

# 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

海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

野口 真希

海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

小野寺 丈尚太郎

海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

溝端 浩平

東京海洋大学 学術研究院 海洋環境科学部門

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、海水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 29 年度は、水平 5km 格子版の積分期間を 2001–2017 年の 17 年間に延長し、粒子態有機物に関する生物地球化学プロセスなどに改良を加えた（海底堆積物からの再懸濁導入や沈降速度分布の四次元化など）。また水平 25km 格子版で 1979–2013 年を対象とした実験を行い、アイスアルジーバイオマス（海水底面に付着する藻類の窒素換算量）の国際的なモデル間相互比較に着手した。さらにベーリング海～チャクチ陸棚域の高次生態系を対象としたハビタットモデルの入力データとなる環境変数を提供するために、全球モデルによる過去再現実験に着手した。

キーワード：北極海, 粒子態有機物, アイスアルジー, ハビタットモデル

## 1. 研究の背景

北極海で近年顕著な夏季の海水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。太平洋側に位置するカナダ海盆の中央部では、1) 海水融解水の増加と 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供給されることで豊か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おいてセディメントトラップ係留系を用いた時系列観測を 2010 年から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 [1]。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議論していく段階にきている。本稿では、北極海全域を対象とした高解像度海水海洋結合モデルで実施した年々変動実験の中から、特に粒子態有機物プロセスに着目した取り組みについて報告する。

アイスアルジーは海水底面（海水との境界面）に付着する珪藻類に代表される植物種であり、海水が存在する北極海・南極海・オホーツク海に幅広く生息している。アイスアルジーの光合成による基礎生産量は北極海全体の積算値にすると海水中の浮遊性植物プランクトンに比べて 1 オーダー小さいが、中央部の多年氷域では植物プランク

トンと同程度になることもある。植物プランクトンブルーム開始前の春先には動物プランクトンや底生生物の餌になることから、高次捕食者の生活史にとっても重要である。夏季の海水融解後には凝集したアイスアルジー由来の有機物粒子が海水中を高速で沈降することから、大気中の二酸化炭素を海洋中深層に隔離する生物ポンプとしての働きも無視できない。北極海で近年急激に進行している海水減少はアイスアルジーの動態に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・鳥類を含む生態系全体にも影響を及ぼすことが予想される。海水が薄くなれば海水底面への太陽光の透過量が増加する一方で、海水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。また海水縁の後退は直接的に生息域の変化をもたらす。したがって海水減少に対するアイスアルジーの応答（基礎生産量の増減など）は海域によって大きく異なる。アイスアルジーを扱う数値モデリングの歴史は南極海の定着氷を対象とした 1990 年代前半の鉛直一次元スキームの開発まで遡るが、北極海全域を含めた三次元モデルは 2010 年代に入ってから実装されたばかりであり、変動要因の相対的寄与や不確定性の評価は十分に行われていない。本稿では、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水海洋生態系モデルの結果と相互比較した初期の解析結果について報告する。

北海道大学北極域研究センターでは、科学的知見に基づく極域経済評価に向けた取り組みの一環として、水産有用魚種の生息環境を定量的に診断するハビタットモデ

ルを開発している。このハビタットモデルの入力データとなる環境変数を提供するために、本課題ではベーリング海も含む全球海洋を対象とした低次生態系モデルを使って、1948年から近年までの過去再現実験、および2100年までの将来予測実験の準備を進めている。本稿ではスピニアップ実験の進捗状況について報告する。

## 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, 3, 4] 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

#### (粒子態有機物プロセス／アイスアルジーモデル間相互比較)

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5 km 格子 (1,280 × 1,024) / 鉛直42層の渦解像版による年々変動実験 (2001–2017年) と水平25 km 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–CFRS (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流量・水温・塩分・栄養塩濃度 (硝酸塩 / 珪酸塩) 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の栄養塩濃度を初期条件および側面境界条件に用いた。海水海洋間の物質交換は熱力学的な海水生成・融解量の関数として計算し、海水中に放出されたアイスアルジーは植物プランクトンや粒子態有機物として振る舞うように設定した。

### 2.2 全球海洋モデル

#### (ハビタットモデルに入力する環境変数提供)

全球海洋を計算領域としたモデル [7] では、水平50–100 km 格子 (360 × 256) / 鉛直63層の設定で、OMIP (Ocean Model Intercomparison Project) プロトコル [5] に従って1948–2009年 (62年間) の過去再現実験を実施している。平成29年度はCOCO単体で310年間 (62年間 × 5周期) 積分した後、NEMUROを結合した上でさらに124年間 (62年間 × 2周期) 積分するところまで完了した (さらに3周期継続予定)。本実験でもWorld Ocean Atlas 2013の栄養塩濃度を初期値に用いたが、大気境界条件は他プロジェクトとの兼ね合いでCORE-II (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments Phase II) を与えている。

