

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03592

研究課題名（和文）微量金属元素が制御する海洋亜表層の新たな窒素循環像

研究課題名（英文）A New paradigm of nitrogen cycle in the marine subsurface layer controlled by trace metals

研究代表者

武田 重信（TAKEDA, Shigenobu）

長崎大学・水産・環境科学総合研究科（水産）・教授

研究者番号：20334328

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）：外洋の亜表層において微量栄養素である鉄、銅、亜鉛の動態と光環境が、植物プランクトンからの亜硝酸塩の細胞外放出や、微生物群集による硝化作用に複合的な影響を及ぼし、亜硝酸塩極大層の形成を始めとする亜表層の窒素循環を制御しているとの仮説の検証に取り組んだ。西部北太平洋の北緯20、30、41度において、栄養塩、微量金属、植物プランクトン、微生物群集の詳細な鉛直分布を調べた結果、微生物群集によるアンモニア酸化と亜硝酸酸化の不均衡が亜硝酸塩蓄積の主な要因になっていることが明らかになった。但し、鉄欠乏ストレスを受けた植物プランクトンからの亜硝酸塩の放出もある程度寄与している可能性が考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、亜硝酸塩極大層の形成要因を始めとする窒素循環機構について新たな知見が得られたことから、有光層内の硝化作用を含めた海洋窒素循環の理解が前進した。今後、海洋亜表層における生物窒素代謝の変動メカニズムを適切に評価することで、海洋の新生産の見積もり値が更新されて、海洋における窒素収支のアンバランスに対して新たな解釈が与えられるものと考えられる。また、グローバルな物質循環・生態系モデルに本研究で得られた成果を組み込むことによって、海洋の窒素および微量金属の循環過程と生物相互作用を精度良く再現できるようになり、地球温暖化に伴う海洋生態系の応答・変化の予測にも貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study was undertaken to test the hypothesis that iron, copper, and zinc dynamics and light environment have a combined effect on the extracellular release of nitrite from phytoplankton and nitrification by microbial communities in the open ocean sub-surface layer, thereby controlling the formation of the nitrite maximum layer. To this end, detailed vertical distributions of nutrients, trace metals, phytoplankton, and microbial communities were examined at 20, 30, and 41°N in the western North Pacific. The results suggest that the imbalance between ammonia oxidation and nitrite oxidation by microbial communities is a major factor in nitrite accumulation in these waters. However, nitrite release from iron-deficiency stressed phytoplankton may also contribute to some extent. Consequently, it is suggested that micronutrients such as iron and the light environment play an important role in the sub-surface nitrogen cycle in the western North Pacific.

研究分野：海洋生物地球化学

キーワード：海洋生態 窒素循環 微量金属 植物プランクトン 硝化微生物

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 海洋における炭素など生元素の物質循環を把握するには、有光層外から供給される硝酸塩などを用いた一次生産、すなわち新生産を正しく評価することが必須となる。近年、有光層内で微生物硝化による硝酸塩の生成が起きていることが示され、硝酸塩取り込みを指標として従来見積もられてきた新生産の見直しが求められている (Yool et al., 2007)。この微生物硝化の寄与を評価する上で、海洋の亜表層 (50 ~ 150 m) でみられる亜硝酸塩の極大層の形成要因の解明が、重要な鍵になり得る。

(2) 外洋の亜熱帯域において窒素循環の主要な中間生成物である亜硝酸塩の極大層が生じる要因としては、微生物によるアンモニアの硝化作用と、植物プランクトンからの亜硝酸塩放出の二つの機構が考えられる。硝化を担うアンモニア酸化酵素は銅、鉄、あるいは亜鉛を補因子として含んでおり、微生物硝化にはこれらの元素が不可欠である。また、硝化細菌・古細菌は、グループによって光障害の感受性が異なることも指摘されている。一方、植物プランクトンからの亜硝酸塩放出には、弱光下での亜硝酸還元阻害に加えて、鉄欠乏により亜硝酸還元と硝酸還元のバランスが乱された結果、余剰の亜硝酸塩が細胞外に放出されることも関係している可能性が指摘されている (Milligan and Harrison, 2000)。

