

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}, 朴 昊澤^{*1}, 川合 美千代^{*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} 東京海洋大学 学術研究院

キーワード：北極海、海氷海洋結合モデル、海氷融解水、河川水、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6年度は、1)海氷融解水の時空間変動、2)河川物質流入が海洋酸性化に及ぼす影響、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。本稿で報告する「海氷融解水」と「河川物質流入」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」の実験では、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[4]。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. 海氷融解水の時空間変動

海氷融解水は貯淡水量の増加や鉛直混合の弱化といった物理過程だけではなく、海洋生態系や物質循環にも影響を及ぼす。例えば、海氷融解水による希釈効果は海洋表層の貧栄養化や酸性化を促進する。また密度成層強化を介して基礎生産量減少の要因にもなり得る。そこで本課題では、後述する河川研究[5]と同様に海氷融解水のトレーサーをモデルに導入し、その時空間変動を解析した。北極海の各海域における海洋表層でのトレーサー濃度は冬～春に負値、夏～秋に正値となる顕著な季節変化を示し、チュクチ海では 2001-2022 年の期間に減少トレンドが見られた(図1)。その要因としては、正味海氷生成量の増加(生成量増加 and/or 融解量減少)または他海域や中深層との水平・鉛直輸送量の変化など多くのプロセスが考えられるため、引き続き詳細な解析を進める予定である。

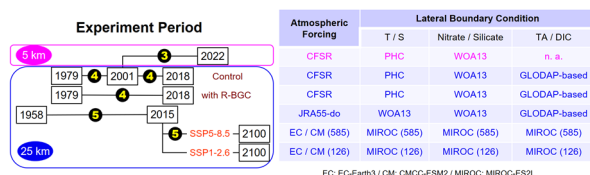


表1. 各ケースの実験期間と大気・側面境界条件。
黒丸内の黄色数字は本稿の章番号に対応。

Atmospheric Forcing	Lateral Boundary Condition			
	T / S	Nitrate / Silicate	TA / DIC	
CFSR	PHC	WOA13	n. a.	
CFSR	PHC	WOA13	GLODAP-based	
CFSR	PHC	WOA13	GLODAP-based	
JRA55-do	WOA13	WOA13	GLODAP-based	
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

図1. (上) 太平洋側北極海における海氷融解水の分布(海洋最上層の海水中に占める割合)。2020年の(左)3月と(右)9月の実験結果。(下)左上図の黄線で示したチュクチ海の水深100m以浅で積算した海氷融解水の存在量。2001-2022年の月平均時系列。

4. 河川物質流入が海洋酸性化に及ぼす影響

北極に流入する河川水の流量は過去数十年にわたって増加しており、淡水だけでなく熱や物質も北極海に供給することで、特に沿岸域の海洋環境に影響を与えている可能性が高い。そこで本課題では、河川からの溶存物質(硝酸塩・珪酸塩・全炭酸・アルカリ度)の流入が海洋環境に及ぼすインパクトも評価した。河川からの物質流入を与えない従来の実験に比べて、物質流入を与えた実験の方が海洋酸性化の指標となる pH や炭酸カルシウム飽和度 Ω が高く、特に大河川が流入するカラ海やラプテフ海から下流域に位置する北極点付近にかけてその差が大きかった(図2)。これらの解析結果から、河川からの物質流入は北極海における海洋酸性化の進行を遅らせる効果があることを定量的に明らかにした[5]。

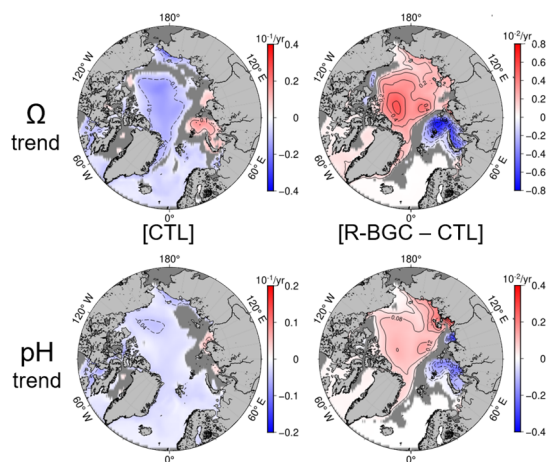


図2. (上)炭酸カルシウム飽和度 Ω と(下)pHのトレンド(1979-2018年)。(左)河川物質流入を与えない実験(CTL)と(右)与えた実験(CTLに対するアノマリー)の結果。

5. アイスアルジー基礎生産量の将来予測

アイスアルジー基礎生産量の長期変動はモデルや海域によって特徴が異なる結果が得られた。大西洋側のラプ

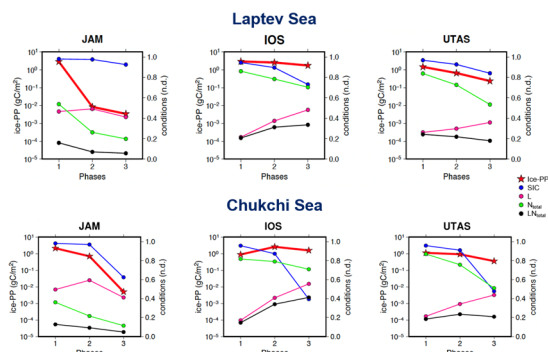


図3. 1979-2018年(Phase 1)、2021-2060年(Phase 2)、2061-2100(Phase 3)でそれぞれ平均したアイスアルジー基礎生産量および支配要因。(左)JAMSTEC(JAM)、(中央)カナダ海洋科学研究所(IOS)、(右)タスマニア大学(UTAS)でそれぞれ計算された(上)ラプテフ海と(下)チュクチ海の平均値。

テフ海では、3つのモデルともに減少傾向が見られたが、JAMSTEC(JAM)の実験では21世紀前半に急減したのに対し、カナダ海洋科学研究所(IOS)やタスマニア大学(UTAS)の実験では21世紀後半まで比較的緩やかな減少トレンドが見られた(図3)。太平洋側のチュクチ海では、IOSのみ21世紀半ばに極大を示した。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(高い海水密度度:SIC)および海水底面での光(L)・栄養塩(N)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、JAMは栄養塩濃度低下への影響が大きいが一方で、IOSは海水減少に伴う光環境向上の寄与が大きく、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] Park, H., Watanabe, E., Kim, Y., Polyakov, I., Oshima, K., Zhang, X., Kimball, J. S., Yang, D., 2020. Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea-ice decline and oceanic and atmospheric warming. *Science Advances*, 6, eabc4699. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc4699>
- [3] 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>
- [4] 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>
- [5] 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>