

北極域環境変動メカニズムの解明に向けた高解像度海水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}, 野口 真希^{*2}, 小野寺 丈尚太郎^{*1,2}, 伊東 素代^{*1}, 西野 茂人^{*1}, 菊地 隆^{*1}

*1 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター, *2 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

北極海の海洋熱輸送・酸性化・生態系変動の実態解明に向けた高解像度海水海洋モデリングの成果および準備状況について報告する。今年度の活動内容は大きく次の3つテーマに分けられる。1) 冬季海水下の亜表層熱輸送に着目し、年々変動に関するプロセスをより詳細に明らかにした。2) 炭酸系ルーツを組み込んだ生態系モデルの実験設定を見直し、海面付近における炭酸系変数の再現性評価を行った。3) 溶存鉄や大気窒素沈着の効果を組み込み、植物プランクトンバイオマスへのインパクトを調べた。今後は河川水から供給される熱・栄養塩・有機物が海水や海洋生態系に及ぼす影響なども調べていく予定である。

キーワード：北極海, 亜表層水温極大, 海洋酸性化, 溶存鉄, 大気窒素沈着

1. 研究の背景

北極海で近年顕著な夏季の海水縁後退は大気や生態系の応答も含めて重大トピックの1つとなっており、早急に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。海水減少の要因としては、風系や海面熱収支の変化が挙げられているが、海域によっては海洋熱輸送の影響も重要である。近年の観測により、カナダ海盆の亜表層には複数の水温極大が存在し、このうち水深50–100mの水温極大はベーリング～チャクチ陸棚域で夏季に日射を受けた暖水塊（太平洋夏季水）がバロー峡谷沖合で発生した中規模渦やポーフォート海洋循環などで水平方向に貫入することで形成される。この海洋熱は数ヶ月から数年スケールで残存するが、何らかの物理プロセスによって海面付近に供給された場合には、直上の海水を底面から融かす、あるいは新たな結氷を抑制することにつながり、海水減少要因の一端を担う可能性がある。また北極海は大気からの二酸化炭素吸収、海水融解水による希釈、陸棚海底に堆積した有機物の分解などに伴って海洋酸性化が急速に進行しており、環境ストレスによる生物への影響が危惧されている。既に炭酸カルシウムのうちアラゴナイト未飽和の海域が拡がりつつあるが、酸性化の時空間変動や要因の相対的寄与については未解明な部分も多い。北極海の海水減少に伴って光・水温・栄養塩環境が変化すれば、食物連鎖を介して動物プランクトンや魚類・海生哺乳類の生息域に少なからずインパクトを与えることも予想される。これらのプロセスを定量的に評価するには数値モデリングが有用であるが、初期・境界条件に必要なデータが揃っていないなどの理由により、現実的に再現性の良いシミュレーション結果を得るには実験設定の継続的な見直しが必要であ

る。本課題では、他の研究プロジェクトなどで作成されたデータセットを最大限生かすことで、海洋熱輸送・酸性化・生態系に関わるモデルの高精度化に取り組んできたので、その一端を報告する。

2. モデル概要および実験設定

本課題でベースとなる海水海洋物理モデルは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。モデルおよび実験設定の詳細は先行研究 [1, 2] も参照のこと。本稿では研究テーマごとに簡単に記述する。

2.1 北極海領域モデル（海洋熱輸送／酸性化）

北極海全域および北大西洋北部を計算領域としたモデルでは、水平5km格子（1280 × 1024）／鉛直42層の渦解像版による年々変動実験（2001–2014年）と水平25km格子（280 × 200）／鉛直28層の中解像度版による長期変動実験（1979–2013年）を行った。いずれも大気境界条件はNCEP-CFSR (National Centers for Environmental Prediction - Climate Forecast System Reanalysis) 再解析データから作成し、AOMIP (Arctic Ocean Model Intercomparison Project) の河川水流入量データを海面淡水フラックスとして与えた。ベーリング海峡では観測に基づく特性を持つ太平洋起源水を流入させ、輸送経路を可視化するために仮想トレーサーも与えた。