(3) 北太平洋亜熱帯の溶存鉄がほぼ枯渇した環境下では、硝酸塩躍層付近の亜鉛や銅の溶存濃度が急激に減少することが、これまでの研究で確認されている。このため海洋亜表層では、微生物群と植物プランクトン間で鉄、銅、亜鉛といった微量栄養素に関する競合が起こり、その過不足が上記の過程を含む窒素循環を支配している可能性は高いと考えられた。加えて、インド洋や北極海での観測からは、現場の硝化微生物群集組成とその光感受性の違いが、亜硝酸塩極大層の発達深度と密接に関わっていることを示すデータも得られている。本研究の対象となる西部北太平洋では、鉄不足による生物活動の制限が厳しく硝酸塩濃度の高い亜寒帯域と、窒素供給が生物生産や微量金属を支配している亜熱帯域という、微量金属の濃度環境と窒素循環の異なる特徴的な海域が広がっており、両海域のデータの比較を通して、以下に示す 3 つの「学術的問い」に取り組む上での格好のフィールドとなっていると考えた。

海洋亜表層の亜硝酸塩極大層付近で、窒素循環に関与する微量金属元素の鉄、銅、亜鉛はどのような分布を示し、その分布は亜硝酸塩極大の発達状況とどのような関係にあるのか？

亜硝酸塩極大層付近の植物プランクトン群集による亜硝酸塩の細胞外放出と、微生物群集による硝化作用は、鉄、銅、亜鉛の供給や光量の強弱に対してどのような応答を示すのか？

微量金属元素の鉛直的な濃度勾配の大きい北太平洋亜寒帯域と、勾配の比較的小さい北太平洋亜熱帯域の間で、植物プランクトンおよび微生物の群集組成と、微量金属や光に対する応答特性はどのような違いがあるのか？

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、上記の 3 つの「学術的問い」に答えるため、西部北太平洋の亜熱帯域と亜寒帯域における海洋観測と船上実験を通して、微量栄養素である鉄、銅、亜鉛の動態と光環境が、植物プランクトンからの亜硝酸塩の細胞外放出や、微生物群集による硝化作用に複合的な影響を及ぼし、亜硝酸塩極大層の形成を始めとする亜表層の窒素循環を制御しているとの仮説を検証することを目的とした。

(2) 亜硝酸塩極大層の形成を始めとする海洋亜表層の窒素循環の複合的な制御メカニズムに関する仮説を検証するため、亜硝酸塩極大層付近の栄養塩・微量金属濃度分布と植物プランクトン・硝化微生物群集の対応関係を詳細に明らかにして、現場の植物プランクトンによる亜硝酸塩放出と硝化微生物の活性や群集構造の微量金属濃度・光強度変化に対する応答を予測した。

(3) 微量金属の濃度環境やプランクトン群集組成が異なる西部北太平洋の亜熱帯域と亜寒帯域での観測結果を対比させることにより、各海域における各種微量金属の役割と窒素循環を支配する生物プロセスの評価を試みた。

### 3. 研究の方法

(1) 上記の課題に取り組むため、微量金属と亜硝酸塩などの鉛直分布の高分解能観測、植物プランクトンおよび硝化微生物の群集組成の把握を中心に、調査船を用いたフィールド研究を進めた。2022 年 7-8 月に実施された学術研究船「白鳳丸」KH-22-7 次研究航海において、西部北太平洋の東経 155 度北緯 20 度および 30 度と、東経 150 度北緯 41 度の 3 つの定点において観測を行った。船体などからの微量金属による汚染を受けないクリーン採水システムを用いて、亜表層栄養塩躍層付近での高分解能採水を実施し、微量金属元素、栄養塩、微生物群集の遺伝子解析用試料を採取した。