### 3. 粒子態有機物プロセス

本サブ課題では、海洋研究開発機構がバロー峡谷からチャクチ海台周辺にかけて設置しているセディメントトラップ係留系 (NAP10–13 / CAPI2 / NBC15–16 / NHC15–16) の観測結果を踏まえながら、生物由来粒子の時空間変動メカニズム解明を目指している。前年度までに物理モデルCOCO単体で2001–2014年を対象とした年々変動実験を実施し、当該海域周辺の海水特性・海洋循環・水温変動の再現性を確認してきた [3]。平成29年度はアイスアルジーを含むArctic NEMUROを結合させた上で積分期間を2001–2017年の17年間に延長した。本課題の先行研究では、太平洋側北極海で発生する海洋渦が生物由来粒子の時空間変動に重要な役割を担っていることを指摘しており [1]、引き続きそのプロセスに着目する。カナダ海盆南部 (3,000m 等深線と北緯75度で囲われた海域として定義) において、相対渦度の絶対値が0.05f ( $f$ はコリオリパラメータ) より大きくなるモデル格子の総体積量から中規模渦の存在量を簡易的に見積もると、先行研究 [1, 6] で実施した季節変動実験の結果と同様に、各年とも夏から秋にかけて渦生成が活発化する様子が再現された (図1a–b)。バロー峡谷の北側に設置したセディメントトラップ (NBC15) では夏季に捕集器上部が目詰まりして測定不能になるほど大量の粒子が沈降していた様子が捉えられてい

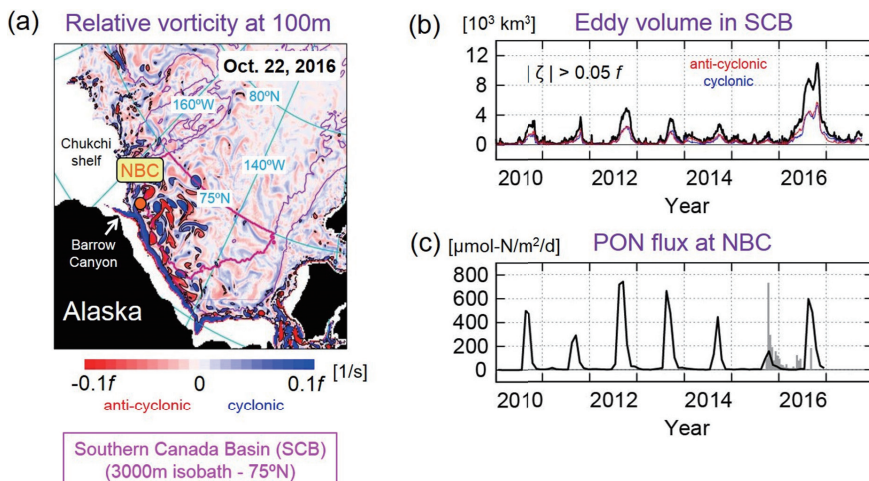


図1 (a) 2016年10月22日の100m深での相対渦度 [1/s]。(b) カナダ海盆南部における中規模渦の総体積量 (定義は本文参照) [ $10^3 \text{ km}^3$ ]。(c) バロー峡谷の北側に位置する係留系設置地点NBCでの粒子態有機窒素PONの沈降フラックス [ $\mu\text{mol-N/m}^2/\text{d}$ ]。(c)のバーはセディメントトラップで捉えられた観測値で、その他はいずれも北極海領域モデル5km格子版による年々変動実験の結果。

