

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04350

研究課題名（和文）西部北太平洋域における海洋の一次生産に対する人為起源エアロゾルの影響評価

研究課題名（英文）Impact of Anthropogenic Aerosols on Marine Primary Productivity in the Western North Pacific

研究代表者

相田 真希 (Aita, Maki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・グループリーダー

研究者番号：90463091

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では主に海表面に沈着する物質と海洋の一次生産の関係に注目した調査解析を実施した。その結果、雨水中に硝酸塩およびアンモニウムといった高濃度の窒素栄養塩が含まれており、貧栄養な亜熱帯域の海表面の一次生産を促進させていたこと、またダストを介した鉄沈着量の解析から、北西部北太平洋亜寒帯海域の基礎生産全体に対し、最大30%程度を担っていることが見積もられた。降雨や黄砂など、栄養塩が枯渇する時季にイベント的に沈着する栄養塩物質は、海洋の一次生産力を上げていることが本研究から定量的に明らかになり、特にこれまでの海洋物質循環モデルの研究において、大気物質沈着の効果を過小評価している可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、アジア塵による溶存鉄フラックス量を定量化し、北太平洋亜寒帯海域西部の一次生産に必要な鉄分の約3割を担っていることを明らかにしたことは、これまで大気沈着による生物生産を過小評価していた当該分野にとって大変重要な成果であると考えられる。最新の地球システムモデルによるシミュレーション実験結果では、北太平洋の一次生産に与える影響は温暖化よりも栄養塩排出の影響が支配的であることが推察されている一方で、大気エアロゾル付加については未だ定量化できていない要素であり (Planetary Boundary, Persson et al., 2022)、プロセスを詳細に理解し、評価する必要がある。

研究成果の概要（英文）：We conducted field observations and analysis to investigate the relationship between aerosol deposition and marine primary production. Our results indicated that primary production increased after rainfall in the subtropical western North Pacific, and analysis of nutrients in the rainwater revealed high concentrations of nitrate and ammonium. The analysis of iron deposition in Asian dust was estimated to be responsible for up to 30% of the total primary production in the subarctic western North Pacific. This study quantitatively showed that nutrient deposition from rainfall and Asian dust during nutrient-deficient seasons contributes to marine primary productivity. In particular, our results also suggest that previous biogeochemical modeling studies may have underestimated the effects of atmospheric deposition.

研究分野：海洋物質循環、生物地球化学、同位体生態学

キーワード：大気エアロゾル 鉱物粒子 海洋一次生産 大気モデル 海洋生態系モデル TEP

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、経済活動の急速に活発化に伴い、東アジア地域から排出される微小な大気エアロゾル = PM2.5 エアロゾルの増加が、地球温暖化にどのような影響を及ぼすのか、その評価が喫緊の課題となっている (e.g. Duce *et al.*, 2008)。アジア地域から放出された PM2.5 エアロゾルは、偏西風帯の影響で日本近海や外洋域にも輸送される。この人為起源エアロゾルの海洋沈着と一次生産の関係について、申請者らが行っ

た数値モデル実験によれば、亜熱帯海域など窒素が著しく欠乏した海域にエアロゾルが沈着することにより、海表面の一次生産量を 2 倍程度増加すると共に、混合層内の物質循環にも影響を与えうる可能性が示唆された (Taketani *et al.*, 2018)。これは、エアロゾルの中に、生物の必須元素である窒素やリン、鉄等といった栄養塩が含まれており、それが海面に沈着することによって、藻類の生産を高めるためである。この結果に付随して、生物生産に影響を与えた海域は、エアロゾルが多く沈着した東シナ海その他、黒潮の外側の外洋域で最も生産が高まるという結果も得られている。この理由として、エアロゾル沈着の効果により一次生産が強化され、その水が南方から水平輸送されたためと推察されるが、実海域の観測において、大気を介して輸送される大陸起源の物質がどこでどれだけ発生し、そして実際にどの程度、海洋に沈着し、海洋生物に影響を与えうるのか定量的な解釈には未だ至っていない。この背景に、試料の量的な問題から定量的な解釈が困難であること、またエアロゾルの海洋への沈着は短期かつイベント的な事象が多いこと、得られる観測データが時空間的に極めて限定的なことに加え、学問的に大気化学と生物海洋学、さらに地質学の調査研究に乖離があり、分野を跨いだ統合的研究がなされていない事が挙げられる。

