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

渡邉 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

渡邉 英嗣^{*1},小野寺 丈尚太郎^{*1},張 圓昕^{*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

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社会・経済的にも 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暖水輸送・酸性化・生態系変動の実態解明を行うことを目的に、海氷海洋結合 モデルを用いた数十年スケールの年々変動実験を数多く実施している。令和3年度は、北極海領域モデルの水平5 km 格子版で年々変動実験(2001-2020 年)を行い、海底から再懸濁した堆積物粒子のチュクチ陸棚域からカナダ 海盆周辺域への輸送過程を詳細に明らかにした。また水平25 km 格子版で長期変動実験(1979-2018 年)を行い、 河川水による物質供給が海洋酸性化に及ぼすインパクトを定量的に評価した。さらに国際的な枠組みにおいて将 来予測実験(2015-2100 年)にも着手し、地球温暖化に伴う海氷減少に対するアイスアルジー基礎生産量の応答に について予備的な解析を行った。

キーワード:北極海,海氷海洋結合モデル,再懸濁堆積物粒子,海洋酸性化,アイスアルジー

研究の背景

北極海の海氷は全球規模の気候形成に重要な役割を果 たしており、熱塩循環に重要な北大西洋深層水の形成や 地球温暖化を考える上で海氷の存在を無視することはで きない。この北極海の海氷が近年急激に減少しており、特 に太平洋側で夏季の海氷縁後退が著しいことが衛星観測 などから報告されている。海氷減少の要因としては、風系 の変化、海上気温の上昇、海洋熱輸送量の増加などが挙げ られるが、これらのプロセス間でも密接に相互作用して おり、各要因の相対的寄与は十分にわかっていない。北極 海でさらに光・水温・栄養塩環境が急激に変化すれば、食 物連鎖を介して動物プランクトンや魚類・哺乳類の生息 域にも少なからずインパクトを与えることが予想される が、植物プランクトン基礎生産量の増減の符号でさえ、い まだ不確定性が大きい。このように北極環境はとても複 雑で未解明プロセスが多く残っている。特に海洋環境変 動とそのメカニズムを定量的に議論するためには、現実 的な実験設定の下で駆動した数値モデルを利用した解析 が求められる。本課題で取り組む北極海モデリングは沿 岸流・渦活動・湧昇といった局所現象の理解だけでなく、 海盆スケールの熱・淡水・物質循環を理解する上でも有用 なアプローチである。

JAMSTEC 北極環境変動総合研究センターでは、太平洋側 北極海の陸棚海盆境界域に位置するバロー峡谷からチュ クチ海台周辺にかけての4地点(Station NBC・NHC・NAP・ CAP)において、セディメントトラップ係留系による時系 列観測を2010年から継続的に実施しており、季節を問わ ず多くの陸起源砕屑物(Lithogenic Material: LM)を捉 えたことが報告されている。このLM は陸棚海底から再懸 濁した堆積物粒子が起源だと考えられているが、その時 空間分布や輸送過程を観測データから定量的に議論する ことは困難であった。そこで本課題では、再懸濁堆積物粒 子のプロセスを簡易的に導入し、太平洋側北極海におけ る輸送過程を明らかにした[1]。

北極海にはユーラシア大陸や北米大陸から大量の河川 水が流入しており、その淡水供給は北極海の成層強度や 酸性化を議論する上でもとても重要である。さらに河川 水は淡水だけでなく、熱や栄養塩の供給源としても考え られる。本課題の先行研究では、河川氷や河川水温も計算 できる最先端の陸面モデルと海氷海洋結合モデルを組み 合わせることで、大陸河川からの熱流入が北極海の海氷 減少・海水温上昇・気温上昇に及ぼすインパクトを定量的 に明らかにし、プレスリリースを通じて多くのメディア で紹介される成果を挙げた [2]。河川水の栄養塩(硝酸 塩・珪酸塩)や炭酸系成分(全炭酸・アルカリ度)も北極 海の生態系や酸性化を議論する上で無視できない存在で あることが想定される。河川から淡水の供給は栄養塩濃 度の低下や海洋酸性化をもたらすため、淡水と物質の相 対的寄与を見積もるためには、可能な限り現実的な設定 を用いた数値モデル実験が有用である。そこで本課題で は、河川からの物質流入を与える実験の結果を解析する ことで、海洋酸性化へのインパクトを明らかにした。

