

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03979

研究課題名（和文）海洋の物質鉛直輸送に伴う微量金属のフラックス及び生物地球化学的プロセスの解明

研究課題名（英文）Particulate trace metal fluxes and biogeochemical processes in the ocean

研究代表者

山岡 香子（Yamaoka, Kyoko）

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・主任研究員

研究者番号：30610399

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：北太平洋東経175度上3地点（30°N亜熱帯域、37°N遷移帯、46°N亜寒帯域）のセジメントトラップで捕集された沈降粒子について、バルク化学組成及び鉄同位体分析を実施した。沈降粒子の元素フラックスは、石質・炭酸塩・有機物・スカベンジングの4つの支配要因で説明され、ニッケル、銅、亜鉛等の微量金属フラックスの80%以上は海洋中で付加されることが明らかとなった。鉄は主に石質成分であることを反映して鉄同位体組成は風成塵に近い値であったが、鉄マンガン酸化物や有機物の付加により、軽い鉄が取り込まれることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海水中の微量金属は一次生産の制限要因となっているため、海水中の溶存金属だけでなく、沈降粒子により鉛直輸送される金属についても検討し、海洋における元素循環を明らかにする必要がある。本研究では、海洋環境が大きく異なる北太平洋の3地点について沈降粒子による元素フラックスを明らかにし、微量金属の鉛直輸送において生物活動やスカベンジングが予想以上に大きな役割を果たしていることを明らかにした。また、沈降粒子に有機物や鉄マンガン酸化物が付加することにより、海洋から軽い鉄が除去されていることを示すことが出来た。

研究成果の概要（英文）：Bulk chemical composition and iron isotopic analysis were performed on sinking particles collected in sediment traps at three sites in the North Pacific Ocean along 175°E (30°N subtropical zone, 37°N transition zone, 46°N subarctic zone). Elemental fluxes of sinking particles were explained by four dominant factors: lithogenics, carbonate, organic matter, and scavenging, indicating that more than 80% of trace metal fluxes such as nickel, copper, and zinc are added in the ocean. The iron isotopic compositions of sinking particles were similar to that of eolian dust, reflecting the fact that iron is mainly a lithogenics component, but the addition of ferromanganese oxides and organic matter indicated that lighter iron is incorporated.

研究分野：地球化学

キーワード：セジメントトラップ 微量金属 鉄同位体

1. 研究開始当初の背景

海洋の一次生産が駆動する炭素循環は、大気中二酸化炭素濃度に影響するため、地球の気候変動において極めて重要であるが、その駆動には窒素やリンなどの主要な栄養塩だけでなく、様々な微量元素が必須である。代表的なものは Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn などであるが、現在の酸化海洋ではこれら微量元素の溶解度は極めて低く、生物に利用可能であるかどうかは濃度と存在形態 (スペシエーション) に依存する。従って、海洋における微量元素の循環を明らかにすることは、炭素循環モデルの精度を高める上で重要である。

外洋域の有光層への微量元素供給源として重要なのは、風成塵と鉛直混合である。大気から海洋、そして海底までの物質輸送は、1980年代からセジメントトラップ観測により調べられ、炭素フラックスの理解が大きく進んだ。しかし、沈降粒子により輸送される微量元素フラックスの研究は意外なほど少なく、これまでに報告された論文は 8 本で、うち太平洋ではたったの 1 件 (Lamborg et al., 2008) であり、対象元素も 8 つに限られていた。現在、海水についてほぼ全ての元素が測定対象となっていることを考えると、沈降粒子に関する微量元素フラックスのデータは大きく不足している。

2. 研究の目的

本研究は、海洋における微量元素の元素循環に関する 2 つの問題を明らかにすることを目的とする。1 つ目は、太平洋外洋域の赤道～亜寒帯において、各種微量元素のフラックスとその変動要因を明らかにすることである。特に、炭素フラックスとの関係を詳細に検討することは、微量元素が生物ポンプの駆動にどのように関与しているかを解明する上で、意義深いものである。2 つ目は、特に生物生産にとって重要な鉄に着目し、表層から海底までの物質輸送に伴う鉄の同位体分別を明らかにすることである。これにより、海洋における元素循環のツールとしての、鉄同位体の本格的な導入が加速されることが期待される。

