

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 北極環境変動総合研究センター

著者

渡邊 英嗣^{*1}, 朴 昊澤^{*1}, 野口 真希^{*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} 海洋研究開発機構 地球環境部門 地球表層システム研究センター

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2年度は、北極海領域モデルの水平25 km格子版で長期変動実験(1979-2018年)を行い、河川水による熱供給が海氷減少・海水温上昇・気温上昇に及ぼすインパクトを定量的に評価した。また水平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粒子のチャクチ陸棚縁での輸送過程を詳細に解析した。さらに全球モデルによる過去再現実験(1958-2018年)を実施し、数十年スケールの全球気候変動に関連した北極域における海洋生態系の変化について解析を行った。

キーワード： 北極海, 海氷海洋結合モデル, 河川熱流入, 再懸濁粒子, 数十年規模変動

1. 研究の背景

北極海には北米大陸やユーラシア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構造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。北米側のポーフォート海に注ぐマッケンジー川の源流はかなり南に位置し、その流域では夏季の気温が30℃を超えることもしばしばある。そのように蓄えられた河川熱は、ポーフォート海の海面付近を1ヵ月間に5~10℃近く昇温させるだけの寄与があることも指摘されている[1]。シベリア側のレナ川でも1960年代の8月に12-13℃であった河川水温が近年では20℃近くまで上昇し、海氷縁後退への影響が無視できないことが推察されてきた。しかし北極域における河川水の水温データは流量に比べて少なく、海氷や海面水温に対する河川熱流入の影響を定量的に解析することは困難であった。また河川水の栄養塩(硝酸塩/珪酸塩)や炭酸系(全炭酸/アルカリ度)の現場観測データも非常に限られている。河川起源の栄養塩は沿岸海洋生態系にとって重要な源である一方で、淡水供給そのものは栄養塩濃度の低下や海洋酸性化をもたらすため、複合的な変動メカニズムを数値モデルによって包括的に明らかにするためには可能な限り現実的な設定で実験を行う必要がある。

これらの背景を踏まえて、本課題では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、河川水による熱・物質供給が北極海環境に及ぼすインパクトを調べている。本稿では、北極海全域を対象とした海氷海洋結合モデルの中解像度版で実施した長期変動実験の結果に基づいて、河川熱が海氷減少・海水温上昇・気温上昇に及ぼすインパクトを定量的に評価した結果について報告する。

北極海の太平洋側に位置するカナダ海盆の中央部では、1)海氷融解水の増加と2)高気圧性の風応力偏差に伴って強化されたエクマン収束の組み合わせによって、海洋表層の栄養塩濃度が低下傾向にあり、植物プランクトンの光合成による基礎生産が抑制されつつある。一方でその縁辺海域では、栄養塩を豊富に含む陸棚起源水がより多く供給されることで、生物生産が盛んな海になり得ることが示唆されている。海洋研究開発機構ではその境界領域に位置するバロー峡谷からチャクチ海台周辺にかけての4地点(NBC15-18/NHC15-17/NAP10-13, 18/CAP12)においてセディメントトラップ係留系を用いた観測を継続的に実施しており、本課題の数値モデリングと融合させることで、これまでにも注目を浴びる成果を挙げてきた[2, 3]。但し、先行研究の主たる解析内容は1地点における1-2年の観測データに基づくものであり、現在は複数地点を対象に数年以上の時空間変動を明らかにしていく段階に来ている。本稿では、北極海全域を対象とした海氷海洋結合モデルの渦解像版で実施した年々変動実験の中から、海底から再懸濁した粒子のチャクチ陸棚縁における輸送過程に着目して解析した結果を報告する。

本課題では、北太平洋から北極海にかけての数十年スケールの気候変動に関連した海洋生態系変化の実態把握に加えて、北海道大学北極域研究センターで開発中のハビタットモデルなどを用いた水産有用種の生息環境や多様性の変化などの理解に資することを目的としたモデリングも実施している。これまでに気候モデルの海氷海洋部分を用いて、全球海洋を対象とした過去再現実験(1958-2018年)を実施してきた。本稿では、チャクチ海とバレンツ海における動物プランクトンの数十年規模変動に着目した結果について報告する。