(2) 海水中の微量金属元素 (Fe, Cu, Zn) の溶存濃度は、船上クリーンブース内での加圧ろ過によりろ液試料を得て、酸性条件下で保存して陸上実験室に持ち帰り、キレート樹脂自動濃縮装置付きの高分解能 ICP 質量分析計で測定した (Lagerström et al., 2013)。栄養塩濃度は、凍結保存して陸上実験室に持ち帰った海水試料について、オートアナライザーを用いて標準の比色法

により測定した。植物プランクトンのクロロフィル *a* 濃度は、CTD に付属のクロロフィル蛍光センサーで測定した。硝化古細菌・細菌群集の遺伝子解析は、2 L の海水試料から孔径 0.22 μm フィルターでろ過捕集した微生物サンプルを用いて、アンモニアモノオキシゲナーゼサブユニット A (amoA) の DNA および RNA の定量 PCR アッセイにより行った (Shiozaki et al., 2016)。アンモニア酸化古細菌 (AOA) は、amoA 遺伝子の塩基配列に基づいて、shallow clade (water column cluster A および *Nitrosopumilus maritimus*-like cluster) と deep clade (water column cluster B) に分類した。アンモニア酸化細菌 (AOB) については、Betaproteobacteria を対象に調べた。

(3) 上記の西部北太平洋におけるフィールド研究で得られるデータと比較するため、黒潮周辺海域の亜表層における栄養塩、クロロフィル *a*、硝化細菌・古細菌群集組成の鉛直分布を調べるとともに、北極海の陸棚域と海盆域における尿素のシンクについての調査を実施した。また、アンモニア酸化生物の多様性を網羅的に調べる手法として、ターゲットキャプチャー法を用いた amoA 遺伝子配列解析法の開発に取り組み、ライブラリからの amoA 遺伝子の濃縮に使用するプローブやプライマーバイアス等について検討を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 西部北太平洋の亜硝酸塩極大層付近における生物・化学的な鉛直構造の特性

西部北太平洋 (東経 150 ~ 155 度) における北緯 20、30、41 度の 3 測点における亜硝酸塩極大層は、それぞれ深度 135 m、105 m、41 m に認められ、緯度が高くなるにつれて浅くなる傾向を示すとともに、北緯 41 度の亜硝酸塩極大の濃度は北緯 20 度と比べて 4 倍程度高くなっていた (図 1)。これらの亜硝酸塩極大層の位置は、亜表層クロロフィル極大層よりも 11-17 m ほど深くなっており、北緯 41 度の測点を除いて、亜硝酸塩極大層付近のクロロフィル *a* 濃度が低かったことから、亜硝酸塩極大の形成に対する植物プランクトン由来の亜硝酸塩の寄与は比較的小さいと考えられた。

