

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03502

研究課題名(和文)鉄コロイドによるレアメタル濃集探査のための新同位体指標

研究課題名(英文) Non-traditional isotope signatures for exploration of rare metals concentrated with Fe collides

研究代表者

大竹 翼 (Otake, Tsubasa)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：80544105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：化学風化の卓越するインドネシアのニッケルラテライト鉱床では、鉄とニッケルの移動度が高く、両者には正の相関がみられた。インドネシアでは上層中の鉄鉱物がニッケルの下層への移動を制限していると考えられる。また、ニッケル品位の高い風化断面においては上層部で顕著な鉄同位体比の低下が見られたため、上層の鉄の還元溶解に伴ってニッケルが下層へ移動・濃集したと考えられる。一方、ミャンマーの鉱床では鉄の移動量が低いにもかかわらず、下層において高品位のニッケル鉱石が形成していた。ミャンマーではスメクタイトが重要なニッケルのホスト鉱物となっており、スメクタイトの高い固定能が、高濃集の要因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

本研究の成果よりインドネシアのような化学風化の卓越するニッケルラテライト鉱床では表層付近の鉄同位体比の低下から下層へのニッケルの移動・濃集の予測が可能であると考えられる。そのため、大規模に表土をはぎ取ることなく下層のニッケル資源を探索する新たな指標を見出すことができた。さらに、ミャンマーのような乾季の長い地域のニッケルラテライト鉱床ではスメクタイトが重要な鉱石であることが明らかになった。スメクタイトの生成には母岩が完全に蛇紋岩化していない超苦鉄質岩が必要であると考えられることから、これらの知見はミャンマーのような地域での広域調査の際に有用である。

研究成果の概要(英文)：Nickel laterite deposits in Indonesia, which are subjected to intensive chemical weathering, show a positive correlation on mass transfer coefficient between iron and nickel. This indicates that mobility of nickel to the saprolite layers is controlled by iron-bearing minerals in the upper layers. A weathering profile that has high nickel grades in the saprolite was depleted in heavy iron isotopes, suggesting nickel was transferred to the saprolite layers associated with reductive dissolution of ferric iron in the upper layers. On the other hand, nickel laterite ores in Myanmar have high nickel grade although the mobility of iron was not as high as those in Indonesia. Because nickel is mainly hosted by smectite in the deposit, smectite may be efficient to fix and concentrate nickel in the saprolite layers in Myanmar.

研究分野：資源地質学

キーワード：ニッケル ラテライト 化学風化 超苦鉄質岩 スメクタイト レアメタル 鉄同位体 クロム同位体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

レアメタルは日本の先端産業に欠かせない“産業のビタミン”であり、今後も長期的な需要の増加が見込まれる重要な資源である。これまでレアメタルを供給する鉱床として、巨大貫入岩体など地球史において特殊なマグマ活動に起因する鉱床が開発されてきた。しかしながら、ニッケル (Ni) などでは、熱帯～亜熱帯地域の広範囲に存在する風化残留鉱床 (Ni ラテライト鉱床) の開発が進み、供給先の多様化が進んでいる。Ni ラテライト鉱床は、鉄 (Fe) やマグネシウム (Mg) に富む超苦鉄質岩の化学風化によって生成し、鉱石が地表から数十メートル程度の深度に広く分布している。これまでに気候 (降水量や気温)、地形、地下水の排水条件 (Golightly, 1981; 2010) などが Ni ラテライト鉱床形成に与える地理的要因として挙げられているが、Ni ラテライト鉱床形成過程において Ni が濃集する化学反応の詳細は明らかになっておらず、異なる気候や地形条件における品位や鉱量の違いを完全には説明できていない。また、同一鉱床内においても風化層中の鉱量や品位の分布は不均質であり、それらを浅部から予測することは難しいため、新たな探査指標が望まれている。

