

令和元年6月18日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H01736

研究課題名(和文) 西部北極海の海水減少と海洋渦が生物ポンプに与える影響評価

研究課題名(英文) Influence of sea ice loss and oceanic eddies to biological pump condition in the western Arctic Ocean

研究代表者

小野寺 丈尚太郎 (ONODERA, Jonaotaro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任研究員

研究者番号：50467859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：海水減少が進む北極海太平洋側において、海洋物理環境(海洋表層循環や海洋渦の動態)と生物源粒子(プランクトン遺骸など)や陸源碎屑物の陸棚から海盆側への輸送との関連を調査した。陸棚縁辺部および海盆側(陸棚斜面域)に設けた定点観測点では、陸棚起源物質の供給が断続的に増加し、その現象は海洋表層循環場の状況に応じて陸棚起源の粒子を取り込んだ太平洋起原水や海洋渦の移流を反映していた。2011～2018年において研究海域の海洋循環場は大きく経年変動をしており、その動態が海盆域における陸棚物質の供給域の分布やそれらを消費する海盆側の低次生態系にも影響を与えていることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

対象海域における年間を通じた海中の現場観測は事例が少なく、貴重な観測データを得ることができた。本課題で得られた観測データや研究成果は、北極海の環境変化にともなう生態系への影響など環境動態把握の一助となることが期待される。北極海中央域では、今後の海水減少に伴い海洋資源の活用が期待されているが、その一方で環境保全に向けた北極生態系の動態理解はまだ不十分である。2017年秋に、少なくとも今後16年間は北極海において商用漁業を規制する取り決めが国際的に交わされた。それまでに多くの観測研究から環境評価を進める必要があり、本課題で得られたデータや成果は、その課題の基礎的な部分で貢献しうるものと思われる。

研究成果の概要(英文)：We studied relationship between physical oceanographic condition (dynamics of sea-surface current system and oceanic eddies) and transportation of shelf materials (such as plankton remains and lithogenic matters) to basin in Pacific side of the Arctic Ocean (western Canada Basin and Chukchi Borderland) where recent sea-ice reduction is remarkable. Annual and interannual fixed-point observation using sediment trap mooring showed that supply of shelf-origin particles increased when lateral advection of Pacific-origin water and oceanic eddies containing shelf matters reached to the monitoring stations. It was suggested that large interannual differences on physical oceanographic dynamics for 2011-2018 changed the distribution of laterally transported shelf-origin matters in offshore side of study region. It is suggested that those hydrographic changes influence to lower-trophic ecosystems applying shelf-origin matters in the basin side.

研究分野：生物海洋学、古海洋学

キーワード：北極海 海洋物理 海洋循環 海洋渦 物質循環 セジメントトラップ 海洋低次生態系

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

北極海では 2000 年代から夏季海水面積の減少傾向が特に顕著になった。国内外の研究者が精力的に観測を行っているカナダ海盆西部(図 1)では、直径が 100km を超える巨大暖水渦が 2010 年にアラスカ北端のバロー沖合で初めて観測され (Nishino et al. 2011)、海水減少に伴う海洋表層循環の強化との関連が指摘されている。

バロー沖で発生する海洋渦は、太平洋を起源とする陸棚沿岸水からの熱、淡水、栄養塩、生物および鉱物粒子を北極海の内海側へ輸送するため、西部北極海の生物生産を介した炭素などの物質循環に影響を与える。従って、海水減少に伴う海洋循環の変化は、生物ポンプなど生物を介した物質循環系の変化に直結する。