2.2 全球海洋モデル（溶存鉄／大気窒素沈着）

全球海洋を計算領域としたモデルでは、水平50–100km

格子 (360 × 256) / 鉛直 63 層の設定で 10-15 年間の気候値実験を行った。初期の海洋物理場は COCO4.9 (MIROC5.9 の海氷海洋コンポーネント) で 3000 年積分した最終年の分布を、硝酸塩・珪酸塩濃度は World Ocean Atlas 2013 の気候値をそれぞれ用いた。大気境界条件は OMIP (Ocean Model Intercomparison Project) で提供されている月平均気候値を与えた。鉄制限実験では、モデル内で鉄循環を解かずに、溶存鉄濃度を境界値として与えた。溶存鉄データは、JAMSTEC 気候変動リスク情報創生プログラムで開発が進められている地球システムモデル (MIROC-ES2) で 850 年積分した最終年の月平均値を用いた。大気窒素沈着実験では、化学輸送モデル IMPACT (Integrated Massively Parallel Atmospheric Chemical Transport model)[3] の実験で得られた、無機態の硝酸塩・アンモニア (ガス/エアロゾル) を NEMURO の各栄養塩に付加する形で与えた。

3. 冬季海水下の垂表層熱輸送

JAMSTEC が 2010 年秋から 4 年間係留系を設置していたチャクチ深海平原では、冬季海水下の垂表層において水温上昇が毎年観測されており、これらのタイミングで水平方向に暖水塊が通過していることが示唆される。COCO 渦解像版による年々変動実験 (2001-2014 年) でもそのような季節性が再現されており、モデル結果をより詳細に解析することで背景メカニズムを調べた [4, 7]。海洋垂表層での暖水域はベーリング海峡に撒いた太平洋水トレーサーの拡がりと共に良く一致しており、その経路上ではチャクチ陸棚縁に沿った強い西向きジェットが卓越していることから、この流れが温暖な太平洋夏季水を冬季海水下に供給していることが示唆された (図 1)。この垂表層ジェットの強さは局所的な風系やカナダ海盆を時計周りに流れるポーフォート循環だけでは説明できず、北極海で広範囲に生じる境界流 (boundary current) の一部と見なすことができる。また夏季の海水融解が活発であるほど、成層強化を介して垂表層の熱輸送が維持されやすいことも示唆された。このように輸送された海洋熱は数年以上のスケールで海盆内部に残存すると考えられるが、損失プロセスについては殆どわかっていない。引き続き現場観測から示唆される知見を注視しつつ、海水減少メカニズムの包括的な理解を目指していく予定である。

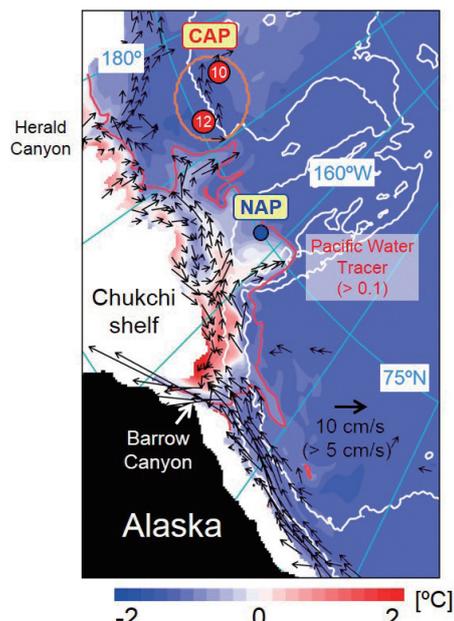


図 1 2013 年 1 月の水深 60-100m で平均した海水温 [°C] と水平流速場 (秒速 5cm より速いベクトルのみ表示)。白いコンターは 1000m と 3000m の等深線、赤いコンターは太平洋水トレーサーの縁 (濃度 0.1 で定義) を表す。

4. 炭酸系モデリング

アイスアルジー (海水底面に付着する藻類) など極域特有のプロセスを含む低次生態系モデル Arctic NEMURO に OCMIP (Ocean Carbon-Cycle Model Intercomparison Project) で提唱されている炭酸系ルーチンを組み込み、二酸化炭素分圧 $p\text{CO}_2$ ・pH・炭酸カルシウム飽和度 Ω など炭酸系変数の計算を行った。アルカリ度と全炭酸の初期値は World Ocean Atlas の水温・塩分・溶存酸素から重回帰式を用いて推定した格子データ (cf. [5]) を与え、水平 25km 格子の中解像度版で 1979 年から 2013 年まで様々な設定の下で実験した結果を検証した。観測値ベースの自己組織化マップから推定された海面付近の $p\text{CO}_2$ や大気海洋間 CO_2 フラックスのデータ [6] と比較しながら、チャクチ陸棚縁やカナダ海盆域で長期トレンドも含めて再現性の良い設定を抽出することができた (図 2)。このケースでは炭酸カルシウムのうちアラゴナイト未飽和の海域が最近拡大している特徴も良く捉えている。今後は既存の地球システムモデルでバイアスが大きい垂表層の鉛直構