Ni ラテライト鉱床は風化残留鉱床の一種であり、Ni のような有用元素が岩石中の主要構成元素である Mg やケイ素 (Si) よりも溶解度が低く、化学風化の過程で岩石中に残留することで濃集すると考えられているが、未風化である母岩中のニッケル含有量はおよそ 0.2 wt.% であり、他の元素が溶脱するだけでは 1 wt.% 程度までしか濃集しない (Brand and Butt, 2001)。したがって、3 wt.% を超えるような高品位の Ni 鉱石の生成には、化学風化において Ni が母岩から一度溶解し、下層へ移動した後、サプロライト層と呼ばれる弱変質層に生成される二次鉱物に固定されることで Ni が濃集する必要がある (Freysinet et al., 2005)。Golightly (2010) は、風化層への Fe と Ni の付加量には正の相関が認められることを指摘しており、Fe の挙動が Ni の移動・濃集に強く影響していると考えられる。近年、分析が可能になった Fe やクロム (Cr) の安定同位体を用いることで、風化層内での酸化還元反応と Fe の移動プロセス、さらに Fe の移動に伴う Ni の濃集を適切に評価・予測できる可能性がある。

2. 研究の目的

気候の異なるインドネシアとミャンマーにおいて異なる超苦鉄質岩の母岩上に発達した風化断面を観察・調査し、その岩石学的、地球化学的および鉱物学的特徴から Ni ラテライト鉱床形成における地球化学的要因を明らかにする。また、Fe や Cr 同位体の探査指標としての可能性を検討する。

3. 研究の方法

インドネシアとミャンマーにおいて超苦鉄質岩の風化断面を観察・調査し、深度方向への化学組成プロファイルを作成し、Fe や Ni の濃集度を調べる。インドネシアではスラウェシ島において、主に Soroako 鉱山 (West Block 内の Konde Hill, Watulabu Hill および Petea Block 内の Petea Hill)、Pomalaa 鉱山 (Wilson Hill) の 4 サイトにおいて調査を行なった。Konde, Watulabu の母岩がハルツバージャイトであったのに対し、Petea, Willson は中～高程度に蛇紋岩化したハルツバージャイトであった。ミャンマーでは、主に中部サガイン州およびマンダレー州に位置する Budaung と Tagaung において調査を行なった。Budaung は蛇紋岩 (ほぼ完全に蛇紋岩化したハルツバージャイト)、Tagaung は中程度に蛇紋岩化したハルツバージャイトを母岩としており、Tagaung はミャンマーで唯一稼行中の Ni 鉱山である。上記全ての風化断面は、上部から完全に風化したリモナイト層、母岩の組織を残したサプロライト層を持ち、一部の風化断面ではマンガ (Mn) が濃集した黒色のマンガ酸化層がみられた。

風化断面の各深度で採取した試料は薄片および研磨片を作成し、光学顕微鏡および電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察するとともに、エネルギー分散型 X 線分光 (EDS) および波長分散型 X 線分光 (WDS) により鉱物の化学組成を定量化した。また粉砕試料に対して粉末 X 線回折 (XRD) を用いて全岩中の鉱物組み合わせを調べた。さらに、ガラスビード法による蛍光 X 線 (XRF) 分析を用いて主要化学組成を、酸による全溶解後、誘導結合プラズマ (ICP)-発光分光分析計 (AES) および ICP-質量分析計 (MS) を用いて微量化学組成を求めた。全溶解試料から Fe イオンと Cr イオンをカラム分離によってそれぞれ単離した後、マルチコレクター型 (MC)-ICP-MS、表面電離型質量分析計 (TIMS) を用いて安定同位体比 (Fe では $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ 、Cr では $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$) を測定した。安定同位体比は標準物質の同位体比からの千分率偏差を以下のように定義し、 δ 値として表す:

$$\delta^{56}\text{Fe} (\text{‰}) = \left[\left\{ \frac{(^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe})_{\text{sample}}}{(^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe})_{\text{IRMM-014b}}} - 1 \right\} \times 1000 \right] \quad (1)$$

$$\delta^{53}\text{Cr} (\text{‰}) = \left[\left\{ \frac{(^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr})_{\text{sample}}}{(^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr})_{\text{NIST 979}}} - 1 \right\} \times 1000 \right] \quad (2)$$

IRMM-014b は Institute for Reference Materials and Measurements, NIST 979 は National Institute of Standard and Technology の標準物質であり、およそ火成岩の同位体比と同様の値を持っている。

4. 研究成果

(1) インドネシアおよびミャンマーにおける化学風化の傾向

XRF 分析による主要化学組成分析の結果、母岩の Mg 含有量はインドネシア、ミャンマーのいずれのサイトでも 40 wt.% 程度であったが、上層のサプロライト層、リモナイト層へ向かうにつれて低下する傾向が見られた (図 1)。一般的に超苦鉄質岩の風化ではリモナイト層へ向かうに