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、低次海洋生態系モデルは NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) である。本稿で報告する河川熱や再懸濁粒子に着目した実験には北極海領域モデルを使用した。ハビタットモデルに入力する環境変数に関しては、ベーリング海も含めて提供するためがあるため、全球海洋モデルによる実験を行った。モデルや実験設定の詳細は先行研究[2, 3, 4]も参照のこと。本章では2種類のモデルについて概要を記述する。

2.1 北極海領域モデル

北極海全域および北大西洋北部をモデル領域とした設定では、水平解像度 25 km (280×200 格子)／鉛直 28 層の中解像度版による長期変動実験 (1979–2018 年) と水平解像度 5 km (1,280×1,024 格子)／鉛直 42 層の薄解像度版による年々変動実験 (2001–2020 年) をそれぞれ行った。大気境界条件には NCEP-CFSR (National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis) 再解析データを使用した。河川水については、陸面モデル CHANGE [5] で計算された流量および熱流入の日平均長期時系列データを中解像度版の海面淡水・熱フラックスとして河口域に与えた。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。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、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。

2.2 全球海洋モデル

全球海洋を計算領域としたモデル[6, 7]では、水平解像度 50–100 km (360×256 格子)／鉛直 63 層の設定で、OMIP (Ocean Model Intercomparison Project) プロトコル[8]に従って 1958–2018 年 (61 年間) の過去再現実験を実施した。大気境界条件として、気象庁 55 年長期再解析プロジェクト JRA-55 に基づいて新たに構築された海氷海洋結合モデル駆動用データセット JRA55-do (atmospheric dataset for driving ice-ocean model based on JRA-55) [9]を与え、305 年間 (61 年間×5 周期) 積分し、5 周期目の結果を解析した。栄養塩濃度の初期値には World Ocean Atlas 2013 を用いた。

3. 河川熱流入のインパクト

陸面過程モデル CHANGE で計算した河川熱流入量 (1980–2015 年平均で 94.4×10^{18} J year⁻¹: 図 1a) は、太平洋や大西洋から北極海に流入する海洋熱輸送量の 7%に相当し、過去 36 年間に増加傾向を示していた。この河川熱流入を海氷海洋結合モデル COCO に与えた実験

では、考慮しない実験に比べて、北極海の海水量が 1980–2015 年の平均で 63 km^3 少なくなっていた。これは厚さ 1 m の海水を $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ (日本国土面積の 17%に相当) 融かすだけのインパクトを河川熱流入がもたらしたことを意味する。海域別では、シベリア側のラプテフ海で影響が大きく、年平均海水厚の 10%以上が河川熱によって減少していた (図 1b)。

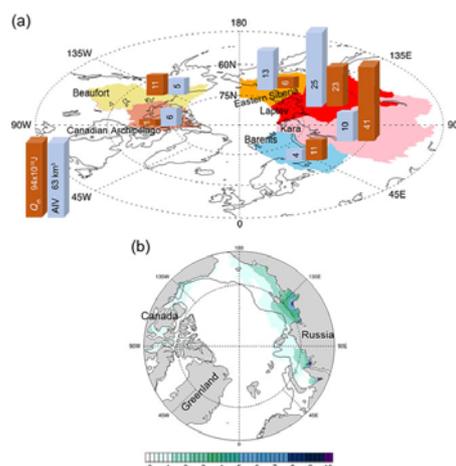


図 1: (a) 北極域における主要な河川流域と北極海への河川熱流入量 (Q_r)。また河川熱に起因する海水減少量 (融解に必要な熱量に換算: AIV)。(b) 河川熱流入を考慮しない実験結果に対する、河川熱流入を与えた実験の海水厚減少幅の割合 (%)。1980–2015 年平均。