北極海で近年急激に進行している海氷減少はアイスア ルジー(海氷に付着する藻類の総称)の動態にも多大なイ ンパクトを与え、食物連鎖を介してプランクトンや魚類・ 哺乳類・海鳥などの生態系全体にも影響を及ぼすことが 指摘されている。海氷が薄くなれば海氷底面への太陽光 の透過量が増加する一方で、海氷融解水は希釈と密度成 層強化を介して、海洋表層の栄養塩濃度を低下させる働 きがある。また海氷縁の後退は直接的に生息域の変化を もたらす。このように海氷減少はアイスアルジー基礎生 産に対して正と負それぞれの寄与を持つ。しかし、アイス

アルジーは人工衛星や船舶による観測が困難という事情 もあり、北極海全域および数十年スケールの時空間変動 について殆どわかっていなかった。そこで本課題の先行 研究では、北極海研究の国際的な枠組みである FAMOS (Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis) に参加している世界各国の海氷海洋生態系 モデルの結果との相互比較に基づいて、アイスアルジー の基礎生産量が光環境と栄養塩濃度に加えて安定した生 息基盤の有無によって複雑に変化しており、少なくとも 1980-2018 年の期間ではモデル間で共通の長期トレンド が見られなかったことを報告している [3]。その後継プ ロジェクトとなる IAMIP2 (Ice Algae Model Intercomparison Project phase 2)では、対象期間を 1958-2100年に延長し、オーストラリア・カナダ・米国の モデル結果と将来予測まで含めて比較すること計画して おり、共通で与える初期条件や大気境界条件などの概要 をまとめた論文を令和3年度に出版した[4]。本稿では 将来予測実験で計算されたアイスアルジー基礎生産量の 一部を報告する。

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[3, 5] にも記載している。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(表1)。本稿で報告する堆積物輸送 と海洋酸性化の実験では、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 の太平洋起源水を流入させた。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 来予測実験では、CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6)に参加している全球気候モデルのうち、 EC-Earth3 と CMCC-ESM2 に基づく大気境界条件が IAMIP2 の枠組みで既に作成されている [4]。両者とも地球温暖 化を想定した社会経済シナリオSSP5-8.5およびSSP1-2.6 の出力を用いて合計 4 ケース実験する計画である。将来 予測実験の初期条件は JRA55-do (Japanese 55-year atmospheric reanalysis for driving ocean-sea ice models) [6] の大気境界条件を与えた Historical Experiment (1958-2014 年)の結果を用いた。将来予測実 験の側面境界条件には、JAMSTEC が中心となって MIROC-ES2L モデルで計算された SSP5-8.5 および SSP1-2.6 の出 力(2015年1月値からのアノマリー)を用いた[7]。



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

3. 再懸濁堆積物粒子の輸送過程

北極海領域モデルの渦解像版に陸起源砕屑物LMを想定 した再懸濁堆積物粒子のプロセスを導入し、太平洋側北 極海における輸送過程を解析した。海底からの再懸濁粒 子フラックスは海洋最下層での水平流速の二乗に比例す るようにモデル内で計算し、堆積物粒子の沈降速度は 0-5 m day⁻¹の範囲で水平一様の鉛直分布を与えた。2001-2020 年を対象とした年々変動実験の結果を調べたところ、 セディメントトラップ係留系が捉えた沈降粒子量を大ま かに再現していることが確認できた(図1)。



図1:(左)太平洋側北極海に位置するチュクチ陸棚域お よびカナダ海盆周辺域における主要海流の模式図。(右) 再懸濁堆積物粒子の水深 200m での沈降フラックス。2010 年9月から 2020 年8月までの平均値。

