

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709069

研究課題名(和文) 初期地球表層環境における化学的要素濃集プロセスの解明

研究課題名(英文) Chemical enrichment processes in Early Earth's surface environments

研究代表者

大竹 翼 (Otake, Tsubasa)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80544105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、約32億年前に形成した縞状鉄鉱層中のクロムスピネルの起源とクロム濃集の時空間的広がりを明らかにするために、南アフリカバーバトン地域での野外調査および鉄、クロム水酸化物の変質実験を行った。その結果、これまでマグマからしか形成しないと考えられていたクロムスピネルが、低温熱水環境下でも結晶化することが実証された。また、化学プロセスによるクロム濃集は、一部の露頭に限られていた。クロム濃集を規制する要因として、当時の鉄の供給源となった熱水活動の強さと堆積環境が考えられる。これらの結果は、当時の海洋にはクロムが酸化的な溶存種で溶解しており、海洋の一部がすでに酸化的だったことを示唆している。

研究成果の概要(英文)：Both geological survey in the Barberton Greenstone Belt, South Africa and laboratory experiments using a hydrothermal flow-through apparatus were conducted to investigate the origin of chromium spinel and temporal/special distributions of chromium enrichment found in a banded iron formation formed 3.2 billion years ago. The experimental results demonstrated that chromium spinel can be formed from iron and chromium hydroxides by the addition of dissolved ferrous iron under low temperature hydrothermal conditions (e.g., 150 degree Celsius). The results of geological survey showed that chromium enrichment in the banded iron formation were due to chemical processes. However, the chromium enrichments were localized in a particular geological unit and area. Important factors controlling the chemical enrichment of chromium are likely the degree of hydrothermal activity and sedimentary environments. These results suggest that a part of ocean was already oxygenated 3.2 billion years ago.

研究分野：地球化学

キーワード：バーバトン緑色片岩帯 初期地球 地球表層環境 縞状鉄鉱層 クロムスピネル 熱水実験 生命の進化

1. 研究開始当初の背景

初期 (45-18 億年前) 地球では、種々の大規模金属鉱床が形成されたことが知られている。その中でも、酸化還元環境によって化学的な挙動が異なる元素は、当時の地球表層環境の変化、特に酸素発生型光合成生物の進化による地球大気の酸化に伴い、鉱床の形成プロセスが変化し、大規模化したと考えられている (Holland, 2002)。例えば鉄鉱床では、海水から鉄が化学沈殿した縞状鉄鉱層から、縞状鉄鉱層がさらに地表での酸化による二次濃集を受けた高品位の大規模鉄鉱床へと変化 (Morris, 1985) しており、新たな鉱床探査の指針を与えるためには、初期地球表層環境の変遷を明らかにすることが必要である。

大規模鉄鉱床の母岩となりうる縞状鉄鉱層は、海水からの沈殿物を含み、かつ 24.5 億年以前にも形成していることから、初期地球の地球表層環境についての重要な情報を保持していると考えられる。近年、縞状鉄鉱層中の微量元素成分と鉄鉱物沈殿時の元素の分配挙動を実験的に調べることで、初期海洋の溶存成分を推定する研究が進められている (Konhauser et al., 2009; Frei et al., 2009 など)。研究代表者である大竹はこれまでの研究で、約 32 億年前に形成した堆積岩から磁鉄鉱 (Fe_3O_4) やクロム鉄鉱 ($FeCr_2O_4$) などのスピネル鉱物に富む縞状鉄鉱層を発見した。このような縞状鉄鉱層中のクロム濃集は当時の酸化環境を示す重要な証拠になりうるが、その空間的・時間的な広がりには分かっていない。また、海水からの初期沈殿物が変質や変成作用中にどのようにして上記のような鉱物相へ変化したのかが分かっていない。

2. 研究の目的

本研究では、(1) 鉄とクロムに富む化学堆積岩の地質学的・鉱物学的・地球化学的な特徴と時空間的な広がりを明らかにし、(2) 実験的に化学堆積岩中にみられるスピネル鉱物の形成プロセスを検証することで、初期地球表層における酸化還元環境を解明することである。

3. 研究の方法

以下のステップで研究目的を達成する:

