

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^{*2}, 朴 昊澤^{*1}, 野口 真希^{*3}, 小野寺 丈尚太郎^{*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}東京海洋大学 大学院海洋科学技術研究科^{*3}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。平成31年度/令和元年度は、北極海領域モデルの水平25 km格子版で1979-2018年を対象とした河川水および陸棚起源海氷に関するトレーサー実験を実施した。また水平5 km格子版に海底から再懸濁した粒子の海氷への取り込み過程を導入し、2001-2018年を対象とした物質循環実験を行った。さらに全球モデルによる過去再現実験(1958-2018年)を実施し、環北極域における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, 河川水, 再懸濁粒子, トレーサー実験

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。北米側のボ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、ボ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]。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中から、河川水および陸棚起源海氷の輸送に着目したトレーサー実験の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(NBC15-17/NHC15-17/NAP10-13/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海氷への取り込み過程を導入した結果について報告する。

衛星観測に基づく北極海を対象とした長期変動解析によれば、海氷減少に伴う海面水温の上昇トレンドが1997年以降近年に至るまで確認されている。一方で、クロロフィル濃度は1997年から増加するものの、2010年以降は減少に転じていることが報告されている。この背景として、特に沿岸域においては、降水量や河川流量の変化など複数の要因が影響していることが示唆されている[4]。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)を実施した。本稿では、環北極域を対象とした海面水温と基礎生産量の数十年スケール変動の関係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水／陸棚起源海氷／再懸濁粒子に関する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必要があるため、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, 5, 6] も参照のこと。本章では2種類のモデルについて簡単に記述する。

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 層の渦解像度版による年々変動実験 (2001-2018 年) をそれぞれ行った。いずれもアイスアルジーを含む Arctic NEMURO モデル[3]を結合させている。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。河川水は AOMIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project) で提供された月平均気候値、または陸面モデル CHANGE[7]で計算された日平均長期系列の流入量データを海面淡水フラックスとして与えた(表 1)。ベーリング海峡では観測に基づく流量・水温・塩分・栄養塩(硝酸塩／珪酸塩)・炭酸系(全炭酸／アルカリ度)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・塩分と World Ocean Atlas 2013 (WOA13) の栄養塩濃度を初期条件と側面境界条件に用いた。海氷-海洋間の物質交換は熱力学的な海氷生成・融解量の関数として計算した[3]。

表 1 : 北極海領域モデルの実験設定

	水平解像度	積分期間	河川水流入
Case 1	25 km	1979-2018	AOMIP
Case 2	25 km	1979-2018	CHANGE
Case 3	5 km	2001-2018	AOMIP

2.2 全球海洋モデル

全球海洋を計算領域としたモデル[8, 9]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 [10]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) [11]を与え、305 年間 (61 年間×5

周期) 積分した。なお本実験でも WOA13 の栄養塩濃度を初期値に用いた。

3. 河川水輸送

AOMIP で流入量データが提供されている主要 13 河川 (Pechora/Ob/Yenisey/Olenek/Yana/Indigirka/Kolyma/Mackenzie/Dvina/Lena/Khatanga/Taimyra/Pyasina) の河口域に仮想トレーサーを撒き続けたところ、シベリア陸棚域の広範囲に分布するとともに、北極海の主要海流である Transpolar Drift によってフラム海峡を經由してグリーンランド東岸まで輸送される様子が確認できた (Case 1/図 1)。北米側でもマッケンジー河川水がカナダ海盆南部を中心に広がっており、この海域における貯淡水量極大に貢献していた。一方、アラスカ沿岸からチャクチ海西方にかけてはトレーサー濃度が低くなっている。本実験ではベーリング海峡がモデル領域の太平洋側南端であるため、ユーコン河川水の寄与が明示的に表現されていないが、間接的にベーリング海峡にもトレーサーを加えることで、当該海域にも河川水が分布することが想定される。