海水縁が後退した後に流入する河川熱は、アイスアルベドフィードバック効果も加わり、海水温をより上昇させる (図 2)。河川熱を与えた実験では、海面での太陽光吸収量が 60×10^{18} J year⁻¹ 増加した。これは河川熱流入量 (94×10^{18} J year⁻¹) の 64%に相当する。暖められた海面からはより多くの顕熱・潜熱が放出されて大気を加熱する。また海洋に蓄えられた熱は秋の結氷を遅らせる。この一連のプロセスに関して、詳細な熱収支計算を行うことで、河川熱が海水を直接融かすのに加えて、海洋や大気の温暖化にも影響していることが定量的に明らかになった。本研究での見積もりでは、河川熱流入が過去 36 年間で 0.11°C の海上気温上昇に寄与するという結果が得られた。この値は 1979 年から 2008 年までに北極海沿岸の気象観測所で観測された気温上昇 (1.92°C) の約 6%に相当する。

このように陸面過程モデルと海氷海洋結合モデルを組み合わせた数値実験結果を解析することで、河川熱流入が海水減少要因の一つであることや、海水温や海上気温の上昇を介して北極温暖化増幅を強める働きをしていたことが明らかになった [10]。今後は水循環への影響や、河川起源の物質流入が海洋生態系および炭酸系(酸性化)に及ぼすインパクトについても定量的に明らかにしていく予定である。

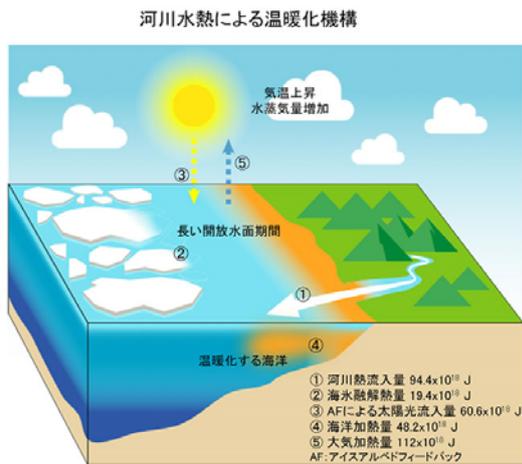


図 2: 北極海への河川熱流入によって変化する大気-海氷-海洋熱収支の模式図。河川熱流入にアイスアルベドフィードバックが加わり、海氷減少や海水温上昇が促進される。海洋貯熱量の増加に伴って大気への顕熱・潜熱放出量も増加し、気温上昇ももたらす。

4. 再懸濁粒子の輸送過程

本課題では、海洋研究開発機構が設置してきたセディメントトラップ係留系 (NBC15-18/NHC15-17/NAP10-13, 18/CAP12) の観測結果を踏まえながら、沈降粒子量の時空間変動メカニズム解明を目指している。令和元年度までに 2001-2018 年を対象とした年々変動実験を行い、当該海域周辺の海氷特性・海洋循環・水温変動・生物由来粒子の再現性を確認してきた[4]。これに関連して、北極海のかなりの部分を占める陸棚域周辺では、海底堆積物の再懸濁が炭素や微量金属などの物質循環を考える上で無視できないことが指摘されており、上述のセディメントトラップでも多くの陸起源碎屑物が捉えられていた[2]。

本課題では、海底直上のモデル格子に再懸濁した仮想粒子 (RLM: Resuspended Lithogenic Material) を加えた実験の結果を解析した。RLM 添加量を当該格子で計算される水平流速の二乗に比例させることで、流れが強いチャクチ海のアラスカ沿岸やホープ海底谷で局所的に RLM 濃度が増加しており、主にバロー峡谷を通じてチャクチ陸棚域から流出していた。その後は中規模渦によってカナダ海盆側に北上する経路とチャクチ陸棚縁に沿って流れる CSC (Chukchi Slope Current) によって西進する経路に分かれ、どちらの経路が支配的かは風系に支配されることが明らかとなった。