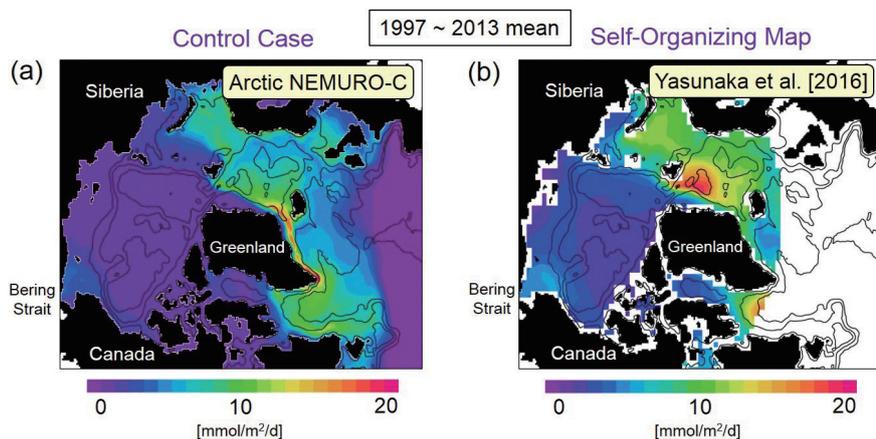


図 2 (a) Arctic NEMURO-C モデルと (b) 自己組織化マップからそれぞれ計算された大気海洋間の CO_2 フラックス [$\text{mmol}/\text{m}^2/\text{d}$]。いずれも 1997-2013 年の平均値。

造や、河川・海岸浸食による栄養塩・有機物の供給などに着目していく予定である。

5. 鉄制限や大気窒素沈着の植物プランクトンへのインパクト

全球海洋モデルにおいて、NEMURO で表現している2つの植物プランクトングループのうち、小型植物プランクトン (PS) よりも珪藻に代表される大型植物プランクトン (PL) の方に強い鉄制限がかかるように設定 (同化時の溶存鉄半飽和定数: $K_{Fe} = 0.1 \text{ nmol [PS]}, 0.8 \text{ nmol [PL]}$) した結果、HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) 海域ではトータル (PS + PL) のクロロフィル量が低下するが、亜熱帯海域ではPSのクロロフィル量が若干増加した (図3a-b)。ちなみにPSに対する鉄制限を少し強化 ($K_{Fe} = 0.2 \text{ nmol [PS]}, 0.8 \text{ nmol [PL]}$) すると、亜熱帯海域においても鉄制限を与えないコントロール実験と同程度のPSクロロ

フィル量になる (図3c)。さらに植物プランクトン全体で鉄制限を強化 ($K_{Fe} = 0.6 \text{ nmol [PS]}, 1.2 \text{ nmol [PL]}$) すると、基礎生産が抑制されることで、北太平洋東部で硝酸塩が過剰に余る結果になった (図3d)。北極海でもやはり鉄制限がかかることでクロロフィル濃度が低下するが、インパクトは亜熱帯に比べて小さかった。

また大気窒素沈着を与えると、特に亜熱帯海域でのインパクトが大きく、 0.3 mgChl m^{-3} 程度のクロロフィル増加、 $0.1\text{--}0.3 \mu\text{mol L}^{-1}$ 程度の硝酸塩増加が見られた (図4)。JAMSTECの定点観測点S1では表層付近の硝酸塩濃度が $0.01\text{--}0.62 \mu\text{mol L}^{-1}$ なので、窒素が枯渇している亜熱帯海域においては生物生産に対して大気由来窒素が無視できないことが示唆された。北極海では比較的影響が小さい結果となったが、現在の設定では大気窒素沈着に対する海水の効果を無視しているので、慎重に判断する必要がある。またMIROC-ES2の最新結果によると、河川からの窒素流入を与えることで、北極海を含む高緯度域の硝酸塩濃度が $3 \mu\text{mol L}^{-1}$ 程度増加することが報告されている [8]。したがって、これらの北極海での扱いについては見直しを検討している。