2. 研究の目的

本研究では、大気エアロゾルの中でも化学的に安定な 2 種の粒子トレーサー：人為活動などによる「燃焼起源過程」より排出される PM2.5 エアロゾル中の BC 粒子と、「陸域自然起源」に由来する鉍物粒子に着目し、東アジア域から排出される大気エアロゾルが、どれだけ海洋に沈着し、西部北太平洋域の一次生産に影響を与えうるのかを定量的に評価することを目的とした。船舶を用いた洋上及び海中の大気エアロゾル物質の調査観測と、数値モデリングによる両輪から、大気エアロゾルと、海洋内部における水平輸送や鉛直混合など複合的な各プロセスの一次生産への寄与率を推定する。

3. 研究の方法

本研究では、実海域における調査観測と数値モデルを組み合わせることによって、北太平洋域における一次生産に対する人為起源エアロゾルの影響を定量的に評価する。このために、

- (1)西部北太平洋域の季節を通じた観測・試料採集、
 - (2)ブラックカーボン (BC) 粒子、鉍物粒子による発生源・寄与率の推定、
 - (3)大気化学輸送モデル - 海洋生態系モデルの構築、
- を遂行する。

(1) 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が所有する海洋地球研究船「みらい」により、2020 年 (令和 2 年) から 2021 年 (令和 3 年) にかけて実施される北西部太平洋亜熱帯海域の観測定点 KEO (32N, 144E)、KEOS (25N, 145E) および亜寒帯海域の観測定点 K2 (47N, 160E) にて、表層から 500m 程度までの複数層にわたる採水を行う。海表面に浮遊している TEP (Transparent Exopolymer Particles: 酸性多糖類がゲル状になったプランクトン分泌物) に大気降下物が吸着し、深層への輸送に関与していると考えられており、(2) の分析を行うと共に、TEP の鉛直濃度分布を定量する。更に、現場の藻類が受けているエアロゾル沈着による栄養塩供給の影響を探るため、船上培養による光合成光曲線実験を行う。

(2) BC 粒子では、「みらい」における観測に加えて、長崎県・福江島に常設された BC 計 (BCM3130、日本カノマックス) による大気 BC 濃度の通年観測結果を利用しつつ、(1) により得られる海水試料を用いて海表面に懸濁する BC 粒子の濃度を定量する。海表面懸濁 BC 粒子の分析では、これまで雨・雪中 BC 粒子定量のために整備してきた液相粒子抽出器 (Marin 5, CETA Ctechnologies) と SP2 を組み合わせたシステムを使い、大気-海洋間と統一した計測手法を用いる。この分析には海水のような高塩分濃度が問題となるが、透析脱塩処理などを用いて対応する。鉍物粒子の分析ではカソードルミネッセンス (CL) 法を石英粒子に応用した分析手法 (Nagashima *et al.*, 2017) を用いる。これまでに行った黄砂試料分析では、ゴビ砂漠、タクラマカン砂漠別に分離できることが分かった。これを更に発展させ、(1) で採水・採取した試料内に含まれる石英について“粒子単位”で分析し、ダスト、河川起源 (オホーツク海系、ベーリング海系)、黒潮起源、火山灰起源など「自然起源物質」の供給源の推定や季節を通じた一次生産への寄与の割合

