

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00184

研究課題名(和文) 国際大陸掘削計画による32億年前の生物圏 水圏 大気圏 岩石圏相互作用の解明

研究課題名(英文) Understanding biosphere-hydrosphere-atmosphere-lithosphere interactions 3.2 billion years ago with an international continental drilling program

研究代表者

大竹 翼 (Otake, Tsubasa)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：80544105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,340,000円

研究成果の概要(和文)：国際的な科学掘削プログラムであるICDPのBASEプロジェクトに参画した。掘削されたコアは計8本、総延長は3131mに渡り、当時の沿岸域・海洋環境や生態系を明らかにする上で原生風化の影響を最小限にとどめた貴重な試料を入手することができた。これまでに鉱山の地下坑道にて採取した碎屑物を含む化学堆積岩の鉱物学的解析および化学・同位体組成分析より、化学沈殿物である鉄が海洋からの初期沈殿の情報を保持していると考えられる。また、磁鉄鉱の微量元素組成分析は、当時の海洋表層が酸化していた可能性を示した。さらに、炭素質物質の分析結果から、この炭素質物質は微生物由来であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

掘削されたコアは歴代のICDPと比較しても長大であり、これらの試料は32億年前の最古の沿岸域から深海底の碎屑性・化学性の堆積岩を網羅しており、非常に貴重な試料を入手することができたと言える。また、これまでに得た堆積岩試料の分析からは当時の海洋がすでに一部酸化していた可能性を示すものであり、これまで考えられていたよりも早期の微生物生態系の進化があった可能性がある。また、発見された炭素質物質は微生物由来であり、当時の生態系において主要な役割を果たしていた可能性がある。32億年前の沿岸域の表層環境や生物活動について新たな知見を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：We participated BASE (Barberton Archean Surface Environments) project funded by ICDP (International Continental Drilling Program). The cores in 2021-2022 were drilled in 8 holes at 5 sites with the total length of 3131 m from the Moodies Group, Barberton Greenstone Belt in South Africa. This is one of the longest cores obtained in the ICDP, and expected to record oldest coastal area on the early Earth. Our preliminary geochemical and mineralogical data of ferruginous sedimentary rocks suggest the iron was enriched from chemical precipitation in the ancient seawater and preserve the primary isotopic and chemical signature during the chemical precipitation. Trace element chemistry in magnetite in the ferruginous sedimentary rocks may imply that a part of shallow ocean was already oxidized. The rocks also contain substantial amounts of carbonaceous materials that were likely biogenic in origin.

研究分野：地球化学

キーワード：科学掘削 縞状鉄鉱層 磁鉄鉱 クロム 炭素質物質 地球表層環境 光合成 鉄同位体

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

35~30 億年前という時代は地球システムや生物進化にとってターニングポイントであったと考えられるが、その物的証拠を有した地質帯は多くは残されていない。南アフリカ共和国・バーバトン緑色岩帯はその一つであり、35~32 億年前の海洋地殻を構成する火山岩や堆積岩から成る。変成度が低く堆積当時の情報を保持していることから初期地球の表層環境や生物活動に関する研究が数多く行われてきた。その中でも近年特に注目されているのが約 32 億年前に堆積したムーディーズ層群である。ムーディーズ層群には世界最古の沿岸域堆積岩が状態良く保存されており、これまでに鉄 (Fe) に富む化学堆積岩である縞状鉄鉱層 (Banded Iron Formation: BIF) 中の炭素質物質 (Bontognali et al., 2013)、バイオマットの痕跡 (Homann et al., 2018)、真核生物を思わせるような巨大な微生物化石 (Javaux et al., 2010) などの世界的にもユニークな発見が相次いでいる。しかしながら、露頭試料や鉱山内試料では現世風化の可能性を排除することや地層を連続的に採取することが難しい。そこで 2017 年 10 月にバーバトンで行われた国際ワークショップにおいて、国際大陸掘削プログラム (International Continental Drilling Program: ICDP) へのムーディーズ層群をターゲットとした掘削調査の提案が話し合われ、BASE (Barberton Archean Surface Environments) 計画として Heubeck 博士 (ドイツ、イェーナ大学) を代表として南アフリカ、フランス、ベルギー、イギリス、米国の研究者と国際共同申請し、2019 年 6 月に採択された。日本チームは本科研費から掘削費の一部をマッチングファンドとすることで、本プロジェクトに参画した。

