様　式　C－19、F－19－1、Z－19　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　３ 年　 ６ 月 １６ 日現在

機関番号：８２７０６
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：１８Ｈ０３３６８

研究課題名（和文）北極海の急激な海氷減少に直面するアイスアルジーの運命

研究課題名（英文）Destiny of Arctic ice algae facing rapid sea ice decline

研究代表者
渡邉　英嗣（WATANABE, Eiji）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・副主任研究員

研究者番号：５０７２２５５０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：海氷底面（海水との境界面）に生息する珪藻類（アイスアルジー）に着目し、北極海における生息分布や基礎生産量の季節～数十年スケール変動および炭素循環における役割を調べた。生物由来粒子を通年で捉えるセディメントトラップを含む様々な測器で構成された多項目係留系を太平洋側北極海に位置するノースウィンド深海平原で設置・回収し、時系列観測データの解析を進めた。また北極海研究の国際的な枠組みであるFAMOSプロジェクトに参加している世界各国の海氷海洋生態系モデルで計算された年々変動実験結果（1979-2018年）を相互比較することで、アイスアルジー基礎生産量の時空間変動特性を不確定性も含めて明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本課題では、氷厚計・流向流速計・セディメントトラップを1つの係留系に装着し、海氷特性や直下の海流、有機物粒子としての沈降量の情報も同時に取得する世界的にも最先端でユニークな試みを実施することができた。またモデル間相互比較によってアイスアルジー基礎生産量の不確定性を定量的に評価し、長期変動も含めて信頼性の高い知見を導出した。この取り組みは北極海生態系モデリングを黎明期から成熟期に導くとともに、陸・海・空を結合させた地球システムモデルの改良、および社会的に注目されている温暖化実験の精度向上にもつながるものである。

研究成果の概要（英文）：　The bottom-tethered mooring with multiple sensors was deployed in Northwind Abyssal Plain (Station NAP18t) of the western Arctic Ocean from August 26, 2018 to August 6, 2019. The one-year record of sea-ice thickness, subsurface ocean current, and settling particle fluxes were analyzed. Then we addressed seasonal, interannual, and decadal variations in ice-algal productivity (Ice-PP) from 1980 to 2009, which were simulated by five sea ice-ocean ecosystem models. 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.

研究分野：極域海洋学

キーワード：アイスアルジー　海氷減少　セディメントトラップ　生態系モデリング

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

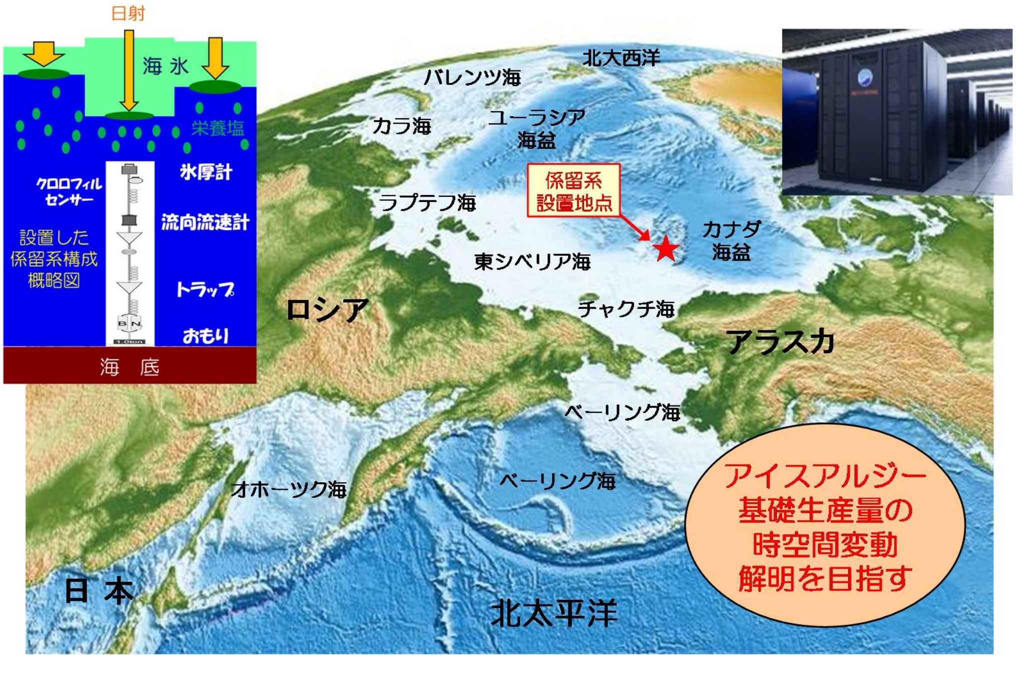
様　式　C－１９、F－１９－１、Z－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

