

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24310006

研究課題名(和文) 現場型自動分析計を用いた熱水起源微量金属元素の広域調査技術の開発

研究課題名(英文) Development of hydrothermal-derived trace metals monitoring method in the ocean by using the in-situ auto analyzer

研究代表者

小畑 元 (Hajime, Obata)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：90334309

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：海洋の鉄収支に大きな影響を及ぼす熱水プルームにおいて、微量金属元素の挙動を研究した。まず、熱水プルーム中の鉄(II)を正確に測定するため、溶存酸素、硫化物濃度による測定値の補正法を開発した。ファンデファーカ海嶺での観測にこの方法を適用し、より正確な鉄(II)の分布を明らかにした。また、長崎県橋湾の沿岸熱水域において海水中の亜鉛の存在状態を調べた。海水中の亜鉛は硫化水素と有機配位子によって存在量がコントロールされていると考えられる。一方、現場型自動分析計を用いて、外洋域の水深1500mまでの鉄(II)濃度を連続観測することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：We investigated distributions and biogeochemical cycles of trace metals in hydrothermal plumes that have strong influences on dissolved iron budget in the ocean. We first developed a correction method of Fe(II) measurements in hydrothermal plumes by using dissolved oxygen and sulfide concentrations in water samples. Using this correction method, we revealed the vertical Fe(II) distribution at the Juan de Fuca Ridge more accurately. On the other hand, zinc speciation in seawater was examined in the coastal hydrothermal area in Tachibana Bay in Nagasaki, Japan. The Zn distribution was seemingly regulated by existing sulfides and organic ligands in seawater. Moreover, we obtained a vertical Fe(II) distribution to a depth of 1500m in the South Pacific Ocean continuously with an in-situ auto analyzer.

研究分野：海洋地球化学

キーワード：熱水プルーム 鉄 亜鉛 硫化物 有機配位子 現場型自動分析計

## 1. 研究開始当初の背景

海洋には広範囲の高栄養塩・低クロロフィル(HNLC)海域が広がっており、この海域での植物プランクトンの成育については海水中の鉄の不足が制限因子になっていると考えられる(Martin, 1990)。生物ポンプに代表される海洋の炭素循環過程を把握するためには、生物生産の制限因子となりうる鉄の海洋での循環過程を明らかにすることが重要である。海洋における鉄のグローバルな循環過程を解明することの重要性は世界的に認知されており、国際 GEOTRACES 計画の中心的な課題として取り上げられている (Score Working Group, 2007)。海洋での鉄の循環過程については未知な点が多いが、この 10 年で明らかになりつつある新たな発見は、海底熱水活動がグローバルな海洋の鉄収支に及ぼす影響である。海底熱水活動から供給される鉄は、総量としては河川からの流入に匹敵する程度と予想されていたが (Elderfield & Schulz, 1996)、熱水噴出後は速やかに鉄(II)から鉄(III)に酸化され噴出域付近でほとんど除去されると考えられてきた。このため、熱水の影響は局所的であり、グローバルな供給源としては重要視されてこなかった。しかし、熱水噴出域から離れた場所においても、深層水中で熱水起源と考えられる鉄の濃度上昇が観測されるようになり(Boyle et al., 2005; Wu et al., 2011)、熱水の影響の再評価が必要となった。熱水の影響についてモデルを用いた研究は実施されているが(Tagliabue et al., 2010)、十分な観測データが得られているわけではなかった。このような状況の中、2009年に GEOTRACES-Japan のインド洋航海が実施された。この航海においてインド洋では、中央海嶺から深層水中に鉄が供給され、広範囲に影響が及んでいることが初めて観測結果として示された(Nishioka et al., 2013)。その後、様々な海域において行われた GEOTRACES 関連航海において、海底熱水活動によって多量の鉄が放出されている様子が観測されている(Klunder et al. 2012; Saito et al. 2013; Resing et al. 2015)。

一方、噴出口から放出された熱水が海水と混合して熱水プルームとなり、どのように広がっているかという点については十分には解明されていない。特に熱水起源の鉄が深層水中に保持されるメカニズムは、全く分かっていない。熱水から放出された鉄(II)が比較的酸化されない形で存在している可能性(Toner et al., 2009)、硫化鉄(II)がナノ粒子として長時間海水中を漂っている可能性(Mustafa et al., 2011)、鉄(II)から鉄(III)への酸化は速やかであるが有機配位子との錯生成により安定化される可能性(Bennett et al., 2008)などが挙げられている。しかし、いずれのプロセスも十分に研究が進んでおらず、個々のプロセスを定性的、かつ定量的に明らかにしていくことが求められていた。