3. 研究の方法

東経 175 度ラインに沿って北緯 30 度から 46 度までの 3 地点 (Site 6, 7, 8) に設置されたセジメントトラップ試料を用いた (図 1)。各地点の緯度及び係留水深は以下の通りである: Site 6 (30°N、亜熱帯域、水深 3,873 m)、Site 7 (37°N、遷移帯、水深 1,482 m 及び 4,588 m)、Site 8 (46°N、亜寒帯域、水深 1,412 m)。セジメントトラップは、1993 年 6 月～1994 年 4 月の約 10 ヶ月間係留され、沈降粒子は 2 週間毎に採取された。なお、本研究においては詳細な時系列解析よりも水深あるいは海域の比較を重視するため、沈降粒子試料の時間解像度は 1～2 ヶ月程度とした。沈降粒子試料のバルク元素分析については、試料を酸分解し、ICP 質量分析計 (Agilent 7700x、産総研) を用いて元素組成分析を行った。鉄安定同位体比の分析については、試料を酸分解し、鉄を完全に酸化した後、陰イオン交換樹脂 (BioRad AG1-X4) を用いて鉄の化学分離を行った。鉄同位体比の測定には、⁵⁸Fe-⁵⁷Fe ダブルスパイク法を用い、脱溶媒ネプライザーを接続したマルチコレクタ型 ICP 質量分析計 (Nu Plasma、ハワイ大学) を使用した。

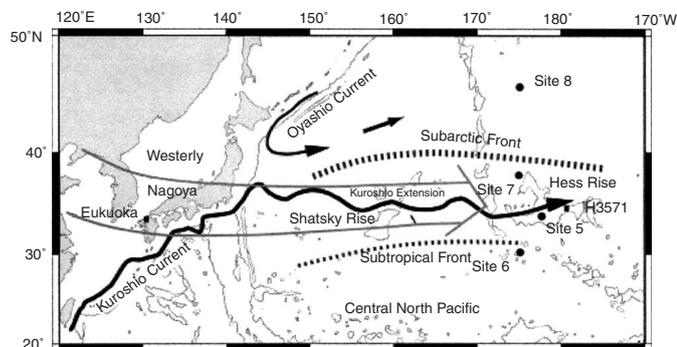


図 1. セジメントトラップの設置地点 (Kawahata, 2006)。本研究では東経 175 度ライン上の 3 地点 (Site 6, 7, 8) で採取された沈降粒子試料を用いた。

沈降粒子試料のバルク元素分析については、試料を酸分解し、ICP 質量分析計 (Agilent 7700x、産総研) を用いて元素組成分析を行った。鉄安定同位体比の分析については、試料を酸分解し、鉄を完全に酸化した後、陰イオン交換樹脂 (BioRad AG1-X4) を用いて鉄の化学分離を行った。鉄同位体比の測定には、⁵⁸Fe-⁵⁷Fe ダブルスパイク法を用い、脱溶媒ネプライザーを接続したマルチコレクタ型 ICP 質量分析計 (Nu Plasma、ハワイ大学) を使用した。

4. 研究成果

沈降粒子試料のバルク元素分析を行い、Site 6 (30°N、亜熱帯海域)、Site 7 (37°N、遷移帯海域)、Site 8 (46°N、亜寒帯海域) における沈降粒子構成成分と元素組成の関係を明らかにした。これらの地点における全沈降粒子フラックスは、Site 6 では $47.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、Site 7 では $94.6 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (浅層) 及び $71.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (深層)、Site 8 では $207.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と大きく変動し、沈降粒子の主要成分は Site 6 では炭酸塩 (~60%)、Site 7 では炭酸塩 (~40%) + 石