本課題で着目するアイスアルジーは海氷底面（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、海氷が存在する北極海・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（端脚類やカイアシ類など）の生物量や生活史にとっても重要である。また夏季の海氷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。このようにアイスアルジーは海氷域における海洋生態系や物質循環の観点からも鍵となる植物種である。北極海で近年急激に進行している海氷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。海氷が薄くなれば海氷底面への太陽光の透過量が増加する一方で、海氷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。また海氷縁の後退は直接的に生息域の変化をもたらす。このように海氷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、海氷底面に生息しているという特徴から人工衛星や船舶による観測が困難で不確定性が大きいのが課題であった。

２．研究の目的

本研究の目的は、北極海におけるアイスアルジーの生息分布や基礎生産量の季節～数十年スケール変動および炭素循環に対する役割を明らかにすることである。生物由来粒子を通年で捉えるセディメントトラップ係留系観測と北極海全域を対象とした数値モデリングを融合させることで、海氷減少に直面するアイスアルジーの動態解明を目指してきた。まず海氷厚、海氷・海洋流速、クロロフィル（葉緑素）濃度、全粒子沈降量、窒素・炭素含有量、珪藻殻群集の変化を通年で明らかにするために、様々な測器で構成された海底設置型の多項目係留系を太平洋側北極海に設置し、過去に取得した時系列観測データも含めて解析を進めた（図 1）。珪藻殻の群集解析に基づいてアイスアルジーの優占度を算出するとともに、海氷厚は透過光や海氷-海洋間の物質交換、流速は水平輸送の評価に利用した。また北極海研究の国際的な枠組みである FAMOS (Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis) プロジェクトに参加している世界各国の海氷海洋生態系モデルで計算された年々変動実験結果を相互比較することで、アイスアルジーによる基礎生産量の時空間変動特性を不確定性も含めて明らかにした。



【図 1】本研究の対象海域。多項目係留系はノースウィンド深海平原で設置・回収した。

モデル領域は北極海全域および北大西洋北部（北緯 45 度以北）である。

３．研究の方法

まず本課題の１年目となる 2018 年秋に韓国極地研究所が運用する砕氷船「アラオン」の北極航海に参加し、太平洋側北極海に位置するノースウィンド深海平原（Station NAP18t）にて多項目係留系を設置し、通年時系列観測を開始した。この係留系は超音波氷厚計 IPS (Ice Profiling Sonar)、超音波多層流向流速計 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)、クロロフィルセンサー、セディメントトラップ一式で構成されており、本課題メンバーが 2013-2014 年に設置した Station NAP13t と同じ観測地点であることから、両期間を比較することで年々変動も含めて議論できる。この係留系は翌 2019 年秋にアメリカ沿岸警備隊の砕氷船「ヒーリー」で回収したが、厳しい海況などの制約があった関係で２年目データ取得のための係留系再設置はできなかった。これと並行して、周辺海域で過去に取得されたセディメントトラップ試料の分析も進めた。