を推定する。

(3) 大気化学輸送モデル (CHASER, Sekiya *et al.*, 2018) では、海洋低次生態系 - 物質循環モデル (図5) の入力データとして、陸域起源エアロゾルに含まれる窒素・リン酸といった栄養塩・BC 粒子の大気からの沈着量を推定する。そのために、既に実装されている窒素・BC 粒子に加え、リン酸に関わる放出・変質・除去といった大気中のプロセスを新たに大気化学輸送モデルに組み込む。また、海洋面に沈着・沈降した粒子態がどのように海水中を移流拡散したのか、これを理解するために海洋生態系モデルでは、粒子トレーサーによる実験を行う。

4. 研究成果

(1) 大気を介した物質と一次生産量の関係

雨水による一次生産への影響

アジア域由来の人為起源エアロゾルによる一次生産への影響評価のために、北西太平洋亜熱帯域で実施された MR21-06 Leg2 (2021 年 12 月 18 日 ~ 2022 年 1 月 13 日) において、複数測点で海表面の一次生産力の測定を行った。貧栄養海域ながらも高い一次生産力を呈した測点では、サンプリング前に降水があったことが事後解析から判明した。この事実から、雨を介した大気からの栄養塩供給が一次生産力を高めたことが示唆された。これを詳しく調査するために、アジア域からの人為起源大気微量物質が多く到達すると考えられる春季に西部北太平洋で実施された観測航海 MR22-03 (2022 年 4 月 16 日 ~ 5 月 19 日) において、これまでの観測で示唆された植物プランクトンへの雨水影響を検証するための追実験を実施した。亜熱帯 ~ 亜寒帯域間の各測点の表面海水に同海域で採取した雨水を添加する培養実験を実施したところ、貧栄養な亜熱帯域の海水では雨水添加後にクロロフィル量が増加し、一次生産量の増大を捉えることに成功した。添加した雨水の成分分析では、高濃度の窒素栄養塩(硝酸イオン: 約 45 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 、アンモニウムイオン: 11 $\mu\text{mol L}^{-1}$) が含まれていたことから、西部北太平洋亜熱帯域では人為起源物質が海洋の生物生産に大きなインパクトを及ぼす可能性があることが示唆された。

北西部北太平洋の TEP 濃度の分布

海洋表層における TEP 濃度は、亜熱帯域よりも亜寒帯域で高くなる傾向を示し、クロロフィル濃度と整合的であったが、クロロフィル当たりの TEP 生成量はむしろ亜熱帯域の方が高く、貧栄養海域での効率的な TEP 生成が認められた。クロロフィルのサイズ分画と植物プランクトン群集組成解析から、亜寒帯域では珪藻類などの直径 10 μm 以上の大型植物プランクトンが卓越したが、亜熱帯域ではシアノバクテリア等の微小な植物プランクトンが卓越していることが分かった。TEP 濃度の鉛直分布については、亜寒帯域では海表面で最も高く、以降は水深 200m まで一様であり、深層までの濃度低下も小さかった。一方、亜熱帯域では、50m 以深から中深層に向かって濃度が低下する傾向を示した。この結果は、亜寒帯域の方が、TEP が分解されずに深層まで届きやすいことを示しており、海洋表層で TEP に吸着された粒子が効率よく深層まで輸送されることを示唆するものである。