- (1) 保存状態の良い 24.5 億年前以前の堆積岩層がみられる南アフリカ、バーバトン地域において地質調査を行うことにより、クロムに富む縞状鉄鉱層の堆積環境とその空間的・時間的広がりを明らかにする。
- (2) 採集試料の鉱物学的特徴を明らかにした後、試料のクロム濃度と共に微量元素濃度を分析し、鉄およびクロムを含む鉱物の形成プロセス・形成条件と縞状鉄鉱層形成時の元素濃集メカニズムを明らかにする。
- (3) 高温高压フロースルー実験装置を製作し、初期沈殿物質である鉄およびクロム水酸

化物からスピネル鉱物ができる交代反応プロセスを実験的に検証する。

4. 研究成果

(1) バーバトン緑色片岩体ムーディーズ層群におけるクロム濃集の広がり

本研究では、先行研究でクロム濃集がみられたバーバトン地域ムーディーズ層群で調査を行なったが、先行研究でクロム濃集がみられた Moodies Hills Block (MH) および北東に 10 km ほどに位置する新たな露頭である Gate of Paradise (GP) において地質調査を行った。ムーディーズ層群は風化に強い珪岩 (MdQ1~4) を鍵層として用いることで異なる露頭間でも同一層序を区別することが可能である。MH では MdQ2 から MdQ3 上部までの層序を確認でき、縞状鉄鉱層部が 2 層認められた (下部を MH MdS2, 上部を MH MdS3 とした)。GP では MdQ1~3 上部までの層序を確認でき、縞状鉄鉱層部が 3 層認められた。 (下部を GP MdS1, 中部を GP MdS2, 上部を GP MdS3 とした。) MH MdS2 と GP MdS1 はシルト質砂岩および砂岩の堆積層序に挟まれていたのに対し、MH MdS3, GP MdS2 および GP MdS3 ではシルト岩に挟まれていたという違いが認められた。また、MH・GP 共に MdS2 の縞状鉄鉱層が最も厚く (>5cm) 連続性を持っていた。

採集した縞状鉄鉱層は顕微鏡観察から微細な石英と赤鉄鉱からなる赤色層と 50 μ m ほどの比較的粒形の大きな磁鉄鉱から構成され、碎屑性粒子を含むことがあるものの典型的な酸化物型縞状鉄鉱層であることが確認できた。またクロムのホスト鉱物として、50 μ m ほどのクロム鉄鉱が磁鉄鉱中に内包され存在していた。時間的な広がりには GP の MdS1 と MdS2 を比較、空間的な広がりには MdS2 における MH と GP を比較することによって行くとし、採集試料の全岩組成分析を行った。分析結果から Cr/TiO_2 と Fe_2O_3/TiO_2 によって 3 つのグループに分けることができ、クロムと鉄濃集が認められた MH MdS2、クロムと鉄の微濃集が認められた GP MdS1、鉄

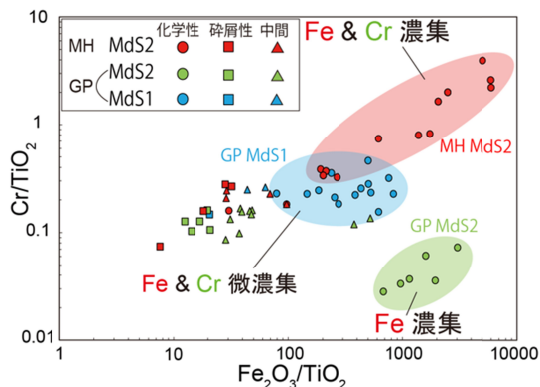


図 1. ムーディーズ層群の異なる露頭 (Moodies Hills Block: MH と Gate of Paradise: GP) における鉄とクロムの濃集。

のみの濃集がみとめられた GP MdS2 となっ

た (図 1).

代表的な碎屑性元素である Ti-Zr-Th によって両露頭の碎屑性成分を評価した結果、MH よりも GP の方がより塩基性岩の寄与が大きく、碎屑性成分がクロム濃集の違いに寄与した可能性は低いと考えられる。化学的なクロム濃集を引き起こした要因として、(i) 堆積環境、(ii) 熱水活動の強さの違いが考えられる。(i) に関して、クロム濃集が認められた MH MdS2 と GP MdS1 は砂岩堆積域であるのに対し、濃集が認められなかった GP MdS2 はシルト岩堆積域であり、浅い場のみクロムが濃集したと言える。(ii) に関して、共に濃集が認められた MH MdS2 と GP MdS1 において化学的な鉄の供給量が大きく異なっており、最大のクロム濃集が認められた MdS2 堆積時により強い熱水活動による鉄の供給があったと考えられる。これは MdS2 において縞状鉄鉱層の規模が大きいこと、また MdQ2 直上のみ玄武岩の産出が認められたという地質調査結果とも整合的であると言える。