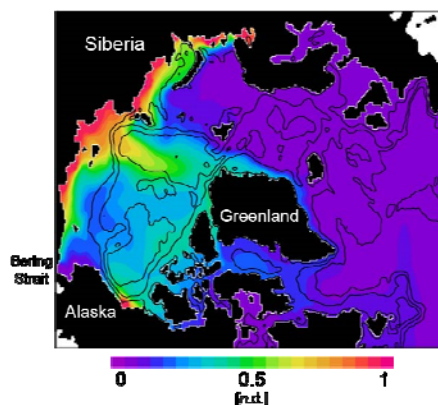


図 1 : 河川水トレーサー分布。海洋最上層における 2018 年平均値を示す。黒いコンターは等深線 (100m/1000m/3000m)。

次に河川熱の影響を受けた海氷の拡がり調べるために、シベリア河川水が多く分布するカラ海／ラプテフ海／東シベリア海に存在する海氷に仮想トレーサーを撒き続ける実験を行った (Case 2/図 2)。この陸棚起源海氷も上述した河川水トレーサーと同様に「海氷」の Transpolar Drift によって数年以内にフラム海峡まで到達する様子が確認された。すなわち河川熱を明示的に与えない実験と比較した場合、河川熱に起因する負の海氷厚 anomalies は陸棚域に留まらず北大西洋北部の氷縁域まで伝搬することが示唆される。海氷厚への影響に関しては令和 2 年度に成果を公表する予定である。また今後は河川水分布の年々変動や、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。

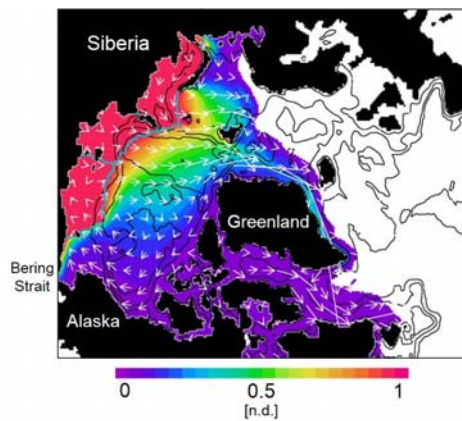


図2： 陸棚起源海水トレーサー分布と海氷流速場。1980-2015年の5月平均値を示す。青いコンターで囲われたカラ海/ラプテフ海/東シベリア海に仮想トレーサーを撒き続けた。黒いコンターは等深線(100m/1000m/3000m)。

4. 再懸濁粒子プロセス

本課題では、海洋研究開発機構が設置しているセディメントトラップ係留系(NBC15-17/NHC15-17/NAP10-13/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。平成30年度までに2001-2017年を対象とした年々変動実験を行い、当該海域周辺の海水特性・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[6]。これに関連して、北極海のか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、当機構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]。

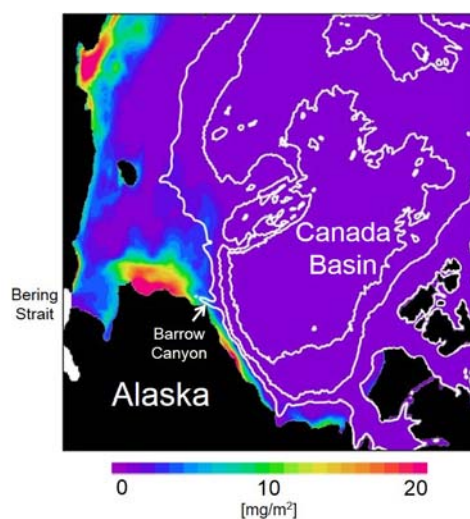


図3： 海水内部の再懸濁粒子量。2010年12月の分布を示す。白いコンターは等深線(100m/1000m/3000m)。

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)を加える実験に着手した(Case 3)。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、流れが強いアラスカ沿岸やバロー峡谷周辺で局所的にRLM濃度が増加する様子が確認された。さらに、海氷の熱力学的成長に伴う海氷内部への取り込みと海水融解に伴う海洋表層への放出のプロセスを既存のモデルに導入した。これにより、北極海の中でも海水生成が活発なバロー沿岸ポリニヤ周辺域において、冬季には多くの再懸濁粒子が海氷に供給されていた(図3)。このような海水による物質輸送はオホーツク海でも観測されており、海水融解に伴う鉄供給が植物プランクトンによる春季ブルームを促進していることがよく知られている。ちなみに本実験でのRLMの沈降速度は最大で 20 m d^{-1} としている。沈降速度そのものを現場観測によって定量的に評価することは困難だが、再懸濁粒子の中でも比較的軽いものだけが海流によって遠方まで輸送されることを想定すれば、この設定は妥当な範囲である。今後はRLM沈降量の時空間変動をセディメントトラップ観測値と直接比較することで、詳細な輸送プロセスを明らかにしていく予定である。