### 2. 研究の目的

初期地球の表層環境や生態系解明に向けて近年注目を集めている南アフリカ・バーバトン緑色岩帯ムーディーズ層群において、

- (1) ICDP の BASE 計画に参画し、ムーディーズ層群から現世風化の少なくかつ連続した地層から 32 億年前の表層環境や生態系を明らかにする上で鍵となる浅海域で形成した堆積岩を採取すること
- (2) ムーディーズ層群の浅海域で形成した堆積岩のうち、陸域から物理的に運搬された碎屑性物質と海洋から沈殿した化学沈殿性の物質の両方を含む岩石を選び、それらの鉱物学および地球化学的特徴から当時の海洋環境と金属元素の挙動について明らかにすること
- (3) (2) で選んだ試料から有機物質を抽出し、当時の生態系についての手がかりを得ることを本研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試料

2019 年に ICDP に採択された BASE 計画は当初 2020-2021 年に南アフリカにて掘削予定だったが、2020 年に始まった新型コロナウイルスの流行によって各国がロックダウンなどの措置を取る中、本掘削計画も延期を余儀なくされ、1 年後の 2021-2022 年に掘削を行った。コロナ禍による掘削計画延期の期間、代替試料としてこれまでに坑内掘りの鉱山 (シェバ金鉱山) の坑道内にて採取していたムーディーズ層群堆積岩 (主に Mds1 層) 試料を対象として、分析手法を検討し、さらに得られたデータからその科学的重要性について検討した。

#### (2) 顕微鏡観察・分光分析

薄片試料は偏光顕微鏡 (OLYMPUS, BX60) にてその産状を観察した。鉱物のモード組成や粒度分布をポイントカウンティング法により定量評価した。また、炭素質物質の観察についても薄片を用いて行った。これらの炭素質物質は薄片上で顕微ラマン分光分析 (HORIBA, XploRA PLUS) に供した。さらに分光分析で有機物として同定された炭素質物質については真空マニピレーターを搭載したマイクロサンプリングツール (Micro Support, Axis Pro SS) を用いて有機物のみを採取し、フーリエ変換赤外分光分析 (日本分光, IRT-5200)、走査型電子顕微鏡 (JEOL, JSM-IT200)、透過型電子顕微鏡 (TEM; JEOL, JEM-2100F)、高エネルギー加速器研究機構の BL-19A にて走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) を用いて分析を行った。

#### (3) 化学・同位体分析

薄片試料で観察された磁鉄鉱中の微量元素組成を分析するために、レーザーアブレーション型の誘導結合プラズマ質量分析器 (LA-ICP-MS; Cyber Laser, IFRt; Agilent Technology, Agilent 8900) を用いた。全岩の主要化学組成は、粉末試料を加圧ペレット法にてエネルギー分散型の蛍光 X 分析装置 (EDXRF; Malvern Panalytical Epsilon 5) およびガラスビード法にて波長分散型の蛍光 X 分析装置 (WDXRF; Panalytical, MagiX PRO) を用いて測定した。一方、全岩の微量元素組成は粉末を全溶解し、ICP-MS (Thermo Scientific, iCap Qc) を用いて測定した。さらに、全岩の鉄同位体比 ( $\delta^{56}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}$ ) を多重検出器型の ICP-MS (MC-ICP-MS; Thermo Scientific, Neptune Plus) を用いて分析した。有機炭素の含有量および炭素同位体比を求めるために、粉末試料を塩酸処理して炭酸塩鉱物のみを溶解した後、元素分析計 (EA, Thermo Scientific, FLASH 2000) および同位体比分析計 (IRMS; Thermo Scientific, DELTA V Advantage) を用いた。さらに極微量含まれる窒素の同位体比を測定するために、段階燃焼法を用いた分析を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 科学掘削