(2) 高温高压フロースルー実験装置による鉄、クロム水酸化物の変質実験

本研究では縞状鉄鉱層の形成過程における初期続成作用や熱水変質作用を模擬したフロースルー型熱水実験装置を製作し、初期地球の海洋からの沈殿物であると考えられる鉄、クロム水酸化物 ((Cr, Fe)(OH)₃) に溶存二価鉄 (Fe²⁺_(aq)) を添加することで、その変質過程を調べた。フロースルー実験装置にはリアクションセルとプレリアクションセルを用意し、プレリアクションセルで酸性溶液と磁鉄鉱 (Fe₃O₄) を反応させることで Fe²⁺_(aq) を含む熱水を生成させ、リアクションセルにおいて (Cr, Fe)(OH)₃ と 150°C、5MPa の条件で最大 164 時間反応させた (図 2)。

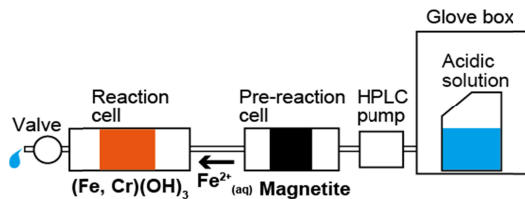
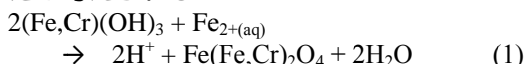


図 2. フロースルー型熱水実験装置概略

(Cr, Fe)(OH)₃ は Fe²⁺_(aq) と Cr⁶⁺_(aq) 溶液を室温で混合し、酸化還元および共沈反応によって沈殿させた。

実験の結果、リアクションセル通過後の溶液組成は pH が 3 から最大 9 程度まで上昇し、溶存鉄濃度が低下していった。pH の上昇は、(Cr, Fe)(OH)₃ の脱水変質に伴うものだと考えられ、その結果以下の反応が進行することで、リアクションセル内の溶存鉄濃度が低下したと考えられる：



実験生成物の XRD 分析の結果から、主な生

成物はゲーサイトであったが、スピネル鉱物のピークも検出された。また、SEM 分析の結果からゲーサイトと思われる針状の結晶だけでなく、スピネル鉱物と思われる正八面体様の結晶も観察された (図 3)。

さらに TEM-EDS 分析では、正八面体様の結晶はスピネル鉱物からなる多結晶体であり、クロムを含むスピネル鉱物であることが明らかになり、反応(1)によるクロムスピネルの

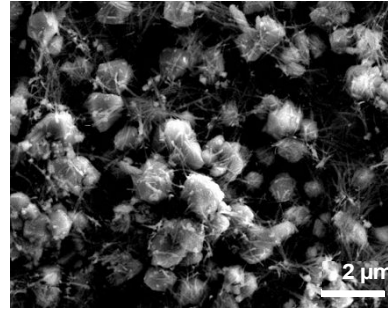


図 3. 実験生成物の SEM 画像

生成が確認された。

(3) まとめ

(2)の実験的研究により、低温熱水環境下でもクロムスピネルが形成可能なことが証明され、従来の「クロムスピネルはマグマプロセスのような高温でのみ結晶化が可能」という考え方を覆すこととなった。したがって、先行研究で発見された縞状鉄鉱層中のクロムスピネルも、海水から沈殿した鉄、クロム水酸化物のような物質が熱水変質により形成した可能性が十分考えられ、縞状鉄鉱層中のクロムの化学的な濃集を支持するものである。また、(1)の野外調査および採取した試料の地球化学的分析により、32 億年前当時に砂岩堆積域のような極浅海域にのみクロムが溶存できるような酸化的な環境が存在しており、また熱水活動によって供給された鉄と化学的な反応 (酸化還元反応) を起こすことでクロムが濃集したと考えられる。これは現在考えられているよりも約 7 億年早い時代から、すでに酸化還元に関わる元素サイクルが始まっていたことを示唆している。しかしながら、クロムの濃集は一部に限られており、当時海洋全体が酸化的ではなかった可能性が高い。

< 引用文献 >

- Frei, R., Gaucher, C., Poulton, S.W., and Canfield, D.E. (2009) Fluctuations in Precambrian atmospheric oxygenation recorded by chromium isotopes. *Nature* 461, 250-253.
Holland, H.D., (2002) Volcanic gases, black smokers, and the great oxidation event. *Geochim. Cosmochim. Acta* 66, 3811-3826.
Konhauser, K.O., Pecoits, E., Lalonde, S.V., Papineau, D., Nisbet, E.G., and others (2009) Oceanic nickel depletion and a methanogen

famine before the Great Oxidation Event. *Nature* 458, 750-753.