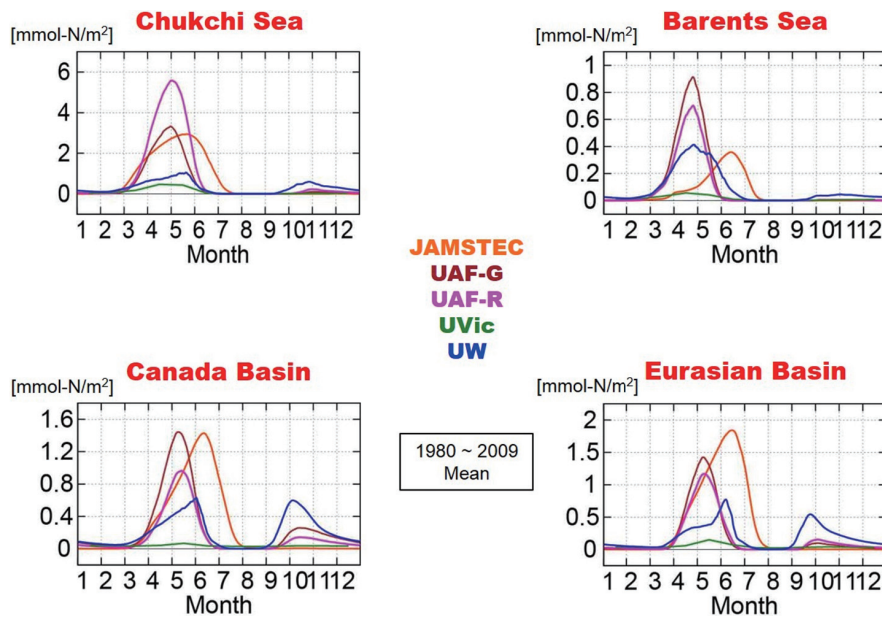


図2 チャクチ海、カナダ海盆、ユーラシア海盆、バレンツ海でそれぞれ平均したアイスアルジーバイオマスの季節変化(1980–2009年の平均値) [mmol-N/m<sup>2</sup>]。北極海領域モデル 25km 格子版 (JAMSTEC) の出力を、アラスカ大学全球版 (UAF-G)、アラスカ大学領域版 (UAF-R)、ビクトリア大学 (UVic)、ワシントン大学 (UW) の結果と相互比較している。

るが、年々変動実験の結果からは、同程度の粒子態有機物の沈降が過去にも頻繁に生じており、その変動は渦生成量とある程度関係があることが示唆された (図 1c)。またこのような水深の浅い陸棚域周辺では、海底堆積物の再懸濁が物質循環を考える上で無視できないことが指摘されている。そこで海底直上のモデル格子に粒子態有機窒素 (PON: Particulate Organic Nitrogen) を加える実験を実施し、その感度を調べた。まずテストケースとして PON 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、流れの強い陸棚縁で局所的に PON 濃度が増加する様子が表現された。但し、海洋表層での生物生産に由来する PON と同じ沈降速度を与えた場合には、再懸濁粒子が海盆内部までは拡がらないことがわかった。今後、再懸濁された PON に対しては異なる沈降速度を与える実験を行う予定である。ちなみに有機物粒子の沈降速度は海底堆積物を起源とする泥質鉱物が多く含まれる場所で大きくなることが推察されている (バラスト効果)。このことを間接的に表現するために、海底に接した海水に色を付ける仮想トレーサーを撒き、その濃度に依存させる形で沈降速度分布を与える実験も試みた。その結果、底層水の下流域で PON 沈降量がより多くなる水平パターンがより鮮明になった。これらのプロセス自体はまだ観測的証拠が少なく、定量的評価が困難であるが、結果として生じる沈降粒子量の時空間変動をセディメントトラップと数値モデルで比較することで検証を進めていく予定である。

#### 4. アイスアルジーモデル間相互比較

本サブ課題では、アイスアルジーのバイオマスおよび基礎生産量に着目し、FAMOS に参加しているアラスカ大学/ビクトリア大学/ワシントン大学の各共同研究者によって計算されたモデル結果との相互比較に着手した [8]。対象期間は 1980–2009 年の 30 年間とし、緯度・経度およ

び等深線で定義したチャクチ海/カナダ海盆/ユーラシア海盆/バレンツ海でそれぞれ平均した関連変数を解析に用いた。いずれの海域においても、30 年平均した春季ブルームの時期は概ね一致しているが、バイオマス (窒素換算量) の値に大きな違いが見られた。一方、秋季ブルームの有無はモデルによって二分されている。また対象期間においてモデル間で共通する長期トレンドは見られていない。そのようなバラツキの要因は海水底面での光と栄養塩の環境、生態系モデルの定式化やパラメータ値、海水移流に伴う力学的な収束・発散など多岐に渡るため、引き続き詳細な解析を続けていく予定である。

#### 5. 全球過去再現実験

本サブ課題では、ベーリング~チャクチ陸棚域の高次生態系を対象としたハビタットモデルの入力データとなる環境変数を提供するために、全球海水海洋生態系モデルによる過去再現実験に着手した。平成 29 年度末時点でまだスピニアップ途中であるが (62 年間×2 周期まで完了)、季節進行とともに北極海の海水が融解 (後退) し、これに伴って植物プランクトンバイオマスが増加する様子が表現できている (図 3a-b)。スピニアップ 2 周期目の 2009 年の結果を確認すると、8 月に海水密接度は最も低く、海面でのクロロフィル濃度は最も高くなっている。海面での硝酸塩濃度は季節を通して 10 mmol-N/m<sup>3</sup> 以下であった (図 3c)。なお本実験では植物プランクトンの栄養塩取込過程に鉄制限を考慮していない影響が見られ、西部ベーリング海および北太平洋亜寒帯海域の硝酸塩濃度を過小評価している。