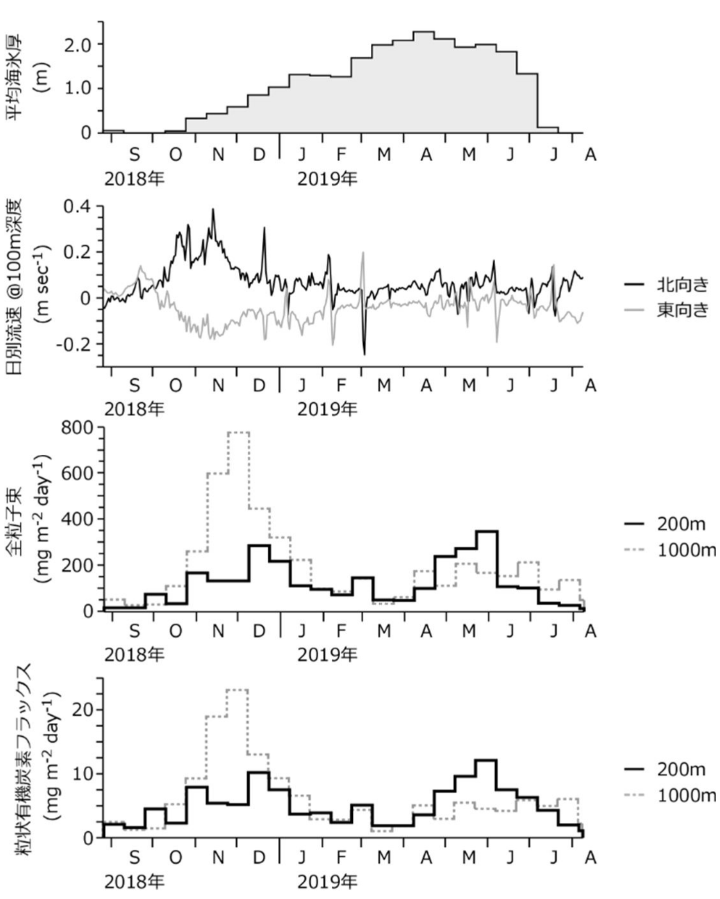
また上記の多項目係留系観測で得られた結果を海氷・海洋物理環境と生物地球化学的側面の双方から解釈するために、北極海全域を対象とした海氷海洋物理モデル COCO version 4.9 に低次海氷海洋生態系モデル Arctic NEMURO を結合させた水平 5km 格子の高解像度版で年々変動実験（2001-2019 年）を数多く実施した。さらに水平 25km 格子の中解像度版で実施した長期変動実験の結果（JAMSTEC）を FAMOS プロジェクトに参加しているアラスカ大学（UAF）・ビクトリア大学（UVic）・ワシントン大学（UW）でそれぞれ実装された計５つの海氷海洋生態系モデル（アラスカ大学は全球モデル UAF-G と領域モデル UAF-R の２つ）の出力と相互比較した。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。比較対象期間は 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	CESM	RASM	NEMO	PIOMAS
生態系モデル	海氷	Watanabe2015	Jin2006	Jin2006	Hayashida2018	Jin2006
	海洋	NEMURO*1	Moore2013	Moore2013	CanOE	NEMURO*1
モデル領域		Pan-Arctic*2 (45 - 90ºN)	Global	Pan-Arctic (30 - 90ºN)	Pan-Arctic*3 (45 - 90ºN)	Pan-Arctic (39 - 90ºN)
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 (60 layers)	5 - 250 m (45 layers)	6 - 250m (46 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	GLODAPv2	WOA05
参考文献		Watanabe et al. [2015]	Jin et al. [2018]	Jin 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