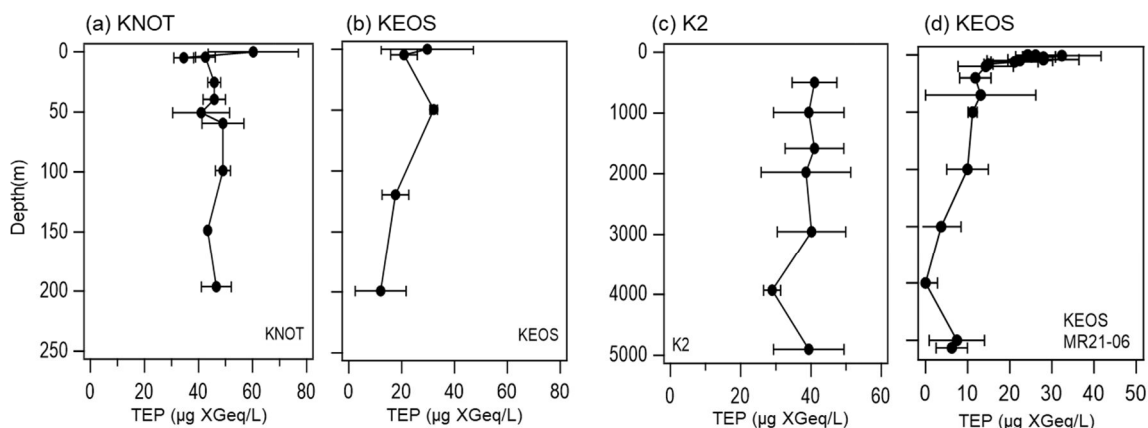


図1 TEP濃度の海表面~250mの鉛直分布(a) KNOT (44N, 155E), (b) KEOS (25N, 145E)、および海表面~5000mまでの鉛直分布(c) K2 (47N, 160E), (d) KEOS (25N, 145E)

(2) 個別粒子(石英)レベルの供給起源の推定

2002 ~ 2006 年の春季 ~ 秋季に観測点 K2 (47N, 160E) の水深 10m, 20m から採取した海水濾過試料を用いて SEM-CL (電子顕微鏡-カソードルミネッセンス) 分析を行った。前年に実施した 2021 年度の MR20-E02 および MR21-01 航海の結果と合わせて、K2 におけるダスト沈着量およびその季節性について解析したところ、4 月 ~ 6 月にかけてダストの沈着量が多く、1 年を通じた沈着フラックスは $0.37 \pm 0.07 \text{ gm}^{-2} \text{ year}^{-1}$ と見積もられた。更に、ダストを介した鉄供給と

K2 周辺海域の基礎生産に与える影響について、他の鉄供給源(中層水、人為起源エアロゾル等)由来の鉄と合わせて定量し、全体の約 30%を担っていることを明らかにし、本成果を *Scientific Reports* 誌に投稿した (Nagashima *et al.*, *submitted*)。

一方、BC 濃度の分析については、装置故障に伴い、当初想定したレーザー有機白熱法では実施できなくなったため、複素散乱振幅計測に基づく海水懸濁のブラックカーボン濃度にて検討を行った。その結果、濃度が $\sim 10^5 \text{ ml}^{-1}$ であると推定され、いずれの手法でも十分な精度で計測できないほどに低濃度であることが明らかとなった。

(3) 大気化学輸送モデルおよび海洋物質循環モデルによる推定

全球化学輸送モデル CHASER による 1960 年代から 2014 年までの過去再現実験からリン沈着量を推定した。その結果、西部北太平洋における燃烧起源のリン沈着は 1960~2014 年の間に約 3 倍増加しており、全リン沈着に対する燃烧起源の寄与は約 20%から約 50%に増加したと推定された。一方、亜寒帯の時系列観測点 K2 の海表面から中深層に存在する粒子について、その起源を理解するために、東京大学大気海洋研究所・松村義正 助教の協力のもと、1/11 解像度の粒子追跡シミュレーション実験を実施した。その結果、K2 から半径 500km 程度の範囲内の表層粒子が移流している可能性が示唆され、先行研究 (Dobashi *et al.*, 2021) の衛星観測で見積もられた半径 200km 内とは大きく異なることが分かった。年々の流動場によっては、カムチャッカ半島沿岸からの移流する時もあり、K2 直上のものが、そのまま水柱に沈降するのではなく、むしろ広範の水塊・粒子の影響を受けている可能性が推察された。

< 引用文献 >

Robert A. Duce, Julie LaRoche, et al., Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *Science*, 320, 893–897, 2008, doi: 10.1126/science.1150369.