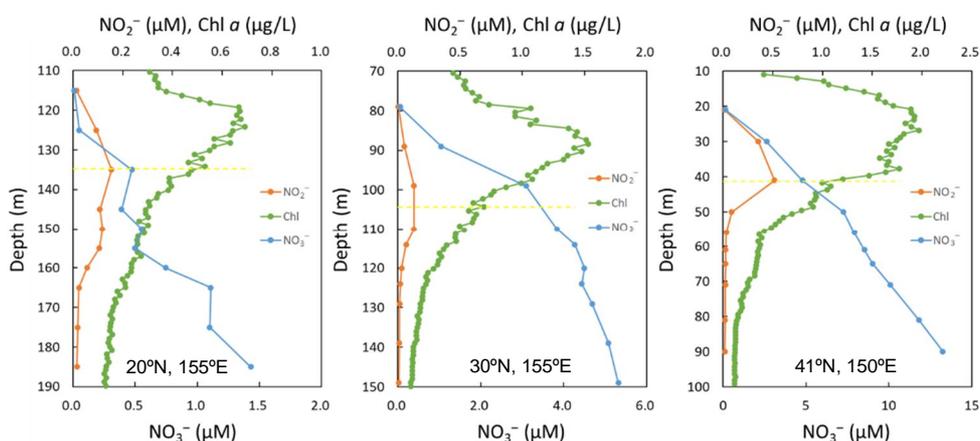


図1 西部北太平洋の北緯 20、30、41 度における亜硝酸塩極大層付近の亜硝酸塩、クロロフィル、硝酸塩の鉛直分布。黄色の破線は亜硝酸塩極大層を示す。

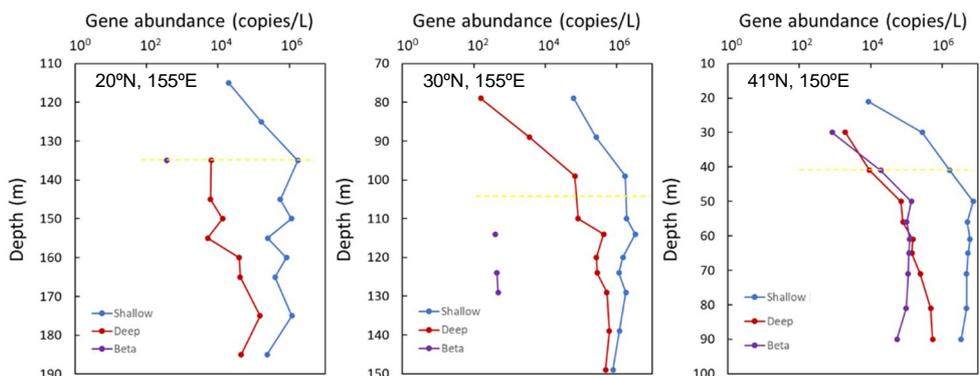


図2 西部北太平洋の北緯 20、30、41 度における亜硝酸塩極大層付近のアンモニア酸化古細菌 (Shallow clade および Deep clade) とアンモニア酸化細菌 (Betaproteobacteria) の DNA 量の鉛直分布。黄色の破線は亜硝酸塩極大層を示す。

硝化微生物のうち、アンモニア酸化古細菌 (AOA) の Shallow clade は、調査した亜表層の全層に出現し、亜硝酸塩極大層に向かって深度が深くなるにつれて存在量が多くなる傾向を示し、亜硝酸塩極大層以深ではほぼ一定となった (図 2)。Deep clade は、亜硝酸塩極大層よりも深い層で存在量が多くなったが、Shallow clade と比べて全層で少なかった。これらの分布傾向は、過

去にインド洋で観測された結果 (Sato et al., 2022) と類似していた。亜硝酸塩極大層においては、検出されたアンモニア酸化微生物群集の DNA 量全体に占める Shallow clade の割合が 96 ~ 100% となり、亜表層における亜硝酸塩の主要な生産者としての重要性が確認された。一方、アンモニア酸化細菌 (AOB) の Betaproteobacteria については、北緯 20 度と 30 度の測点でほとんど検出されなかったのに対して、北緯 41 度の測点において Deep clade と同程度の存在量で出現し、亜熱帯海域と亜寒帯海域で硝化に関わる微生物群集の組成が異なることが明らかになった。

