

## 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<sup>\*1</sup>, 張 圓昕<sup>\*1</sup>, 増田 良帆<sup>\*2</sup>, 野口 真希<sup>\*2</sup><sup>\*1</sup> 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<sup>\*2</sup> 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

キーワード: 北極海, 海氷海洋結合モデル, 再懸濁粒子, アイスアルジー, クロロフィル:炭素:窒素比

## 1. 研究の背景

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生態系などの環境変動を解明することを目的に、海氷海洋結合モデルを用いた数十年スケールの実験を数多く実施している。令和4年度は、1)再懸濁粒子による光遮蔽効果の解析、2)アイスアルジー基礎生産量の将来予測、3)可変型クロロフィル:炭素:窒素比の導入を進めてきた。これらは北極海に限らず生態系モデルとして先駆的な試みであり、現実的な実験設定で定量的な解析を行うことで、光と栄養塩のバランスに応じて長期トレンドの増減が変わり得る基礎生産量および高次生態系への食物連鎖に関して、不確定性のさらなる評価・低減につながる事が期待される。

## 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。本稿で報告する再懸濁粒子やアイスアルジーに着目した実験には北極海領域版を使用した。またクロロフィル:炭素:窒素比が可変型の生態系モデルを全球版に組み込んで予備的な実験に着手した。モデルや実験設定の詳細は先行研究[1-5]も参照のこと。本章では対象海域が異なる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 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 (2001-2020 年) と水平解像度 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 (1958-2100 年) をそれぞれ行った。生態系モデルは海氷-海洋間の物質交換やアイスアルジー (海氷に付着する藻類の総称) も計算できる Arctic NEMURO を使用した[2-3]。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。大西洋側の側面境界条件は気候値データセットから作成した。

## 2.2 全球海洋モデル

全球海洋を対象とした設定では、水平解像度約 1/4 度 (1,440×1,280 格子) / 鉛直 63 層の Tri-polar 座標系物理モデルに独自開発した生態系モデル FlexPFT-3D[4] を結合させる作業を現在進めている。NPZD や NEMURO など従来型生態系モデルとの最大の違いは、植物プランクトンのクロロフィル:炭素比が可変で、環境変化に対して適応 (馴化) する点である。有光層下部でクロロフィル:炭素比を海洋表層より大きくすることで、獲得する光子量を増やすことができる。また従来型では Redfield 比に固定されていた炭素:窒素比も環境に応じて変化させることができる [5]。

## 3. 再懸濁粒子による光遮蔽効果

本課題の先行研究[1]において北極海領域モデルの渦解像版に導入した再懸濁堆積物粒子の光遮蔽効果について調べる実験に着手した。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、堆積物粒子の沈降速度は 0-5 m/day の範囲で水平一様の鉛直分布を与えた。これまで海洋内部の光減衰は海水自体と植物プランクトンバイオマスにそれぞれ依存する2つの項で計算していたが、再懸濁粒子量に比例する項を新たに追加して感度実験を行った。本稿では、1 g/m<sup>3</sup>の再懸濁粒子が 1 μmol-N/L の植物プランクトンバイオマスと同じ光遮蔽効果を持つと仮定した実験結果について報告する。

まず海面への入射光は下向き短波放射の増加と海氷縁の後退に伴って大きく変化し、8月の光合成有効放射量 (PAR) はチュクチ海南部の広い範囲で 40 W/m<sup>2</sup> を超えた (図 1a)。この時期、再懸濁粒子は鉛直混合などによって特にチュクチ海中央部で海面まで達しており (図 1b)、有光層での光減衰に寄与した。再懸濁粒子による光遮蔽効果を計算しない従来の実験と比較すると、PAR が最大で 10 W/m<sup>2</sup> 低下した (図 1c)。これによって、植物プランクトンの基礎生産量が約 15m 以深で負のアノマリーを示しており、光減衰が強化されたことで下層の光合成が抑制される結果となった。一方、光合成が抑制されると栄養塩の取り込み速度も低下することで、海洋表層では栄養塩の枯渇が遅れ、8月の基礎生産量は正のアノマリーを示していた (図 1d)。この結果を踏まえて、今後は季節変化の位相や年間基礎生産量についても比較していく予定である。

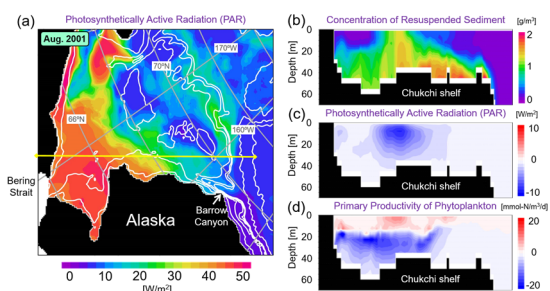


図1. 渦解像版による年々変動実験で得られた2001年8月の結果。(a)海面(海洋最上層)での光合成有効放射PAR。(a)の黄線に沿った(b)再懸濁粒子。(c)PAR。(d)植物プランクトン基礎生産量の鉛直分布。(c, d)は再懸濁粒子による光遮蔽効果を考慮しない実験に対するアノマリー。