BASE 計画はバーバトン緑色岩帯のムーディーズ層群が見られる地域のうち、比較的露出やアクセスの良い 5 サイト (サイト 1: Eureka Syncline; サイト 2: Dycedale Syncline; サイト 3, 4: Saddleback Syncline; サイト 5: Stolzberg Syncline; Fig. 2) にて実施された. サイト 1 では、主にシルト質砂岩から成り薄い BIF を胚胎する Mds1 層から砂岩から成る MdQ2 層、玄武岩の MdL を挟み、ムーディーズ層群では最も厚い BIF を胚胎する Mds2 層を貫く 497 m のコアを採取することに成功した. このコアは 2 つの異なる層序の BIF をカバーしており、日本チームの研究にとって重要なコアとなる. サイト 2 は下位層に見られる礫岩から斜交層理を持つ砂岩を貫く 368 m のコアであり、より浅海域～河口域における堆積・表層環境や生態系の解明が期待できる. サイト 3 も下位層における砂岩層であり、ここでは微生物マットと思われる構造が多数確認された. 今後の化学構造分析によって大きな成果が期待される. サイト 4 はサイト 3 よりも層序的に若干上位に位置し、河口域について陸地近傍から遠方部まで堆積環境が連続的に遷移していることから、当時の岩石圏 (陸地) -水圏 (河川, 海洋) の境界域における情報を良く保持していることが期待できる. サイト 5 も下位層であるが、サイト 3 よりもさらに上位に位置し、比較的深海部で堆積したと考えられるシルト質砂岩を多く含む層である. また、BIF と同様に化学沈殿由来と思われる磁鉄鉱を含むシルト質砂岩 (現地では magnetic shale と呼ばれる) も含むほか、ジャスパー、BIF 層も確認された (Fig. 1).

本科研究チームは 2023 年 9 月にベルリンで行われたコアサンプリングパーティーに参加し、主に BASE 1, BASE 5A のコアから、BIF/ジャスパー層とそれらを胚胎する碎屑性堆積岩層 (砂岩, シルト質砂岩, 泥岩) から計 160 試料を採取した.

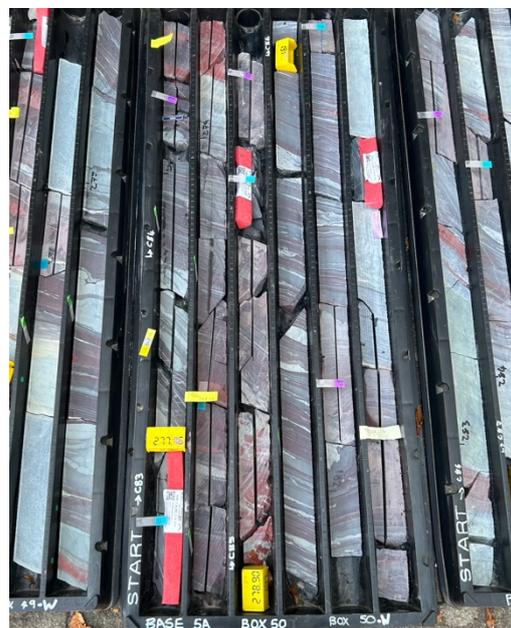


Fig. 1. ICDP BASE 5A コアで確認されたシルト質砂岩に胚胎される BIF/ジャスパー層 (Mds1, Md11).

## (2) 堆積環境の推定

鉱山内で採取された試料の多くは砂質シルト岩 (sandy siltstone) であったが、主要な鉄鉱物に違いが見られたため、これらに基づき分類を行った. 酸化物である磁鉄鉱を多く含む magnetite siltstone、菱鉄鉱、アンケライトといった炭酸塩鉄物を多く含む carbonate siltstone、これらの鉄鉱物を含まず、鉄は主に緑泥石や黒雲母などの珪酸塩鉄物に含まれている sandy siltstone の 3 種類である (Fig. 2a). これらの堆積深度を推定するために、碎屑粒子の粒度分布をポイントカウンティングにて求めた. 30  $\mu\text{m}$  以下の粒子をマトリックスと定義したマトリックス比は、試料間では多少の変動を示すものの、平均するとどの種類も概ね 90% であり (Fig. 2b)、鉄鉱物の近い堆積深度に起因していないと考えられる. なお、これは碎屑粒子を石英に限定した粒度分布でも同様であった.