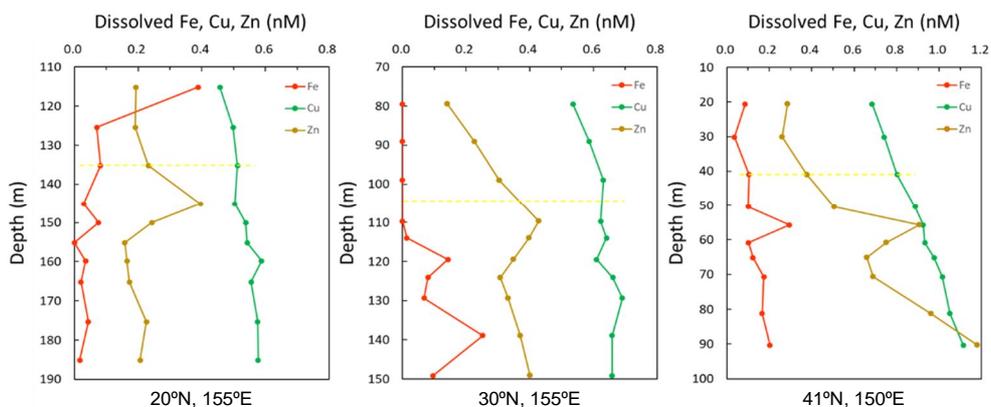


図3 西部北太平洋の北緯 20、30、41 度における亜硝酸塩極大層付近の鉄、銅、亜鉛の溶存濃度の鉛直分布。黄色の破線は亜硝酸塩極大層を示す。

微量金属元素 (Fe, Cu, Zn) の溶存濃度の鉛直分布に関しては、いずれの測点でも亜硝酸塩極大層付近において鉄が 0.1 nM 以下の低濃度になっていた (図 3)。一方、銅と亜鉛については、それぞれ約 0.2 nM 以上、約 0.5 nM 以上の値を示し、高緯度の測点ほど濃度が高くなる傾向が見られた。従って、亜硝酸塩極大層付近の植物プランクトン群集は弱光に加えて鉄不足によるストレスを受けていた可能性が高く、植物プランクトン細胞からの亜硝酸塩の放出もある程度起きていたと推察される。それに対して、硝化微生物のアンモニア酸化酵素に必要な銅と亜鉛は現場海水中に十分に存在していたものと考えられる。これらの結果から、西部北太平洋の亜表層において、主にアンモニア酸化古細菌 (Shallow clade) の硝化作用によって生産される亜硝酸塩が蓄積して亜硝酸塩極大層が形成されていると考えられるものの、植物プランクトンが関与する窒素循環に関しては微量栄養素である鉄の不足と光環境が重要な役割を果たしていることが示唆された。

## (2) 黒潮周辺海域および北極海の亜表層における窒素循環

奄美大島北西の黒潮周辺海域において硝酸塩極大層は深度 104 m に出現し、亜表層クロロフィル極大より約 14m 深くなっていたが、比較的クロロフィル濃度の高い層に位置しており、表層で枯渇していた硝酸塩濃度が増加し始める深度とほぼ一致していた。また、硝化微生物としてはアンモニア酸化古細菌 (Shallow clade) の存在が確認されたが、上記の西部北太平洋の結果と比べて DNA 量が桁程度低かった。そのため、この海域では硝酸塩を取り込んだ植物プランクトン細胞からの亜硝酸塩の放出フラックスが比較的大きいと推察される。

溶存有機態窒素として窒素循環に関与する尿素を対象に、北極海の陸棚域と海盆域における尿素のシンクについて調査を実施した。尿素濃度は、陸棚域では海底付近で高くなる傾向がみられたのに対して、海盆域では水柱内ではほとんど検出されないことを見出した。また、尿素の取り込み速度は有光層上部で高く、下部で低くなったのに対して、尿素酸化は有光層上部で低く、下部で高くなった。これらの結果から、尿素シンクが 2 層のシステムによって成り立っていると考えられる。

## (3) ターゲットキャプチャー法を用いたアンモニア酸化生物の多様性解析法の開発

アンモニア酸化は硝化における最初のステップであり、硝化を制御する反応として特に注目されている。アンモニア酸化生物は全てアンモニアモノオキシゲナーゼ (amoA) 遺伝子を持つ。そのため、その配列を調べることでアンモニア酸化生物の分布や多様性が調べられている。amoA 遺伝子のアンプリコン解析はその多様性を調べるために広く用いられている方法であるが、古細菌と細菌にまたがる普遍的なプライマーセットが存在しないためアンモニア酸化生物全てを網羅することができない問題があった。この代替的な手法としてショットガンメタゲノム解析やメタトランスクリプトーム解析があるが、標的遺伝子の濃度が環境 DNA 中において非常に低いため、網羅的なアンモニア酸化生物群集解析をするにはシーケンス深度を深める必要があり、多くのサンプルについて調べるには現実的な方法ではない。本研究ではターゲットキャプチャー法を用いた amoA 遺伝子配列解析法の開発を行った。本研究において開発した手法によって、これまで広く使われていた手法の問題点が明らかになると共に、本手法の有効性が確かめられた。すなわち、これまで amoA 遺伝子解析で最もよく使われているプライマーセット Arch-amoAF/R (Francis et al., 2005) は顕著な PCR バイアスがあり、古細菌の群集組成を適切に復元することができないことが示された。また本手法はメタオミクスシーケンス解析よりも多様