本稿では、CSC による粒子輸送が強化された 2017 年夏季から 2018 年春季に着目して詳細に解析した結果を報告する (図 3)。セディメントトラップ係留系を設置した 4 地点での沈降粒子量は 2017 年 7 月以降に複数の極大を示しているが、いずれもバロー峡谷に撒いた仮想トレーサの鉛直積算量と極大のタイミングが良く一致していることから、バロー峡谷を通過した粒子が CSC

によって輸送されたことで説明できる。100m 深での水平流速場からもカナダ海盆域のポーフォート循環に比べてはるかに強い流れが確認されており、NHC 近傍の 160°W ラインを横切る西向き輸送量も顕著な値を示していた。さらに 2017 年 11 月には CSC 強化に伴う局所的な再懸濁イベントが生じており、このことも NHC/NAP の沈降粒子量極大に寄与していることが示唆された。

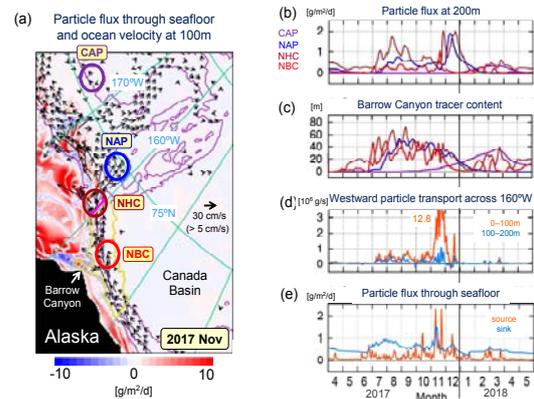


図 3: (a) 海底での正味上向き再懸濁粒子フラックスと 100m 深での水平流速ベクトル。紫色コンターは等深線 (100m/1000m/3000m)、黄色コンターは本研究で定義した CSC 領域。(b) 200m 深での沈降粒子量、(c) バロー峡谷トレーサの鉛直積算量、(d) 160°W ラインを横切る西向き粒子輸送量、(e) CSC 領域で平均した海底での再懸濁粒子フラックス。(a) 2017 年 11 月平均、(b-e) 2017 年 4 月-2018 年 5 月の日平均時系列。

5. 海洋生態系の数十年規模変動

数十年スケールの気候変動に関連した海洋生態系の変化を理解することや水産有用種の生息環境を定量的に診断するハビタットモデルの基礎データとなる各種環境変数を提供することを目的に、全球海洋を対象とした過去再現実験 (1958-2018 年) を実施した。

チャクチ海 (70-80°N/160-180°W) とバレンツ海 (70-80°N/10-40°E) で領域平均した基礎生産量と動物プランクトンバイオマスの 1980-2018 年時系列に着目すると、チャクチ海では 15-20 年程度の周期変動を含みながら増加トレンドを示したのに対し、バレンツ海では 1990 年代から 2000 年代にかけて大きく減少していた (図 4)。チャクチ海の変動は北極振動 (AO) 指数に対して 3-4 年遅れるラグを示しているが、ベーリング海峡から太平洋起源水が常に流入している海域であるため、ベーリング海およびアラスカ湾の基礎生産量を増加 (減少) させる太平洋十年規模振動 (PDO) 正偏差 (負偏差) の影響も受けた複合的な応答をしていることが示唆される。一方、バレンツ海における基礎生産量と動物プランクトンバイオマスの減少は AO および北大西洋振動 (NAO) 指数が正から負に転じる時期と良く一致していることが確認された。

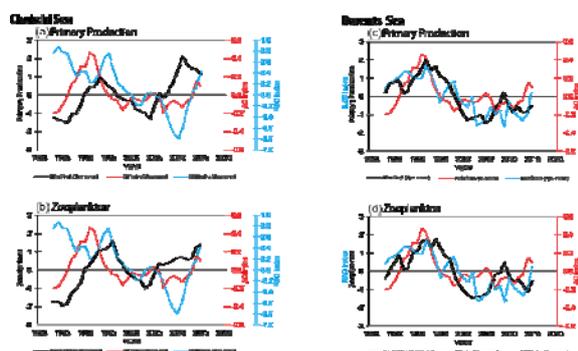


図4：(a-b)チャクチ海と(c-d)バレンツ海でそれぞれ領域平均した(a, c)基礎生産量と(b, d)動物プランクトンバイオマスの鉛直積算量(0-100m)。色線はAO/NAO/PDO指数。いずれも7年移動平均時系列。