つれて Fe やアルミニウム (Al) に富む傾向があり (Aiglsperger et al., 2016)、インドネシアではそのような傾向が見られたが、ミャンマーではシリカ (SiO₂) に富む傾向がみられた。これはミャンマーではインドネシアよりも乾季が長いこと、インドネシアと比較して相対的に化学風化が卓越しにくいことや、蒸発などの影響によって SiO₂ が再沈殿することが原因だと考えられる。また、インドネシアのサイト間での比較では、Watulabu と Wilson は Fe や Al の濃集度が低いリモナイト層が見られ、Konde や Petea と比較すると地形などの局所的な要因によって化学風化の強度が低いと考えられる。

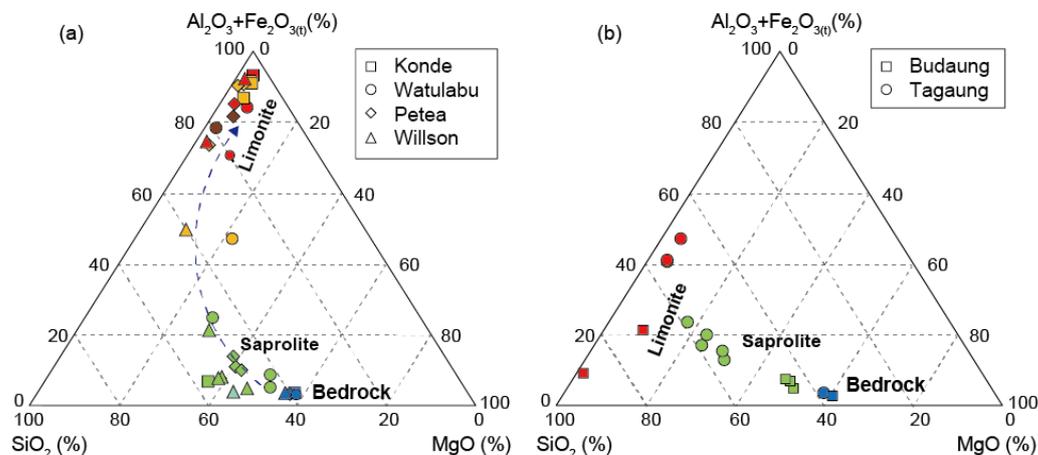


図 1. (a) インドネシアおよび (b) ミャンマーの各風化断面における主要成分の三角ダイアグラム。

(2) 鉱石の Ni 品位と元素移動量

母岩中の Ni 含有量はどのサイトも 0.2 wt.% 程度であり、大きな違いは見られなかった。インドネシアにおけるリモナイト層の平均 Ni 品位は、Watulabu が 1.55 wt.%, Konde が 1.62 wt.%, Petea が 1.92 wt.%, Wilson が 2.18 wt.% だったのに対し、サプロライト層では Watulabu が 1.92 wt.%, Konde が 0.48 wt.%, Petea が 2.89 wt.%, Wilson が 2.06 wt.% であり、鉱石として最も重要なサプロライト層の Ni 品位は Petea > Wilson > Watulabu > Konde となり、インドネシアでは母岩が部分的に蛇紋岩化しているサイトの方が Ni が濃集しやすいと考えられる。一方で、ミャンマーにおけるリモナイト層の平均 Ni 品位は、Budaung が 0.56 wt.%, Tagaung が 1.31 wt.% だったのに対し、サプロライト層では Budaung が 1.09 wt.%, Tagaung が 3.52 wt.% であり、Tagaung はインドネシアも合わせて全サイトの中で最も平均 Ni 品位が高かった。