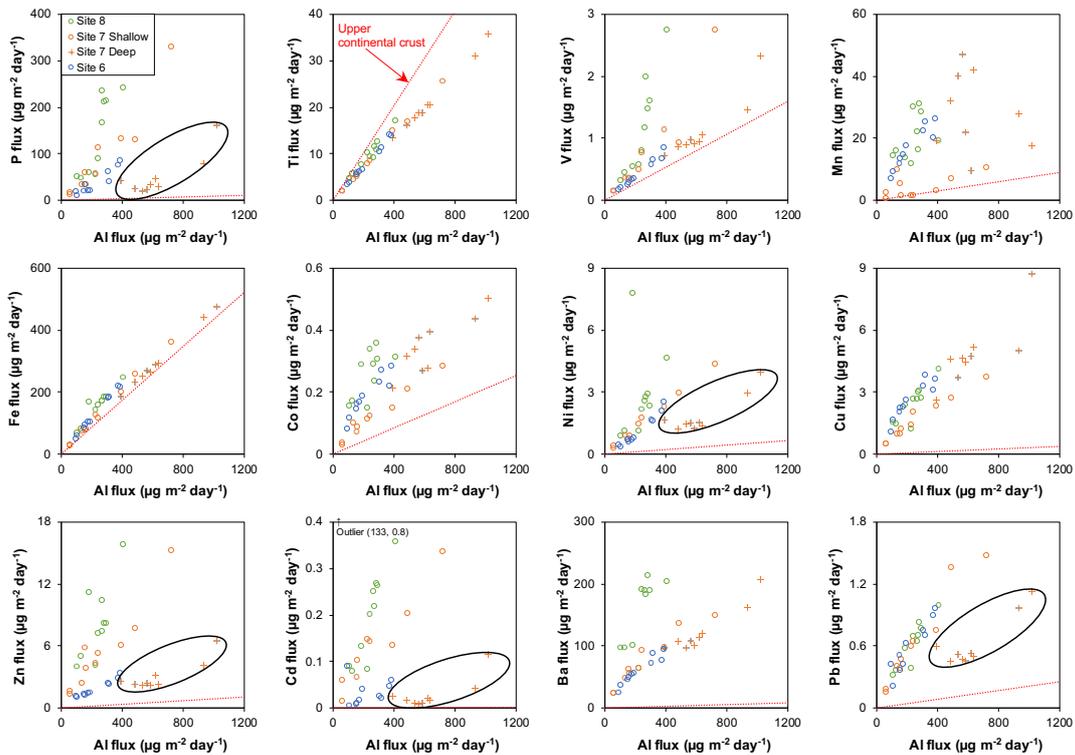


図2. 各元素フラックスとアルミニウムフラックスの関係。赤線は上部大陸地殻の平均組成から得られる傾きを示し、大陸地殻の傾きとほぼ一致する元素 (Ti, Fe) は石質由来、大陸地殻の傾きから上に外れる元素 (V, Mn, Co, Cu) は主にスキャベンジングの効果、大陸地殻の傾きから外れ、かつリンと同様に Site 7 深層トラップでのフラックスが減少 (図中の黒枠) する元素 (Ni, Zn, Cd, Pb) は有機物由来と考えられる。

質 (~30%)、Site 8 では生物源オパール (~70%) と、海洋環境や基礎生産を反映して大きく異なっている (Kawahata, 2002, 2006)。また、全地点において、全沈降粒子フラックスは有機物フラックスと正相関を示す。各元素フラックスとアルミニウムフラックスとの関係から、北西太平洋亜熱帯域で実施した先行研究 (Yamaoka et al., 2020) と同様に、4つの主要プロセス、すなわち石質 (Al, Ti, Fe)、炭酸塩 (Mg, Ca, Sr)、スキャベンジング (V, Mn, Co, Cu)、有機物 (+スキャベンジング) (Ni, Zn, Cd, Pb)、が、沈降粒子の元素フラックスを支配していることが示された (図2)。上部大陸地殻の組成とを比較にもとづく余剰フラックスの推定により、Vの25~73%、Mnの56~91%、Coの54~81%、Ni、Cu、Zn、Cd、Pbの約80%以上がスキャベンジング (+生物による取り込み) によるものであることが明らかにされた。Feの余剰フラックスは、Site 7での15% (浅層) 及び8% (深層) に対し、Site 6で25%、Site 8で33%とやや高い傾向を示した。