東部ベーリング海 (60°N, 170°W) における 1975–2009 年の海水密接度の変化を確認すると、1970 年代後半から 1980 年代前半にかけ海水密接度が低く、1990 年代前半および 2000 年代後半に高い (図 4a)。海面水温は 1970 年代

後半と 2000 年代前半にピークが生じていた (図 4b)。植物プランクトンバイオマスは海水密度と逆相関の傾向が見られた (図 4c)。海洋研究開発機構が複数年に渡ってセディメントトラップ係留系を設置していた北極海のノースウインド深海平原 (Station NAP: 75°N, 162°W) では、

1970 年代から近年まで海氷減少および昇温傾向を示している (図 4a-b)。植物プランクトンバイオマスは長期的に増加傾向だが、海水や海面水温だけで説明できない変動も見られており (図 4 c)、今後その要因を明らかにしていく予定である。

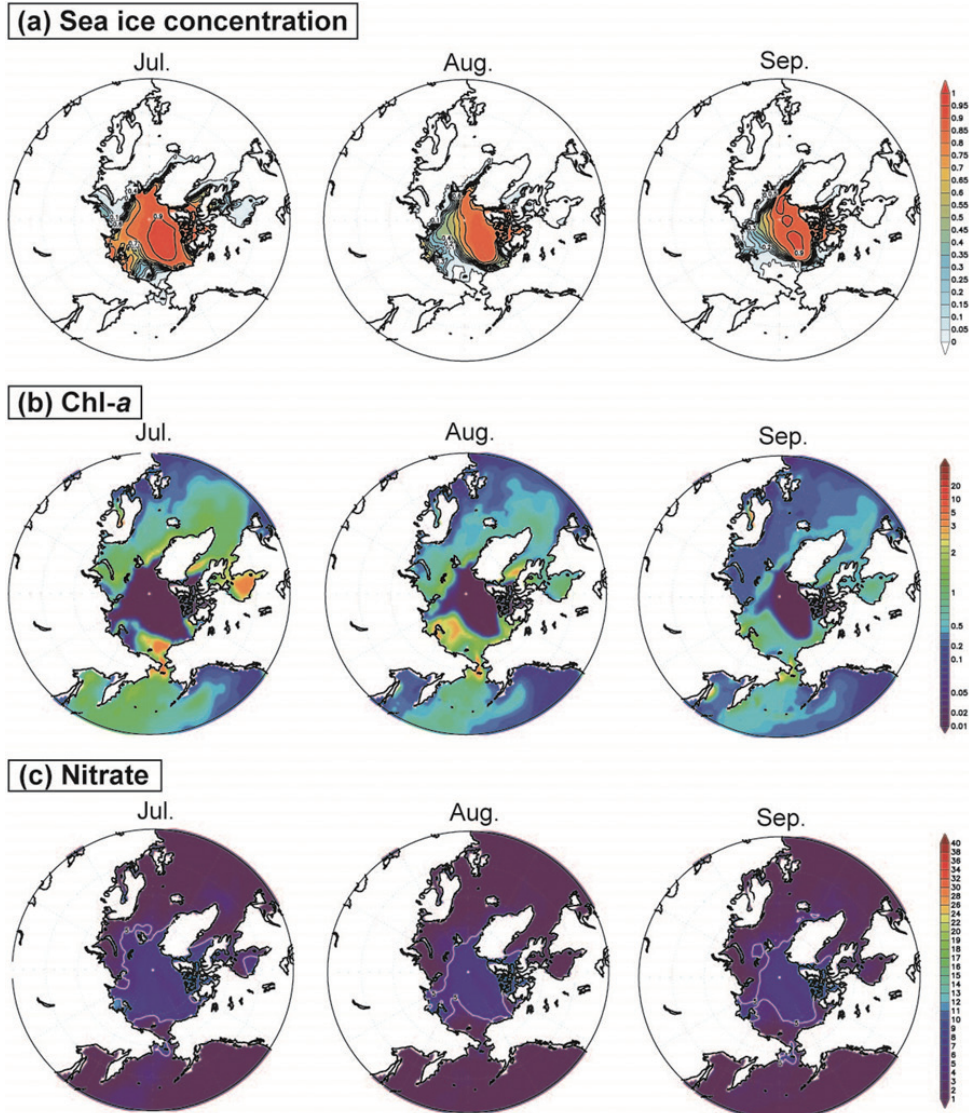


図 3 全球海水海洋生態系モデルで計算された (a) 海水密度、(b) クロロフィル濃度 [mgChl/m<sup>3</sup>]、(c) 硝酸塩濃度 [mmol-N/m<sup>3</sup>]。 (b-c) は海面値。スピンアップ実験 (1948–2009 年) 2 周期目における 2009 年 7–9 月の水平分布を示す。