## 2. 研究の目的

海洋の炭素循環を把握するためには、生物生産の制限因子となる鉄の海洋での循環過程を明らかにすることが重要である。近年、海底熱水活動がグローバルな海洋での鉄収支に大きな影響を及ぼすことが分かってきた。しかし、熱水プルーム中の鉄が広がる範囲や深層水中に保持されるメカニズムは全く明らかにされていない。本研究では、海洋深層に広がる熱水プルーム中の鉄濃度を精密に測定する方法を開発し、深層水中の熱水プルームを追跡する手法の確立を目指した。

また、熱水プルーム中の微量金属元素の存在状態は深層における長距離輸送過程に大きく関わる。そのため、熱水プルーム中の微量金属元素の存在状態の変化と海水からの除去メカニズムの解明を目指した。

さらに本研究では、海洋深層に広がる熱水プルーム中の鉄(II)濃度を現場測定するシステムの開発を目指した。海洋表層を観測するために開発された鉄(II)の現場型自動分析計を深層で使用し、熱水探査への適用を検討していく。

## 3. 研究の方法

## (1) 深層水中の極微量鉄(II)の船上分析法

海水中の鉄(II)は、アルカリ性の条件下でルミノールと反応して化学発光を生じる。この化学発光を光電子増倍管によって検出することにより、海水中のピコモルレベル( $10^{-11}$  ~  $10^{-12}$  M)の鉄(II)を測定することができる(King et al. 1995)。本研究では、ペリスタリックポンプによって、海水とルミノール溶液を混合し、化学発光検出器で発光強度を測定するフロー分析法を使用した。この方法による海水中の鉄(II)の検出限界は 3 - 43 pM 程度となった。

(2) 外洋域における試料は、白鳳丸 KH-12-3 および 4 次研究航海において採取した。海水試料は CTD-マルチ採水システムに取り付けた X 型ニスキン採水器により採水した。X 型ニスキン採水器の内部はテフロンコートをし、界面活性剤・塩酸・超純水により洗浄した。採取した海水は、孔径 0.2 $\mu$ m のポリサルフォン製カートリッジにより濾過した。鉄(II)測定時には、濾過した海水をすべて 5 分以内に分析した。

一方、沿岸熱水域の観測では、長崎大学水産学部の鶴洋丸を利用した。海水は CTD-マルチ採水システムに取り付けた X 型ニスキン採水器により採取した。海水は、孔径 0.2 $\mu$ m のポリサルフォン製カートリッジにより濾過した。硫化物については船上で速やかに Cathodic Stripping Voltammetry(CSV)法(Luther and Tsamakis, 1989)により分析を行った。濃度分析用試料は酸を添加して持ち帰り、存在状態を調べるための試料は冷凍して持ち帰った。海水中の亜鉛は、実験室において海水試料を紫外線照射した後、APDC を用いた CSV

法により測定した(van den Berg, 1985; Kim et al., 2015)。亜鉛と有機配位子との錯生成については、競争配位子平衡-CSV法(Kim et al., 2015)により測定を行った。

### (3) 現場型自動分析法

現場型自動分析装置(紀本電子製)に、鉄(II)測定のためのルミノール化学発光系を適用した。送液用ペリスタリックポンプ、テフロン製電磁バルブは油漬けの被圧容器に収納した。光電子増倍管、CPUはアルミ製耐圧容器内に収容した。流路は全て内径1mmのテフロン製チューブでつなぎ、ペリスタリックポンプによって海水・試薬を流すフローシステムを作製した。流路の切り替えはテフロン製電磁バルブによって行った。耐圧容器にアクリル製の窓を取り付け、化学発光の強度は耐圧容器内の光電子増倍管により測定した。アクリル製窓にはテフロンチューブを螺旋状に巻いたフローセルを取り付けた。