な amoA 配列を復元することができた。本手法を広く応用することで、アンモニア酸化生物の分布と多様性の理解がさらに深化すると考えられる。加えて、本研究では海洋の硝化のデータベース作りに貢献した。このような海洋硝化のデータベースが作られたのは初めてである。データベースは全球スケールであり、2393 点のアンモニア酸化速度と 1006 点の亜硝酸酸化速度、2242 点のアンモニア酸化生物と 631 点の亜硝酸酸化生物の現存量のデータを含む。これによって、硝化の光制限が全球で一様ではないことが示された。またインド洋のような硝化研究がほとんど進んでいない海域も明らかとなった。

#### (4) 得られた成果のまとめと今後の展望

西部北太平洋の亜熱帯から亜寒帯域海域において、窒素循環に関わる環境パラメーターの高分解能観測を行い、亜硝酸塩極大層の形成過程と微量栄養素である鉄、銅、亜鉛との関わりについての仮説検証に取り組んだ。その結果、亜硝酸塩極大層の形成に関しては、比較的豊富に存在する溶存銅と亜鉛に支えられたアンモニア酸化古細菌を主体とする硝化微生物群集によるアンモニア酸化と亜硝酸酸化の不均衡が主な要因となっていることが明らかになった。一方、有光層底部の植物プランクトン群集は、鉄欠乏と弱光によるストレスを受けており、細胞内に取り込んだ硝酸塩を亜硝酸塩に還元して細胞外に放出することで、亜表層における亜硝酸塩の蓄積にある程度寄与していることが示唆された。このように西部北太平洋の亜表層では、硝化微生物群集と植物プランクトン群集による窒素代謝に微量栄養素が重要な役割を果たしており、微量栄養素の動態に応じて変動する両生物群集の活性が現場の窒素循環に複合的な影響を及ぼしているものと考えられた。今後は、本研究成果を踏まえて海洋亜表層における生物窒素代謝の変動メカニズムを適切に評価することで、海洋の新生産に関する新たな見積もりが得られ、海洋における窒素収支のアンバランスに対して新たな解釈が提示されるものと予想される。また、グローバルな物質循環・生態系モデルに、本研究で明らかになった海洋亜表層における微量栄養素の作用を反映させることによって、海洋全体の窒素および微量金属の循環過程と生物相互作用を精度良く再現できるようになり、地球温暖化に伴う海洋生態系の応答・変化の予測にも貢献することが期待される。

