

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

小野 純^{*1}, 芳村 圭^{*2}, 李 一帆^{*3}

^{*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, ^{*3} 東京大学工学系研究科

キーワード：北極温暖化増幅, 海水運動量制約, 海氷予測, 水同位体版地球システムモデル, プロキシ

1. はじめに

急激な温暖化が進行する北極域では海氷の減少など顕著な環境変化が確認されている。さらに、その影響は北極域の表層圏だけでなく、地球全体に及ぶことが理解されつつある。本課題は北極域の急激な環境変化を把握し、その全球気候変動に果たす役割を明らかにすることを通じて、東アジア域の極端気象の予測可能性の向上や温暖化予測の不確実性の軽減を目的とする。本報告では、大気-海洋-海氷結合モデルや水同位体過程を組み込んだ地球システムモデルを用いた各種実験および開発状況を報告する。

2. 北極海の気候場形成に対する海氷制約の効果

北極海における海氷の減少や変動は、北極域だけでなく中緯度の気候システムや北極航路を利用した経済活動にも影響を与えるため、高精度な海水予測期間を延ばすために気候モデルの改良は欠かせない。特に北極海では、海氷分布だけでなく表層の低温塩分躍層の初期化は海水予測にとって極めて重要であるが、気候モデルにおけるそれらの表現には依然としてバイアスが残されている。

北極海の海水・海洋循環は主に海面風応力で駆動されていることから、本研究 [1] では、風応力で海水運動量を制約することにより海氷だけでなく海洋表層の再現性も改善されるのではなかろうか？という作業仮説を立てた。気候モデルで表現される北極海の海水分布や海洋の基本的な成層の形成機構について海水運動量制約の効果を検証・調査するために、気候モデル MIROC6 を用いて3種類の過去気候再現実験を実施した。具体的には、A：気候モデルに海水密度だけを同化した実験（nAnOI）、B：実験 A に診断風応力で海水運動量制約を加えた実験（nAnOI.wsfc）、C：実験 B に水温塩分アノマリー同化を加えた実験（nAaOI.wsfc）である。また、比較評価のために既存の実験結果と観測・再解析データも使用した。

まず、相関係数と二乗平均平方根誤差を評価指標として気候モデル実験の再現性を調べた結果、診断風応力で海水運動量を制約した実験（nAnOI.wsfc、nAaOI.wsfc）では、既存の気候モデル実験と比べて、より現実的な海水場（速度、面積、密度）が再現されることがわかった（図略）。特に、冬季から春季にかけて海水場のバイアスが低減したことは、夏季の海氷予測のリードタイムが延びる

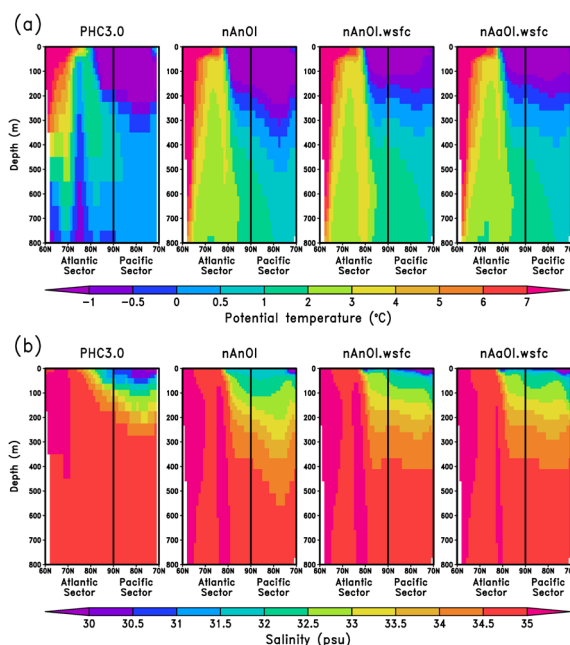


図1 北極海を横切る断面（各パネル左から右へ大西洋側北極海～北極点～太平洋側北極海）における、ポテンシャル水温（a）と塩分（b）の鉛直分布。観測データ（PHC3.0）と気候モデル実験（nAnOI、nAnOI.wsfc、nAaOI.wsfc）から得られた夏季（7-9月）平均気候値を示している。

可能性を示唆している。

さらに、海水運動量を制約した実験（nAnOI.wsfc、nAaOI.wsfc）では、太平洋側北極海の表層付近に広がる低塩分水の表現が良くなり、海水運動量を制約しない実験（nAnOI）と比較して低温塩分躍層の構造が再現された（図1a,b）。この理由の一つは、風応力で海水運動量を制約することで海氷速度の再現性が改善され、その影響は海水海洋間応力を介して海洋表層に伝わり、海水運動量を制約しない実験で表現されていたカナダ海盆上の過度な負の応力カーブとそれに伴う下向きエクマンポンピングが抑えられたためである。一方、大西洋側北極海では北緯85°以南の高温バイアスや北緯80°以北の200-400m深

の低塩バイアスが残っており、これらの改善は今後の課題である。

3. 水同位体版地球システムモデルの開発

水の安定同位体 (H_2^{16}O , H_2^{18}O , HD^{16}O) は、水循環を含んだ気候プロセスのプロキシであり、気候や環境システムの解明において重要な役割を担っている。例えば、極地の氷床コアやアジアの鍾乳石から測定された水同位体比は、それぞれ極地の過去の気温変化の復元やモンスーン変動の復元研究によく使われている。古気候復元の研究に欧米で開発された水同位体版結合気候モデルが応用されている現状を考えると、日本もこのような最先端のモデルを開発することが急務である。本研究では、結合地球システムモデル MIROC6 の水同位体版 (以下、MIROC6-iso と呼ぶ) を新たに開発し、本稿ではその初期的な結果を記す。