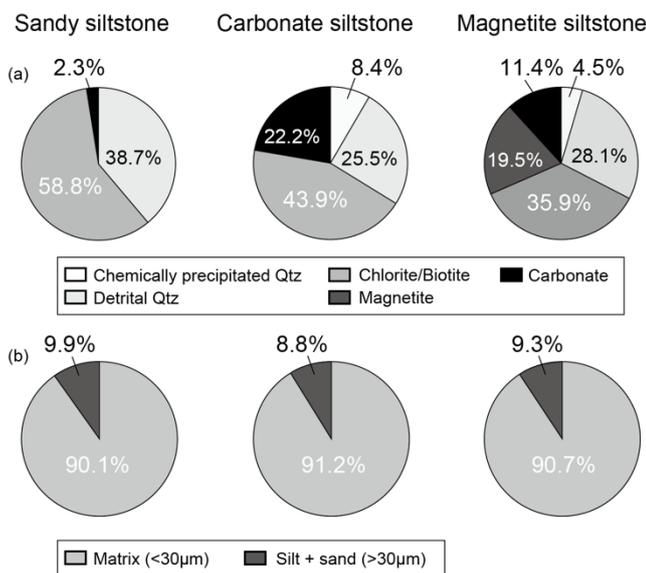


Fig. 2. 3 種類 (Sandy siltstone,  $n = 6$ ; Carbonate siltstone,  $n = 8$ ; Magnetite siltstone,  $n = 8$ ) に分類された試料の平均的な (a)モード組成と (b)マトリックス比. ここでマトリックスは 30  $\mu\text{m}$  以下の粒子と定義する.

## (3) 炭素質物質の形態観察・化学構造・同位体組成

岩石薄片表面に露出している炭素質物質に対して顕微ラマン分光分析を行った結果、グラフアイト構造に由来する G ピークとその欠陥に由来する D ピークが得られた. また、炭素質物質をマイクロサンプリングし、FTIR 分析を行ったところ、アミドの C=O 伸縮運動、C-N 伸縮運動などの水素、窒素、酸素を含む結合に由来するピークが確認された. さらに酸処理後粉末試料の炭素安定同位体測定により、炭素質物質は -28.8 ~ -25.9‰ という生物由来の炭素質物質と整合的な炭素同位体比を示すことがわかった. これらの結果は、Mds1 層中の炭素質物質がバイオマーカーとして用いられる、かつ変成度の高い炭素質物質試料には分析可能な量が残存していない窒素を比較的多く含んでいる生物由来の有機物である可能性を示唆している. そこで段階燃焼法

により、炭素質物質中の窒素安定同位体分析を行った。その結果、炭素質物質に由来する窒素安定同位体組成は $\sim +5\%$ であることが示された。これは炭素質物質の起源である微生物が酸化環境で活動していたことを示唆している。

岩石薄片表面からマイクロサンプリングで収集した炭素質物質に対し SEM, STEM, TEM 及び STXM による形態観察及び化学分析を行った。採取した計 80 の粒子はその形状でフィラメント状、シート状、フレーク状の 3 タイプに分類され、フレーク状及びシート状タイプの一部は  $1\ \mu\text{m}$  の突起に覆われた複雑な構造をしていた。膜状構造の有無を確認するため、FIB にて代表的なフレーク状炭素質物質の薄膜を作製して SEM, TEM 及び STEM により観察を行った。薄膜の SEM 観察では炭素質物質は数百 nm サイズの微粒子を薄膜で包有した特異な微細組織を持っていることが判明した (Fig. 3a)。細胞膜に相当するような構造は観察されなかった。TEM の制限視野電子回折では微粒子、薄膜ともにグラフェン構造に起因する回折パターンが確認されたこと (Fig. 3b, c), STXM では  $\pi$  結合、 $\sigma^*$  結合に起因するピークが顕著にみられたことから (Fig. 3d), 炭素質物質はグラフェン構造を持つことがわかった。

観察した炭素質物質は真核生物と思しき複雑な表面構造を持っていたが、内部はグラフェン構造を持つ微粒子がグラフェン構造を持つ薄膜に覆われるという報告例のない特異な構造を示した。内部が微粒子の集合体であること、周辺に付着している鉱物粒子が自形であることから、これらは太古代海洋の微生物由来有機物が一部溶解・再沈殿等を経た形態ではないかと推察される。その一方で炭素質物質の炭素・窒素安定同位体やそれに含まれる化学結合は保持されていることから、炭素質物質が被った変質、溶解、再沈殿のプロセスはごく微小範囲で起こったと考えられる。

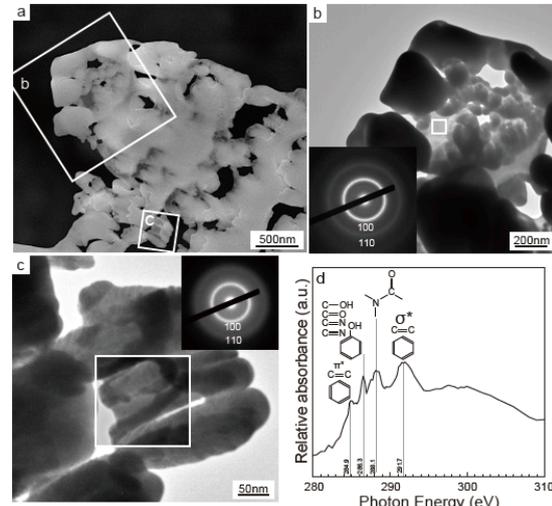


Fig. 3. (a) フレーク状炭素質物質薄膜の SEM 観察像。(b) (a)で示した領域 b の TEM 像及び白枠部分の X 線回折像。(c) (a)で示した領域 c の TEM 像及び白枠部分の X 線回折像。(d) STXM により(a)の画像全体から収集した X 線吸収スペクトル。