岩石中の元素含有量は岩石密度の変化や他の元素の増減によっても変化するため、ある元素の移動量や付加量を適切に評価することができない。そこで最も難溶性な元素であるチタン (Ti) で規格化した元素移動度 (τ 値) を以下のように定義した (Brimhall and Dietrich, 1987):

$$\tau_{j,Ti} = (C_{j,w} / C_{Ti,w}) / (C_{j,p} / C_{Ti,p}) - 1 \quad (3)$$

ここで、 C は元素濃度、 j は着目した移動性元素、 w は風化物試料、 p は母岩試料を示す。また、単位面積当たりの付加量 (m 値) は、

$$m_{j,w} \text{ (kg)} = C_{j,p} \rho_p H_w \tau_{j,Ti} \quad (4)$$

で求めることができる。ここで、 ρ_p は母岩の密度、 H_w は風化層の厚さである。計算の結果、サプロライト層における最大の τ 値は、インドネシアで Petea (+22.1) > Watulabu (+9.4) > Wilson (+4.9) > Konde (+2.8)、ミャンマーで Tagaung (+15.3) > Budaung (+0.6) であり、Petea で最大の Ni 移動量を示した。またインドネシアでは、 τ 値から計算された Ni の付加量 (m 値) が同様に計算された Fe の付加量と良い相関を示し (図 2)、先行研究である Golightly (2010) の主張と同様な結果が得られた。この相関は、風化層における Ni の移動が Fe の地球化学的挙動によってコントロールされていることを示唆する。インドネシアでは風化層上部であるリモナイト層は主に鉄水酸化物である針鉄鉱から成り、種々のイオンに高い固定能を持つため、上層の Ni の多くは針鉄鉱の結晶構造内に取り込まれ、リモナイト層に固定されていると考えられる。実際、本研究において最も厚

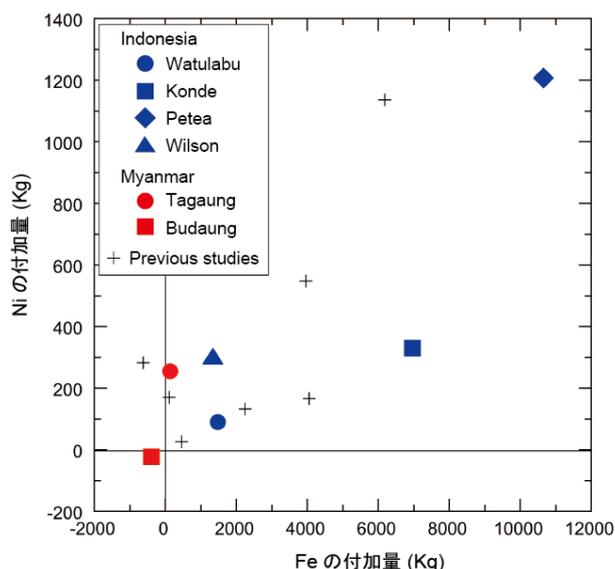


図 2. インドネシアおよびミャンマーの各風化断面における Fe と Ni 付加量相関図。先行研究のデータはインドネシア (Sufriadin et al., 2011; Fu et al., 2014)、キューバ、ドミニカ (Aiglsperger et al., 2016)、ミャンマー (Schellman, 1989) の各地より得られたもの。

いリモナイト層をもつ **Konde** では、非常に化学風化の強度が高いにも関わらずサプロライト層への Ni の移動度が **Petea** ほど高くなく、サプロライト層における Ni 品位の増加を妨げていると考えられる。

(3) Ni のホスト鉱物となる風化生成物の重要性

ミャンマーの **Tagaung** では、Ni の移動度、付加量ともにインドネシアの Ni ラテライト鉱床よりも低かったにも関わらず、サプロライト層において高い Ni 品位が認められた。粉末 XRD 分析の結果では、インドネシアではリモナイト層で針鉄鉱が、サプロライト層で蛇紋石が支配的であったのに対し、ミャンマーではリモナイト層で石英が、サプロライト層ではスメクタイトが支配的であった。したがって、インドネシアとミャンマーにおける風化生成物の差異がサプロライト層における Ni の固定能と鉱物としての品位に影響している可能性がある。

そこでサプロライト層試料において SEM による詳細な観察を行ったところ、インドネシアの **Petea** では主に風化によって生成した蛇紋石に Ni が含まれており、蛇紋石の Ni 含有量は最大で 6 wt.%程度であった。一方で、ミャンマーの **Tagaung** では、蛇紋石とスメクタイトの両方に Ni が濃集しており、蛇紋石中の Ni 含有量は **Petea** と同様最大で 6 wt.%程度であった一方、スメクタイト中の Ni の分布は不均質ではあるが、最大 15 wt.%まで Ni を含むものがみられた (図 3)。スメクタイトは端面などの吸着によって蛇紋石よりも高い Ni 固定能を持っていると考えられる。**Tagaung** でみられた Ni に富むスメクタイトはその組織から輝石の風化によって生成した可能性が示唆され、**Tagaung** におけるスメクタイトの生成は母岩中に輝石が残っているような中程度の蛇紋岩化の程度と(1)で議論されたように間隙水がシリカに富みやすいというミャンマーの気候が要因となっていると考えられる。

