

北極域環境変動メカニズムの解明に向けた海氷海洋結合モデリング

課題責任者

渡邊 英嗣

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

渡邊 英嗣^{*1}, 張 圓昕^{*1}, 西野 茂人^{*1}, 安中 さやか^{*1}^{*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

キーワード: 北極海, 海氷海洋結合モデル, 低酸素水, 炭素収支, アイスアルジー

1. 研究の背景

北極海で近年顕著な夏季の海氷縁後退に対する海洋生態系の応答は自然科学分野のみならず人文社会科学的にも関心が高まっており、早急に時空間変動メカニズムを解明し、将来予測に反映させることが各方面から要請されている。本課題では北極海における生態系や物質循環などの環境変動を解明することを目的に、海氷海洋結合モデルを用いた数十年スケールの実験を数多く実施している。令和5年度は、1)中央北極海公海域への低酸素水輸送、2)大気-海洋間 CO₂ 交換量の国際データセット比較、3)アイスアルジー基礎生産量の将来予測に関するモデリング研究を遂行した。本稿ではそれらの概要を報告する。

2. モデル概要および実験設定

本課題でベースとなる海氷海洋物理モデルは COCO (Center for Climate System Research Ocean Component Model) version 4.9、低次海洋生態系-物質循環モデルは Arctic NEMURO-C (Arctic and North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography with Carbonate Chemistry) である。モデルや実験設定の詳細は先行研究[1, 2]に記載しており、概要を表1に示す。モデル領域は北極海全域および北大西洋北部で、水平解像度 5 km (1,280×1,024 格子) /鉛直 42 層の渦解像版と水平解像度 25 km (280×200 格子) /鉛直 28 層の中解像度版をそれぞれ実装している。本稿で報告する「中央北極海への低酸素水輸送」と「大気-海洋間 CO₂ 交換量」の実験では、NCEP-CFSR (National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis) 再解析データを大気境界条件として与え、ベーリング海峡では観測に基づく流量・水温・塩分の太平洋起原水を流入させた。また PHC (Polar Science Center Hydrographic Climatology) 3.0 の水温・塩分を初期条件と側面境界条件に用いた。「アイスアルジーの将来予測」では、JRA55-

do (Japanese 55-year atmospheric reanalysis for driving ocean-sea ice models; 1958-2014 年) および IAMIP2 (Ice Algae Model Intercomparison Project-2) の枠組みで作成された社会経済シナリオ SSP5-8.5 (EC-Earth3; 2015-2100 年) の大気境界条件を与えた[3]。将来予測実験の側面境界条件には、地球システムモデル MIROC-ES2L で計算された SSP5-8.5 の出力 (2015 年 1 月値からのアノマリー) を用いた。

3. 中央北極海公海域への低酸素水輸送

北極海を対象とした国際連携広域観測プロジェクト Synoptic Arctic Survey (SAS) の観測データを取りまとめ、著しく低酸素化や酸性化が進んだ水塊が太平洋側の公海域に広がっていることを世界で初めて発見した[4]。この特異なシグナルは JAMSTEC の海洋地球研究船「みらい」による 2020 年の北極航海で観測されたものだが、これまでにカナダや韓国の砕氷船で取得された観測データも合わせて解析すると、近年の海水減少に伴う海盆スケールの海洋循環変化によって、シベリア陸棚で有機物分解の影響を大きく受けた水塊が 2010 年代後半に当該海域に運ばれやすくなったことが示唆された。このことを検証するために、本課題の先行研究[1]と同じ渦解像版の設定で (表 1)、東シベリア海の陸棚斜面に仮想トレーサーを撒く実験を行ったところ、低酸素陸棚水の北上が 2017 年以降に頻発するという結果が定量的に得られた (図 1)。低酸素水はマダラの呼吸を阻害することなどが指摘されており、本成果は公海域における生物活動への影響の観点からも、「中央北極海無規制公海漁業防止協定」に関わる水産資源管理や政策提言に資することが期待される。

Experiment Period	Atmospheric Forcing		Lateral Boundary Condition			
	T / S	Nitrate / Silicate	TA / DIC			
Control	CFSR	PHC	n. a.	n. a.		
with R-BGC	CFSR	PHC	WOA13	GLODAP-based		
SSP5-8.5	JRA55-do	PHC	WOA13	GLODAP-based		
SSP1-2.6	EC / CM (585)	MIROC (585)	MIROC (585)	MIROC (585)		
	EC / CM (126)	MIROC (126)	MIROC (126)	MIROC (126)		

EC: EC-Earth3 / CM: CMCC-ESM2 / MIROC: MIROC-ES2L

表 1: 各ケースの実験期間と大気・側面境界条件。

黒丸内の黄色数字は本稿の章番号に対応。

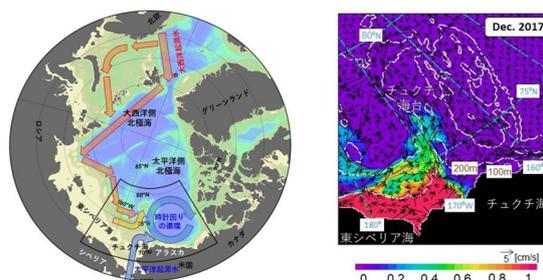


図 1. (a) 北極海全域における主要な水塊輸送の模式図。(b) 渦解像版による年々変動実験で得られた 2017 年 12 月のトレーサー分布 (海水中に占める割合)。ベクトルは水平流速。いずれも水深 100-200m の平均値。