Morris, R. C. (1985) Genesis of iron ore in Banded Iron-Formation by supergene and supergene-metamorphic processes — a conceptual model, in: K.H. Wolf (Ed.), *Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposit* 13, Elsevier, Amsterdam, 73–235.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

1. Ito, A., Otake, T., Shin, K., Ariffin, K. S., Yeoh, F.-Y., and Sato, T. (2017) Geochemical signatures and processes in a stream contaminated by heavy mineral processing near Ipoh city, Malaysia. *Applied Geochemistry*, 82, 89-101 (査読あり). DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.05.007
2. Ooi, C.-H., Ito, T., Otake, T., and Yeoh, F.-Y. (2017) Cerium removal by activated carbon derived from palm kernel shell. *Advanced Materials Letters*, 8, 145-149 (査読あり). DOI: 10.5185/amlett.2017.7061
3. Mäder, U., Jenni, A., Lerouge C., Gaboreau, S., Miyoshi, S., Kimura, Y., Cloet, V. Fukaya, M., Claret, F., Otake, T., Shibata, M., and Lothenbach, B. (2017) 5-year chemico-physical evolution of concrete-claystone interfaces. *Swiss Journal of Geosciences*, 110, 307-327 (査読あり). DOI: 10.1007/s00015-016-0240-5
4. Huang, R., Furukawa, Y., Otake, T., and Kakegawa, T. (2017) Effects of glycine, water, ammonia, and ammonium bicarbonate on the oligomerization of methionine. *Origin of Life and Evolution of Biospheres*, 47, 145-160 (査読あり). DOI: 10.1007/s11084-016-9518-x
5. Hase, H., Nishiuchi, T., Sato, T., Otake, T., Yaita, T., Kobayashi, T., and Yoneda, T. (2017) A novel method for remediation of nickel containing wastewater at neutral conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 329, 49-56 (査読あり). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.01.019
6. Francisco, P. C. M., Sato T., Otake T., and Kasama, T. (2016) Kinetics of Fe³⁺ mineral crystallization from ferrihydrite in the presence of Si at alkaline conditions and implications for nuclear waste disposal. *American Mineralogist*, 101, 2057-2069 (査読あり). DOI: 10.2138/am-2016-5589
7. Otake, T., Yokoyama, T., Francisco, P. C. M., and Watanabe, K. (2015) Effect of octahedrally coordinated aluminum ions on the uptake of Au(III) chloro-hydroxy complexes in Al-Si systems. *Geochemical Journal*, 49, 343-350 (査読あり). DOI: 10.2343/geochemj.2.0360

〔学会発表〕(計 33 件)

1. Zhou, S., Sato, T., and Otake, T., Adsorption and co-precipitation behavior of antimonite and antimonate with synthetic ferrihydrite and Si-ferrihydrite, The 3rd Asian Clay Conference, Guangzhou, China, November 19, 2016.
2. Otake, T., Spatial and temporal distributions of metallic ore deposits, 2016 5th International Doctoral Symposium: Sustainable Management of Resources and Environment in the 21st Century, Sapporo, Japan, November 10th, 2016 (招待講演).
3. 大友 陽子, 大竹 翼, 掛川 武, 西グリーンランド・イスア表成岩帯における変堆積岩の地質学的・地球化学的特徴及び希土類鉱物の産状からみる約38億年前の微生物棲息環境, 日本地球化学会第63回年会, 大阪市立大学 (大阪), 2016年9月16日.
4. 大竹 翼, 梁 智現, 大友 陽子, 佐藤 努, フロースルー型装置を用いた低温熱水環境下におけるクロムスピネルの合成実験, 日本地球化学会第63回年会, 大阪市立大学 (大阪), 2016年9月14日.
5. 伊藤 茜, 大竹 翼, 宮崎 あかね, 佐藤 努, 陰イオン共存下における鉄(水)酸化物へのU(VI)吸着に関する拡散二重層表面錯体モデル, 日本地球化学会第63回年会, 大阪市立大学 (大阪), 2016年9月14日.
6. Ito, A., Otake, T., Shin, K., Ariffin, K. S., Yeoh, F.-Y., and Sato, T. Fe and Pb isotopic signatures of the processing of REE-bearing heavy minerals in a contaminated stream near Ipoh city, Malaysia, Goldschmidt Conference 2016, okohama, Japan, July 29th, 2016.
7. Yang, J., Otake, T., and Sato, T., Experimental study for understanding hydrothermal alteration of iron and chromium hydroxides in a flow-through system, Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan, July 28th, 2016.
8. Nakajima, R., Ohtomo, Y., Otake, T., Kakegawa, T., and Sato, T., Biosignatures recorded in geochemical correlations between organic matter and Fe-bearing minerals in 3.2Ga banded iron formations, Barberton Greenstone Belt, South Africa, Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan, July 28th, 2016.
9. Francisco, P. C. M., Ozaki, Y., Sato, T. and Otake, T., Effects of Si on the behavior of co-precipitated Se() during Fe-oxide transformation at alkaline conditions, Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan, July 27th, 2016.
10. 中村 峻介, 大竹 翼, 山田 亮一, 申 基澈, 小野 修司, 佐藤 努, 火山性塊状硫化物