## 4. 研究成果

### (1) ルミノール系化学発光を用いた熱水ブルーム中の鉄(II)の分析法

海洋表層中の鉄(II)の測定法については様々な研究が報告されている(例えば、Bowie et al., 2002; Croot et al., 2007; Ussher et al., 2007; Kondo and Moffett, 2013)。しかし、熱水ブルームの多くは深層に存在が確認されており、ブルーム中の鉄(II)の測定法については十分に検討されていなかった。そこで本研究では新たな検量線法を検討した。鉄(II)の酸化速度に関わる水温、pH、溶存酸素濃度、硫化物濃度を変化させ、検量線がどのように変化するかを実験的に調べた。その結果、検量線の傾きは溶存酸素濃度に強く依存することが明らかになった。これまで、深層水中の鉄(II)測定時には大気中の酸素を十分に含んだ海水を用いて検量線を作成していたが、分析系内での鉄(II)の酸化速度が早いいため、実試料中の鉄(II)と異なる結果が得られていた。また、硫化物濃度が高い海水(40nM以上)についても、分析系内での酸化が抑えられ、検量線用

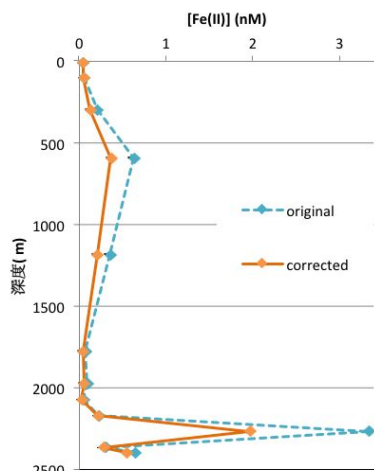


図1. ファンデフーカ海嶺における鉄(II)の鉛直分布補正前と補正後のデータを示した。

試料と実試料の間に差が生じることが明らかになった。そこで本研究では、試料中の溶存酸素濃度と硫化物濃度を用いて検

量線を補正する方法を開発した。

白鳳丸KH-12-4次研究航海において東太平洋ファンデフーカ海嶺で観測された熱水ブルーム中の鉄(II)濃度をこの補正法を用いて計算した。その結果を図1に示す。最も熱水の影響が強いと考えられる深度においては、従来の方法では鉄(II)濃度を1.7倍過大評価していたことが明らかになった。本補正法も用いることによって、全溶存鉄濃度を鉄(II)濃度が超えるという問題が解決され、より正確な鉄(II)濃度を測定することが可能となった。鉄(II)は熱水ブルーム中の酸化還元状態を表す指標にもなることから、熱水ブルーム中の微量金属元素の存在状態を研究する上で、重要な成果と考えられる。

### (2) 橋湾における亜鉛の存在状態とその挙動

長崎県橋湾において海水中の亜鉛の分析を行った。橋湾の小浜温泉沖では、海底から気泡が生じる現象が報告されており、沿岸熱水活動が存在している可能性がある。小浜温泉沖の熱水活動域において亜鉛濃度の鉛直分布を求めたところ、底層付近における濃度減少を観測した(図2)。濃度減少が観測された深度では硫化水素も検出されており(46-96nM)、亜鉛が硫化物として除去されてい

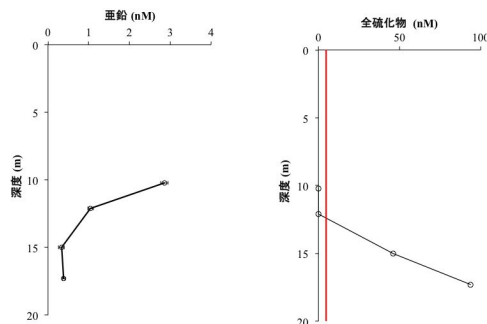


図2. 橋湾小浜温泉沖における亜鉛と全硫化物の鉛直分布

る可能性を示している。一方、橋湾では多くの場合、有機配位子(0.88 - 1.6 nM)が溶存態亜鉛の濃度(0.3 - 3.1 nM)を上回り、亜鉛は有機錯体を形成している(88-97%)ことが明らかになった。硫化物濃度、硫化亜鉛の安定度定数、有機配位子と亜鉛の安定度定数から亜鉛の存在状態を推定した。有機配位子が存在しなかった場合、亜鉛濃度は0.03nM程度しか水中に存在できないが、有機配位子が存在することにより、0.38nMの亜鉛が溶存態として存在することができる。橋湾のような沿岸熱水域においては、有機配位子の存在により海水中の亜鉛が比較的高濃度に保たれているというメカニズムが明らかになった。

### (3) 現場型自動分析装置を用いた外洋水の鉄(II)濃度の観測

本研究で開発した現場型自動分析計は南太平洋において使用された。水深1500mまでの観測に適用し、データを取得することに成功した。表層では比較的高濃度(約80pM)であったが、水深200m付近まで指数関数的に鉄(II)は減少し、10pM程度となった。表層での光反応によって生成された鉄(II)が、海水中的溶存酸素によって酸化されている様子を示

