

# 北極域環境変動メカニズムの解明に向けた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<sup>\*1</sup>, 野口 真希<sup>\*2</sup>, 小野寺 丈尚太郎<sup>\*1,2</sup>

<sup>\*1</sup>海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター, <sup>\*2</sup>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。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 30 年度は、水平 25 km 格子版で 1979-2013 年を対象とした長期変動実験を行い、アイスアルジー(海水底面に付着する藻類)の基礎生産量について国際的なモデル間相互比較を実施した。また水平 5 km 格子版で 2001-2017 年を対象とした年々変動実験を行い、海底から再懸濁した粒子態有機物に関する生物地球化学プロセスの解析を行った。さらに全球モデルによる過去再現実験(1958-2018 年)を実施し、ノースウィンド深海平原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, 海水海洋結合モデル, アイスアルジー, 粒子態有機物, 数十年スケール変動

## 1. 研究の背景

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、高次捕食者のバイオマスや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。このように海水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い。

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。本研究では、アイスアルジー基礎生産量の不確定性を見積もり、海水減少との関係を定量的に明らかにす

ることを目的として、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の相互比較を実施した [1]。

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生物生産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おいてセディメントトラップ係留系を用いた観測を 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 [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進捗状況について報告する。

現在から遡って約半世紀の間に得られた観測結果によれば、北太平洋の広域で海洋表層の栄養塩濃度が減少し、これに伴ってプランクトンの生物量が変化しており、さらには動物プランクトンを捕食する魚類にまで影響が及んでいることが多くの先行研究によって報告されている[4, 5]。そこで本課題では、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(北海道大学北極域研究センターで開発中)に対して入力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)も実施した。

## 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、低次生態系モデルは NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography)である。アイスアルジー基礎生産量のモデル間相互比較および粒子態有機物プロセスの解析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ので、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, 6, 7] 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計算領域としたモデルでは、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(1979-2013 年)と水平解像度 5 km (1,280×1,024 格子)／鉛直 42 層の渦解像版による年々変動実験(2001-2017 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 モデルを結合させている(図1)。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 (WOA13)の栄養塩濃度を初期条件と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た。

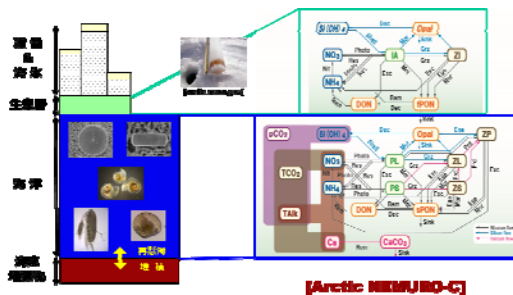


図1: Arctic NEMURO モデルの模式図

### 2.2 全球海洋モデル

全球海洋を計算領域としたモデル[7, 8]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 [9]に従って 1958-2017 年(60 年間)の過去再現実験を実施した。平成 30 年度は COCO 単体で 300 年間(60 年間×5 周期)積分した後、NEMURO を結合した上でさらに 300 年間(60 年間×5 周期)積分した。本実験でも WOA13 の栄養塩

濃度を初期値に用いた。大気境界条件は気象庁 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水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) [10]を与えた。

### 3. アイスアルジー基礎生産量のモデル間比較

アイスアルジーの基礎生産量に着目し、FAMOS に参加しているアメリカとカナダの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を実施した。海洋研究開発機構(JAMSTEC)／アラスカ大(UAF)／ビクトリア大(UVic)／ワシントン大(UW)でそれぞれ実装された計5つの海水海洋生態系モデル(領域モデル×4, 全球モデル×1)による実験結果を解析に使用した。ベースモデル・計算領域・解像度・大気境界条件・初期条件は表1の通りである。対象期間は 1980-2009 年の 30 年間とし、各環境変数の値を緯度・経度・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領域平均した上で解析を行った。