Fumikazu Taketani, Maki Noguchi Aita, Kazuyo Yamaji, Takashi Sekiya, Kosei Sasaoka, Taketo Hashioka, Makio C. Honda, Kazuhiko Matsumoto, Yugo Kanaya, Seasonal Response of North Western Pacific Marine Ecosystems to Deposition of Atmospheric Inorganic Nitrogen Compounds from East Asia, *Scientific Reports*, 8, 9324, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-27523-w.

Kana Nagashima, Hirotsugu Nishido, Masahiro Kayama, Yasunari Kurosaki, Syuhei Ohgo, Hitoshi Hasegawa, Composition of Asian dust from cathodoluminescence spectral analysis of single quartz grains, *Geology*, 45(10), 879-882, 2017, doi:10.1130/G39237.1.

Takashi Sekiya, Kazuyuki Miyazaki, Koji Ogochi, Kengo Sudo, Masayuki Takigawa, Global high-resolution simulations of tropospheric nitrogen dioxide using CHASER V4.0, *Geoscientific Model Development*, 11(3), 959-988, 2018. doi: 10.5194/gmd-11-959-2018

Ryo Dobashi, Hiromichi Ueno, Nozomi Matsudera, Isao Fujita, Tetsuichi Fujiki, Makio C. Honda, Naomi Harada, Impact of mesoscale eddies on particulate organic carbon flux in the western subarctic North Pacific. *Journal of Oceanography*, 78, 1–14, 2022. doi: 10.1007/s10872-021-00620-7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 相田（野口）真希、岸道郎	4. 巻 250
2. 論文標題 海洋生態系モデルと人為的影響評価～地域から全球スケール～	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 海洋と生物	6. 最初と最後の頁 433、438
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 2件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 長島 佳菜、川上 創、杉江 恒二、藤木 徹一、野口 真希、本多 牧生、岩本 洋子
2. 発表標題 個別石英粒子のカソードルミネッセンス分析に基づく北太平洋亜寒帯域へのダスト輸送量・季節性の解明
3. 学会等名 日本地球化学会第68回オンライン年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nagashima K., Kawakami H., Sugie K., Fujiki T., Iwamoto Y., Aita M.N.
2. 発表標題 Seasonal Asian dust transport to the western subarctic North Pacific based on the Cathodoluminescence analysis of single quartz grains
3. 学会等名 PICES 2021 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taketani F., Matsumoto K., Iwamoto Y., Nagashima K., Kitamura M.
2. 発表標題 R/V Mirai cruise for IMPACT-SEA project 2021-Preliminary results-
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taketani F., Aita M.N., Sekiya T., Yamaji K., Ikeda K., Matsumoto K., Honda M.C., Sasaoka S., Kanaya Y.
2. 発表標題 Impact assessment of deposition of atmospheric nitrogen compounds to the surface chlorophyll-a concentration over Northwestern Pacific Ocean
3. 学会等名 PICES 2021 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹谷文一、長島佳菜、喜多村稔、本多牧生、松本和彦、宮川拓真、藤木徹一、木元克典、杉江恒二、栗栖美菜子、脇田昌英、内田裕、中嶋亮太、野口(相田)真希、金谷有剛、原田尚美、岩本洋子、Astrid Muller、Matthias Frey、村上裕太郎、藤木なぎさ
2. 発表標題 「みらい」MR21-01航海概要報告：西部北太平洋におけるアジア大気微量物質による海洋生物地球化学への影響評価
3. 学会等名 海と地球のシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹谷文一、松本和彦、金谷有剛
2. 発表標題 海洋表層の基礎生産力への大気物質の影響：現場観測による湿性沈着の効果検証
3. 学会等名 第26回大気化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口(相田)真希、竹谷文一、岩本洋子、羽島知洋