４．研究成果

まず多項目係留系(NAP18t)で取得された時系列観測データの分析を進めた(図 2)。超音波氷厚計 IPS の観測結果から、NAP18t 係留期間における海氷は 2018 年 10 月から増え始めて 2019 年 4 月に海氷厚が 2.3 m に達した。当該地点では 2013 年 9 月から 2014 年 9 月にかけての期間にも同様の係留系(NAP13t)による通年観測を実施しているが、2019 年春季の海氷厚は 2014 年春季より 50cm ほど大きかった。一方、2019 年夏季の融解の融解のペースは 2014 年夏季よりも 1 ヵ月早いことがわかった。亜表層の流向流速は、100m深のデータに見られるように 2018 年 10 月から 11 月にかけて北西流が強化されていた。それに対応するようにセディメントトラップで捕集された粒子径 1mm 以下の粒子（以下、沈降粒子として扱う）の量とトラップの捕集面積・期間に基づく沈降全粒子フラックスは、2018 年 10 月末から増え始めて同年 11-12 月に極大を示した。この期間の全粒子フラックスは 1000m 深より 200m 深の方が低いが、これに関しては亜表層の強い流れによって 200m 深での捕集効率が下がっていた可能性も考えられる。全粒子フラックスは 2019 年 4 月から 6 月初旬にかけて再び増加していた。粒状有機炭素フラックスは概ね全粒子フラックスの時系列変動と同様の変動を示した。沈降粒子に含まれる粒状有機炭素の割合は 3.0-12.2wt%で、夏季に増加していた。6 月下旬からは海氷厚の減少とともに、25m 深付近で測定したクロロフィル a 濃度の増加が見られた。しかし、この時期の粒状有機炭素フラックスは減少傾向を示していた。一般的にセディメントトラップには沈降粒子の他に「スイマー」と呼ばれるメソ動物プランクトンも捕集されるが、夏季の NAP18t 試料では端脚類の可能性が高い個体が多数捉えられた。このことから、アイスアルジーを含む生物生産が活発な夏季に粒状有機炭素フラックスが増加しなかった要因としては、動物プランクトンによる捕食圧が大きかった可能性がある。

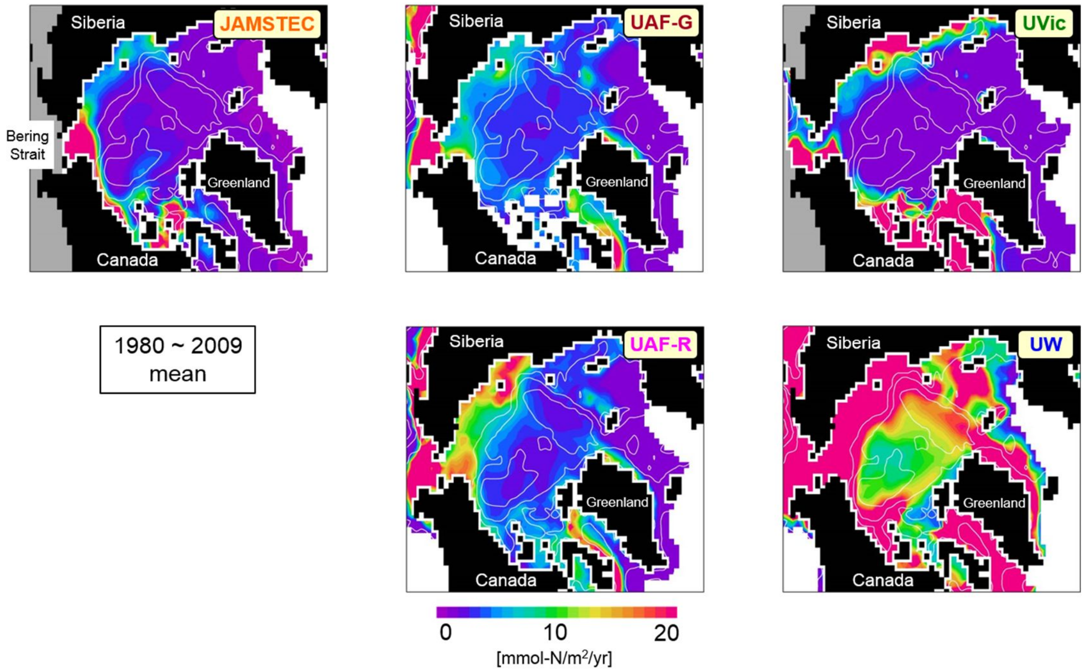


【図 2】 2018 年 8 月 26 日から 2019 年 8 月 6 日までの係留系 NAP18t（74°39.01'N 161°50.34'W, 水深 1820m）観測結果。グラフは上段から、現場の超音波氷厚計で実測された沈降粒子捕集期間別の平均海氷厚、100m 深での日平均流速、200m・1000 m深における全粒子および粒子状有機炭素の沈降フラックス。