#### (4) 全岩鉄同位体比

全岩の鉄同位体比 ( $\delta^{56}\text{Fe}$  値) は, sandy siltstone で $-0.58\%$  から $+0.23\%$ , carbonate siltstone で $-0.21\%$ から $+0.09\%$ , magnetite siltstone で $-0.54\%$ から $+0.60\%$ の範囲を示した。これらは典型的な碎屑性堆積岩の値である $-0.1\%$ から $+0.4\%$ の範囲を超えており、顕微鏡での産状観察からも示唆された通り化学沈殿由来の鉄の付加があったことを支持している。

ここで堆積環境と鉄同位体比の関係性を調べるために、Carbonate siltstone と Magnetite siltstone について顕微鏡観察から得られたマトリック比を用いてプロットした (Fig. 4)。その結果、Magnetite siltstone 1 試料を除いた全ての試料で、マトリックス比が低下するにつれて  $\delta^{56}\text{Fe}$  値も低下する傾向が得られた。マトリックス比が堆積深度を表しており、深いほどマトリックス比が増加する(細粒分が増加する)と仮定すると、全岩鉄同位体比は深部で沈殿したものほど鉄同位体比が高いことを示している。この傾向は、化学沈殿由来の鉄の起源が深部海底熱水であり、それが酸化沈殿したと考えると最も説明がつく。これまでの先行研究でも、もっと若い時代の BIF においてこのような深部から浅部へのレイリー分別を伴う溶存二価鉄の酸化沈殿によって同様の傾向が得られている (e.g., Planavsky et al., 2009)。32 億年前の沿岸域においてもこのような傾向が得られたことは、この時代すでに酸化を伴う鉄の化学沈殿によって BIF の形成が起こっていたことを示唆している。

さらにこの傾向は、異なる鉄のホスト相を持つ Magnetite siltstone と Carbonate siltstone で同様であった。この事は、現在は磁鉄鉱、炭酸塩鉄と異なる鉄のホスト相を含んでいても、初期の鉄化学沈殿物が共通の物質であり、その後の変質や相変化中には鉄の大規模な移動がなく、初期沈殿物の同位体比が保存されていることを示唆している。海洋中の溶存鉄の起源が深部海底熱水由来であったと仮定すると、溶存鉄から初期沈殿物へ

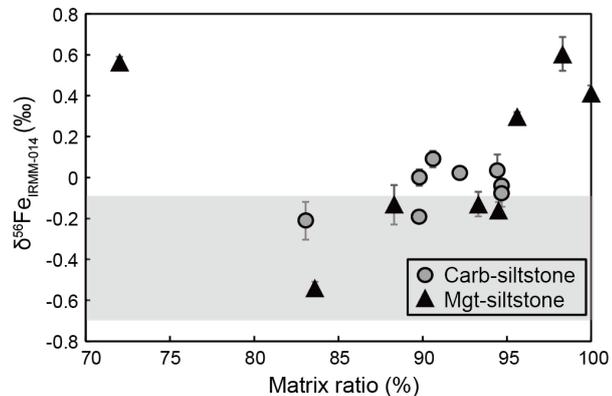


Fig. 4. Carbonate siltstone と Magnetite siltstone における各試料のマトリックス比と全岩鉄同位体比の関係。灰色に塗られた範囲は化学沈殿由来の鉄の起源と考えられる海底熱水中の溶存鉄の典型的な鉄同位体比。

の沈殿物の際に+1.5%程度の同位体効果が必要であると推定される。このような同位体効果には酸化を伴う鉄の沈殿が必要であることから、初期沈殿物はフェリハイドライトのような三価鉄を含む鉄水酸化物が主体であったことを示唆している。また、これらの初期沈殿物から磁鉄鉱や菱鉄鉱のような炭酸塩鉱物への形成は、系が比較的閉鎖的な続成環境下で共に埋没した有機物による還元反応によって形成した可能性が高い。