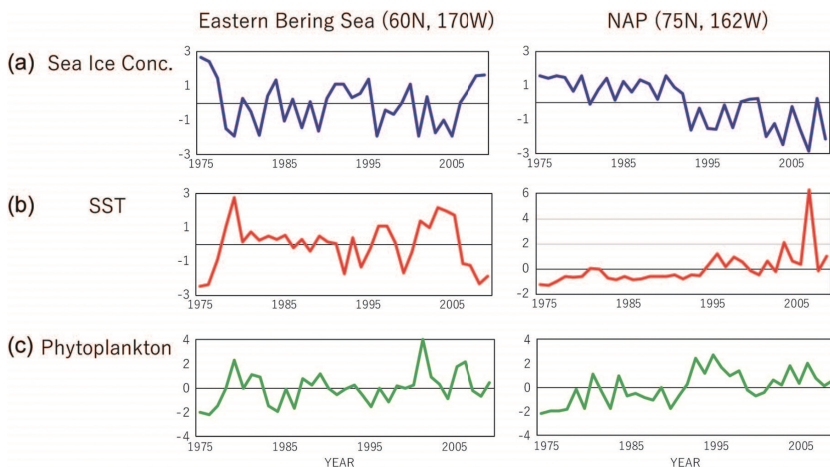


図 4 全球海水海洋生態系モデルで計算された東部ベーリング海 (60°N, 170°W) およびノースウインド深海平原 (Station NAP: 75°N, 162°W) 地点での (a) 海水密度、(b) 水温、(c) 植物プランクトンバイオマス。 (b-c) は海面値。スピンアップ実験 (1948–2009 年) 2 周期目における 1975–2009 年のアノミー時系列を示す (年々変動の標準偏差で規格化)。

## 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）、基盤研究 B（課題番号 16H02947）、新学術領域研究（課題番号 15H05822）、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

## &lt;雑誌&gt;

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.

- [5] 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.org/10.5194/gmd-10-2169-2017, 2017.

- [6] Watanabe, E., “Beaufort shelf break eddies and shelf-basin exchange of Pacific summer water in the western Arctic Ocean detected by satellite and modeling analyses”, *J. Geophys. Res.*, 116, C08034, doi:10.1029/2010JC006259, 2011.

## &lt;国際会議&gt;

- [7] 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.
- [8] Watanabe, E., M. Jin, and J. Zhang, “Decadal variations in ice algal productivity simulated by pan-Arctic ice-ocean ecosystem models”, *Ocean Sciences Meeting*, Portland, Oregon, U.S.A., February 2018.

# 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 Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Maki Noguchi Aita Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Jonaotaro Onodera Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Kohei Mizobata Department of Ocean Sciences, Faculty, Tokyo University of Marine 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) model improvement of particulate organic material (POM) processes, 2) multi-model intercomparison of ice algal biomass, and 3) hindcast experiments collaborated with a habitat modeling.

**Keywords:** Arctic Ocean, particulate organic material, sea ice algae, habitat model

## 1. Research Background

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. 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]. Now, we should discuss interannual to decadal variability at multiple locations. In this report, our modeling effort on processes related to particulate organic materials is focused on.

Ice algae are a key component of the 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, because sinking of their assemblage from sea ice bottom to deep seafloors is considered to be much faster than that of pelagic plankton species. 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. For example, sea ice thinning enhances light penetration into the skeletal layer at the 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. Numerical modeling is a powerful tool to evaluate the impacts of sea ice decline on ice algal productivity on the pan-Arctic and decadal scales. Whereas ice algae models have long history of development, most previous works have been conducted on one-dimensional landfast ice ecosystem. In recent years, the model domain was extended to include the entire Arctic Ocean, and complex ice algal processes were numerically formulated in various ways. The present study addressed seasonal and decadal variations in ice algal biomass/productivity from 1980 to 2009, which were simulated by pan-Arctic sea ice-ocean ecosystem models participating in the Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis (FAMOS) project. Preliminary analysis of the multi-model intercomparison is introduced in this report.