ちなみにノースウィンド深海平原の同じ地点に係留した NAP13t では 1 月と 9 月に全粒子フラックスが極大を示しており、NAP18t との違いが見られた (Onodera et al., submitted)。冬季海氷下における全粒子フラックスの極大は、粒子の水平輸送に寄与する海洋渦の通過やチャクチ陸棚縁に沿った西向きの強い海流(Chukchi Slope Current) など海洋亜表層の物理環境を反映していることが本課題メンバーのこれまでの研究からも示唆されている。また夏季の沈降粒子フラックス極大が見られた月が NAP18t と NAP13t で異なる要因としては、光環境を支配する海氷動態や栄養塩の分布などが複合的に絡んでいる。COVID-19 による出勤制限の影響で本課題期間内に試料分析を完了できなかったが、今後も NAP13t との違いなども含めて詳細な分析を継続していく。また海洋研究開発機構と韓国極地研究所との共同研究の一環として、アイスアルジーが生成する化合物 IP25 の分析も他の有機化合物と併せて進めていく。これらの分析結果がまとまり次第、国内外の学会や査読付き国際誌などにて成果を公表していく予定である。

海氷海洋結合モデルの高解像度版では海氷による物質輸送プロセスにも着目し、海氷の熱力学的成長に伴う海氷内部への取り込みと海氷融解に伴う海洋表層への放出を表現する既存のスキームを利用してトレーサー実験も行った。これにより、北極海の中でも海氷生成が活発なバロー沿岸ポリニヤ周辺域において、海底から再懸濁した粒子がより多く海氷に供給され、海氷のボーフォート循環によって NAP 方面に西方輸送されている様子を確認した。すなわち NAP 周辺でのアイスアルジー基礎生産量は海氷輸送の上流域でもあるバロー周辺域での物質供給にも依存する可能性がある。

以降では中解像度版によるモデル間相互比較結果を報告する。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 3)。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。ちなみに海氷面積・積雪深・海氷厚は概ね減少トレンドを示していたが、海氷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。各海域および各モデルにおいて、年間基礎生産量と 9 月の海氷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氷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氷厚の間には正と負の相関が両方出ていたことから、安定した生息場所と海氷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である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。春先の積雪や海氷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、海氷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 Vmax 値の違いが大きな要因になっていることが示唆された。これらの知見を国際誌 Journal of Geophysical Research: Oceans にて公表した (Watanabe et al., 2019)。今後のモデル改良ポイントとしては、消失項や水平移流項の比較、秋季ブルーム特性などが挙げられる。



【図 3】モデル間比較したアイスアルジーの年間基礎生産量

さらに国際共同研究 IAMIP2 (Ice Algae Model Intercomparison Project phase 2)の枠組みにおいて、共通の初期条件と大気境界条件を与える長期変動実験（1958-2018 年）も実施した。このプロジェクトは上述のモデル間相互比較の後継となるもので、引き続き水平 25km 格子の中解像度版を用いたが、大気境界条件を従来の NCEP-CFSR から IAMIP2 で指定された JRA55-do に差し替えるためにソースコードを改良した。この結果を解析することで、北極海全体で積算したアイスアルジー基礎生産量が 1970 年代をピークに現在にかけて減少傾向にあり、結氷期間の短縮に伴ってアイスアルジーが生息しにくい環境にシフトしていることが示唆された。引き続き 2100 年までの将来予測実験を実施し、北極海の海氷が夏季に消失するような状況下でのアイスアルジーの応答（運命）を定量的に評価していく予定である。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計1件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　1件／うちオープンアクセス　1件）