謝辞

本課題は科学研究費助成事業・基盤研究(26340018、15H01736、16H02947、17H01870、18H04129)、新学術領域研究(研究領域提案型)「海洋混合学の創設：物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明／北太平洋の海洋低次生態系とその変動機構の解明(課題番号15H05822)」、北極域研究推進プロジェクトArCS(JPMXD1300000000)、北極域研究加速プロジェクトArCSII(JPMXD1420318865)の支援を受けて実施した。海洋研究開発機構・地球情報基盤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] Nghiem, S. V., D. K. Hall, I. G. Rigor, P. Li, and G. Neumann, Effects of Mackenzie River discharge and bathymetry on sea ice in the Beaufort Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2013GL058956, 2014.

[2] Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. C. Honda, K. Kimoto, T. Kikuchi, S. Nishino, K. Matsuno, A. Yamaguchi, A. Ishida, and M. J. Kishi, Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump, *Nature Comm.*, 5:3950, doi:10.1038/ncomms4950, 2014.

[3] Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. N. Aita, A. Ishida, and M. J. Kishi, Wind-driven interannual variability of sea ice algal production in the western Arctic Chukchi Borderland, *Biogeosciences*, 12, 6147-6168, doi:10.5194/bg-12-6147-2015, 2015.

[4] Watanabe, E., J. Onodera, M. Itoh, S. Nishino, and T. Kikuchi, Winter transport of subsurface warm water toward the Arctic Chukchi Borderland, *Deep-Sea Research Part I*, 128, 115-130, doi:10.1016/j.dsr.2017.08.009, 2017.

[5] Park, H., Y. Yoshikawa, D. Yang, and K. Oshima, Warming water in Arctic terrestrial rivers under climate change, *J. Hydrometeorol.*, 18, 1983-1995, 2017.

[6] Aita, M. N., Y. Yamanaka, and M. J. Kishi, Interdecadal variation of the lower trophic ecosystem in the Northern Pacific between 1948 and 2002, in a 3-D implementation of the NEMURO model, *Ecol. Modeling*, doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.07.045, 2007.

[7] Tatebe, H., and H. Hasumi, Formation mechanism of the Pacific equatorial thermocline revealed by a general circulation model with a high accuracy tracer advection scheme, *Ocean Model.*, 35, 245-252, doi:10.1016/j.ocemod.2010.07.011, 2010.

[8] Orr, J. C., R. C. Najjar, O. Aumont, L. Bopp, J. L. Bullister, G. Danabasoglu, S. C. Doney, J. P. Dunne, J.-C. Dutay, H. Graven, S. M. Griffies, J. G. John, F. Joos, I. Levin, K. Lindsay, R. J. Matear, G. A. McKinley, A. Mouchet, A. Oschlies, A. Romanou, R. Schlitzer, A. Tagliabue, T. Tanhua, and A. Yool, Biogeochemical protocols and diagnostics for the CMIP6 Ocean Model Intercomparison Project (OMIP), *Geosci. Model Dev.*, 10, 2169-2199, doi:10.5194/gmd-10-2169-2017, 2017.

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

[10] Park, H., E. Watanabe, Y. Kim, I. Polyakov, K. Oshima, X. Zhang, J. S. Kimball, D. Yang, Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea-ice decline and oceanic and atmospheric warming, *Science Advances*, 6, eabc4699, doi:10.1126/sciadv.abc4699, 2020.