研究代表者らは、2010 年 10 月から 4 年間にわたり西部北極海のノースウィンド深海平原 (NAP 地点) に、沈降粒子を時系列で捕集する観測装置「セジメントトラップ」の係留観測点を設置した。この係留系観測と「地球シミュレータ」を用いた北極海物理・生態系モデリングの連携研究によって、(1)陸棚物質を取り込んだ海洋渦が陸棚縁辺から 100km 沖合に位置する NAP 地点まで移流すること、(2)海洋渦の移流によって生物生産の低い初冬にも多くの粒子状有機物が陸棚から海盆へ輸送されていたことが分かった (Watanabe et al. 2014)。さらに、(3)海水減少に伴い物質の水平輸送に寄与する渦形成量が 1990 年代から倍増しており、今後も増加することが数値モデルによって示された。渦による物質水平輸送は、カナダ海盆南西部の生物生産の増加と生物ポンプ効果の改善に繋がる可能性がある。これまでは渦到達域である NAP 地点での観測研究に注力してきたが、海洋渦による陸棚から海盆への物質輸送や生物ポンプへの影響を把握するためには、渦形成域の時系列観測も重要である。物理場の年々変動が大きいカナダ海盆南西部における沈降粒子の時系列観測は NAP 地点以外に実施されておらず、今後の低次海洋生態系と物質循環プロセスの動向を監視するために経年観測の継続が必要な状況であった。

## 2. 研究の目的

上記の背景をふまえて、本課題では、海洋渦の到達域である NAP 地点に加え、これまで沈降粒子の時系列観測が行われてこなかった海洋渦形成域を研究対象とし、渦の移動経路に沿った沈降粒子量の変化とプランクトン群集および生物ポンプ効果への影響の解明、および数値モデルによる海洋物理場と生物ポンプ効果への面的な影響評価を行うこととした。

## 3. 研究の方法

### (1) 北極海太平洋側における海洋表層の循環場と時空間変動の観測

研究海域の表層循環の動態を大局的につかむため、人工衛星に搭載されたレーダー高度計による観測データから、2011~2018 年の海面力学高度および海面における絶対流速を算出した。

### (2) 時系列セジメントトラップ係留系による海洋沈降粒子の定点捕集観測

海洋渦による太平洋起源水や陸棚起源粒子、太平洋起源プランクトンの取込と沈降粒子フラックス変動への影響を捉えるため、水温・塩分・流向流速センサーなどを伴うセジメントトラップ係留系を設置し、2015 年 9 月から約 4 年間にわたり現場定点の時系列海洋観測を実施した。1 年目に現場へ出向いた際、本課題申請時に計画した観測点では海氷に覆われていたことにより係留系の設置作業ができなかった。バロー海底谷北方沖に設定した観測点 NBC は、計画よりも陸棚寄りの海洋渦到達域に設置した(図 1)。NBC の西方約 300km の表層海流系の下流にあたる観測点 NAP 向けに用意した係留観測機材は、バロー海底谷以外からカナダ海盆への太平洋起源水の流入を探るため、ハンナ海底谷北部の観測点 NHC に投入した。NAP 地点は 2010 年 10 月から約 4 年分の既存試料があるため、その試料を解析することとした。また最も西側に位置する係留点 CAP の観測結果も利用した。各観測点のデータを比較し、海流や海洋渦によって輸送される生物源および陸棚碎屑物の沈降量と沈降粒子組成がどのように異なるか調査した。現場観測作業には、海洋研究開発機構が保有する海洋地球研究船「みらい」およびカナダ沿岸警