#### 4. アイスアルジー基礎生産量の将来予測

社会経済シナリオ SSP5-8.5 の地球温暖化を想定した本実験[3]で計算されたアイスアルジー基礎生産量は北極海の多くの海域で減少トレンドを示していた(図2a)。アイスアルジー基礎生産量の支配要因としては、安定した生息基盤の有無および海水底面の光・栄養塩環境が挙げられる。バレンツ海では2-4月平均の海水氷密度が1980年代以降に減少しており(図2b)、海水後退の早期化が基礎生産量の減少に寄与している。光制限項の長期トレンドは概ね小さい一方で(図2c)、栄養塩制限項は実験初期から減少傾向にあることから(図2d)、海水融解量や河川水流入量の増加に伴う海洋表層での栄養塩濃度低下が基礎生産量減少の主要因になっていることが示唆された。

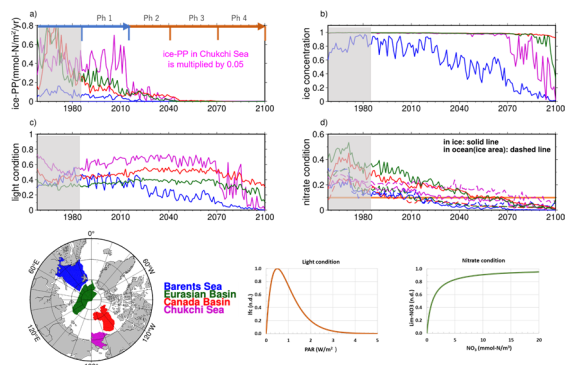


図2. 中解像版による長期変動実験で得られた1958-2100年の時系列。左下の地図で示したチュクチ海・カナダ海盆・ユーラシア海盆・バレンツ海でそれぞれ平均した(a)アイスアルジー基礎生産量、(b)海水氷密度、(c)光制限項、(d)栄養塩制限項。(a)は年間積算値、(b, c, d)は2-4月平均値。各制限項は値が0に近いほど光合成が抑制され、1に近いほど促進される(右下図)。

#### 5. 全球モデル開発の課題

全球モデルにおける北極海生態系の再現には重要なポイントがいくつか存在する。まず全球モデルの多くは太陽光の海水透過を計算しておらず、海水下の光合成を過小評価している可能性がある。そこでFlexPFT-3Dに与える光にも海水氷積雪や海水内部での透過・減衰を導入する予定である。また先行研究では、河川水による栄養塩の流入を与えていない、または実測値とあまり合っていない

濃度を与えているケースが多い。北極海への河川水の流入量は他海域に比べて極めて多いため、栄養塩流入量の有無や精度は基礎生産量の再現性に大きく影響する。本課題の領域モデルでは既に上記の要素が導入されており、これらを最先端の生態系プロセスが組み込まれた全球モデルにも適用することで、相乗効果が期待される。

#### 謝辞

本課題は北極域研究加速プロジェクト ArCSII (JPMXD1420318865)、JSPS JRP-s-LEAD Project (PI SLS)、科学研究費助成事業・学術変革領域A「デジタルバイオスフェア：地球環境を守るための統合生物圏科学/地球システムモデルによる生態系環境適応が気候へ与えるフィードバックの解明」(21H05319)/基盤研究(18H04129、21H05319、22K12342)の支援を受けて実施した。海洋研究開発機構・地球情報科学技術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., Onodera, J., Itoh, M., Mizobata, K., 2022. Transport processes of seafloor sediment from the Chukchi shelf to the western Arctic basin. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 127, e2021JC017958. <https://doi.org/10.1029/2021JC017958>.
- [2] Watanabe, E., Jin, M., Hayashida, H., Zhang, J., Steiner, S., 2019. Multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice-algal productivity on seasonal, interannual, and decadal timescales. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 124, 9053-9084. <https://doi.org/10.1029/2019JC015100>.
- [3] Hayashida, H., Jin, M., Steiner, N. S., Swart, N. C., Watanabe, E., Fiedler, R., Hogg, A. McC., Kiss, A. E., Matear, R. J., Stratton, P. G., 2021. Ice Algae Model Intercomparison Project phase 2 (IAMIP2). *Geoscientific Model Development*, 14, 6847-6861. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6847-2021>.
- [4] Masuda, Y., Yamanaka, Y., Smith, S. L., Hirata, T., Nakano, H., Oka, A., Sumata, H., 2021. Photoacclimation by phytoplankton determines the distribution of global subsurface chlorophyll maxima in the ocean. *Communications Earth & Environment*, 2, 128. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00201-y>.
- [5] Masuda, Y., Yamanaka, Y., Smith, S. L., Hirata, T., Nakano, H., Oka, A., Sumata, H., Aita, M. N., 2022. Acclimation by diverse phytoplankton species determines oceanic carbon to nitrogen ratios. *Limnology and Oceanography Letters*. <https://doi.org/10.1002/lol2.10304>.