Strait, 2004-10”, *J. Phys. Oceanogr.*, 44, 1244-1266, (2014).
- [5] Woodgate, R. A., “Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data”, *Progress in Oceanography*, 160, 124-154, (2018).
- [6] Li, Y., Cauquoin, A., Okazaki, A., Yoshimura, K., “Improved response of $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ in the Pacific Ocean to atmosphere-ocean interaction and ENSO using the isotope-enabled Fully Coupled Model MIROC6-iso”, *J. Advances in Modeling Earth Systems*, DOI: 10.1029/2025MS005082, (2026).