Quantitative estimates based on scientific knowledges are required to answer following questions: 1) what kind of environmental changes will influence food chains from lower-trophic levels (such as phytoplankton and zooplankton) to higher-trophic levels (such as fish and marine mammals) and 2) what kind of their impacts will be given to socio-economic sides in the high-latitude regions. To provide environmental variables as input data for a habitat model covering the Bering and Chukchi Seas which is developed at the Hokkaido University, we are now preparing hindcast and future experiments from 1948 to 2100 using a global lower-trophic marine ecosystem model. In particular, we focus on multi-decadal responses of

marine ecosystem in the Bering Sea and the Arctic Ocean under global warming.

## 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, 3, 4]. The brief summaries of two frameworks are described below.

### 2.1 Pan-Arctic Regional Model for POM and Ice Algae 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 (2001–2017) and decadal (1979–2013) experiments were performed, respectively. Atmospheric forcing was obtained from the NCEP–CFRSR (National Centers for Environmental Prediction–Climate Forecast System Reanalysis) dataset. Water properties at the Bering Strait were prescribed to idealized seasonal cycles.

### 2.2 Global Model to provide Environmental Variables for Habitat Model

The global modeling framework has a grid size of 50–100 km (63 layers) [7]. The spin-up experiment was performed from 1948 to 2009 (62 years) following the OMIP (Ocean Model Intercomparison Project) protocol [5]. First, 62-year atmospheric forcing provided by the CORE-II (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments Phase II) was repeatedly given for five cycles (i.e., total 310 years) using only the COCO model. A subsequent experiment coupled with the NEMURO model was then done for 124 years (62 years  $\times$  2 cycles) by the end of this fiscal year.

## 3. Model Improvement of POM Processes

To clarify background mechanisms of spatial and temporal variability in biogenic particle sinking, numerous interannual experiments for 2001–2017 were performed with a variety of model settings. The simulated sinking flux of biogenic particle is comparable with the sediment trap value north of the Barrow Canyon and seems to be related with mesoscale eddy generation (Fig. 1), as indicated by our previous seasonal experiments [1, 6]. We then tried to estimate sensitivity of particle transport to POM resuspension from sea bottom sediments as test studies. In addition, it was confirmed that variable sinking velocity of POM depending on bottom water tracer concentration possibly represented “ballast effect”.

## 4. Multi-model Intercomparison of Ice Algal Biomass

We collected model results which were produced by collaborators at the Universities of Alaska Fairbanks, Victoria, and Washington [8]. First, the variables from 1980 to 2009 were averaged in the Chukchi Sea, Canada Basin, Eurasian Basin, and Barents Sea, respectively (Fig. 2). Timing of spring ice algal bloom was broadly similar, but peak values of the biomass remarkably differed in these models. The fall bloom also appeared in a few models. The common decadal trends were not seen. Light and nutrient conditions at the sea ice bottom, model formulation and parameter values, and mechanical convergence/divergence due to sea ice advection would be factors for various uncertainties. We plan to deepen the analysis in subsequent fiscal years.

## 5. Global Hindcast Experiment

To provide environmental variables as input data for a habitat model which treats higher-trophic level species in the Bering and Chukchi Seas, we started hindcast experiments from 1948 to 2009 using the global sea ice-ocean model. The preliminary results are described in this report. The model reasonably simulated seasonal melting (retreat) of sea ice and

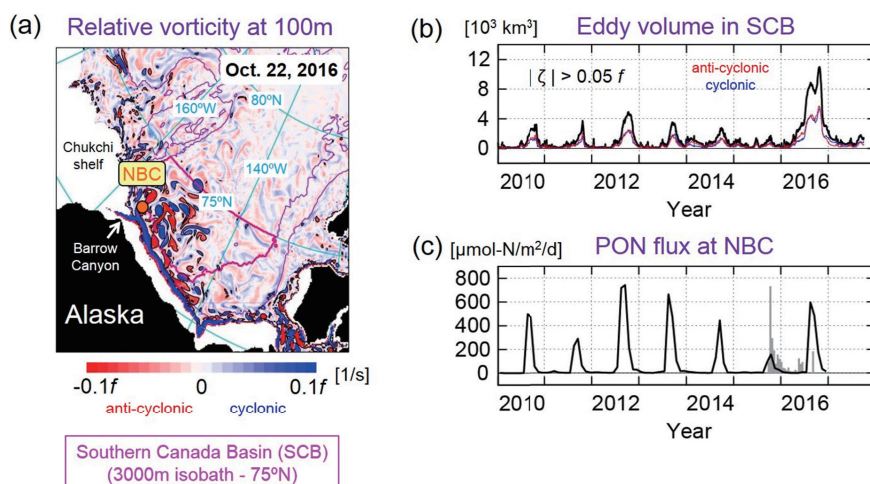


Fig. 1 (a) Relative vorticity at 100 m on October 22, 2016 [ $1/s$ ], (b) total volume of mesoscale eddies in the southern Canada Basin [ $10^3 \text{ km}^3$ ], and (c) sinking flux of Particulate Organic Nitrogen (PON) north of Barrow Canyon (Mooring Station NBC) [ $\mu\text{mol-N}/\text{m}^2/\text{d}$ ], which were simulated by a 5km grid version of our pan-Arctic sea ice-ocean model. Gray bars in (c) indicate the sediment trap values.