#### (5) 磁鉄鉱の微量元素組成

鉄同位体から明らかになったようにムーディーズ層群中の鉄に富む堆積岩は、海洋からの化学沈殿後に鉱物相の変質を被っているがその化学組成は保存されている可能性がある。そこで、様々な微量元素を結晶構造内に固溶しうる磁鉄鉱の微量元素 (Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge) 組成を LA-ICP-MS にて測定した。偏光顕微鏡・SEM 観察の結果、Magnetite siltstone は主に厚さ 1000-40000  $\mu\text{m}$  程度の磁鉄鉱に富む層、碎屑物石英に富む層、炭酸塩鉱物に富む層のマイクロバンドの互層によって構成されていたが、いずれの層にも自形の磁鉄鉱が確認された。LA-ICP-MS 分析の結果、磁鉄鉱中の Cr, Ni の平均濃度はそれぞれ 2500 ppm, 190 ppm であった。これは比較対象として分析を行った約 28 億年前の深海域に堆積したカナダ・オンタリオ州のテマガミ BIF 中の Cr, Ni の平均濃度 17 ppm, 13 ppm と比べて有意に高い。ムーディーズ層群中において高い値を示した Cr 濃度は異なる層毎で違いが見られた他、全岩鉄同位体比が低い薄片ほど Cr 濃度が高くなるという傾向が得られた。(4)で示されたようにムーディーズ層群では、溶存二価鉄の部分酸化により深部から浅部にかけて鉄同位体比が高くなることが示されており、磁鉄鉱中の Cr 濃度もその堆積環境の違いに対応していることから、初期沈殿時の情報を反映していると考えられる。つまり、当時の海洋ではクロム濃度が海表面からの深度によって異なり、浅い部分で高く深い部分で低かったと考えられる。このようなプロファイルは、当時の浅海域が酸化的であり、クロムが 6 価として溶存していた可能性を支持するものである。

#### (6) まとめ

本研究課題を遂行することで、国際的な科学掘削プログラムである ICDP の BASE プロジェクトに参画し、南アフリカ共和国バーバトン緑色岩帯に分布するムーディーズ層群の浅海性堆積岩試料から原生風化や熱水変質の影響を最小限に抑えた連続性の良いコア試料を掘削することに成功した。新型コロナウイルス流行の影響があり、掘削が 1 年延期されたことによりコア試料について詳細な化学分析を行うことはできなかったため、本研究課題では、これまでに鉱山の地下坑道にて採取した試料を用いて研究を進めた。採取した試料は大部分が堆積学的にはシルト質砂岩に分類されるものであったが、磁鉄鉱や炭酸塩鉱物として鉄を多く含んでいた。これらの碎屑性成分について粒度分布を調べたところ、薄片スケールでは試料ごとに変動は見られたものの、岩石種ごとの平均では差異は見られず、おおよそ同様の堆積深度で形成したと考えられる。また、これらの試料は炭素質物質を比較的多く含んでおり、炭素同位体比分析から生物起源であると考えられる。また、分光分析の結果から、グラファイト構造やグラフェン構造を持ち、少量ではあるが、アミド基のような官能基を持つことも明らかになった。微細領域の観察から、これらは微生物由来の有物が溶解・再沈殿によって形成したと考えられる。これらの微生物は 32 億年前の生態系において主要な役割を果たしていた可能性がある。本研究課題では、これらに示唆を与える当時の表層環境や元素循環を明らかにするために、全岩鉄同位体比と磁鉄鉱中の微量元素組成を測定した。全岩の鉄同位体比は堆積深度を反映していると考えられるマトリックス比の低下とともに低下する傾向を示し、全岩鉄同位体比が酸化を伴う初期沈殿物の形成プロセスを反映していることが明らかとなった。さらに、磁鉄鉱中の微量元素分析では酸化還元に敏感な元素である Cr 濃度が全岩鉄同位体比や堆積環境と呼応して変動している傾向がみられた。これは当時の浅海域で Cr のような微量元素が深度で異なる濃度プロファイルを示し、当時の海洋表層が酸化還元環境について成層構造を持っていた可能性を示唆するものである。つまり、32 億年前の浅海域は局所的ながらも酸化的になっており、酸化還元を伴う元素循環が起こっていた可能性があり、段階燃焼法による窒素同位体分析からも整合的な結果が得られている。このような元素循環と生態系との関わりについて、今後 BASE プロジェクトで得たコアの分析を参画した他チームとの国際共同研究を推進することで、初期地球における沿岸域の表層環境や生態系の理解について大きな進展を見込むことできる