	JAMSTEC	UAF-G	UAF-R	UVic	UW	
物理モデル	COCO	CEGM	RAM	NEMO	PIOMAS	
生態系モデル	海水	Watanabe2015	Jim2005	Jim2006	Hayashida2018	Jim2005
	海洋	NEMURO*1	Moore2013	Moore2013	CanOE	NEMURO*1
モデル領域	Pan-Arctic*2 (45 - 90°N)	Global	Pan-Arctic (30 - 90°N)	Pan-Arctic*3 (45 - 90°N)	Pan-Arctic (30 - 90°N)	
水平解像度	~ 25 km	40 60 km	~ 9 km	11 15 km	2 80 km	
鉛直解像度	2 500 m (28 layers)	10 250 m (80 layers)	5 250 m (45 layers)	6 250m (45 layers)	5 600m (40 layers)	
大気境界条件	NCEP-CFSR	CORE II	CORE II	DFS	NCEP-CFSR	
栄養塩初期値	WOA13	WOA13	WOA13	GLADAPv2	WOA05	
参考文献	Watanabe et al. [2015]	Jim et al. [2018]	Jim et al. [2018]	Hayashida et al. [2018]	Zhang et al. [2015]	

表1: 相互比較したモデル実験の概要

各海域とも極夜が明けた直後に春季ブルームが始まるが、年間基礎生産量は海域やモデルによって大きく異なっていた(図2)。海域間ではチャクチ海で最も多く、バレンツ海で少なかった。モデル間ではワシントン大の結果が4つの海域ともに最も高い値を示した。解析対象とした 30 年間においては、長期的な変化よりも年々変動の振幅の方がはるかに大きく、殆どのケースで統計的に有意なトレンドは生じていなかった。ちなみに海水面積・積雪深・海水厚は概ね減少トレンドを示していたが、海水内部および海洋表層の硝酸塩濃度は海域やモデルによってトレンドの符号にばらつきが見られた。

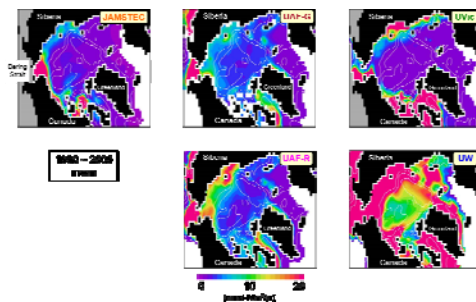


図2: アイスアルジーの年間基礎生産量

各海域および各モデルにおいて、年間基礎生産量と9月の海水面積の相関は極めて低く、春季ブルーム後に風などによって海水面積が力学的に変化したことで両者の関係性が崩れた可能性がある。一方、年間基礎生産量と春先の海水厚の間には正と負の相関が両方出ていることから、安定した生息場所と海水底面への十分な透過光のバランスが基礎生産の維持に必要なことがより具体的に示された。また海盆域では春先に硝酸塩濃度が高いほど年間基礎生産量が多くなる傾向が見られたが、陸棚域での相関は低かった。

春先の積雪や海水が薄くなるのに伴ってブルーム時期が徐々に早まっており、一部ではブルーム時期が早いほど年間基礎生産量が少なくなるという関係性も見られた。基礎生産量のモデル間の差については、海水底面での光や栄養塩の環境よりも、アイスアルジーの最大成長率を支配する  $V_{max}$  値の違いが大きな要因になっていることが示唆された。今後の研究テーマとしては、消失項や水平移流項の比較、秋季ブルームの特性、海水が極端に少なくなる状況を見据えた将来予測などが挙げられる。

#### 4. 粒子態有機物プロセス

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/CAP12/NBC15-17/NHC15-17)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 [6]。平成30年度は Arctic NEMURO を結合させた上で2001-2017年を対象とした年々変動実験を数多く実施した。