MIROC6-iso の海氷モジュールに水同位体を導入することで、南極における降水同位体分布が改善され (図 2)、降水と表層海水における同位体観測結果とよく一致していることを確認した (図 3)。海洋表層から 1500m 深までの水同位体分布は、観測と比較して概ね整合的な状態にあることが確認できているが、より深い部分では、準平衡状態に到達するために、より多くのスピニングアップ時間 (数百年以上) が必要である。

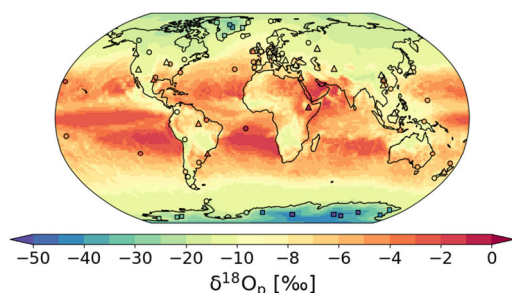


図 2: MIROC6-iso によってシミュレートされた降水同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の気候値の分布 (‰) と、観測された降水、アイスコア、石筈の同位体比 (それぞれ○、□、△で示す) の比較。

我々は、MIROC6-iso を一般的なスカラー型クラスタマシン[2]からベクトルエンジン (VE) 搭載ノード (ES4VE) に移植した。現状このモデルは、ES4VE において 13 時間で 1 年分の計算をすることができる。コンパイル環境の変化により、モデルマイグレーションが正常に実行されない多くの問題を解決した。例えば、ES4VE の NECSDK/nfort 環境では、0/0 や 1-nan などの演算が突然クラッシュしてモデルが実行できなくなることがある。上記のような事態が起きないように、if 判定文を多めに記述し、よりロバストにモデルを実行できるようにした。同時に、リスタートファイルを修正し、運転中の初期値不足によるモデルクラッシュの問題を回避した。そして、コンパイラの変更に伴うモデルの結合不良の問題を解決した。

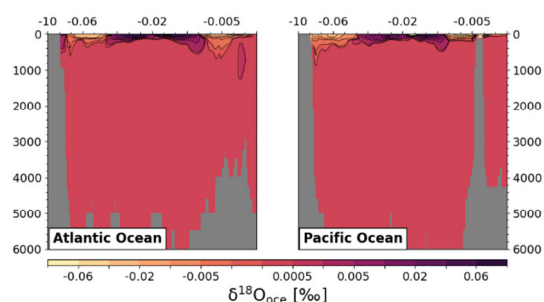


図 3: MIROC6-iso によってシミュレートされた大西洋 (左) と太平洋 (右) での海水同位体比分布。1000m より深いところで鉛直一様になっているのは、スピニングアップが足りず、準平衡状態に至っていないためと考えられる。

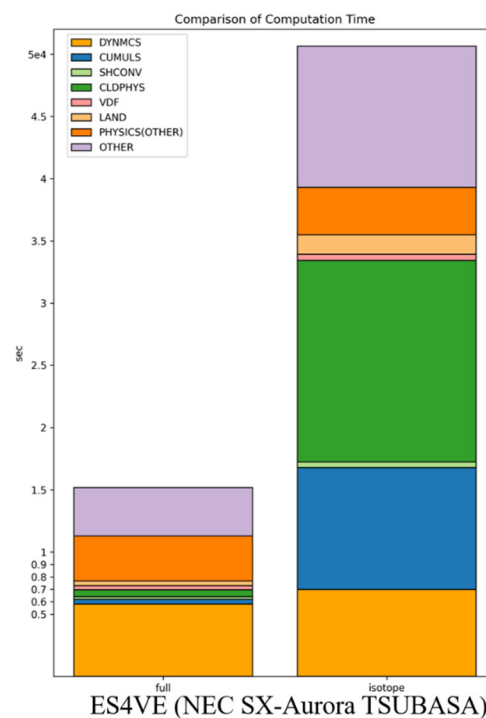


図 4: ES4VE で実行した MIROC6 (左) と MIROC6-iso の実行時間の違い。Intel のクラスタマシンでは両者の違いは 1.5 倍程度だが、ここでは 3-4 倍の差がある。

以上の多くの問題を解決した結果、MIROC6-iso を ES4VE に移植することに成功し、さらにモデル検証解析を実施した。

しかしながら、図 4 が示すように、他のサーバでは標準的な MIROC6 と MIROC6-iso の実行時間の差は 1.5 倍程度であるのに対し、ES4VE では 2 つのモデルの実行時間の差は 3.5 倍から 4 倍になっているのが現状である。今後は、MIROC6-iso を ES4VE に実装した際に発生する実行時間の増加という問題に対処する必要がある。

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] Ono, J., Komuro, Y., Tatebe, H., and Kimura, N., “Effectiveness of wind-constrained sea-ice momentum on formation of sea-ice distribution and upper halocline of Arctic Ocean in climate model”, Environmental Research: Climate (Accepted for publication on 17 April 2024).
- [2] Li, Y., Cauquoin, A., Okazaki, A., Yoshimura, K., “Development of the isotope version of the fully coupled climate model MIROC6-Iso”, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 2023.