5. 全球過去再現実験

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。

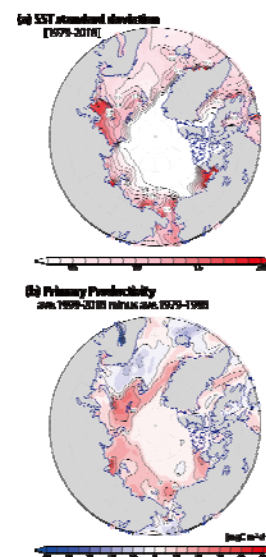


図4： 1979-2018年における(a)年平均海面水温変動の標準偏差、(b)前後20年間における基礎生産量の変化量(1999-2018年平均から1979-1998年平均を引いた値の水平分布)。

北極海における変動パターンは海域によって大きく異なることが 1979-2018 年の 40 年間における海面水温変動の標準偏差から確認できる (図 4a)。ポーフォート海/チャクチ海/ラフテフ海/カラ海などの大陸に面した海域で特にその変動が大きい。同期間の前後 20 年間における基礎生産量は、上記の海域において増加トレンドを示している (図 4b)。また沿岸域のみならず、海盆周辺域においても基礎生産量が増加しており、この背景には海氷域後退による光環境の向上が大きく影響していることが考えられる。一方、縁辺部のベーリング海/バレンツ海/ノルウェー海では基礎生産量が減少していた。これらの海域では、太平洋水や大西洋水の輸送量や栄養塩濃度の変化なども支配要因として推察されるため、海洋循環も含めて変動メカニズムを明らかにしていく予定である。

謝辞

本課題は科学研究費助成事業・基盤研究 A (課題番号 15H01736、18H04129)、基盤研究 B (課題番号 16H02947)、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 ArcCS 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] Siswanto, E., Temporal variability of satellite-retrieved chlorophyll-a data in Arctic and subarctic region within the past two decades, *Int. J. Remote Sensing*, 41:19, 7427-7445, doi:10.1080/01431161.2020.1759842, 2020.
- [5] Watanabe, E., M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner, Multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice-algal productivity on seasonal, interannual, and decadal timescales, *J. Geophys. Res. Oceans*, 124, 9053-9084, doi:10.1029/2019JC015100, 2019.
- [6] 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.
- [7] Park, H., Y. Yoshikawa, D. Yang, and K. Oshima, Warming water in Arctic terrestrial rivers under climate change, *J. Hydrometeorol.*, 18, 1983-1995, 2017.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

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}, Yuanxin Zhang^{*2}, Hotaek Park^{*1}, Maki Noguchi Aita^{*3}, Jonaotaro Onodera^{*1}

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

^{*2}Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology

^{*3}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 2019 are categorized to three themes: 1) river water and shelf-origin sea-ice transport, 2) resuspended particle in sea ice, and 3) multi-decadal hindcast experiments for collaboration with habitat modeling.

Keywords: Arctic Ocean, sea ice–ocean model, river water, resuspended particle, tracer experiment

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. 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 sediment trap measurements near the Chukchi shelf break since 2010 have produced notable outcomes [1, 2]. Now, we are examining impacts of riverine heat/material inflow and resuspended particle on various marine environments (e.g., sea ice, sea surface temperature, primary productivity, and ocean acidification) using a pan-Arctic sea ice–ocean model.