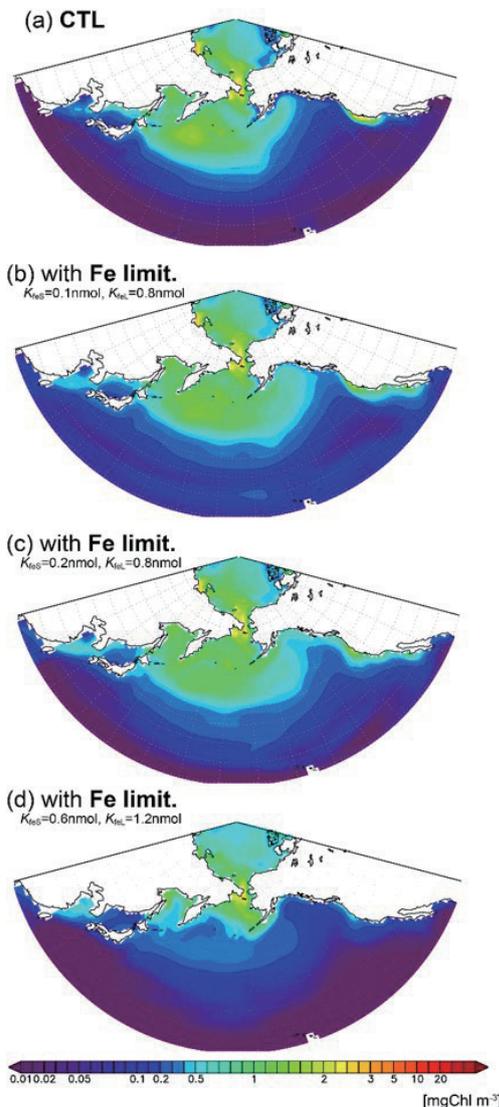


図3 鉄制限を (a) 与えないケースと (b-d) 与えたケースで計算された海面でのクロロフィル濃度 [mgChl m^{-3}]。小型/大型植物プランクトン (PS/PL) に対する溶存鉄取り込みの半飽和定数 (K_{Fe} [nmol]) は (b) 0.1/0.8、(c) 0.2/0.8、(d) 0.6/1.2 にそれぞれ設定した。

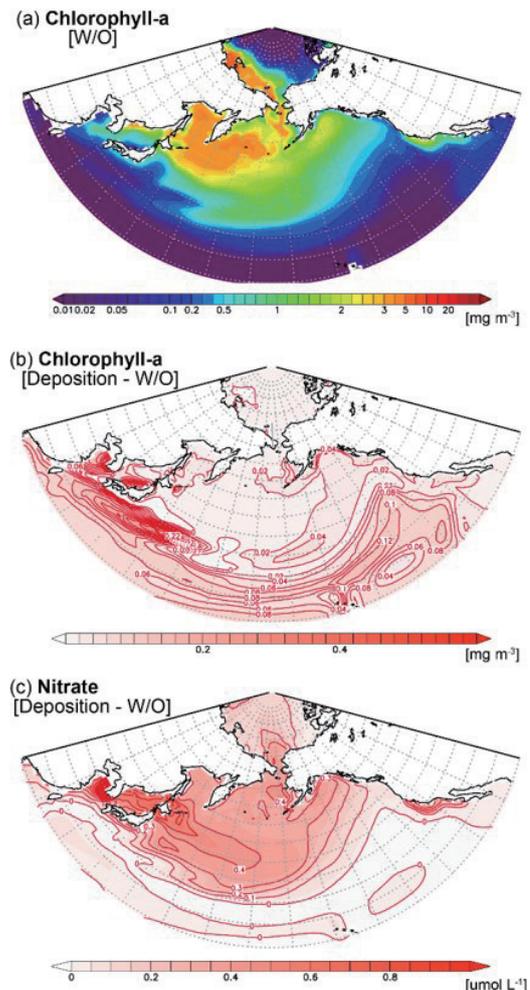


図4 (a) 大気窒素沈着を与えないケースのクロロフィル濃度 [mgChl m^{-3}]。それに対する大気窒素沈着を与えたケースの (b) クロロフィル濃度 [mgChl m^{-3}] と (c) 硝酸塩濃度 [$\mu\text{mol L}^{-1}$] のアノマリー。いずれも海面での4月の平均値。

謝辞

本課題は科学研究費助成事業・若手研究 B (課題番号 26800248)、基盤研究 B (課題番号 JP16H02947)、新学術領域研究 (課題番号 JP15H05822)、ArCS 北極域研究推進プロジェクトの支援を受けて実施しました。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

<雑誌>

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Ito, A, and J. F. Kok, “Do dust emissions from sparsely vegetated regions dominate atmospheric iron supply to the Southern Ocean?”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, doi:10.1002/2016JD025939, 2017.

