

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^{*1,2}, 朴 昊澤^{*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^{*2} 東北大学 理学部 大気海洋変動観測研究センター

キーワード：北極海、海水海洋結合モデル、海水内マイクロプラスチック、積雪融解水、アイスアルジー

1. 研究の背景

北極海で近年顕著な海氷減少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7年度は、1)海氷内マイクロプラスチックの拡がり、2)海氷上積雪に由来する淡水成分の時空間変動、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それぞれ遂行した。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[1,2,3,4]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。現在気候下での大気境界条件はNCEP-CFSR (National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis)および JRA55-do (Japanese 55-year atmospheric reanalysis for driving ocean-sea ice models)再解析データをそれぞれ与え、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。また初期条件と側面境界条件は PHC (Polar Science Center

Hydrographic Climatology) 3.0、WOA13 (World Ocean Atlas 2013)、GLODAP (Global Ocean Data Analysis Project)の各データセットから構築した。将来予測実験 (2015–2100 年)では、IAMIP2 (Ice Algae Model Intercomparison Project phase 2) [2] の枠組みで作成された社会経済シナリオ SSP5-8.5 における地球システムモデル EC-Earth3 と MIROC-ES2L の出力からそれぞれ構築した大気・側面境界条件を与えた。

3. 海氷内マイクロプラスチックの拡がり

海洋地球研究船「みらい」による北極航海で採取した海水中に含まれるマイクロプラスチック試料を分析したところ、北太平洋から流入したマイクロプラスチックの大部分はチュクチ海の海水中ではなく、海氷や海底堆積物、あるいは太平洋起原水の下流域に蓄積していることが示唆された[1]。そこで本課題では、a) 海水生成と同じ量の海水中に含まれる海洋表層のマイクロプラスチックが全部海氷に取り込まれる、b) 海氷内マイクロプラスチックは海氷融解量に応じて海洋表層に放出されるが、海氷が全部融け切るまでは残存する、c) 海水中のマイクロプラスチックは沈降しないといった極端な条件を仮定して、ベーリング海峡で実測に基づくトレーサーを撒く実験を行った。その結果、北極海の広範囲にトレーサーが拡がり、海氷が集積するグリーンランド北岸で高濃度になる水平分布が得られた (図1)。一方、海水中での沈降速度を与える実験 (最大で 1 m/day) では、海盆域での濃度が著しく低くなったことから、海氷を介した拡がり海水中でどれだけ沈降するか大きく依存することが定量的に示された。

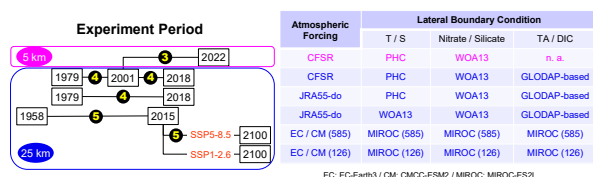


表1. 各ケースの実験期間と大気・側面境界条件。

黒丸内の黄色数字は本稿の章番号に対応。

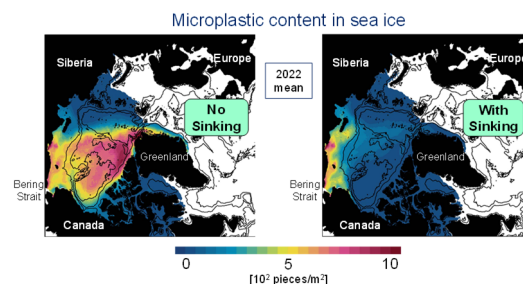


図1. 海氷内に取り込まれたマイクロプラスチックの水平分布。2022年平均の鉛直積算値。海水中での沈降を(左)与えないケースと(右)与えたケース。黒いコンターは等深線 (100, 1000, 3000m)。