次に本実験結果を解析することで、チュクチ陸棚海底 から再懸濁した堆積物粒子の輸送には、1)バロー峡谷通 過流、2) チュクチ陸棚縁を西向きに流れる CSC (Chukchi Slope Current)、3) バロー峡谷通過流によってイベント 的に生成される中規模渦がそれぞれ重要な役割を担って いることがわかった。ボーフォート高気圧の変動に伴っ て 2010 年代に強化傾向を示した CSC はチュクチ海台への 粒子輸送量の増加に寄与する一方で、2012年や2016年は 活発な渦活動によってカナダ海盆に多くの粒子が供給さ れていた。セディメントトラップ試料の分析からは陸起 源砕屑物LMと粒状有機炭素POCの沈降量に高い相関が見 られていることから、陸棚海底から再懸濁した堆積物粒 子は太平洋側北極海の炭素循環にとっても重要であるこ とが示唆された(図2)。今後は一連の輸送過程が北極海 の生態系や物質循環に及ぼす影響についても定量的に評 価していく予定である。



図2:2010年9月から2020年8月まで平均した再懸濁堆 積物粒子濃度。(上)西経160度と(下)西経150度に沿 った鉛直断面図。

4. 海洋酸性化に対する河川水流入のインパクト

海洋酸性化に対する河川からの物質流入のインパクト を調べるために、北極海に流入するオビ・エニセイ・レナ・ コリマ・マッケンジーの五大河川における硝酸塩・珪酸 塩・全炭酸・アルカリ度の月平均気候値を Arctic GRO (Arctic Great Rivers Observatory)のデータセット [8] から作成した。これらに AOMIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project)で提供されている淡水流入量 の月平均気候値を掛けることでフラックス値に換算した。 またこの五大河川の河口域に流入量に応じたトレーサー を撒いて、水温・塩分と同じスキームで移流・拡散過程を 計算した。この河川水トレーサーの水平分布を調べたと ころ、シベリア陸棚域のカラ海やラプテフ海から Transpolar Drift Stream に沿ってフラム海峡の方向に拡 がっていることが確認できた(図3)。北極海を横断する 鉛直断面図を見ると、海面から約 40m 深にかけて多く分 布していた。



図3:1989-2018 年の期間で平均した河川水トレーサー 分布。(左)表層10mで平均した水平分布。(右)左図の A-A'とB-B'ラインにそれぞれ沿った鉛直断面図。

次に河川からの物質流入を与える実験と与えない実験 をそれぞれ行い、実験間のアノマリーを解析した。海洋 酸性化の指標となる炭酸カルシウム飽和度Ωを実験間で 比較したところ、物質流入を与えた実験の方が北極海全 域でΩが高く、特に大河川が流入するカラ海やラプテフ 海から北極点付近にかけてその差が大きかった(図4)。 これらの海域では pH 値も高くなっていた。河川からの物 質流入のうち硝酸塩・珪酸塩のみ与える実験と全炭酸・ アルカリ度だけ与える実験もそれぞれ追加で行った。そ の結果を調べたところ、硝酸塩・珪酸塩の流入は植物プ ランクトンによる基礎生産量の増加を介して海水中の二 酸化炭素分圧を下げる効果があり、特に沿岸域でΩ・pH の正のアノマリーに寄与していた。一方、全炭酸・アル カリ度の流入は沿岸域を含む北極海全域においてΩ・pH の正のアノマリーに大きく寄与していた。これらの解析 結果から、河川からの物質流入は現在北極海で進行して いる海洋酸性化の進行を遅らせる効果があることが示さ れた [9]。今後、年々変動や長期トレンド、淡水流入に よる希釈効果との関連も含めて報告していく予定である。



図4:表層 10m で平均した(左)炭酸カルシウム飽和 度 Ω と(右) pH の 1989-2018 年平均値。河川からの物 質流入(硝酸塩・珪酸塩・全炭酸・アルカリ度)を与え ない実験に対する与えた実験のアノマリー。 Ω や pH の 値が低いほど酸性化が進行していることを意味する。

5. アイスアルジー基礎生産量の将来予測

本実験で計算されたアイスアルジー基礎生産量のトレンドを4期間に分けて計算したところ、北極海全域で概ね減少傾向が見られた(図5)。まず Historical Experimentの1968-2014年には特にカナダ多島海の沖合で減少トレンドが大きかった一方で、太平洋側の陸棚域やバレンツ海では増加トレンドも見られた。社会経済シナリオ SSP5-8.5 の地球温暖化を想定した Future Experimentのうち2015-2040年の期間では、シベリア陸棚域のカラ海やラプテフ海で減少トレンドが大きかった。それ以降の2041-2070年や2071-2100年の期間も減少傾向が見られたものの、トレンドの値は小さくなっていた。