- [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*, doi:10.1016/j.dsr.2017.08.009, 2017.
- [5] Yamamoto-Kawai, M., T. Mifune, T. Kikuchi, and S. Nishino, “Seasonal variation of CaCO₃ saturation state in bottom water of a biological hotspot in the Chukchi Sea, Arctic Ocean”, *Biogeosciences*, 13, 6155–5169, doi:10.5194/bg-13-6155-2016, 2016.
- [6] Yasunaka, S., A. Murata, E. Watanabe, M. Chierici, A. Fransson, S. van Heuven, M. Hoppema, M. Ishii, T. Johannessen, N. Kosugi, S. K. Lauvset, J. T. Mathis, S. Nishino, A. M. Omar, A. Olsen, D. Sasano, T. Takahashi, and R. Wanninkhof, “Mapping of the air-sea CO₂ flux in the Arctic Ocean and its adjacent seas: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability”, *Polar Science*, 10, 323–334, doi:10.1016/j.polar.2016.03.006, 2016.

<国際会議>

- [7] Watanabe, E., J. Onodera, M. Itoh, S. Nishino, and T. Kikuchi, “Winter transport of subsurface warm water toward the Arctic Chukchi Borderland”, *Arctic Science Summit Week Science Symposium, Prague, Czech.*, April 2017.
- [8] Aita M. N., M. Watanabe, and T. Hajima, “Modelling the impact of riverine and atmospheric nitrogen inputs on the marine biogeochemistry”, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Chiba, Japan, May 2017.*

High-Resolution 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}, Maki Noguchi Aita^{*2}, Jonaotaro Onodera^{*1,2}, Motoyo Itoh^{*1}, Shigeto Nishino^{*1} and Takashi Kikuchi^{*1}

*1 Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *2 Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Progresses for the high-resolution sea ice-ocean modeling studies on ocean heat transport, acidification, and ecosystem in the Arctic Ocean are reported. Activities in this fiscal year are categorized to following three themes: 1) winter subsurface warm water transport under sea ice, 2) evaluation of the simulated sea surface variables on carbonate chemistry, 3) impacts of dissolved iron and atmospheric nitrogen deposition on phytoplankton biomass. As future works, we will focus on sea ice and marine ecosystem associated with riverine heat, nutrient, and organic materials.

Keywords: Arctic Ocean, subsurface temperature maximum, ocean acidification, dissolved iron, nitrogen deposition

1. Research Background

Arctic sea ice retreat is remarkable, particularly in the Pacific side. Changes in wind-driven export of Arctic sea ice to the North Atlantic and atmospheric heat fluxes are known to be important factors for sea ice reduction. In addition, ocean heat transport from subarctic seas is another candidate to decrease sea ice volume. It has been indicated that the subsurface temperature maximum in the Canada Basin reflected intrusion of the Pacific summer water. Substantial parts of upper ocean heat have a potential to affect sea ice freezing/melting. However, spatial and temporal variabilities in the corresponding warm water transport still remain uncertainties. Ocean acidification is also an important problem for Arctic marine biology. Major factors for the acidification are absorption of atmospheric CO₂ in the expanding open water area, dilution effect due to sea ice meltwater, and remineralization of organic materials over the shelf bottom. Now we need to estimate relative influence of each factor. On the other hand, the current pan-Arctic sea ice-ocean models have not represented significant parts of biogeochemical processes, plausibly owing to lack of reliable gridded data. In this project, we are trying to improve the coupled physical and biogeochemical model with recently available datasets, which can be utilized as initial and boundary conditions.

2. Model and Experimental Design

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). The detailed model description and experimental design were presented in our previous papers [1, 2]. The brief summaries of two frameworks are introduced below.

2.1 Pan-Arctic Regional Model for Ocean Heat Transport and Acidification Studies

The pan-Arctic regional modeling framework has two versions with their grid size of 5 km (42 layers) and 25 km (28 layers). Both of them cover the entire Arctic Ocean and the northern North Atlantic. In this fiscal year, interannual (2001–2014) and decadal (1979–2013) experiments were performed, respectively. Atmospheric forcing was obtained from the NCEP-CFSR (National Centers for Environmental Prediction - Climate Forecast System Reanalysis) dataset. Water properties at the Bering Strait were prescribed to idealized seasonal cycles. In addition, a virtual passive tracer was provided at the strait to visualize the Pacific water pathway.

2.2 Global Ocean Model for Dissolved Iron and Atmospheric Nitrogen Deposition Studies

The global modeling framework has a grid size of 50–100 km (63 layers). The COCO4.9 was run for 3,000 years, and the final state could be regarded as being at equilibrium. Following this state, the COCO was coupled with the NEMURO. The initial nitrate and silicate concentrations were taken from the World Ocean Atlas 2013. Atmospheric forcing was

provided by monthly climatology of the OMI (Ocean Model Intercomparison Project). In the iron limitation experiments, monthly mean concentrations of dissolved iron were given as boundary data without explicit calculation of iron cycle in the NEMURO. The dissolved iron profile was obtained from the Earth System Model “MIROC-ES2”, which was developed by the Program for Risk Information on Climate Change, JAMSTEC. In the atmospheric nitrogen deposition experiments, the deposition of atmospheric nitrate and ammonium (in gas and aerosol phases), which was simulated by the IMPACT (Integrated Massively Parallel Atmospheric Chemical Transport) model [3], was given as a source of ocean nutrients.