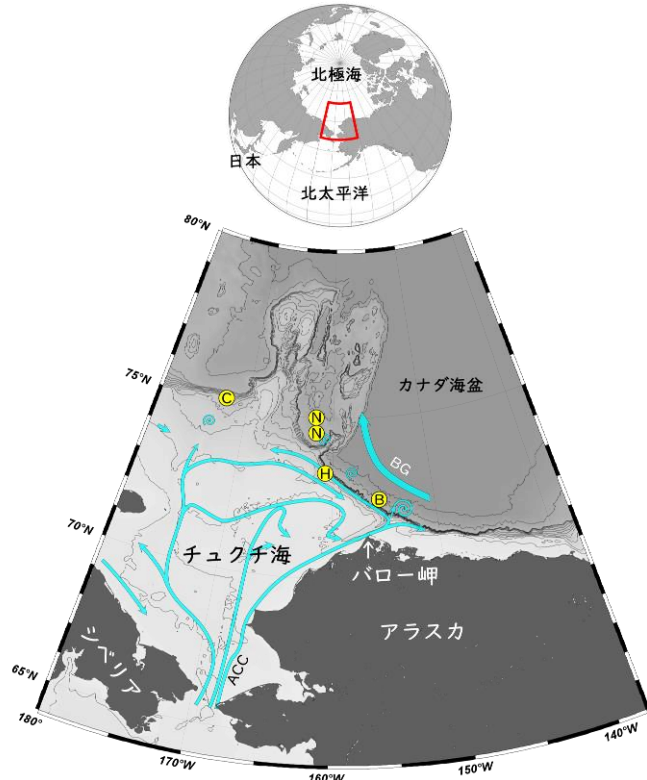


図 1. 研究海域と表層海流系 (Corlett and Pickart 2017)。観測点 ① NBC, ② NHC, ③ NAP, ④ CAP

備隊所属砕氷船「S. W. Laurier」の研究観測航海を利用した。

### (3) 数値モデル実験

海洋物理環境と海中懸濁粒子の水平・鉛直輸送の時空間的な変動を理解するにあたり、現場係留観測データだけでは空間的な動態変動の理解に限られる。そこで、海洋研究開発機構の地球シミュレータを用い、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 格子の渦解像版で数値実験を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 北極海太平洋側における広域の海洋表層循環場の経年変動

本研究で得られた新規の海面力学高度データセットによる 2011 年～2018 年の夏季 (7 月～9 月平均場) における海面力学高度分布・海洋循環場とその変動を図 2 に示す。チャクチ海では、ベーリング海峡からバロー海底谷まで続くアラスカ沿岸流が見られ、ロシア沿岸域でも岸を右手に見て流れる沿岸流が見られる。また、カナダ海盆に中心を置く高気圧性循環、ポーフォート海洋循環が見られ、海面力学高度が 2015 年以降、徐々に上昇している傾向も見出された。ポーフォート循環中心域における海面力学高度の上昇には、エクマン収束による淡水量の増加が要因として挙げられる。海面力学高度の時空間変動をより明らかにするため、500m 以深の海面力学高度に対して主成分分析を施した (図 3)。EOF 第 1 モード (変動の分散の 36.6% を説明) はカナダ海盆およびマカロフ海盆付近で同様に変動し、EOF 第 2 モード (変動の分散の 16.6% を説明) はカナダ海盆とマカロフ海盆で符号が逆転する反対称モードを示した。EOF 第 1 モードのスコアが正となる期間 (例えば、2013 年 3 月や 2014 年 7 月～2016 年 6 月まで) は、ポーフォート海洋循環の西方への拡大が見られた。