している。一方、200 - 350mの深度では10pM程度の鉄(II)が存在したが、それ以深では検出限界以下(約3pM程度)となった。本研究により、中深層にかけて外洋水レベルの鉄(II)を測定することが可能となった。また、装置全体の軽量化を図るため、電池式のバッテリーを取り付け、その動作についても検討を行った。

#### (4)北太平洋中深層における鉄(II)

北太平洋の中・深層水中の鉄(II)について白鳳丸KH-12-3および4次研究航海において観測を行った。測定には船上分析法を適用した。溶存酸素極小層において鉄(II)濃度は上昇する傾向が見られた。現場の海水を用いて鉄(II)の酸化速度を実験的に求めたところ、西部北太平洋の溶存酸素極小層では鉄(II)の寿命は10時間程度となった。これらの結果から、外洋域における鉄(II)は生物起源粒子などから放出され、水中で速やかに酸化されていることが分かる。一方、水中の鉄(II)濃度と水温や溶存酸素濃度との関係を求めたところ、溶存酸素と鉄(II)濃度には逆相関があることが示された。溶存酸素濃度が低いほど鉄(II)の酸化速度が遅くなることから、海洋内部で生成された鉄(II)は溶存酸素濃度が低いところでは酸化されにくく、比較的高濃度に保たれていると考えられる。

#### (6) まとめ

本研究では、まず外洋域の中深層におけるバックグラウンドレベルの鉄(II)の分布を調べ、その挙動を解析した。また、分析法を改良することにより、熱水プルーム中の鉄(II)濃度をより正確に測定することが可能となった。ルミノール化学発光船上分析法を用いることにより迅速な測定が可能であり、熱水プルーム中の鉄(II)のマッピングに適用することもできる。さらに、現場型自動分析装置を用いて1500mの深度まで鉄(II)を観測することが可能となった。沖縄トラフなど比較的水深の浅い海域の熱水活動調査には十分に適用が可能である。

一方、沿岸熱水活動域において、海水中の亜鉛が有機錯体と錯生成することにより、硫化物としての除去が緩和されるというシステムを明らかにした。熱水プルームにおいては、有機配位子と硫化物イオンが微量金属元素の存在状態に大きな影響を与えている可能性を示唆している。今後は、外洋域においても有機錯体と硫化物の挙動を調べ、熱水プルーム中の微量金属元素の挙動をさらに詳細に検討していく必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計12件)

<sup>1</sup> Okamura, K., T. Sugiyama, T. Noguchi, T. Fukuba, and K. Okino, 2015. Development of a deep-sea hydrogen sulfide ion sensor and its application for submarine hydrothermal plume exploration.

Geochemical Journal 49(6), 603-611, doi:10.2343/geochemj.2.0391 (査読有).

<sup>2</sup> Lee, J.-M., E. A. Boyle, T. Gamo, H. Obata, K. Norisuye and Y. Echegoyen, 2015. Impact of anthropogenic Pb and ocean circulation on the recent distribution of Pb isotopes in the Indian Ocean. Geochimica et Cosmochimica Acta 170, 126-144, doi:10.1016/j.gca.2015.08.013 (査読有).

<sup>3</sup> Kim, T., H. Obata and T. Gamo, 2015. Dissolved zinc and its speciation in the northeastern Indian Ocean and Andaman Sea. Frontier in Marine Science 2, 1-14 doi: 10.3389/fmars.2015.00060 (査読有).

<sup>4</sup> Nakayama, N., T. Gamo, K. Shirai, Y. Sano and H. Obata, 2015. Chemical speciation and vertical profiles of dissolved sulfides in oxic seawater over the sublittoral hydrothermal area of Kikai Caldera: Dispersed hydrothermally-derived sulfides throughout the water column. Geochemical Journal 49(4), e1-e7, doi:10.2343/geochemj.2.0374 (査読有).

<sup>5</sup> Kim, T., H. Obata, Y. Kondo, H. Ogawa, and T. Gamo, 2015. Distribution and speciation of dissolved zinc in the western North Pacific and its adjacent seas. Marine Chemistry 173(1-2), 330-341 doi:10.1016/j.marchem.2014.10.016 (査読有).

<sup>6</sup> Kim, T., H. Obata, T. Gamo and J. Nishioka, 2015. Sampling and onboard analytical methods for determining subnanomolar concentrations of zinc in seawater. Limnology and Oceanography: Methods 13, 30-39 doi:10.1002/lom3.10004 (査読有).