3. Winter Subsurface Warm Water Transport under Sea Ice

The hydrographic sensors moored in the Chukchi Abyssal Plain detected subsurface warming signals in mid-winter or spring for 2010–2014. The interannual experiment for 2001–2014 also reproduced similar seasonality. We then investigated background mechanisms [4, 7]. The simulated subsurface warm water distribution was highly consistent with the Pacific water tracer (Fig. 1). The westward shelf break jet north of the Chukchi shelf reasonably accounted for lateral ocean heat transport and consequent subsurface warming in the downstream region. It was also suggested that highly stratified condition due to anomalous sea ice meltwater assisted the winter heat transport.

4. Carbonate Chemistry Modeling

We performed the decadal experiment for 1979–2013 using the Arctic NEMURO-C model, where sea ice algae and carbonate chemistry were recently incorporated. The initial and boundary conditions of total alkalinity and dissolved inorganic carbon were obtained from the gridded data, which were estimated by a multi-regression method with temperature, salinity, and dissolved oxygen of the World Ocean Atlas (cf. [5]). The simulated patterns of sea surface $p\text{CO}_2$ and air-sea CO_2 flux were consistent with the observational-based Self-Organizing Map [6] (Fig. 2). The decline

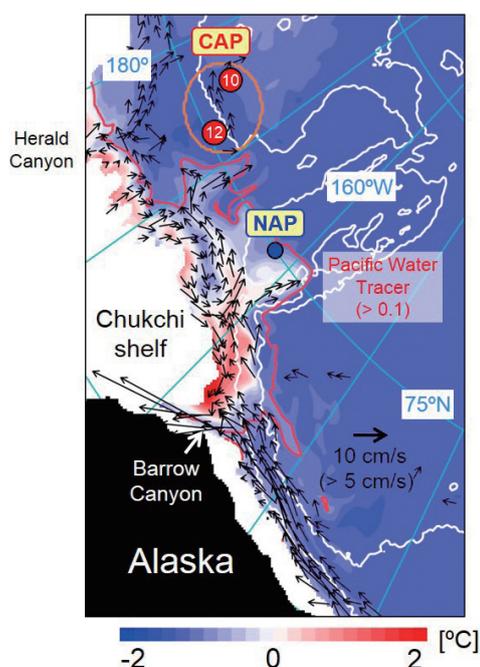


Fig. 1 The simulated ocean (shade) temperature [$^{\circ}\text{C}$] and (vectors) horizontal velocity faster than 5 cm s^{-1} at 60–100 m in January 2013. Unit vector of the velocity is 10 cm s^{-1} . White contours show the seafloor depths of 1,000 and 3,000 m. Red contours show the Pacific water tracer edge defined by the concentration of 0.1.

in calcium carbonate saturation rate “ Ω ” was also reproduced in the surface layer. As next steps, we plan to improve the vertical structure of “ Ω ” with additional input of organic materials from river, coastal erosion, and shelf bottom.

5. Impacts of Iron Limitation and Atmospheric Nitrogen Deposition on Phytoplankton Biomass

In the global modeling framework, the iron limitation was applied to two phytoplankton groups of the NEMURO: PS (small phytoplankton) and PL (large phytoplankton such as diatom). In the sensitivity experiments, the stronger iron limitation was applied to PL compared with PS. In the case of dissolved iron half saturation constant $K_{\text{Fe}} = 0.1 \text{ nmol}$ for PS and 0.8 nmol for