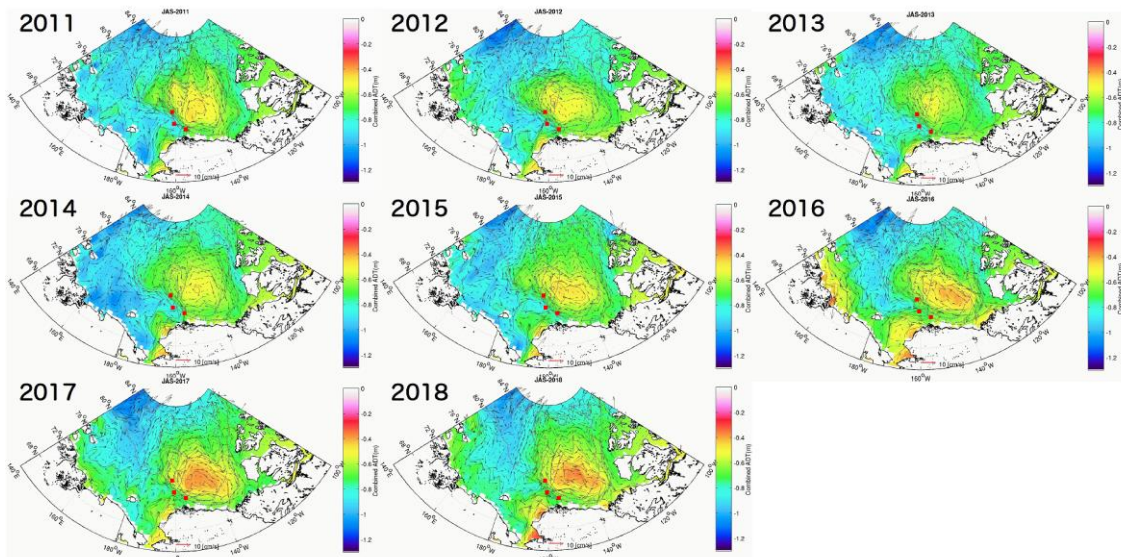


図 2. レーダー高度計から得られた海氷の影響を除いた太平洋側北極海 (7-9 月) の海面力学高度および流速分布の平均場。各地図内の赤点は、西から観測点 NAP, NHC, NBC の位置を示す。

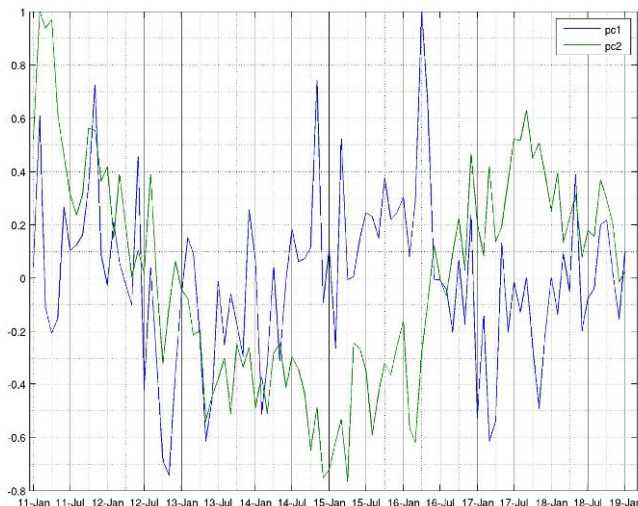


図 3. 2011 年から 2018 年にかけて、深度 500m 以深の海面力学高度に対して実施した主成分分析の EOF 第 1 モード (青線) および第 2 モードのスコア



(2)現場観測と数値モデル実験に基づく粒子輸送の動態理解

各観測点における沈降粒子フラックスは、基礎生産が増加する夏季だけでなく、生産が限られる冬季においても、海洋渦の通過イベントや太平洋起源の夏季水や新たな冬季水の流入が増加したイベントにあわせて増加していた(図4)。ほぼ対象領域が海水に覆われる1月~3月の平均場は、夏季(図2)とは異なる様相を示した。Mizobata et al. (2016)は海面応力に応答したポーフォート循環の強化・西方への拡大や、粒子追跡法による太平洋起源水のチャクチボーダーランド(CBL)より西方への輸送を指摘した。2016年冬季においても同様のCBLより西方への太平洋起源水の輸送が示唆された。観測点CAPでは2013年3月に亜表層水温極大と粒子フラックスの極大を捉えた。CAPでの現象も、太平洋起源の暖かな夏季水が陸棚域北縁を西方に輸送されたことを反映したものであることが数値モデル実験により分かった(Watanabe et al., 2017)。粒子フラックスの極大も、その移流を反映したものと考えられた。観測点NHCでも西向きの海流が卓越し、太平洋起源水の海盆への流入は目立たなかった。また、2018年冬季はCBL付近の北上流が強化されており、陸棚側からの熱や粒子の北方輸送に寄与した可能性がある。