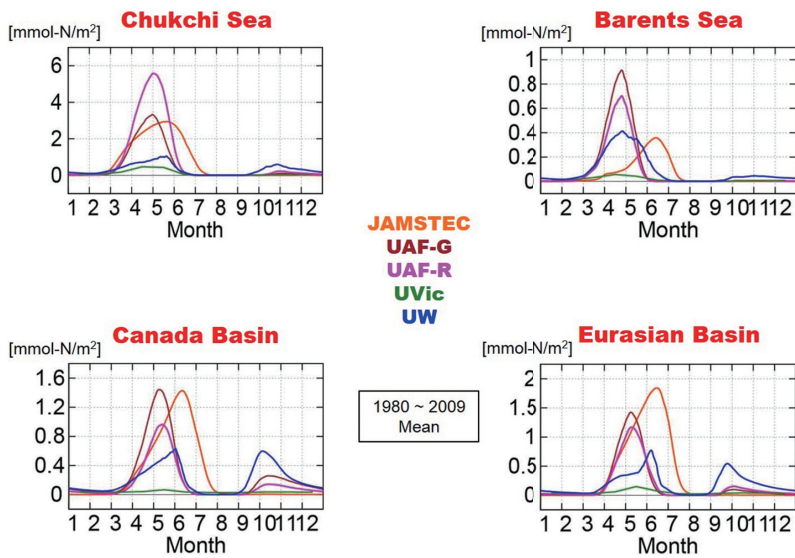


Fig. 2 Seasonal cycle of ice algal biomass averaged in the Chukchi Sea, Canada Basin, Eurasian Basin, and Barents Sea (1980–2009 mean) [mmol-N/m<sup>2</sup>]. The result from a 25km grid version of our pan-Arctic sea ice-ocean model (JAMSTEC) was compared with those from the University of Alaska Fairbanks (UAF-G: global version, UAF-R: regional version), the University of Victoria (UVic), and the University of Washington (UW).

spring bloom of phytoplankton (Fig. 3 a-b). In 2009 of the second spin-up cycle, the minimum sea ice concentration and the highest phytoplankton biomass were produced in August. The simulated nitrate concentration in the Arctic Ocean was less than 10 mmol-N/m<sup>3</sup> throughout the year (Fig. 3c). In this model, the nitrate concentration was underestimated relative to in-situ observations in the western Bering Sea and the sub-arctic North

Pacific. Lack of iron-limitation process in the photosynthesis formulation would be a plausible factor.

We then checked decadal time series of annual mean sea ice concentration, sea surface temperature (SST), and phytoplankton biomass in the eastern Bering Sea (60°N, 170°W) and the Northwind Abyssal Plain (Station NAP: 75°N, 162°W) from 1975 to 2009 (Fig. 4). The simulated sea ice concentration in the