アイスアルジー基礎生産量の支配要因としては、海氷 底面の光・栄養塩環境および安定した生息基盤の有無が 挙げられる。積雪深や海氷厚が減少することで、海氷底面 での光量は増加する。但し本実験では強光阻害を考慮し ているので、パラメータ値として与える最適光強度まで は光制限が緩和されるが、それより光量が増加すれば逆 に光制限が強化される。海氷下の栄養塩濃度は様々なプ ロセスによって変化するが、海面付近での海氷融解水の 蓄積は栄養塩濃度の低下に大きく寄与する。さらに夏季 に海氷が融け切るとアイスアルジーの生息基盤が失われ るため、海氷後退の早期化は基礎生産量の減少につなが り得る。本実験で見られたアイスアルジー基礎生産量の 長期的な減少トレンドはこれらの支配要因の組み合わせ で生じたと考えられ、今後は各制限項の解析も合わせて 進めることで相対的な寄与を見積もっていく。また SSP1-2.6 など異なる社会経済シナリオの大気境界条件を与え る実験結果やオーストラリア・カナダ・米国からそれぞれ 提供されたモデル結果とも比較・解析することで、将来予 測の不確定性を調べていく予定である。



図5:アイスアルジー基礎生産量のトレンド。1968-2100年を4期間に分けてプロット。2015-2100年はEC-Earth3のSSP5-8.5シナリオの出力を与えた実験結果。

謝辞

本課題は文部科学省の北極域研究加速プロジェクト ArCSII (JPMXD1420318865) および科学研究費助成事業・基 盤研究 B (18H04129)の支援を受けて実施した。JAMSTEC 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.,K. 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] Watanabe, E., Onodera, J., Itoh, M., Nishino, S., Kikuchi, T., 2017. Winter transport of subsurface warm water toward the Arctic Chukchi Borderland, Deep-Sea Research Part I, 128, 115-130, https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.08.009

[6] Tsujino H., et al., 2018. JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). Ocean Modelling, 130, 79-139. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.07.002

[7] Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M. A., Abe, M., Ohgaito, R., Ito, A., Yamazaki, D., Okajima, H., Ito, A., Takata, K., Ogochi, K., Watanabe, S., and Kawamiya, M., 2020. Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks, Geoscientific Model Development, 13, 2197-2244. https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020

[8] Holmes, R. M., Coe, M. T., Fiske, G. J., Gurtovaya, T., McClelland, J. W., Shiklomanov, A. I., Spencer, R. G. M., Tank, S. E., & Zhulidov, A. V., 2012. Climate Change Impacts on the Hydrology and Biogeochemistry of Arctic Rivers. In Climatic Change and Global Warming of Inland Waters, pp. 1-26. John Wiley & Sons, Ltd., https://doi.org/10.1002/9781118470596.ch1

[9] Zhang, Y., Yamamoto-Kawai, M., Watanabe, E., 2022. How Much Can Riverine Biogeochemical Fluxes Affect the Arctic Ocean Acidification? Journal of Geophysical Research Oceans, under review.

Sea Ice-Ocean Modeling on the Arctic Environmental Changes

Project Representative Eiji Watanabe Institute of Arctic Climate and Environment Research, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

Authors

Eiji Watanabe^{*1}, Jonaotaro Onodera^{*1}, Yuanxin Zhang^{*1}, Michiyo Yamamoto-Kawai^{*2} ^{*1}Institute of Arctic Climate and Environment Research, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine– Earth Science and Technology,

*2Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Marine Science and Technology

Biogeochemical responses to the Arctic sea ice decline have become an important topic for a variety of communities: not only natural science researchers but also social and economic communities. In this project, sea ice-ocean modeling studies on ocean heat/biogeochemical transport, acidification, and ecosystem in the Arctic are progressing. The coupled sea ice-ocean general circulation model is the COCO (Center for Climate System Research Ocean Component Model) version 4.9. The marine ecosystem and biogeochemical model is the Arctic NEMURO-C (Arctic and North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography with Carbonate Chemistry). Activities in the fiscal year 2021 are categorized to three themes: 1) transport processes of seafloor sediment, 2) riverine impacts on ocean acidification, and 3) future projection of ice algal productivity.