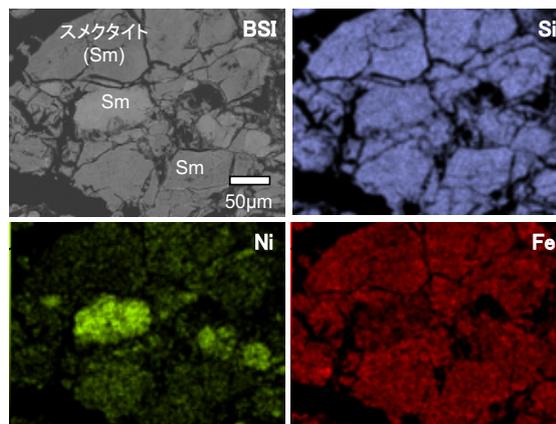


図 3. **Tagaung** サプロライト層中のスメクタイト (Sm) の反射電子像写真 (BSI) および化学マッピング (Si, Ni, Fe)。Ni に富むスメクタイトが局所的に存在している。

(4) インドネシアの風化断面における Fe と Cr の同位体分別

(2)で議論されたように、インドネシアにおいては Ni の移動が Fe によってコントロールされていると考えられる。そこで、インドネシアの 4 サイトにおいて Fe 安定同位体比を測定したところ、母岩が同様である **Petaa** と **Wilson** では深度方向に同じような同位体比の変動がみられ、 $\delta^{56}\text{Fe}$ 値はリモナイト層で低く、サプロライト層で高い傾向がみられた (図 4)。プロファイル内の最大の変動幅は **Petaa** が 0.17‰であったのに対し **Wilson** では 0.12‰と、**Petaa** の方が大きな変動幅が得られた。これは **Petaa** の方が Fe の移動量が大きいという結果 (図 2) と整合的であり、移動に伴って同位体が分別するという事は、酸化還元反応が起こっていることを示唆する。特にリモナイト層で低い $\delta^{56}\text{Fe}$ 値を示したことから、リモナイト層の主要鉄鉱物である針鉄鉱が最上層の土壌層中の有機物によって還元溶解し、低い $\delta^{56}\text{Fe}$ 値をもつ溶存二価鉄 ($\text{Fe}^{2+}_{\text{aq}}$) が下層へ移動し、再沈殿していると考えられる。(1)で示したように一般的に Fe は化学風化の進展に伴い濃集する難溶性元素であるが、有機物などによって還元されると溶解度が上昇し、移動することが可能になる。したがって、リモナイト層における $\delta^{56}\text{Fe}$ 値の低下は Fe の移動量、ひいては Ni の移動・濃集量を示す重要な指標であると言える。リモナイト層では酸素が豊富にあるため、浸透してきた $\text{Fe}^{2+}_{\text{aq}}$ はほぼ全酸化するために $\text{Fe}^{2+}_{\text{aq}}$ と同様の低い $\delta^{56}\text{Fe}$ 値を示すが、サプロライト層では $\text{Fe}^{2+}_{\text{aq}}$ の部分酸化に伴う同位体効果によって高い $\delta^{56}\text{Fe}$ 値を示すものと考