#### <引用文献>

- Francis, C.A., Roberts, K.J., Beman, J.M., Santoro, A.E., Oakley, B.B., 2005, Ubiquity and diversity of ammonia-oxidizing archaea in water columns and sediments of the ocean, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 14683-14688.
- Lagerström, M.E., Field, M.P., Séguret, M., Fischer, L., Hann, S., Sherrell, R.M., 2013, Automated on-line flow-injection ICP-MS determination of trace metals (Mn, Fe, Co, Ni, Cu and Zn) in open ocean seawater: Application to the GEOTRACES program, *Marine Chemistry*, 155, 71-80.
- Milligan, A.J., Harrison, P.J., 2000, Effects of non-steady-state iron limitation on nitrogen assimilatory enzymes in the marine diatom *Thalassiosira weissflogii* (BACILLARIOPHYCEAE), *Journal of Phycology*, 36, 78-86.
- Sato, M., Hirata, K., Shiozaki, T., Takeda, S., 2022, Effects of iron and light on microbial nitrogen cycles in the primary nitrite maxima of the eastern Indian Ocean, *Deep Sea Research Part 1*, 185, 103808, doi.org/10.1016/j.dsr.2022.103808.
- Shiozaki, T., Ijichi, M., Isobe, K., Hashihama, F., Nakamura, K., Ehama, M., Hayashizaki, K., Takahashi, K., Hamasaki, K., Furuya, K., 2016, Nitrification and its influence on biogeochemical cycles from the equatorial Pacific to the Arctic Ocean, *The ISME Journal*, 10, 2184-2197.
- Yool, A., Martin, A., Fernández, C. Clark, D.R., 2007, The significance of nitrification for oceanic new production, *Nature*, 447, 999-1002.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tang Weiyi, Ward Bess B., Beman Michael, Bristow Laura, Clark Darren, Fawcett Sarah, Frey Claudia, Fripiat Francois, Herndl Gerhard J., Mduyana Mhlangabezi, Paulot Fabien, Peng Xuefeng, Santoro Alyson E., Shiozaki Takuhei, Sintes Eva, Stock Charles, Sun Xin, Wan Xianhui S., Xu Min N., Zhang Yao	4. 巻 15
2. 論文標題 Database of nitrification and nitrifiers in the global ocean	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth System Science Data	6. 最初と最後の頁 5039 ~ 5077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/essd-15-5039-2023	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

1. 著者名 Hamilton Douglas S., Baker Alex R., Iwamoto Yoko, Gasso Santiago, Bergas-Masso Elisa, Deutch Sarah, Dinasquet Julie, Kondo Yoshiko, Llort Joan, Myriokefalitakis Stelios, Perron Morgane M. G., Wegmann Alex, Yoon Joo-Eun	4. 巻 11
2. 論文標題 An aerosol odyssey: Navigating nutrient flux changes to marine ecosystems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Elementa Science of the Anthropocene	6. 最初と最後の頁 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1525/elementa.2023.00037	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

1. 著者名 小畑 元、西岡 純、近藤 能子、張 勁	4. 巻 57
2. 論文標題 海洋における微量元素・同位体の地球化学研究の進展：国際GEOTRACES計画の成果	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 地球化学	6. 最初と最後の頁 35 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14934/chikyukagaku.57.35	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 -

1. 著者名 Wang Yaoyao, Bi Rong, Zhang Jing, Gao Jiawei, Takeda Shigenobu, Kondo Yoshiko, Chen Fajin, Jin Gui'e, Sachs Julian P., Zhao Meixun	4. 巻 9
2. 論文標題 Phytoplankton Distributions in the Kuroshio-Oyashio Region of the Northwest Pacific Ocean: Implications for Marine Ecology and Carbon Cycle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2022.865142	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