Keywords : Arctic Ocean, sea ice-ocean model, seafloor sediment, ocean acidification, sea ice algae

1. Research Background

The carbon sink in the deep Arctic basins sometimes exhibits an annual peak during winter and spring. A one-dimensional biological pump cannot account for this seasonality because the polar night and sea ice cover prevent phytoplankton photosynthesis in high-latitude regions. Instead, it has been suggested that resuspension and cross-shelf transport of seafloor sediment including organic material could be induced both by winter mixing/convection on shallow shelves and by mesoscale shelf-break eddies. We conducted the first modeling attempt to quantify the resuspension and subsequent transport of lithogenic material (LM) in the western Arctic under a realistic framework.

Massive river water inflow into the Arctic Ocean is important for the stratified structure and ocean acidification as primary freshwater source. It is also considered that riverine heat and nutrient inflow also influences the Arctic sea ice and marine ecosystem [1]. We evaluated impacts of riverine freshwater and biogeochemical inflows on ocean acidification.

Ice algae are a key component of Arctic marine ecosystem, for example, as foods for zooplankton and benthos species in early spring. In addition, the activity of ice algae is important for biological pump. Widespread depositions of ice-algal biomass were detected in the deep Arctic basins. Generally, sea ice decline plays both positive and negative roles in ice algal biomass and productivity. For example, sea ice thinning enhances light penetration into the skeletal layer at the sea ice–ocean interface. On the other hand, reduction in net thermal ice growth restricts nutrient availability. Retreat of sea ice margin causes shrinking of ice algal habitat. Recently we started the Ice Algae Model Intercomparison Project phase 2 (IAMIP2) [2].

2. Model and Experimental Design

The detailed model description and experimental design were presented in our previous publications [3, 4]. The brief summaries are described below. The pan-Arctic regional modeling framework has two versions with their grid size of 25 km (28 layers) and 5 km (42 layers). Both of those models cover the entire Arctic Ocean and the northern North Atlantic. Atmospheric forcing was obtained from the National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis (NCEP-CFSR) dataset and Japanese 55-year atmospheric reanalysis for driving ocean-sea ice models (JRA55-do), respectively (Table 1). Water properties at the Bering Strait were prescribed to idealized seasonal cycles. In the 5-km grid version, LM transport was also calculated with its sinking speed of 0-5 m day-1. For the study on ocean acidification using the 25-km grid version, riverine biogeochemical inflow was constructed from freshwater flux provided by the Arctic Ocean Model Intercomparison Project (AOMIP) and biogeochemical concentration of Arctic Great Rivers Observatory (Arctic GRO). For future projection of ice algal productivity, the model was integrated until 2100 under several global warming scenarios.

Experiment Period	Atmospheric Forcing	Lateral Boundary Condition		
		T/S	Nitrate / Silicate	TA / DIC
5 km 2020	CFSR	PHC	n. a.	n. a.
1979 2001 2018 Control	CFSR	PHC	WOA13	GLODAP-based
1979 2018 with R-BGC	CFSR	PHC	WOA13	GLODAP-based
1958 2015	JRA55-do	WOA13	WOA13	GLODAP-based
	EC / CM (585)	MIROC (585)	MIROC (585)	MIROC (585)
25 km SSP1-2.6 - 2100	EC / CM (126)	MIROC (126)	MIROC (126)	MIROC (126)
	EC: EC-Earth3 / CM: CMCC-ESM2 / MIROC: MIROC-ES2L			

Table 1: Experiment period and boundary conditions.Yellow numbers correspond to Chapters in this report.