鉄同位体分析の結果、各地点 (n=4) における鉄同位体組成 ($\delta^{56}\text{Fe}$) の平均値 ($\pm 1\sigma$) は、Site 6で $-0.08 \pm 0.02\text{‰}$ 、Site 7浅層で $-0.05 \pm 0.04\text{‰}$ 、Site 7深層で $-0.17 \pm 0.04\text{‰}$ 、Site 8で $-0.24 \pm 0.09\text{‰}$ であった (図3)。これらの値は大陸地殻の平均的な値 $+0.1\text{‰}$ よりも低い。Site 6及びSite 7浅層の $\delta^{56}\text{Fe}$ は、これまでに報告されている風成塵や遠洋性粘土の値の範囲内であった。Site 7深層の $\delta^{56}\text{Fe}$ は浅層よりも約0.1%低く、鉄マンガン酸化物の影響が考えられる。Site 8の値は、Site 6とFeの余剰フラックスが同程度にも関わらず $\delta^{56}\text{Fe}$ は0.1%以上低く、鉄マンガン酸化物に加えて生物による軽い鉄の取り込みが影響している可能性が示唆された。Site 8の余剰Feフラックス33%を全て有機物由来と仮定し、風成塵の鉄同位体組成を -0.05‰ として計算すると、有機物の鉄同位体組成は -0.63‰ と見積もられた。

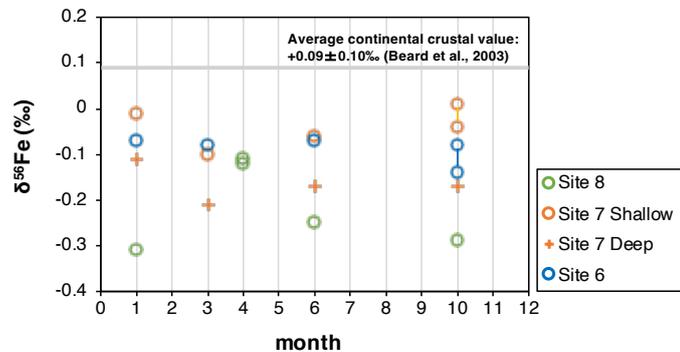


図3. セジメントトラップ各地点における鉄同位体組成とその季節変動。図中の実線は大陸地殻の平均値を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Yamaoka Kyoko, Suzuki Atsushi, Tanaka Yuichiro, Suzumura Masahiro, Tsukasaki Ayumi, Shimamoto Akifumi, Fukuhara Tatsuo, Matsui Takaaki, Kato Shogo, Okamoto Nobuyuki, Igarashi Yoshiaki | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Late Summer Peak and Scavenging-Dominant Metal Fluxes in Particulate Export Near a Seamount in the Western North Pacific Subtropical Gyre | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science | 6. 最初と最後の頁 558823 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/feart.2020.558823 | 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 Usui A., Hino H., Suzushima D., Tomioka N., Suzuki Y., Sunamura M., Kato S., Kashiwabara T., Kikuchi S., Uramoto G.-I., Suzuki K., Yamaoka K. | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Modern precipitation of hydrogenetic ferromanganese minerals during on-site 15-year exposure tests | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 3558 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-60200-5 | 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 - |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 山岡香子, Jasper Konter, 川幡穂高 |
| 2. 発表標題 中部北太平洋東経175度線上から採取された沈降粒子の元素フラックスと鉄同位体組成 |
| 3. 学会等名 2022年度日本地球化学会年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 臼井 朗, 山岡香子, 柏原輝彦, 日野ひかり |
| 2. 発表標題 海底沈着実験による元素濃集のメカニズム解明 |
| 3. 学会等名 JpGU Meeting 2022 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yamaoka, K., Kawahata, H. |
| 2. 発表標題 Annual particulate element fluxes in the central North Pacific Ocean from 30° to 46°N along 175°E |
| 3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Usui, A., Hino, H., Suzushima, D., Kashiwabara, T., Tomioka, N., Yamaoka, K. |
| 2. 発表標題 Modern precipitation of ferromanganese oxides and metal accumulation during 12-15-yr on-site experiment at NW Pacific seamounts |
| 3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

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 | ハワイ大学 | | |