- 鉱床に付随する鉄石英の地球化学的特徴と形成環境, 資源地質学会第66回年会講演会, 東京大学小柴ホール (東京), 2016年6月24日.
11. 後藤 翔太, 大竹 翼, 川本 大祐, 横山 拓史, 小野 修司, 伊藤 真由美, 佐藤 努, 沖縄トラフ海底熱水鉱床における鉱石鉱物組成の多様性とその定量的評価, 資源地質学会第66回年会講演会, 東京大学小柴ホール (東京), 2016年6月23日.
 12. Goto, S., Otake, T., Kawamoto, D., Yokoyama, T., Ito, M., and Sato, T., Quantitative analyses for mineralogical composition of sulfide ores using powder X-ray diffraction and Mössbauer spectroscopy, 8th International Conference on Geological and Geo-resources Engineering & 7th Mineral Symposium, Penang, Malaysia, September 29th, 2015.
 13. 伊藤 茜, 大竹 翼, 安楽 総太郎, 申 基澈, Kamar Shah Ariffin, Fei Yee Yeoh, 佐藤 努, マレーシアの汚染河川における鉄・鉛同位体と地球化学モデリングを用いた環境影響評価, 日本地球化学会第62回年会, 横浜国立大学教育人間科学部 (神奈川), 2015年9月17日.
 14. 大竹 翼, 鈴木 陵平, 山田 亮一, 申 基澈, 昆 慶明, 佐藤 努, 秋田県北鹿地域にみられる鉄・マンガンに富む化学堆積岩の鉄同位体比の特徴と黒鉱鉱床との関係性, 日本地球化学会第62回年会 横浜国立大学教育人間科学部 (神奈川), 2015年9月16日.
 15. 伊藤 茜, 大竹 翼, 安楽 総太郎, 申 基澈, Kamar Shah Ariffin, Fei Yee Yeoh, 佐藤 努, マレーシアの汚染河川における鉄・鉛同位体を用いた環境影響評価, 資源地質学会第65回年会講演会, 東京大学小柴ホール (東京), 2015年6月25日.
 16. 後藤 翔太, 大竹 翼, 川本 大祐, 横山 拓史, 伊藤 真由美, 佐藤 努, 粉末X線回折法とメスパウワ分光法を用いた硫化鉱石鉱物組成の定量的評価, 資源地質学会第65回年会講演会, 東京大学小柴ホール (東京), 2015年6月25日.
 17. 大竹 翼, 鈴木 陵平, 山田 亮一, 申 基澈, 昆 慶明, 佐藤 努, 黒鉱鉱床形成後に堆積した鉄・マンガン堆積岩に記録された鉄同位体分別, 資源地質学会第65回年会講演会, 東京大学小柴ホール (東京), 2015年6月25日.
 18. 新井 悠, 佐藤 努, 大竹 翼, 鉄鋼スラグの水和反応による道路用路盤材の強度発現, 平成27年度資源・素材学会北海道支部春季講演会, 函館市国際水産・海洋総合研究センター (北海道), 2015年6月13日.
 19. 後藤 翔太, 大竹 翼, 川本 大祐, 横山 拓史, 伊藤 真由美, 佐藤 努, 粉末X線回折法とメスパウワ分光法を用いた硫化鉱石中の鉄および鉛鉱物組成の定量的評価, 平成27年度資源・素材学会北海道支部春季講演会, 函館市国際水産・海洋総合研究センター (北海道), 2015年6月13日.
 20. 石川 宏, 大竹 翼, 佐藤 努, 掛川 武, 南アフリカバーバトン地域に産出する32億年前に形成された縞状鉄鉱層中のクロム濃集の広がり, 日本地球惑星連合大会2015年大会, 幕張メッセ (千葉), 2015年5月26日.
 21. 新井 悠, 大竹 翼, 佐藤 努, 道路用路盤材に用いる鉄鋼スラグの水和反応と硬化作用, 日本地球惑星連合大会2015年大会, 幕張メッセ (千葉), 2015年5月26日.
 22. Puji Astuti, T., Surjono, S., Warmada, I., Kusuma, D. P., Tsukada, Y., Otake, T., and Sato, T., The Relationship Between Smectite/Illite Ratios and Diagenetic History of Sandstone Reservoir, Batu Ayau Formation, Upper Kutai Basin, East Kalimantan, Indonesia. International Petroleum Technology Conference 2014, Kuala Lumpur, Malaysia, December 10th, 2014.
 23. Otake, T., Ito, A., Anraku, S., Ariffin, K. S., Yeoh, F. Y., and Sato T., Environmental impacts associated with REE resources: case study of the tin tailing processing industry in Malaysia, 4th Asia Africa Mineral Resources Conference, Algiers, Algeria, October 13th, 2014 (招待講演).
 24. 福原 直基, 佐藤 努, 大竹 翼, 低温蛇紋岩化作用に伴う水素生成-付随合金鉱物の役割-, 第58回粘土科学討論会, 福島市A・O・Z (福島), 2014年9月26日 (招待講演).
 25. 大竹 翼, 鈴木 陵平, 山田 亮一, 申 基澈, 昆 慶明, 佐藤 努, 鉄・マンガン堆積岩中のレアアースパターンと鉄同位体比から推定される黒鉱鉱床形成後の堆積環境の変遷, 日本地球化学会第61回年会, 富山大学五福キャンパス (富山), 2014年9月16日.
 26. 石川 宏, 大竹 翼, 川井 洋二, 佐藤 努, 掛川 武, 南アフリカ・バーバトン地域ムーディーズ層群中の縞状鉄鉱層中におけるクロム濃集の空間的広がり, 日本地球化学会第61回年会, 富山大学五福キャンパス (富山), 2014年9月16日.
 27. 伊藤 茜, 大竹 翼, 安楽 総太郎, Kamar Shah Ariffin, Fei Yee Yeoh, 佐藤 努, マレーシアの汚染河川におけるREE,U,およびThの地球化学的挙動, 2014年度日本地球化学会年会, 富山大学五福キャンパス (富山), 2014年9月16日.
 28. Suzuki, R., Otake, T., Yamada, R., Shin, K., KON, Y., Yoneda, T., Sato, T., Large Fe isotope fractionations in ferruginous sedimentary rocks above Kuroko deposits in the Hokuroku District, Asia Oceania