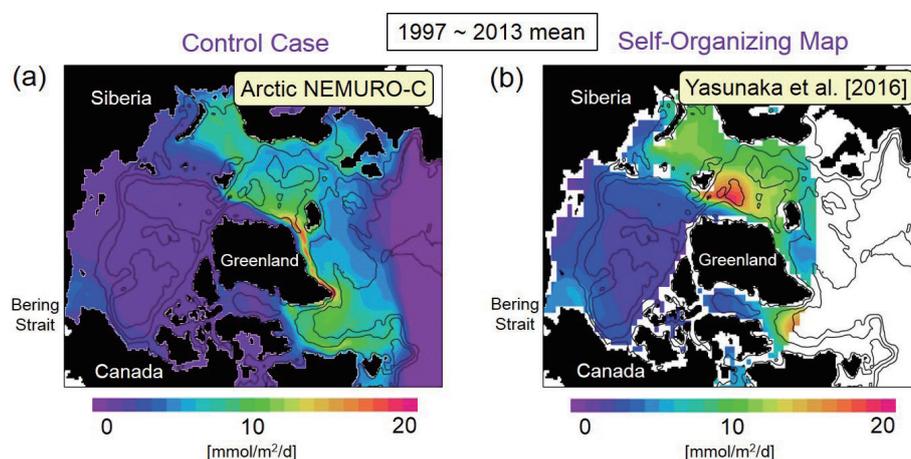


Fig. 2. Air-Sea CO_2 fluxes calculated by (a) the Arctic NEMURO-C and (b) the Self-Organizing Map [$\text{mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$]. The averages for 1997–2013 are plotted.

PL, total chlorophyll-*a* decreased particularly in the HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) region, while chlorophyll-*a* of PS slightly increased in the subtropical region (Fig. 3a-b). When the iron limitation for PS was enforced ($K_{Fe} = 0.2$ nmol for PS and 0.8 nmol for PL), PS chlorophyll-*a* was equivalent to the original case (i.e., no iron limitation) in the subtropical region (Fig. 3c). Furthermore, the extreme iron limitation ($K_{Fe} = 0.6$ nmol for PS and 1.2 for PL) caused excessive nitrate owing to the damped primary productivity in the eastern North Pacific (Fig. 3d). At least in these experiments, the chlorophyll-*a* reduction due to the iron limitation was minor in the Arctic Ocean.

The impact of atmospheric nitrogen input on marine biogeochemical variables was remarkable in the subtropical region: the chlorophyll-*a* and nitrate concentrations increased

by approximately 0.3 mgChl m^{-3} and $0.1\text{--}0.3 \text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$, respectively (Fig. 4). The sea surface nitrate concentration previously observed at Stn. S1 (30°N , 145°E) in the western North Pacific was $0.01\text{--}0.62 \text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$. Hence the model result suggested that atmospheric nitrogen deposition should not be ignored for biological production in the subtropical region, where nitrogen is normally exhausted. While the impact on the Arctic phytoplankton biomass seemed to be minor, modification by sea ice was not considered yet. Thus we need to revisit more accurate evaluation. The MIROC-ES2 simulated that riverine nitrogen inflows had a potential to increase nitrate concentration by $3 \text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ in high-latitude regions such as the Arctic Ocean [8]. Based on these findings, we plan to examine the Arctic nitrogen and ecosystem dynamics with incorporation of these external sources in the pan-Arctic regional modeling framework.

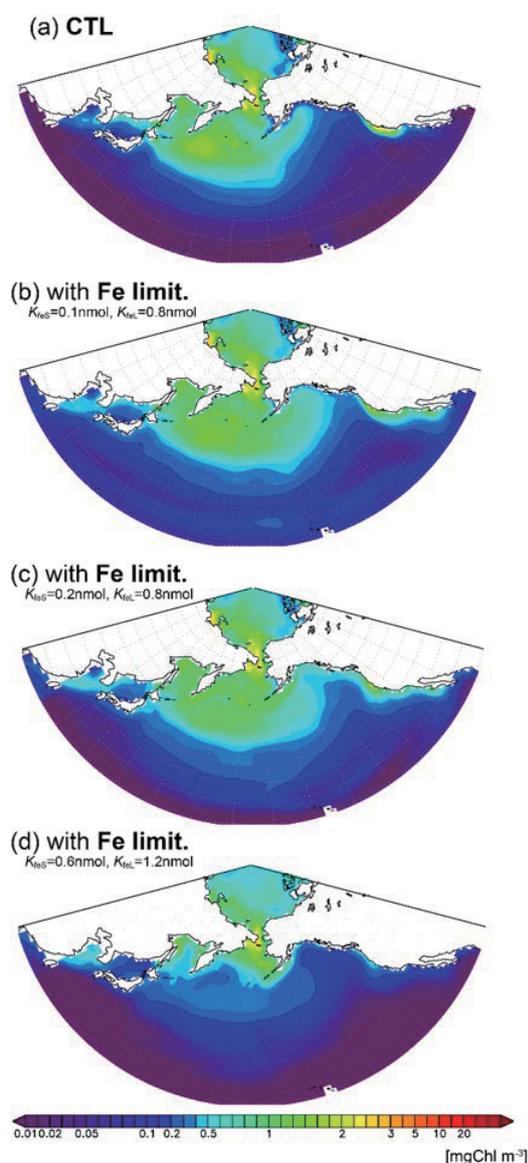


Fig. 3 Chlorophyll-*a* concentration at the sea surface in (a) the control case (i.e., no iron limitation) and (b-d) the iron limitation case [mgChl m^{-3}]. The half saturation constant for iron uptake of PS/PL (K_{Fe} [nmol]) was set to (b) 0.1/0.8, (c) 0.2/0.8, and (d) 0.6/1.2, respectively. All figures show the annual mean sea surface values after 10 years integration.