<sup>7</sup> Tazoe, H., T. Yamagata, Y. Sakuma, R. Watanabe, T. Matsumura, H. Obata and H. Nagai, 2014. Determination of picomolar beryllium levels in seawater with inductively coupled plasma mass spectrometry following silica-gel preconcentration. Analytica Chimica Acta 852, 74-81 doi:10.1016/j.aca.2014.09.015 (査読有).

<sup>8</sup> Suzuki, A., H. Obata, A. Okubo and T. Gamo, 2014. Precise determination of dissolved platinum in seawater of the Japan Sea, the Sea of Okhotsk and the western North Pacific. Marine Chemistry 166, 114-121 doi:10.1016/j.marchem.2014.10.003 (査読有).

<sup>9</sup> Kawagucci, S., T. Narita, H. Obata, H. Ogawa, and T. Gamo, 2014. Molecular hydrogen and carbon monoxide in seawater in an area adjacent to Kuroshio and Honshu

Island in Japan. *Marine Chemistry*, 164, 75-83 doi:10.1016/j.marchem.2014.06.006 (査読有).

<sup>10</sup> Kawagucci, S., Y. Ueno, K. Takai, T. Toki, M. Ito, K. Inoue, A. Makabe, N. Yoshida, Y. Muramatsu, N. Takahata, Y. Sano, T. Narita, G. Teranishi, H. Obata, S. Nakagawa, T. Nunoura, and T. Gamo, 2013. Geochemical origin of hydrothermal fluid methane in sediment-associated fields and its relevance to the geographical distribution of whole hydrothermal circulation. *Chemical Geology* 339, 213-225, doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.05.003 (査読有).

<sup>11</sup> Okubo, A., H. Obata, M. Magara, T. Kimura, H. Ogawa, 2013. Rapid collection of iron hydroxide for determination of Th isotopes in seawater. *Analytica Chimica Acta*, 804, 120-125, doi:10.1016/j.aca.2013.10.004 (査読有).

<sup>12</sup> Nishioka, J., H. Obata, D. Tsumune, 2013. Evidence of an extensive spread of hydrothermal dissolved iron in the Indian Ocean. *Earth and Planetary Science Letters* 361, 26-33 doi:10.1016/j.epsl.2012.11.040 (査読有).

[学会発表](計 20 件)

<sup>1</sup> 黄国宏, 金泰辰, 小畑元, 蒲生俊敬. Distribution and speciation of copper in seawater of the East China Sea. 日本海洋学会 2016 年度春季大会, 東京大学本郷キャンパス(東京), 2016 年 3 月 15 日.

<sup>2</sup> Obata, H., T. Kim, S. Takeda and T. Gamo. Dissolved zinc and its speciation in the coastal hydrothermal area of Japan. 2016 Ocean Sciences Meeting, New Orleans (USA), 2016 年 2 月 24 日.

<sup>3</sup> 小畑元, 高橋沙珠子, 蒲生俊敬, 西岡純. 北太平洋中深層における鉄(II). 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「太平洋南北断面観測による生物地球化学・生態系の総合研究」, 東京大学大気海洋研究所(千葉), 2016 年 2 月 19 日.

<sup>4</sup> 丸尾雅啓, 大田啓一, 早川和秀. 琵琶湖における溶存態鉄(II)・有機物の動態と光反応. 2015 年度日本地球化学会第 62 年会, 横浜国立大学(神奈川), 2015 年 9 月 18 日.

<sup>5</sup> 岡村 慶. 海水の化学センシングのための多連式採水器と化学センサ開発. 日本海洋工学会・海洋工学シンポジウム, 日本大学文理学部(東京), 2015 年 8 月 7 日.

<sup>6</sup> 小畑元, 西岡純, 金泰辰, 則末和宏, 武田重信, 涌田陽平, 蒲生俊敬. 相模湾および伊豆小笠原海溝域における鉄・亜鉛の挙動. 2014 年度に本地球化学会第 61 年会, 富山大学共通教育棟(富山), 2014 年 9 月 16 日.

<sup>7</sup> Kim, T., H. Obata, T. Gamo. Dissolved

zinc and its speciation in the northeastern Indian Ocean and Andaman Sea. 2014 年度に本地球化学会第 61 年会, 富山大学共通教育棟(富山), 2014 年 9 月 16 日.