2. 発表標題 数値モデルによる大気窒素沈着と海洋物質循環への影響～領域から全球スケールまで
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長島佳菜、川上創、杉江恒二、藤木徹一、西岡純、岩本洋子、竹村俊彦、宮川拓真、竹谷文一、野口真希
2. 発表標題 西部北太平洋亜寒帯域の海水中石英粒子から復元したダスト沈着フラックスおよび海洋基礎生産への影響
3. 学会等名 2022年度北大低温研 共同利用研究集会：寒冷圏大気 - 海洋間の生物地球化学的相互作用に関する研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長島 佳菜、川上 創、杉江 恒二、藤木 徹一、西岡 純、岩本 洋子、竹村 俊彦、宮川 拓真、竹谷 文一、野口 真希
2. 発表標題 Asian dust-deposition flux to the subarctic Pacific and its Impact on the Phytoplankton Production
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長島佳菜、川上創、杉江恒二、藤木徹一、西岡純、岩本洋子、竹村俊彦、宮川拓真、竹谷文一、野口 真希
2. 発表標題 風が吹けばプランクトンが増える？
3. 学会等名 日本海洋学会 海洋生物シンポジウム2023（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Matsumoto K., Taketani F., Mino Y.
2. 発表標題 Examining the impact of rainfall on primary productivity in the oligotrophic subtropical ocean 令和4年度が最終年度であるため、記入しない。西部北太平洋亜寒帯域の海水中石英粒子から復元したダスト沈着フラックスおよび海洋基礎生産への影響 風が吹けばプランクトンが増える？ 2022年度北大低温研 共同利用研究集会：寒冷圏大気 - 海洋間の生物地球化学的相互作用に関する研究集会 3. 学会等名 (2/
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川名華織, 松本和彦, 野口真希
2. 発表標題 冬季～春季の西部北太平洋域におけるTEPの時空間分布と生物学的プロセス
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taketani F., Matsumoto K., Kanaya Y.
2. 発表標題 Direct observation of surface primary productivity influenced by wet deposition at subtropical Northwestern Pacific
3. 学会等名 8th hybrid SOLAS Open Science Conference
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉江 恒二, 藤木 徹一, 木元 克典, 松本 和彦, 竹谷 文一, 脇田 昌英, 中野 善之, 岸 正敏, 喜多村 稔, 金谷 有剛, 佐々木 雄亮, 塩崎 拓平, Qin Hongwei, 下島 公紀, 大井 麻由, 刀祢 館奈々子, 山口 三亜佳, 三野 義尚
2. 発表標題 「みらい」MR22-03航海概要報告 -春季西部北太平洋における東アジア大陸起源物質の分布と生態系への影響-
3. 学会等名 海と地球のシンポジウム2022
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 喜多村稔, 松本和彦, 熊本雄一郎, 小川萌日香, 古巻史穂, 李何萍, 三谷曜子, 多田雄哉, 田中さき, 松中哲也, 浜島靖典
2. 発表標題 MR21-06航海概要報告
3. 学会等名 海と地球のシンポジウム2022
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野口(相田)真希、宮川拓真
2. 発表標題 北西太平洋の豊かな海洋生態系の未来にむけて
3. 学会等名 日本エアロゾル学会 第39回エアロゾル科学・技術研究討論会(招待講演)
4. 発表年 2022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	長島 佳菜 (Nagashima Kana) (90426289)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・副主任研究員 (82706)	
研究分担者	松本 和彦 (Matsumoto Kazuhiko) (50359155)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・准研究主任 (82706)	
研究分担者	宮川 拓真 (Miyakawa Takuma) (30707568)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・副主任研究員 (82706)	
研究分担者	関谷 高志 (Sekiya Takashi) (00781460)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・研究員 (82706)	
研究分担者	竹谷 文一 (Taketani Fumikazu) (50377785)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・主任研究員 (82706)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	山下 洋平 (Yamashita Youhei)		
研究協力者	伊藤 彰記 (Ito Akinori)		

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1件

国際研究集会	開催年
Ocean Decade Laboratories #7 A Productive Ocean サテライトアクティビティ「北西太平洋の豊かな海洋生態系の未来にむけて」	2022年～2022年

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