捕集された粒子組成は、各観測点で陸源碎屑物が最も多く、粒状有機物は年平均で8-15重量%であった。チャクチ海から海盆側へ水平的に輸送されてきた粒子は、屑物だけでなく生物源粒子も含んでおり、それらを消費する海盆域のプランクトンや底生生物、微生物の生態系に寄与する。年間の沈降粒子フラックスは、全観測点(NBC, NHC, NAP, CAP)のうちNBCで最も高く、深度250mで $362 \text{ g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ を観測した(2015年9月-2018年8月)。海洋表層循環下流域NAPの年間沈降粒子フラックス(図5)は深度215mで $16 \text{ g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ であった(2010年10月-2014年9月)。そのうち、流向流速計などを係留していた2013年9月からの1年間で、NAPで海洋渦の通過期間に捕集された粒子は、その1年間に得られた粒子量のうち少なくとも約20%を占めた。沈降粒子フラックスの経年変動は、表層海洋循環場の変動と対応する場合が多かった。観測点NAPで2012年に沈降粒子フラックスが低く陸源粒子の割合も低かったのは、貧栄養で粒子の少ないカナダ海盆からの水塊に覆われやすい状況を反映したためである。一方、2017年から2018年にかけての冬季に観測点NBCで沈降粒子フラックスが増加したのは、チャクチ海東部からカナダ海盆の一带における表層海洋循環の強化と関連する可能性があり、試料の分析が完了次第、詳しい検討が要る。

これらの結果から、陸棚起源の水塊を内包する海洋渦が係留点付近に到達する確率と到達するタイミング、および陸棚起源物質のカナダ海盆やCBL域における供給量や組成の水平分布は、渦自体を輸送する海盆スケールの流れ場の季節経年変動に大きく依存することが分かった。