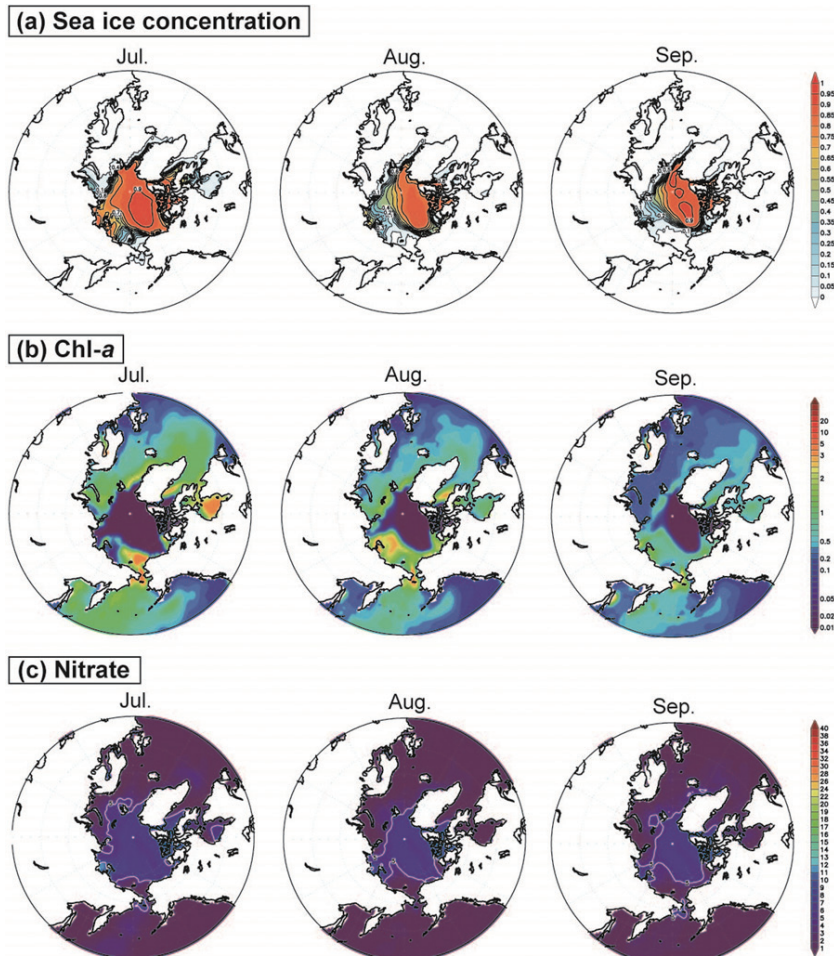


Fig. 3 (a) Sea ice concentration, (b) surface Chlorophyll-*a* concentration [mgChl/m<sup>3</sup>], and (c) surface nitrate concentration [mmol-N/m<sup>3</sup>] from July to September in 2009. All figures show spatial distributions simulated in the second spin-up cycle using our global sea ice-ocean model.



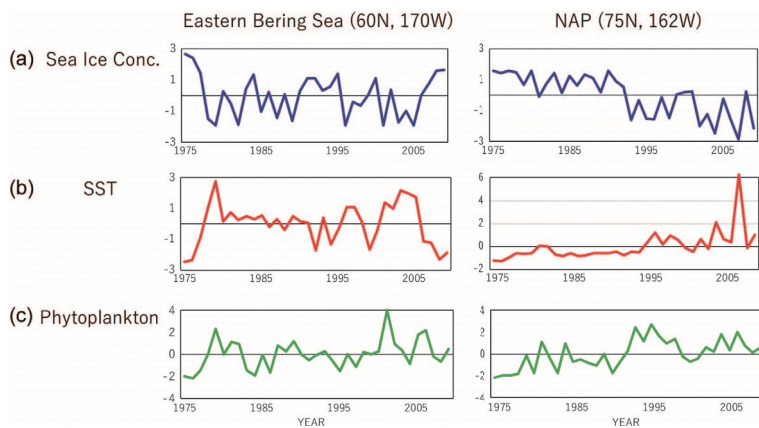


Fig. 4 (a) Sea ice concentration, (b) sea surface temperature, and (c) surface phytoplankton biomass in the eastern Bering Sea (60°N, 170°W) and the Northwind Abyssal Plain (Station NAP: 75°N, 162°W). All figures show anomaly time series for 1975–2009 simulated in the second spin-up cycle using our global sea ice-ocean model (normalized by standard deviations of interannual variability).

eastern Bering Sea decreased from the late 1970s to the early 1980s, while it was higher in the early 1990s and the late 2000s. The SST had its peaks in the late 1970s and the early 2000s. The phytoplankton biomass was inversely correlated with the sea ice concentration. At Station NAP, the simulated sea ice concentration (SST) showed negative (positive) trends on the decadal timescale. The phytoplankton biomass has also been increasing, but its trend was not so simple.

### Acknowledgement

This work was supported by the Grants-in-Aids for Scientific Research (No. 15H01736, 16H02947, 15H05822) 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 (Center for Earth Information Science and Technology).

### References

<Publications>

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 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.org/10.5194/gmd-10-2169-2017, 2017.
- [6] Watanabe, E., “Beaufort shelf break eddies and shelf-basin exchange of Pacific summer water in the western Arctic Ocean detected by satellite and modeling analyses”, *J. Geophys. Res.*, 116, C08034, doi:10.1029/2010JC006259, 2011.

<International Meetings>

- [7] 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.
- [8] Watanabe, E., M. Jin, and J. Zhang, “Decadal variations in ice algal productivity simulated by pan-Arctic ice-ocean ecosystem models”, *Ocean Sciences Meeting*, Portland, Oregon, U.S.A., February 2018.