According to an analysis of changes in the Arctic Ocean over the past two decades using satellite data, sea surface temperature continued to increase from 1997 to the recent years with sea ice decline. The chlorophyll-a concentration at the ocean surface has also increased since 1997 but it turned to decrease after 2010. It has been suggested that multiple factors, such as changes in rainfall and river discharge, caused this decadal variation [3]. To clarify long-term variability of lower-trophic level productivity, we also performed multi-decadal experiments from 1958 to 2018 using a global sea ice–ocean model.

2. Model and Experimental Design

The detailed model description and experimental design were presented in our previous publications [1, 2, 4, 5, 6]. 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 is now replaced to interannually variable data produced by the land surface model “CHANGE” in some cases. In the 5-km grid version, sea ice–ocean flux of resuspended lithogenic material (RLM) is newly incorporated using the same formulation as nutrients.

The global modeling framework has a grid size of 50–100 km (63 layers). 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] is adopted for atmospheric forcing. The simulation results for the last 61 years are used for the analyses.

3. River Water Transport

Passive tracers were continuously given in mouths of the major 13 rivers (Pechora/Ob/Yenisey/Olenek/Yana/Indigirka/Kolyma/Mackenzie/Dvina/Lena/Khatanga/Taimyra/Pyasina). The simulation result shows that the river water tracers spread over wide area of the Siberian shelves and are transported toward the Fram Strait along the Transpolar Drift stream (Figure 1). The Mackenzie river water is distributed mostly in the southern Canada Basin.

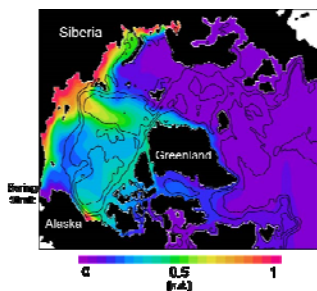


Figure 1: Distribution of the simulated river water tracers.

The 2018 annual mean value in the ocean surface layer.

Black contours show isobaths of 100, 1000, and 3000m.

Next, to investigate the transport of sea ice influenced by riverine heat, the passive tracer was continuously given in sea ice over the Kara, Laptev, and East Siberian seas. Most of this shelf-origin sea ice was also transported toward the Fram Strait. This result supports that negative anomaly of sea-ice thickness relative to that in no riverine heat case reaches the marginal ice zone in the northern North Atlantic within several years. The impact of riverine heat on sea ice will be documented in the 2020 annual report.

4. Resuspended Particle in Sea Ice

To clarify background mechanisms of spatial and temporal variability in particle sinking captured by our sediment trap measurements, numerous interannual experiments for 2001–2018 have been performed with a variety of model settings. In the fiscal year 2019, sea ice–ocean flux of particle originally resuspended from seafloor (RLM) was incorporated. The simulation result shows that the larger amount of RLM was distributed near the Barrow Coastal Polynya region.

5. Global Hindcast Experiment

The standard deviation of interannual variability in the simulated sea surface temperature for 1979–2018 (40 years) showed the greater changes especially in the shelf regions such as the Beaufort, Chukchi, Laptev, and Kara seas. The simulated primary productivity also showed an increasing trend in those regions. The positive trend appeared even in a part of the central basin due to the enhanced light condition under less sea ice cover. On the other hand, the primary productivity decreased in the Bering, Barents, and Norwegian

seas. The environmental condition in those regions is expected to depend on the transport and nutrient concentration of the Pacific and Atlantic water masses. Therefore, we need to clarify the mechanism including ocean circulation.

Acknowledgement

This work was supported by the Grants-in-Aids for Scientific Research (No. 15H01736, 16H02947, 15H05822, 18H04129) and the Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) Project 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] Siswanto, E., Temporal variability of satellite-retrieved chlorophyll-a data in Arctic and subarctic region within the past two decades, *Int. J. Remote Sensing*, 41:19, 7427–7445, doi:10.1080/01431161.2020.1759842, 2020.
- [4] 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.
- [5] Watanabe, E., et al., Multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice-algal productivity on seasonal, interannual, and decadal timescales, *J. Geophys. Res. Oceans*, 124, 9053–9084, doi:10.1029/2019JC015100, 2019.
- [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.