北極海のかなりの部分を占める水深が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。そこで平成29年度に引き続き、海底直上のモデル格子に再懸濁した粒子態有機窒素(RPON: Resuspended Particulate Organic Nitrogen)をシンプルな方法で加える実験を行った。RPON 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PON濃度が増加する様子が表現されている(図3)。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から、RPONの沈降速度を小さくする感度実験を多く実施した。その結果、セディメントトラップ観測値の再現性が季節変化も含めて向上した。沈降速度そのものは現場観測による定量的評価が困難だが、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と考えれば、この設定は非現実的なものではないと言える。引き続き沈降粒子量の時空間変動をセディメントトラップ観測値と比較することで、さらなる改良を進めていく予定である。

ちなみに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るが、年々変動実験の結果からは、同程度の有機物沈降が過去にも頻繁に生じていたことが示唆された。

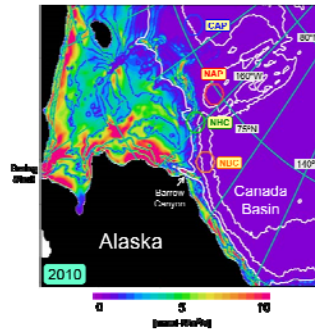


図3: 再懸濁有機物フラックスの年平均値(2010年)

#### 5. 全球過去再現実験

北極海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に対して入力データとなる各種環境変数を提供することを目的に、ベーリング海も含む全球海洋を対象とした過去再現実験(1958-2017年)を実施した。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地点(Station NAP: 75°N, 162°W)に着目すると、年平均海面水温は長期的な海洋減少に伴って1960年代から上昇トレンドを示していた(図4a)。特に1990年代後半、2000年代後半、および2015年以降に顕著な昇温が見られた。

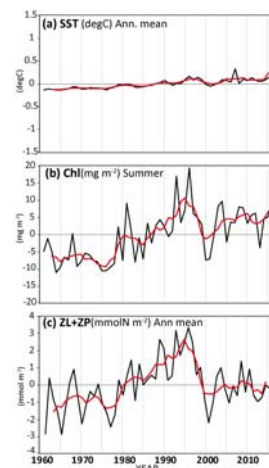


図4: NAP 地点における(a)海面水温、(b)クロロフィル量、(c)動物プランクトンバイオマス量の1960-2017年時系列。(a, c)年平均値、(b)夏季平均値。(b, c)水深200mまでの鉛直積算値。赤線は5年移動平均値。

一方、植物・動物プランクトンともに 1970 年代後半から 1996 年にかけてバイオマス量が増加していたが、1997 年から 2000 年にかけて急激に減少、その後再び増加に転じていた(図4b-c)。このように長期的には低次生態系のバイオマスが増加傾向を示しているが、海氷や海面水温だけでは説明できない変動も見られており、海氷融解水や鉛直混合の影響を受けた栄養塩環境の変動プロセスも含めて今後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)、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 ArCS 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] 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.

[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] Ito, S., K. A. Rose, B. A. Megrey, J. Schweigert, D. Hay, F. W. Werner, and M. N. Aita, Geographic variation in Pacific herring growth in response to regime shifts in the North Pacific Ocean. *Prog. Oceanogr.*, 138, 331–347. doi:10.1016/j.pcean.2015.05.022, 2015.

[5] Ueno, H., M. Kaeriyama, M. Otani, M. Oe, Y. Qin, M. N. Aita, S. Yoon, and M. J. Kishi, Temporal and spatial variation in a growth condition of Pacific salmon, *N Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.*, 6, 181–187. doi:10.23849/npafcb6/181.187, 2016.

[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] 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.

[8] Tatebe H. and Hasumi H., 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.

[9] 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.

[10] 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  
Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

## Authors

Eiji Watanabe<sup>\*1</sup>, Maki Noguchi Aita<sup>\*2</sup>, Jonaotaro Onodera<sup>\*1,2</sup>

<sup>\*1</sup>Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology

<sup>\*2</sup>Research and Development Center 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 Ocean 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 2018 are categorized to three themes: 1) multi-model intercomparison of ice-algal productivity, 2) model improvement of particulate organic material (POM) processes, and 3) multi-decadal hindcast experiments for collaboration with habitat modeling.