4. 大気-海洋間 CO₂ 交換量の国際データセット比較

国際的な地域炭素収支評価プロジェクト RECCAP2 (REgional Carbon Cycle Assessment and Processes-2) の枠組みにおいて、世界各国の研究機関で作成された大気-海洋間 CO₂ 交換量のデータセットを比較し、北極海における時空間変動と不確定性を明らかにした[5]。本課題の中解像度版による実験結果(表1)も比較用のプロダクトとして提供している。観測データに基づく推定値も含む合計32個のデータセットを解析したところ、北極海でのCO₂吸収量は1985-2018年に概ね増加トレンドを示しており(図2)、CO₂交換量を抑制する海氷の減少が最大の要因であることが示唆された。一方で、将来的には海面水温の上昇に伴って、CO₂吸収量が減少し、いずれ海洋から大気への放出に転じることが推察されることから、同様の枠組みで将来予測実験結果を比較することも今後の方向性として挙げられる。

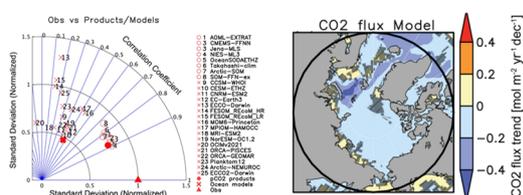


図2. (a) 海面でのCO₂分圧について、観測値との標準偏差比と相関を表すテララダイアグラム。半径方向と動径方向ともに1に近いほど観測値と一致していることを意味する。(b)モデルで計算された大気-海洋間CO₂交換量の長期トレンド(1985-2018年: mol/m²/year/decade)。正值(負値)は大気から海洋への正味吸収量の減少(増加)に相当する。

5. アイスアルジー基礎生産量の将来予測

共通の初期条件や大気境界条件を与える実験を行っても、アイスアルジー基礎生産量の長期トレンドはモデルによって異なる計算結果が得られた(図3)。JAMSTECのモデル(表1)は20世紀後半に急激な減少が見られたが、21世紀に入る頃にはトレンドが緩やかになった。カナダ海洋科学研究所のモデル(IOS)は、21世紀半ばに極大を示す

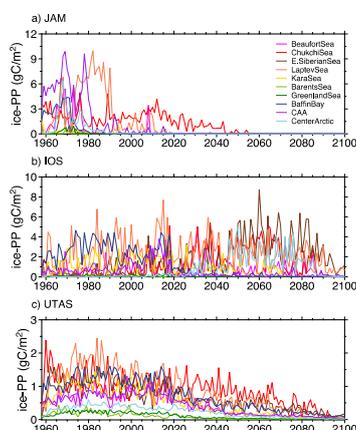


図3. アイスアルジー年間基礎生産量の時系列(1958-2100年)。(a)JAMSTEC、(b)カナダ海洋科学研究所(IOS)、(c)タスマニア大学(UTAS)でそれぞれ計算された10海域の各平均値(gC/m²)。

海域がいくつか見られた。タスマニア大学のモデル(UTAS)は、21世紀末に至るまで比較的一定の減少トレンドを示した。アイスアルジー基礎生産量の支配要因としては、安定した生息基盤の有無および海水底面での光・栄養塩環境が挙げられる。基礎生産が盛んな2-5月平均の各制限項を比較すると、JAMSTECは栄養塩濃度低下への感度が大きい一方で、IOSは海水減少に伴う光環境向上の効果が大きく、UTASは両モデルの中間に位置することが示唆された。

謝辞

本課題は文部科学省からの受託事業である北極域研究加速プロジェクトArCS II (JPMXD1420318865)の支援を受けて実施した。海洋研究開発機構・地球情報科学技術センターの多大なるサポートにも深く感謝致します。

文献

[1] Watanabe, E., Onodera, J., Itoh, M., Mizobata, K., 2022. Transport processes of seafloor sediment from the Chukchi shelf to the western Arctic basin. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 127, e2021JC017958. <https://doi.org/10.1029/2021JC017958>

[2] Watanabe, E., Jin, M., Hayashida, H., Zhang, J., Steiner, S., 2019. Multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice-algal productivity on seasonal, interannual, and decadal timescales. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 124, 9053-9084. <https://doi.org/10.1029/2019JC015100>

[3] Hayashida, H., Jin, M., Steiner, N. S., Swart, N. C., Watanabe, E., Fiedler, R., Hogg, A. McC., Kiss, A. E., Matear, R. J., Strutton, P. G., 2021. Ice Algae Model Intercomparison Project phase 2 (IAMIP2). *Geoscientific Model Development*, 14, 6847-6861. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6847-2021>

[4] Nishino, S., Jung, J., Cho, K.-H., Williams, W. J., Fujiwara, A., Murata, A., Itoh, M., Watanabe, E., Aoyama, M., Yamamoto-Kawai, M., Kikuchi, T., Yang, E. J., Kang, S.-H., 2023. Atlantic-origin water extension into the Pacific Arctic induced an anomalous biogeochemical event. *Nature Communications*, 14:6235. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41960-w>

[5] Yasunaka, S., Manizza, M., Terhaar, J., Olsen, A., Yamaguchi, R., Landschutzer, P., Watanabe, E., Carroll, D., Adiwara, H., Muller, J. D., Hauck, J., 2023. An assessment of CO₂ uptake in the Arctic Ocean from 1985 to 2018. *Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2023GB007806. <https://doi.org/10.1029/2023GB007806>