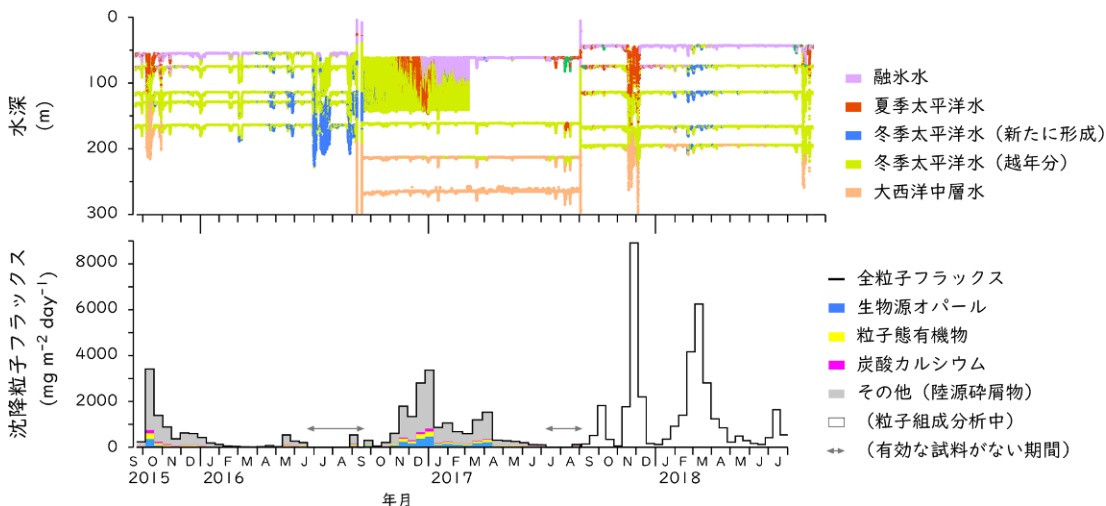


図4. 観測点NBCにおける係留観測から得られた上部水柱の水塊分布(上段)および深度260m付近における沈降粒子フラックス(積上げグラフ)の時系列変動

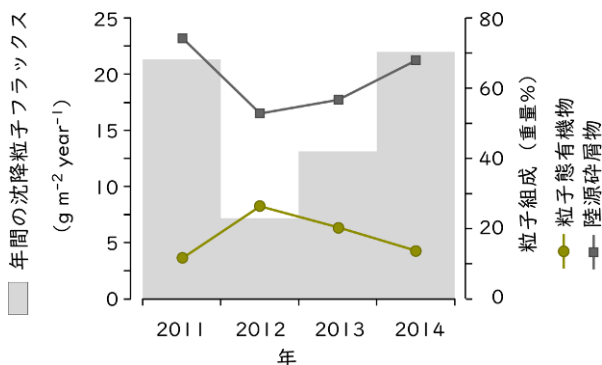


図5. 観測点NAP 深度190-260mにおける沈降粒子の年間フラックスと粒子組成の経年変動。2014年は1-9月のデータに基づく(フラックスは過小評価となる)。

### (3) 数値モデルによる粒状有機物沈降フラックスの再現

この取り組みについては、陸棚（チャクチ海）から海盆への再懸濁有機物粒子の輸送および沈降プロセスの再現が難航し、まだ満足には達成できていない。主な原因は、現場の粒子径サイズ・重量・沈降速度の実測データが少なく、数値モデルを実測値に基づき検証しながら改善する作業が十分に進まなかったためである。そこで2018年度に回収された沈降粒子試料の粒形分布分析を別途進めており、このトピックについては、今後まとまった成果が得られ次第公表していく。

### (4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望

本課題によって得られた観測データや研究成果は、北極海中央部において海氷減少の影響を受け始めている低次生態系の今後の動態理解の一助になるものと期待される。本課題は、2000年代以降の著しい海氷減少に伴い変化を続ける北極海の物理環境と生物源粒子の水平・鉛直輸送に関する状況を捉える研究課題である。2017年秋に、少なくともこの先16年間は北極海において漁船の立ち入りを規制する取り決めが国際的に交わされた。その間に、北極海における海洋生態系や漁業資源の調査などを進め、関連する様々な知見を得ることが求められており、本課題のデータや知見は基礎的な成果として有効なものと考えられる。なお、本課題で得られた一連の観測データについては、2019年秋に国立極地研究所のデータベース Arctic Data Archive System (ADS)に登録され、随時公開される予定である。

本課題を含むこれまでのセジメントトラップ係留観測の継続をきっかけにして、本課題の西側で同様の観測を始めた韓国極地研究所と、海洋低次生態系と物質循環に関する共同観測研究を進めることになった。数値モデル研究関連では、本課題を含む一連の数値モデル研究をきっかけとして、海氷藻類（アイスアルジー）による基礎生産量を海外の類似モデルと比較検証しながら時空間変動メカニズムを明らかにする科研費課題が新たに採択されて別途進行中であり、本課題と併せてさらなる成果が期待される。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Koki Tokuhira, Yoshiyuki Abe, Kohei Matsuno, Jonaotaro Onodera, Amane Fujiwara, Naomi Harada, Toru Hirawake, Atsushi Yamaguchi “Seasonal phenology of four dominant copepods in the Pacific sector of the Arctic Ocean: Insights from statistical analyses of sediment trap data”, *Polar Science* 19, 94-111, 2019, 査読付, DOI:10.1016/j.polar.2018.08.006
- ② Eiji Watanabe, Jonaotaro Onodera, Motoyo Itoh, Shigeto Nishino, Takashi Kikuchi “Winter transport of subsurface warm water toward the Arctic Chukchi Borderland”, *Deep-Sea Research Part I* 128, 115-130, 2017, 査読付, DOI: 10.1016/j.dsr.2017.08.009
- ③ Kohei Mizobata, Eiji Watanabe, Noriaki Kimura “Wintertime variability of the Beaufort Gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations” *Journal of Geophysical Research-Oceans* 121, 1685-1699, 2016, 査読付, DOI:10.1002/2015JC011218
- ④ Jonaotaro Onodera, Eiji Watanabe, Shigeto Nishino, Naomi Harada “Distribution and vertical fluxes of silicoflagellates, ebridians, and the endoskeletal dinoflagellate *Actiniscus* in the western Arctic Ocean”, *Polar Biology* 39, 327-341, 2016, 査読付, DOI:10.1007/s00300-015-1784-y
- ⑤ Eiji Watanabe, Jonaotaro Onodera, Naomi Harada, Noguchi Maki Aita, Akio Ishida, Michio J. Kishi “Wind-driven interannual variability of sea ice algal production in the western Arctic Chukchi Borderland” *Biogeosciences* 12, 6147-6168, 2015, 査読付, DOI: 10.5194/bg-12-6147-2015