1. 著者名 Hiraoka Satoshi, Ijichi Minoru, Takeshima Hirohiko, Kumagai Yohei, Yang Ching-Chia, Makabe-Kobayashi Yoko, Fukuda Hideki, Yoshizawa Susumu, Iwasaki Wataru, Kogure Kazuhiro, Shiozaki Takuhei	4. 巻 -
2. 論文標題 Probe capture enrichment sequencing of <i>amoA</i> genes discloses diverse ammonia-oxidizing archaeal and bacterial populations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/2023.04.10.536224	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Sato Mitsuhide, Hashihama Fuminori, Takeda Shigenobu	4. 巻 79
2. 論文標題 Effects of cyanate enrichment on growth of natural phytoplankton populations in the subtropical Pacific	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-022-00658-1	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Sato Mitsuhide, Shiozaki Takuhei, Hashihama Fuminori, Kodama Taketoshi, Ogawa Hiroshi, Saito Hiroaki, Tsuda Atsushi, Takeda Shigenobu, Furuya Ken	4. 巻 67
2. 論文標題 Relative depths of the subsurface peaks of phytoplankton abundance conserved over ocean provinces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Limnology and Oceanography	6. 最初と最後の頁 2557~2571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lno.12222	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Sato Mitsuhide, Hirata Kunioki, Shiozaki Takuhei, Takeda Shigenobu	4. 巻 185
2. 論文標題 Effects of iron and light on microbial nitrogen cycles in the primary nitrite maxima of the eastern Indian Ocean	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers	6. 最初と最後の頁 103808~103808
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dsr.2022.103808	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Shiozaki Takuhei, Hashihama Fuminori, Endo Hisashi, Ijichi Minoru, Takeda Noriko, Makabe Akiko, Fujiwara Amane, Nishino Shigeto, Harada Naomi	4. 巻 66
2. 論文標題 Assimilation and oxidation of urea derived nitrogen in the summer Arctic Ocean	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Limnology and Oceanography	6. 最初と最後の頁 4159 ~ 4170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lno.11950	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Sato Mitsuhide, Wakuta Yohei, Takeda Shigenobu	4. 巻 234
2. 論文標題 Distribution and chemical speciation of iron on the outer edge of the Changjiang diluted water plume of the East China Sea	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Continental Shelf Research	6. 最初と最後の頁 104646 ~ 104646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.csr.2022.104646	査読の有無 有
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9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Douglas S. Hamilton, Alex R. Baker, Yoko Iwamoto, Santiago Gasso Elisa Bergas-Masso, Sarah Deutch, Julie Dinasquet, Yoshiko Kondo, Joan Llort, Stelios Myriokefalitakis, Morgane M. G. Perron, Alex Wegmann, Joo-Eun Yoon
2. 発表標題 An Aerosol Odyssey: Navigating Nutrient Flux Changes to Marine Ecosystems. A contribution to the SOLAS special issue
3. 学会等名 AGU23 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤能子, 小畑元, 西岡純, 張勁
2. 発表標題 海洋における微量元素・同位体に関する国際研究GEOTRACES計画の現状と将来
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会JpGU2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤能子, 山中紘輝, 岩田遙貴, 砂原雄大, 西岡純, 小畑元, 武田重信
2. 発表標題 北太平洋における鉄の光化学反応による形態変化
3. 学会等名 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「微量元素・同位体を用いた海洋生物地球化学研究 (GEOTRACES-Japan)」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増田貴子, 井之村啓介, 児玉武稔, 塩崎拓平, 北島聡, Gabrielle Armin, 松井貴人, 鈴木光次, 武田重信, 佐藤光秀, Ondrej Prasil, 古谷研
2. 発表標題 主要な窒素消費者としての窒素固定性シアノバクテリア
3. 学会等名 日本海洋学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigenobu Takeda, Kunioki Hirata, Takuhei Shiozaki
2. 発表標題 Nitrogen cycling in the primary nitrite maximum of the Indian Ocean
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 佐藤 光秀, 涌田 陽平, 武田 重信
2. 発表標題 東シナ海大陸棚・大陸斜面上における溶存鉄濃度と化学形態
3. 学会等名 日本海洋学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsuhide Sato, Yohei Wakuta, Shigenobu Takeda
2. 発表標題 Distribution and chemical speciation of iron on the outer edge of the Changjiang diluted water plume of the East China Sea
3. 学会等名 PICES-2021 Virtual Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigenobu Takeda, Kunioki Hirata, Takuhei Shiozaki, Mitsuhide Sato
2. 発表標題 Biogeochemical characterization of the primary nitrite maxima in the eastern Indian Ocean and the effects of iron on subsurface nitrogen cycle
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mitsuhide Sato, Natsuki Ogata, Shigenobu Takeda
2. 発表標題 Photodecomposition of humic substances and organic iron-binding ligands from natural seawater
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2022 (国際学会)
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	塩崎 拓平  (SHIOZAKI Takuhei)  (90569849)	東京大学・大気海洋研究所・准教授    (12601)	

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
研究分担者	近藤 能子  (KONDO Yoshiiko)  (40722492)	長崎大学・水産・環境科学総合研究科（水産）・准教授    (17301)	

	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	佐藤 光秀  (SATO Mitsuhide)		

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	プリンストン大学			