<sup>8</sup> 鈴木麻彩実, 小畑元, 大久保綾子, 蒲生俊敬. 西部北太平洋および縁辺海における白金の分布. 2014 年度日本地球化学会第 61 年会, 富山大学共通教育棟(富山), 2014 年 9 月 16 日.

<sup>9</sup> Maruo, M., H. Obata, O. Mitamura, T. Akatsuka, N. Amahashi, H. Azumi, H.-S. Shin, Y. Seike, S. Sugahara, A. Yagi, M. Oyagi, N. Ishida, R. Somiya, J.K. Choi. Characterization of highly strong metal binding ligands in waters of natural lakes in Japan and Korea by electroanalysis. The 16th International Symposium on River and Lake, Chuncheon (Korea), 2014 年 8 月 25 日.

<sup>10</sup> Obata, H., J. Nishioka, T. Kim, K. Norisuye, S. Takeda, Y. Wakuta and T. Gamo. Clean seawater sampling for trace metals during Japanese GEOTRACES cruises. 11th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, ロイトン札幌(北海道), 2014 年 7 月 29 日.

<sup>11</sup> 丸尾雅啓, 小畑元. Pseudopolarography による琵琶湖水中銅配位子の評価. 日本地球惑星科学連合 連合大会 2014 年大会. パシフィコ横浜(神奈川), 2014 年 4 月 28 日.

<sup>12</sup> 小畑元, 西岡純, 金泰辰, 則末和宏, 武田重信, 涌田陽平, 蒲生俊敬. 新青丸 KS-13-T3 習熟航海におけるクリーンサンプリング. 2014 年度日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学(東京都), 2014 年 3 月 29 日.

<sup>13</sup> Obata, H., S. Takahashi, T. Gamo and J. Nishioka. Distribution of iron (II) in the Northwestern Pacific. 2014 Ocean Science Meeting, Honolulu (USA). 2014 年 2 月 26 日.

<sup>14</sup> 小畑元, 金泰辰, 蒲生俊敬, 武田重信, 森井康宏. 長崎県橘湾における海水中的亜鉛の存在状態. 2013 年度日本海洋学会秋季大会, 北海道大学(北海道), 2013 年 9 月 19 日.

<sup>15</sup> Kim, T., H. Obata and T. Gamo. Distribution and speciation of zinc in the northwestern Pacific and its adjacent seas. 2013 年度日本海洋学会秋季大会, 北海道大学(北海道), 2013 年 9 月 19 日.

<sup>16</sup> 高橋沙珠子, 小畑元, 蒲生俊敬. ルミノール化学発光法による中深層水中の鉄(II)測定. 2013 年度日本海洋学会秋季大会, 北海道大学(北海道), 2013 年 9 月 19 日.

<sup>17</sup> 小畑元, 高橋沙珠子, 金泰辰, 蒲生俊敬. 北太平洋の中深層における海水中的鉄(II). 第 60 回日本地球化学会年会, 筑波大学(茨城県), 2013 年 9 月 13 日.

<sup>18</sup> Obata, H., S. Takahashi, T. Gamo and J. Nishioka. Distribution of iron (II) in the Northwestern Pacific. Goldschmidt Conference, Florence (Italy), 2013 年 8 月 27 日.

<sup>19</sup> Takahashi, S., H. Obata, and T. Gamo. Distribution of iron(II) in the northeastern Pacific around the Juan de Fuca Ridge. 10th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, Brisbane (Australia), 2013年6月26日.

<sup>20</sup> 小畑元, 金泰辰, 蒲生俊敬, 西岡純. 海水中の微量金属元素分析のためのクリーンサンプリング技術. 日本地球惑星科学連合連合大会 2013年大会, 幕張メッセ(千葉県), 2013年5月22日.

〔図書〕(計 1 件)

小畑元(分担執筆), 朝倉書店, 「地球と宇宙の化学事典」(日本地球化学会編), 東京, 102 & 113.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小畑 元 (OBATA, Hajime)  
東京大学・大気海洋研究所・准教授  
研究者番号: 90334309

### (2) 研究分担者

岡村 慶 (OKAMURA, Kei)  
高知大学・教育研究部総合科学系複合領域  
科学部門・准教授  
研究者番号: 70324697

丸尾 雅啓 (MARUO, Masahiro)  
滋賀県立大学・環境科学部・准教授  
研究者番号: 80275156

蒲生俊敬 (GAMOS, Toshitaka)  
東京大学・大気海洋研究所・教授  
研究者番号: 70143550