[学会発表] (計 41 件)

- ① 徳弘 航季 他 (小野寺 丈尚太郎 含む) “北極海におけるカイアシ類群集構造の季節変化およびその海域間比較” 海洋生物シンポジウム, 2019.
- ② 渡邊 英嗣 “西部北極海における再懸濁粒子の輸送モデリング” J-ARC Net 共同研究集会, 2018.
- ③ Eiji Watanabe “Sea ice-ocean modeling study collaborated with the western Arctic sediment trap” POLAR 2018 SCAR/IASC Open Science Conference, 2018.
- ④ 村松 美幌 他 (渡邊 英嗣, 小野寺 丈尚太郎 含む) “チャクチ海北東部陸棚縁辺部における太平洋起源水の移流について” 日本海洋学会秋季大会, 2018.
- ⑤ Jonaotaro Onodera 他 “Lateral advection of biogenic particles in the southwestern Arctic Ocean” 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.
- ⑥ Jonaotaro Onodera 他 “Settling particle flux and the possible influence of surface atmospheric forcing in the southern Northwind Abyssal Plain” Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5), 2018.
- ⑦ Eiji Watanabe “Arctic sea ice-ocean modeling study in collaboration with sediment trap measurements” IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly, 2017, 招待講演.

- ⑧ Eiji Watanabe 他 “Shelf-basin interaction: its impact on Arctic marine biological pump” Japan-Norway Arctic Science and Innovation Week (ASIW), 2016.
- ⑨ Kohei Mizobata 他 “Validation/calibration of sea surface salinity estimated by L-band microwave radiometers SAC-D/Aquarius in the Pacific sector of the Arctic Ocean” Ecosystem Study for Sub-Arctic and Arctic Seas (ESSAS) 2016 Annual Meeting, 2016.
- ⑩ Jonaotaro Onodera 他 “Diatom settling flux reflecting hydrographic change in the western Arctic Ocean, 2010-2012” Forth International Symposium on the Arctic Research (ISAR-4)”, 2015.
- ⑪ Kohei Mizobata 他 “Intra-seasonal variability of the Beaufort Gyre and its impact on the fate of Arctic Sea ice in the Pacific sector of the Arctic Ocean” European Geophysical Union General Assembly 2015, 2015.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：田中 裕一郎

ローマ字氏名：(TANAKA, Yuichiro)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：地質調査総合センター

職名：研究部門長

研究者番号 (8桁)：50357456

研究分担者氏名：渡邊 英嗣

ローマ字氏名：(WATANABE, Eiji)

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：北極環境変動総合研究センター

職名：研究員

研究者番号 (8桁)：50722550

研究分担者氏名：溝端 浩平

ローマ字氏名：(MIZOBATA, Kohei)

所属研究機関名：東京海洋大学

部局名：海洋環境科学部門

職名：助教

研究者番号 (8桁)：80586058

※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、研究者個人に帰属されます。