3. Transport Processes of Seafloor Sediment

The processes of seafloor sediment transport from the Chukchi shelf to the western Arctic basin were investigated with sedimenttrap measurements at four mooring stations: North of Barrow Canyon, North of Hanna Canyon, Northwind Abyssal Plain, and Chukchi Abyssal Plain [5]. The available sediment-trap data verified that the sinking flux of LM originally resuspended from the seafloor for 2010-2020 was simulated reasonably well in the four mooring areas. The model results were analyzed to quantify the spatiotemporal variability of LM and to reveal its background mechanisms. Analysis indicated that the Barrow Canyon throughflow, Chukchi Slope Current (CSC), and mesoscale eddies played important roles in LM redistribution. The CSC controlled the westward transport of LM from the mouth of Barrow Canyon to the Chukchi Borderland. The mesoscale eddies generated north of Barrow Canyon efficiently transported shelf-origin LM toward the southern Canada Basin. The sinking flux of particulate organic carbon (POC) averaged from September 2010 to August 2020, which was estimated statistically from the simulated LM flux, was 0.13-0.30 gC m⁻² yr-1 at 200-m depth in the southern Canada Basin. This finding reveals that lateral transport of sediment from the Chukchi shelf bottom has a considerable effect on the sinking flux of POC in the western Arctic basin, and suggests that the western Arctic marine biogeochemical cycle is strongly influenced by shelfbasin exchange that depends on the relative strength of the CSC and mesoscale eddy activity.

4. Riverine Impacts on Ocean Acidification

Effects of the riverine biogeochemical fluxes (R-BGC; carbon and nutrients) on carbonate variables and ocean acidification (OA) in the Arctic were evaluated. R-BGC effects on seawater carbonate system were found in the surface water and were larger in the coastal regions and along the Transpolar Drift Stream. R-BGC caused positive anomalies in aragonite saturation state (Ω) and pH relative to those in an experiment with riverine discharge of only freshwater. In the central part of the Arctic Ocean, the positive anomalies in Ω and pH were caused mostly by riverine carbon delivery. In the coastal regions, riverine nutrient delivery accounted for approximately 20% of the positive anomalies in Ω and pH owing to the enhanced primary production and corresponding reduction in seawater pCO₂. During 1989-2018, decreasing trends in Ω and pH appeared in most regions of the Arctic Ocean in the cases both with and without R-BGC, and Ω had an increasing trend in the Kara Sea and a part of the Laptev Sea. Increased riverine freshwater content promoted OA in most parts of the Arctic Ocean by dilution effect; Conversely, according to the addition of riverine carbon fluxes, the decrease trend in Ω and pH was mitigated to some extent at the same time in these regions, including the Canada Basin, a part of the Eurasian Basin, and the East Siberian Sea.

5. Future Projection of Ice Algal Productivity

IAMIP2 is built upon the experience from its previous phase [4] and expands its scope to global coverage (both Arctic and Antarctic) and centennial timescales (spanning the mid-20th century to the end of the 21st century). Participating regional and global models are driven by the same initial conditions and atmospheric forcing datasets. Both historical and future experiments using our model show continuous decline trends in primary productivity of sea ice algae (ice-PP) over most regions of the Arctic Ocean. The simulated fastest decline appears north of the Canadian Archipelago for 1968-2014 and on the Siberian shelves for 2015-2100. Sea ice thinning enhances light intensity in the skeletal layer, which initially provides preferable condition of ice-PP. But, strong light inhibition adopted in the present experiment reduces ice-PP in the 21th century. Accumulation of sea ice meltwater dilutes nutrients in the ocean surface layer, so nutrient limitation for ice-PP becomes stronger. Those relative contributions will be estimated at the next stage.

Acknowledgement

This work was supported by the Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) Project II (JPMXD1420318865) and the Grants-in-Aids for Scientific Research (No. 18H04129) of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). We really appreciate great supports by the JAMSTEC– CEIST.

References

[1] Park, H., et al., 2020. Increasing riverine heat influx triggersArctic sea-ice decline and oceanic and atmospheric warming.ScienceAdvances,6,eabc4699,https://doi.org/10.1126/sciadv.abc4699

[2] Hayashida, H., et al., 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., et al., 2017. Winter transport of subsurface warm water toward the Arctic Chukchi Borderland, Deep–Sea Research Part I, 128, 115–130, https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.08.009.

[4] Watanabe, E., et al., 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

[5] Watanabe, E., et al., 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