4. 海氷上積雪に由来する淡水成分の時空間変動

海氷上の積雪深やこの積雪に由来する淡水成分（積雪融解水）の数十年スケール変動や不確定性を評価した。2種類の気象再解析データ（CFSR v.s. JRA55-do）を与えた実験結果を比較したところ、降雪量および積雪深の水平分布は一致しないが長期変化の特徴は似ており、数十年スケール変動に対する海水移流（収束・発散など）の影響は相対的に小さかった。降雪量と積雪深はともに北極海の広範囲で減少トレンドを示すが、大西洋側のユーラシア海盆では増加トレンドを示した。また、海洋表層に分布する積雪融解水は2000年代以降にユーラシア海盆で減少、カナダ海盆で増加しており、時計回りに流れるポーフォート海洋循環の拡大を反映していた。CFSRの気象境界条件で、降雪量のみJRA55-doに差し替えた実験からは、積雪融解水の時空間変動が降雪量よりも海洋循環の変動に強く依存していることが示唆された（図2）。今後はまず海氷上の積雪深を氷上観測・漂流ブイ・人工衛星のデータと比較することで再現性を検証する。積雪融解水以外の淡水成分（降水・河川水・海氷融解水など）についても、酸素同位体比やアルカリ度の船舶データから間接的に推定された値を用いて検証していく。

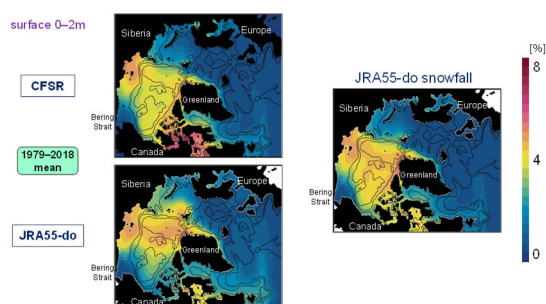


図2. (上) 海洋最上層における積雪融解水の水平分布。(左上) CFSRと(左下) JRA55-doをそれぞれ与えた結果。(右) CFSRの気象境界条件で、降雪量のみJRA55-doに差し替えた結果。いずれも1979-2018年平均値。

5. アイスアルジー基礎生産量の将来予測

アイスアルジー（海氷に付着する藻類の総称）の基礎生産量をJAMSTEC・カナダ海洋科学研究所・タスマニア大学でそれぞれ開発された3つモデルで比較したところ、

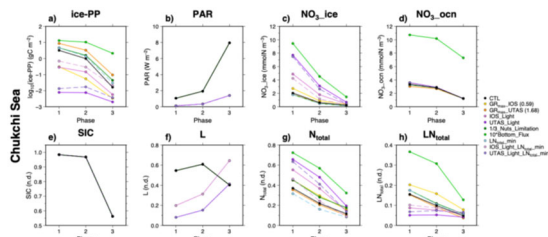


図3. 1979-2018年(Phase 1)、2021-2060年(Phase 2)、2061-2100年(Phase 3)でそれぞれ平均したチュクチ海におけるアイスアルジー基礎生産量および支配要因。各線は10ケースの感度実験結果。

太平洋側北極海では、カナダのモデルのみ21世紀前半に極大を示した[5]。このように長期的な変動傾向がモデル間で異なる要因を明らかにするために、多くの感度実験を行い、最大成長率・光制限・栄養塩制限の変更が及ぼすインパクトを定量的に評価した。その結果、a) 強光阻害を考慮しない、b) 海洋表層の栄養塩が豊富に存在する、c) 光と栄養塩の条件を比較して制限が強い方のみに依存させるという条件が揃う場合に基礎生産量が増加しやすくなることが示唆された（図3）。モデル結果の不確定性を低減させるためには、さらなる現場観測や培養実験に基づくパラメタリゼーションの精緻化もより一層必要である。

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強化プロジェクト ArCS III (JPMXD1720251001)および科学研究費補助金（基盤 A: 25H00679／基盤 B:25K03258）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 ※下線の著者は本課題メンバー

[1] Watanabe, E., Ueno, H., Kodaira, T., Murata, A., Nishino, S., Ikenoue, T., Yamamoto, M., Nomura, D., Abe, H., Kawaguchi, Y., Hirano, D., Zhang, Y., Yasunaka, S., 2025. Arctic marine environments regulated by ocean transport and air-sea-land interaction: Findings from the ArCS II Ocean Research Program. Polar Science, 45, 101205. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2025.101205>

[2] 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>

[3] 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>

[4] Zhang, Y., Yamamoto-Kawai, M., Watanabe, E., Park, H., 2024. How much can riverine biogeochemical fluxes affect the Arctic Ocean acidification? Journal of Geophysical Research Oceans, 129, e2023JC020404. <https://doi.org/10.1029/2023JC020404>

[5] Zhang, Y., Watanabe, E., Hayashida, H., Sou, T., Steiner, N., 2026. Future decline of ice-algal productivity in the Arctic Ocean: Model intercomparison. Journal of Geophysical Research Oceans, submitted.