#### <引用文献>

- Bontognali T.R.R. et al., 2013, *Precambrian Res.*, 226, 116-124.  
Homann M. et al., 2018, *Nature Geosci.*, 11, 665-671.  
Javaux E. J. et al., 2010, *Nature*, 463, 934-939.  
Planavsky, N.J. 2009, *Earth Planet. Sci. Lett.* 286, 230-242.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Chikanda, F., Otake, T., Mwatseteza J., Sato, T.	4. 巻 14
2. 論文標題 Water quality in the Lisungwi and Kaphamtengo Rivers in Manondo, Central Malawi: Assessment of the impact of artisanal small scale gold mining	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Malawi Journal of Science and Technology	6. 最初と最後の頁 29-43
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 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 Ohtomo Yoko, Yang Jeehyun, Nishikata Miu, Kawamoto Daisuke, Kimura Yuki, Otake Tsubasa, Sato Tsutomu	4. 巻 12
2. 論文標題 Low-Temperature Hydrothermal Synthesis of Chromian Spinel from Fe-Cr Hydroxides Using a Flow-Through Reactor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 1110 ~ 1110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/min12091110	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 Otake Tsubasa, Yamada Ryoichi, Suzuki Ryohei, Nakamura Shunsuke, Ito Akane, Shin Ki-Cheol, Sato Tsutomu	4. 巻 295
2. 論文標題 Large Fe isotope fractionations in sulfide ores and ferruginous sedimentary rocks from the Kuroko volcanogenic massive sulfide deposits in the Hokuroku district, northeast Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 49 ~ 64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gca.2020.12.009	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 Chikanda Frances, Otake Tsubasa, Koide Aoi, Ito Akane, Sato Tsutomu	4. 巻 774
2. 論文標題 The formation of Fe colloids and layered double hydroxides as sequestration agents in the natural remediation of mine drainage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 145183 ~ 145183
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scitotenv.2021.145183	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 Ito Akane, Otake Tsubasa, Maulana Adi, Sanematsu Kenzo, Sufriadin, Sato Tsutomu	4. 巻 71
2. 論文標題 Geochemical constraints on the mobilization of Ni and critical metals in laterite deposits, Sulawesi, Indonesia: A mass balance approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resource Geology	6. 最初と最後の頁 255 ~ 282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/rge.12266	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 Murofushi Ayaka, Otake Tsubasa, Sanematsu Kenzo, Zay Ya Kyaw, Ito Akane, Kikuchi Ryosuke, Sato Tsutomu	4. 巻 -
2. 論文標題 Mineralogical evolution of a weathering profile in the Tagaung Taung Ni laterite deposit: significance of smectite in the formation of high-grade Ni ore in Myanmar	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mineralium Deposita	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) 10.1007/s00126-021-01089-6	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 該当する