- Geosciences Society 2014, Sapporo, Japan, July 31st, 2014.
29. Ito, A., Otake, T., Anraku, S., Ariffin, K. S., Yeoh, F. Y. and Sato, T., Anthropogenic influences on the geochemistry of stream waters in Malaysia: Effects of the tin tailing processing industry, Asia Oceania Geosciences Society 2014, Sapporo, Japan, August 1st, 2014.
30. 伊藤 茜, 大竹 翼, 安楽 総太郎, Kamar Shah Ariffin, Fei Yee Yeoh, 佐藤 努, マレーシアにおける錫尾鉱から回収される重鉱物プロセッシングによる環境影響, 資源地質学会第 64 回年会講演会, 東京大学小柴ホール (東京), 2014 年 6 月 27 日.
31. 大竹 翼, 海洋における酸化還元環境の変遷と元素濃集, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜 (神奈川), 2014 年 4 月 28 日 (招待講演).
32. 鈴木 陵平, 大竹 翼, 山田 亮一, 申 基澈, 昆 慶明, 秋田県北鹿地域にみられる黒鉄鉱床形成後に堆積した鉄・マンガン堆積岩に記録された大きな鉄の同位体分別, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜 (神奈川), 2014 年 4 月 30 日.
33. 石川 宏, 大竹 翼, 川合 祥次, 佐藤 努, 掛川 武, 南アフリカ・バーバトン地域に産出する約 32 億年前の縞状鉄鉱層におけるクロム濃集の空間的拡がり, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜 (神奈川), 2014 年 4 月 30 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大竹 翼 (Tsubasa Otake)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80544105