Sea Ice–Ocean Modeling on the Arctic Environmental Changes

Project Representative

Eiji Watanabe

Institute of Arctic Climate and Environment Research Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

Authors

Eiji Watanabe^{*1}, Hotaek Park^{*1}, Maki Noguchi Aita^{*2}

^{*1}Institute of Arctic Climate and Environment Research, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

^{*2}Earth Surface System Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine–Earth 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, the high-resolution sea ice–ocean modeling studies on ocean heat 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 lower-trophic marine ecosystem model is based on the NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography). Activities in the fiscal year 2020 are categorized to three themes: 1) impacts of river heat inflow on the Arctic marine environments, 2) transport of particle resuspended from seafloor along the Chukchi Sea northern slope, and 3) multi-decadal variability in primary productivity and zooplankton biomass.

Keywords: Arctic Ocean, sea ice–ocean model, river heat inflow, resuspended particle, multi-decadal variability

1. Research Background

Massive river water inflow into the Arctic Ocean is important for the stratified structure and ocean acidification as primary freshwater source. It can be considered that riverine heat and nutrient inflow also influences the Arctic sea ice and marine ecosystem. In the Lena River of Siberia, August water temperature increased from 12–13°C in the 1960s, when the effects of global warming were not yet conspicuous, to nearly 20°C in recent years, with a high amount of riverine heat entering the Arctic Ocean. Whereas primary productivity of phytoplankton becomes restricted by nutrient reduction due to anomalous sea-ice meltwater and wind-driven Ekman pumping in the central Canada Basin, the down-stream regions of nutrient-rich shelf-origin water around the Chukchi Plateau are still preferable environments for biological activity. Our previous modeling studies in collaboration with the western Arctic sediment trap measurements since 2010 have produced notable outcomes [1, 2]. Now, we are examining impacts of riverine heat/material and particle resuspended from seafloor on various marine environments (e.g., sea ice, sea surface temperature, primary productivity, and ocean acidification) using a pan-Arctic sea ice–ocean model.

In the Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) II ocean research program, we aim to provide information on vulnerability and resilience of marine ecosystem in response to rapid sea-ice retreat. To clarify long-term variability of lower-trophic level productivity related to global climate change, we also performed multi-decadal experiments from 1958 to 2018 using a global sea ice–ocean model and examined primary productivity and zooplankton biomass.

2. Model and Experimental Design

The detailed model description and experimental design were presented in our previous publications [1, 2, 3]. The brief summaries of two frameworks 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. Water properties at the Bering Strait were prescribed to idealized seasonal cycles. Riverine freshwater inflow has been given by monthly climatology of the Arctic Ocean Model Intercomparison Project (AOMIP) and was replaced to interannually variable data produced by the land surface model “CHANGE” including river water temperature [4] in the 25-km grid version. The simulation results with/without river heat inflow were compared to estimate its impact on the Arctic marine environments. In the 5-km grid version, transport of resuspended lithogenic material (RLM) was also calculated with its sinking speed of 0–5 m day⁻¹.

The global modeling framework has a grid size of 50–100 km (63 layers) [5, 6]. A 61-year experiment (1958–2018) was performed for five cycles (i.e., total 305 years) following the Ocean Model Intercomparison Project (OMIP) protocol [7]. The Japanese 55-year atmospheric reanalysis for driving sea ice–ocean models (JRA55-do) version 1.4.0 dataset [8] was adopted for atmospheric forcing. The simulation results for the fifth cycle were used for the analyses.

3. River Heat Impact

The simulation results provided the first quantitative evidence showing that river heat inflow contributed a maximum of more than 10% to regional sea ice thinning in the Arctic Ocean (Figure 1) [9]. The result suggests not only sea-ice bottom melting by warm river water flowing into the Arctic Ocean, but also ice-albedo feedback processes. A quantitative evaluation also revealed increases in sensible and latent heat energy released into atmosphere from the warmer ocean surface following sea-ice retreat, causing an increase of 0.1°C in summer air temperature during the past 36 years.