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

## 1. Research Background

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.

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 spatial and temporal variability in ice-algal productivity (Ice-PP) and sinking particulate organic material (POM) using a pan-Arctic sea ice–ocean model.

Climate change has periodic variations with various time scales. In particular, many studies have been conducted on changes in marine ecosystems related to climate change with decadal-scale climate variability, such as the Arctic Oscillation index (AO) and Pacific Decadal Oscillation index (PDO) [3, 4]. To clarify long-term variability of lower-trophic level

productivity and its controlling factor, we also performed multi-decadal experiments from 1958 to 2018 using a global sea ice–ocean model. Some of the simulated environmental variables will be provided for a habitat model covering the Bering and Chukchi seas, which is developed at the Hokkaido University, as external input data.

## 2. Model and Experimental Design

The detailed model description and experimental design were presented in our previous papers [1, 2, 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 them cover the entire Arctic Ocean and the northern North Atlantic. 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.

The global modeling framework has a grid size of 50–100 km (63 layers). The spin-up experiment was performed from 1958 to 2017 (60 years) following the OMIP (Ocean Model Intercomparison Project) protocol [7]. The JRA55-do (atmospheric dataset for driving ice-ocean model based on JRA-55 [8]) dataset is adopted for atmospheric forcing. First, a 60-year experiment (1958–2017) was performed for five cycles (i.e., total 300 years) using only the COCO model [9]. After that, an experiment coupled with the NEMURO model was performed for additional five cycles. We use the results in the last 60 years for analyses.

### 3. Ice-Algal Productivity

We addressed seasonal, interannual, and decadal variations in Ice-PP 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 (Fig. 1) [10].

Relationships of Ice-PP with snow, sea-ice, and ocean properties related to ice algae are particularly focused on. The simulated annual total Ice-PP has no common decadal trend for 1980–2009 among the five models. The multi-model averages show that ice-algal bloom timing shifts to an earlier date and the bloom duration shortens in four sub-regions (Chukchi Sea, Canada Basin, Eurasian Basin, and Barents Sea). This intercomparison indicates that an appropriate balance of stable sea-ice cover and enough light availability is necessary to retain Ice-PP.

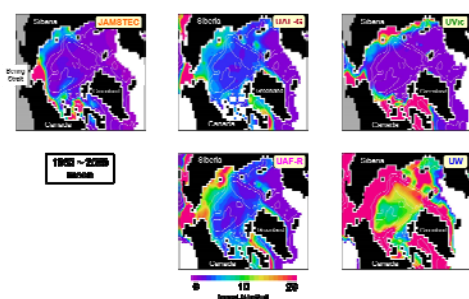


Figure 1: Annual total ice-algal productivity in five models

### 4. 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. In the fiscal year 2018, we improved transport processes of POM resuspended from the sea bottom (RPON). Consequently, the simulated sinking flux of biogenic particle becomes comparable with the sediment trap values near the Chukchi shelf break.

### 5. Global Hindcast Experiment

We examined time series at a station of our sediment trap mooring. In Northwind Abyssal Plain (Station NAP: 75°N, 162°W), the simulated sea ice concentration showed negative trends during the experiment period (1958–2017), while sea surface temperature (SST) has increased especially in the late 1990s, late 2000s, and after 2015. The annual mean phytoplankton and zooplankton biomass integrated vertically for 0–200 m have gradually increased after the mid-1970s. However, we found that sea ice cover and SST could not account for all decadal variability in plankton biomass.

### 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.

### 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] Ito, S., et al., Geographic variation in Pacific herring growth in response to regime shifts in the North Pacific Ocean. *Prog. Oceanogr.*, 138, 331–347, doi:10.1016/j.pocean.2015.05.022, 2015.
- [4] Ueno, H., et al., Temporal and spatial variation in a growth condition of Pacific salmon, *N Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.*, 6, 181–187, doi:10.23849/npafcb6/181.187, 2016.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] Tatebe H and Hasumi H., 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.
- [10] 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.