１．著者名 Watanabe, E., M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner	４．巻 124
２．論文標題 Multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice-algal productivity on seasonal, interannual, and decadal timescales	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	６．最初と最後の頁 9053-9084
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JC015100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕　計12件（うち招待講演　0件／うち国際学会　10件）

１．発表者名 Watanabe, E., M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner
２．発表標題 Multi-model intercomparison of ice-algal productivity in the Arctic Ocean on seasonal, interannual, and decadal timescales
３．学会等名 Arctic Science Summit Week Science Symposium（国際学会）
４．発表年 2019年

１．発表者名 Watanabe, E., M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner
２．発表標題 FAMOS multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice algal productivity on seasonal and decadal timescales
３．学会等名 Integrated Marine Biosphere Research (IMBeR) Open Science Conference（国際学会）
４．発表年 2019年

１．発表者名 Watanabe, E., M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner
２．発表標題 FAMOS multi-model intercomparison of ice-algal productivity in the Arctic Ocean on seasonal, interannual, and decadal timescales
３．学会等名 International Glaciological Society (IGS) Sea Ice Symposium（国際学会）
４．発表年 2019年

１．発表者名
渡邉　英嗣, M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner

２．発表標題
北極海におけるアイスアルジー基礎生産量のモデル間相互比較

３．学会等名
日本海洋学会秋季大会

４．発表年
2019年

１．発表者名
Watanabe, E., M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner

２．発表標題
Multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice-algal productivity on seasonal, interannual, and decadal timescales

３．学会等名
Ocean Sciences Meeting（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
Watanabe, E., and J. Onodera

２．発表標題
Modeling study on resuspended particle transport in the western Arctic Ocean

３．学会等名
Sixth International Symposium on the Arctic Research (ISAR-6) Online Meeting（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
Watanabe, E., M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner

２．発表標題
Multi-model intercomparison of ice algal productivity on the Arctic sub-region scales

３．学会等名
Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis (FAMOS) Workshop（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Watanabe, E.

２．発表標題
FAMOS multi-model intercomparison of ice algal productivity on the Arctic sub-region scales

３．学会等名
Pacific Arctic Group (PAG) Science Symposium（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Watanabe, E.

２．発表標題
Perspective from FAMOS multi-model intercomparison of ice algal productivity

３．学会等名
Japan - U.S. Arctic Science Collaboration Workshop（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Watanabe, E.

２．発表標題
Sea ice-ocean modeling study collaborated with the western Arctic sediment trap

３．学会等名
POLAR 2018 SCAR/IASC Open Science Conference（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Watanabe, E., M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner

２．発表標題
FAMOS multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice algal productivity on seasonal and decadal timescales

３．学会等名
America Geophysical Union (AGU) Fall Meeting（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名 小野寺　丈尚太郎, 渡邉　英嗣, 溝端　浩平, 田中　裕一郎, 伊東　素代, 原田　尚美
２．発表標題 Lateral advection of biogenic particles in the southwestern Canada Basin, Arctic Ocean
３．学会等名 日本地球惑星科学連合大会（JpGU）
４．発表年 2018年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

―

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	伊東　素代 (Itoh Motoyo) (60373453)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・副主任研究員 (82706)	
研究分担者	小野寺　丈尚太郎 (Onodera Jonaotaro) (50467859)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・主任研究員 (82706)	
研究分担者	鈴木　淳 (Suzuki Atsushi) (60344199)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究グループ長 (82626)	
研究分担者	田中　裕一郎 (Tanaka Yuichiro) (50357456)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究部門長 (82626)	

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of Alaska Fairbanks	University of Washington		
カナダ	University of Victoria	Institute of Ocean Science		
オーストラリア	University of Tasmania			