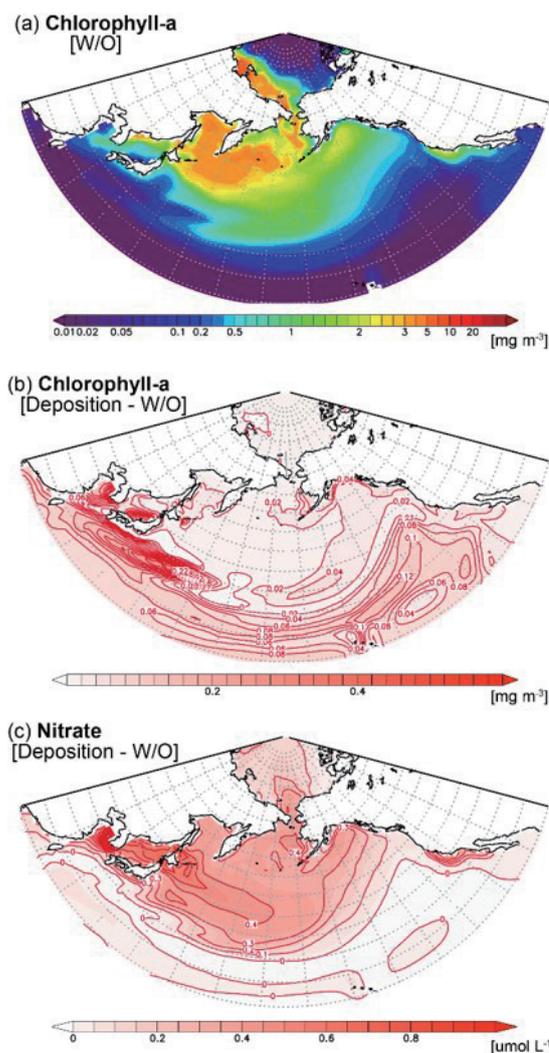


Fig. 4 (a) Chlorophyll-*a* concentration in the control case (i.e., no atmospheric nitrogen deposition) [mgChl m^{-3}]. Anomalies of (b) chlorophyll-*a* [mgChl m^{-3}] and (c) nitrate [$\mu\text{mol L}^{-1}$] in the atmospheric nitrogen deposition case. All figures show the sea surface values in April after 15 years integration.

Acknowledgement

This work was supported by Grants-in-Aids for Scientific Research (No. 26800248, JP16H02947, JP15H05822) and 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 (Center for Earth Information Science and Technology).

References

<Publications>

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Ito, A., and J. F. Kok, “Do dust emissions from sparsely vegetated regions dominate atmospheric iron supply to the Southern Ocean?”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, doi:10.1002/2016JD025939, 2017.
- [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*, doi:10.1016/j.dsr.2017.08.009, 2017.

- [5] Yamamoto-Kawai, M., T. Mifune, T. Kikuchi, and S. Nishino, “Seasonal variation of CaCO₃ saturation state in bottom water of a biological hotspot in the Chukchi Sea, Arctic Ocean”, *Biogeosciences*, 13, 6155–5169, doi:10.5194/bg-13-6155-2016, 2016.
- [6] Yasunaka, S., A. Murata, E. Watanabe, M. Chierici, A. Fransson, S. van Heuven, M. Hoppema, M. Ishii, T. Johannessen, N. Kosugi, S. K. Lauvset, J. T. Mathis, S. Nishino, A. M. Omar, A. Olsen, D. Sasano, T. Takahashi, and R. Wanninkhof, “Mapping of the air-sea CO₂ flux in the Arctic Ocean and its adjacent seas: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability”, *Polar Science*, 10, 323–334, doi:10.1016/j.polar.2016.03.006, 2016.

<International Meetings>

- [7] Watanabe, E., J. Onodera, M. Itoh, S. Nishino, and T. Kikuchi, “Winter transport of subsurface warm water toward the Arctic Chukchi Borderland”, *Arctic Science Summit Week Science Symposium*, Prague, Czech., April 2017.
- [8] Aita M. N., M. Watanabe, and T. Hajima, “Modelling the impact of riverine and atmospheric nitrogen inputs on the marine biogeochemistry”, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, Makuhari Messe, Chiba, Japan, May 2017.