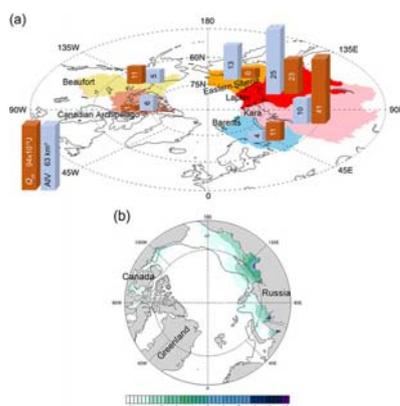


Figure 1: (a) Major Arctic river basins, riverine heat inflow into the Arctic Ocean (Q_{rh}), and sea-ice thickness anomaly caused by river heat (AIV). (b) Sea ice decline caused by river heat inflow (%). All values are averages for 1980–2015.

4. Resuspended Particle Transport

To clarify background mechanisms of spatial and temporal variability in particle sinking captured by our sediment trap measurements, numerous interannual experiments for 2001–2020 have been performed with a focus on lithogenic materials originally resuspended from seafloor (RLM). In the fiscal year 2020, we found that the Chukchi Slope Current played an important role in the RLM transport over four mooring areas. Besides, local resuspension event on the slope region contributed to the particle sinking in autumn 2017.

5. Multi-decadal Variability in Marine Ecosystem

We investigated the simulated primary productivity and zooplankton biomass averaged in the Chukchi Sea and the Barents Sea. Those variables show the positive (negative) trend with decadal variability for 1980–2018 in the Chukchi Sea (Barents Sea). The variability in the Chukchi Sea, where the Pacific water inflows, seems to be influenced by the Pacific Decadal Oscillation (PDO) with a lag of several years. On the other hand, the variability in the Barents Sea was in phase with the Arctic/North Atlantic Oscillation (AO/NAO).

Acknowledgement

This work was supported by the Grants-in-Aids for Scientific Research (No. 26340018, 15H01736, 15H05822, 16H02947, 17H01870, 18H04129) and the Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) Project phase I–II (JPMXD130000000, JPMXD1420318865) of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). We really appreciate great supports by the JAMSTEC–CEIST.

References

- [1] Watanabe, E., J. Onodera, et al., Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump, *Nature Comm.*, 5:3950, doi:10.1038/ncomms4950, 2014.
- [2] Watanabe, E., et al., Wind-driven interannual variability of sea ice algal production in the western Arctic Chukchi Borderland, *Biogeosciences*, 12, 6147–6168, doi:10.5194/bg-12-6147-2015, 2015.
- [3] Watanabe, E., et al., Winter transport of subsurface warm water toward the Arctic Chukchi Borderland, *Deep Sea Research Part I*, 128, doi:10.1016/j.dsr.2017.08.009, 2017.
- [4] Park, H., et al., Warming water in Arctic terrestrial rivers under climate change, *J. Hydrometeorol*, 18, 1983–1995, 2017.
- [5] Aita, M. N., et al., Interdecadal variation of the lower trophic ecosystem in the Northern Pacific between 1948 and 2002, in a 3-D implementation of the NEMURO model, *Ecol. Modeling*, doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.07.045, 2007.
- [6] Tatebe H, and H. Hasumi, Formation mechanism of the Pacific equatorial thermocline revealed by a general circulation model with a high accuracy tracer advection scheme, *Ocean Model.*, 35, 245–252, doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.07.011, 2010.
- [7] Orr, J. C., et al., Biogeochemical protocols and diagnostics for the CM3IP6 Ocean Model Intercomparison Project (OMIP), *Geosci. Model Dev.*, 10, 2169–2199, doi.org/10.5194/gmd-10-2169-2017, 2017.
- [8] Tsujino H., et al., JRA-55 based surface dataset for driving ocean–sea-ice models (JRA55-do), *Ocean Model.*, 130, 79–139, doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.07.002, 2018.
- [9] Park, H., et al., Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea-ice decline and oceanic and atmospheric warming, *Science Advances*, 6, eabc4699, doi:10.1126/sciadv.abc4699, 2020.