1. 著者名 大竹翼, 大友陽子	4. 巻 71
2. 論文標題 地球表層環境における鉄の濃集と鉄鉱床の形成	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 資源地質	6. 最初と最後の頁 57 ~ 73
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 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21件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 T. Otake, A. Murofushi, T. Daimon, R. Kikuchi, T. Sato
2. 発表標題 Formation of Ni-rich smectite in the Tagaung Taung Ni laterite deposit, Myanmar
3. 学会等名 Goldschmidt 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohtomo, T. Matsui, F. Chikanda, S. Tum, T. Otake, T. Sato
2. 発表標題 Iron precipitation and associated microbial activities in Ainai and Shojin river mine drainages, Japan
3. 学会等名 Goldschmidt 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. V. Sari, T. Otake, R. Kikuchi, T. Sato, and G. Cock
2. 発表標題 Mineralogical and geochemical characteristics of weathering profiles at Weda Bay Nickel laterite deposit, Halmahera, Indonesia
3. 学会等名 第71回資源地質学会年会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松川 春樹, 大友陽子, 大竹 翼, 昆 慶明, 佐藤 努, 掛川 武
2. 発表標題 南アフリカ・ムーディーズ層群中の縞状鉄鉱層に産する磁鉄鉱の微量元素組成
3. 学会等名 第71回資源地質学会年会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大友 陽子, 松居 達也, チカンダ フランセス, セレイロイス タム, 大竹 翼, 佐藤 努
2. 発表標題 Iron precipitation and associated microbial activities in acid mine drainages of Ainai and Shojin river mine
3. 学会等名 JpGU 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉浦 遼平, 大竹 翼, 大友 陽子, 佐藤 努, SHIN Ki-Cheo
2. 発表標題 南アフリカ・バーバトン緑色岩帯ムーディーズ縞状鉄鉱層における鉄とマグネシウムの地球化学的挙動
3. 学会等名 JpGU 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大竹 翼, 大門 嵩泰, 実松 健造, 高橋 嘉夫, 佐藤 努
2. 発表標題 高品位Niラテライト鉱石におけるホスト相同定のための逐次抽出法の改善
3. 学会等名 JpGU 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Sugiura, T. Otake, Y. Ohtomo, T. Sato and T. Kakegawa
2. 発表標題 Fe isotope signatures for oxidative precipitation of ferrous iron in ~3.2 Ga shallow ocean from the Moodies Group, Barberton Greenstone Belt, South Africa
3. 学会等名 Goldschmidt 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉浦 遼平, 大竹 翼, 申基澈
2. 発表標題 32 億年前に形成した南アフリカ・バーバトン緑色片岩帯ムーディーズ縞状鉄鉱層中の Fe 及び Mg 同位体比
3. 学会等名 第11回同位体環境学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野並亨祐, 大竹翼, 相川公政, 伊藤真由美, 佐藤努
2. 発表標題 沖縄トラフごんどうサイト産海底熱水鉱石に含まれる溶解性鉱物の同定
3. 学会等名 資源・素材 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大竹 翼
2. 発表標題 Niラテライト鉱床の高品位鉱石形成に関わる地球化学的要因
3. 学会等名 資源地質学会第70回年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅原 あすか, 川喜田 竜平, 大竹 翼, 佐藤 努
2. 発表標題 低温蛇紋岩化反応による水素生成における包有物の影響
3. 学会等名 JpGU 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Chikanda, T. Otake, T. Matsui, S. Tum, T. Sato
2. 発表標題 Utilizing isotopic Fe fractionations to trace the behavior of dissolved and colloidal Fe in mine drainages
3. 学会等名 JpGU 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大竹 翼
2. 発表標題 地球表層環境における鉄の濃集と鉄鉱床の形成：レビュー
3. 学会等名 JpGU 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 照井 勇陽, 大竹 翼, Sufriadin, 佐藤 努
2. 発表標題 インドネシアスラウェシ島ラタウ地域に産する蛇紋岩中におけるニッケル濃集
3. 学会等名 資源・素材学会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Chikanda, T. Otake, T. Matsui, S. Tum, T. Sato
2. 発表標題 Role of colloids on the (im)mobility of toxic elements in mine drainage systems with acidic and circumneutral pH
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大竹 翼
2. 発表標題 インドネシアおよびミャンマーにおける超苦鉄質岩の化学風化とニッケル濃集に与える地球化学的要因
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kyaw Zay Ya, 大竹 翼, 実松 健造, 佐藤 努
2. 発表標題 Environmental study on the Pinpet Fe deposit in southern Shan State, Myanmar
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大友 陽子, 山内 大蔵, 大竹 翼, 佐藤 努
2. 発表標題 パーバトン緑色岩帯32億年前ムーディーズ層群縞状鉄鉱層中のクロム濃集度から見る堆積場及び生物活動
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田 将仁, 大竹 翼, 中山 健, 佐藤 努
2. 発表標題 北海道下川Cu-Zn鉱床における海底下鉱化作用
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉浦 遼平, 大竹 翼, 山内 大蔵, 大友 陽子, 佐藤 努
2. 発表標題 32億年前に形成した南アフリカ・パーバトン緑色片岩帯ムーディーズ縞状鉄鉱層における鉄同位体分別
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ICDP: BASEプロジェクト  
<https://www.icdp-online.org/projects/world/africa/moodies-s-africa/details/>

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	石田 章純  (Akizumi Ishida)  (10633638)	東北大学・理学研究科・助教   (11301)	
研究分担者	杉谷 健一郎  (Kenichiro Sugitani)  (20222052)	名古屋大学・環境学研究科・教授   (13901)	
研究分担者	A G A N G I A N D R E A  (Agangi Andrea)  (20840812)	秋田大学・国際資源学研究科・教授   (11401)	
研究分担者	掛川 武  (Takeshi Kakegawa)  (60250669)	東北大学・理学研究科・教授   (11301)	
研究分担者	大友 陽子  (Yoko Ohtomo)  (80612902)	北海道大学・工学研究院・助教   (10101)	

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
---------	---------