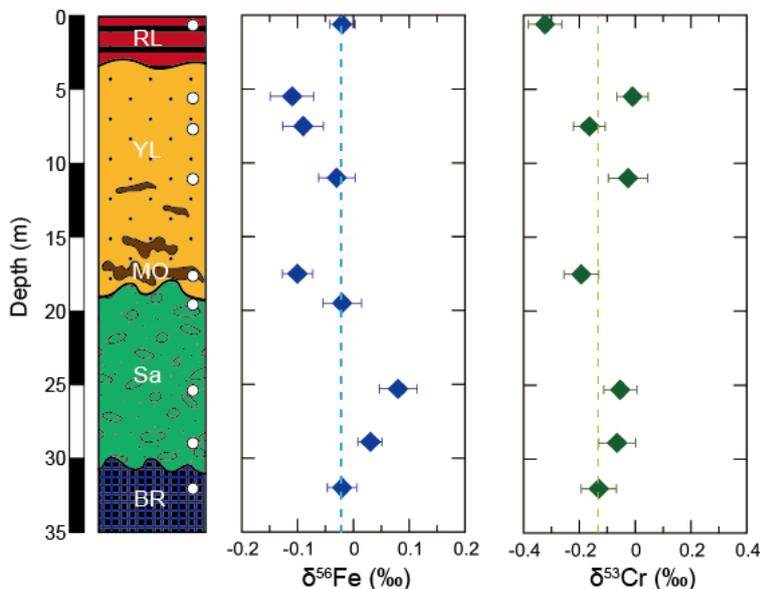


図 4. インドネシア **Petea Hill** における Fe 同位体比および Cr 同位体比の深度プロファイル。RL: 赤色リモナイト層; YL: 黄色リモナイト層; MO: マンガン酸化物; Sa: サプロライト層; BR: 母岩。図中のエラーバーは分析の標準誤差 (2σ) を示す。

えられる。

一方で Cr 同位体比 ($\delta^{53}\text{Cr}$ 値) は、プロファイル内での最大の変動幅が Petea で 0.31%であったのに対し Wilson では 0.66%と、Peteaの方が小さかった (図 4)。Cr は母岩中では主にスピネル中に Cr^{3+} として存在しているが、可溶性の Cr^{6+} に酸化されて移動すると考えられる。しかしながら、 $\text{Cr}^{6+}_{(\text{aq})}$ は $\text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})}$ によって速やかに還元沈殿することが知られている:



したがって、Petea において Cr 同位体比の変動幅が小さいことは、間接的に Fe の還元溶解による移動を示唆していると考えられる。このことは元素移動度や付加量で示される Fe の移動がインドネシアよりもかなり小さいミャンマーの Tagaung で $\delta^{53}\text{Cr}$ 値が 0.84% という大きな変動幅を示す結果が得られたことと整合的である。

(4) まとめ

本研究の結果、気候の異なるインドネシアとミャンマーでは超苦鉄質岩の化学風化の傾向には違いがあり、高温多湿なインドネシアでは化学風化の進展に伴い Fe が濃集する一方で、乾季の長いミャンマーでは Si に濃集する傾向がみられた。化学風化の卓越しやすいインドネシアの Ni ラテライト鉱床では、Fe と Ni の移動度が非常に高く、両者には正の相関関係がみられた。Fe が高濃集したリモナイト層が発達するインドネシアでは、リモナイト層の主要構成鉱物である針鉄鉱が Ni を結晶構造内に取り込むため、下層であるサプロライト層への移動を制限していると考えられる。また Fe 同位体比の分析結果は、最も Fe 移動量の多い Petea のリモナイト層において $\delta^{56}\text{Fe}$ 値が最も低下していた。これらの結果より、インドネシアのような高温多湿な気候下で形成した Ni ラテライト鉱床では、表層の Fe 同位体比の低下から深部への Ni の移動・濃集の予測が可能であると考えられ、新しい探査指標としての可能性を見出すことができた。また、Cr 同位体比は Fe 移動量の高い Petea で同位体変動が小さく、Petea では $\text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})}$ の存在によって $\text{Cr}^{6+}_{(\text{aq})}$ の移動が制限されたためと考えられ、Cr 同位体では変動幅が小さいことが Fe や Ni の下層への移動・濃集を示唆すると考えられる。

また、ミャンマーの Ni ラテライト鉱床では Fe の移動量が低いにも関わらず、サプロライト層において高品位の Ni 鉱物が形成していることが明らかとなった。XRD や SEM 分析の結果からミャンマーの Tagaung ではスメクタイトが重要な Ni のホスト鉱物となっており、特に母岩に含まれていた輝石由来のスメクタイトが Ni を固定し、高濃集させたと考えられる。つまり、ミャンマーにおいて高品位の Ni ラテライト鉱床が形成するためには風化生成物として高い Ni 固定能を持つスメクタイトの生成が必要であり、そのためには母岩が完全に蛇紋岩化していない超苦鉄質岩であることが重要である。

以上より本研究の結果は、気候の異なる様々な地域での Ni ラテライト鉱床探査において新たな探査指針を与えることに成功した。

引用文献

- Aiglsperger, T. *et al.* (2016) *Ore Geol. Rev.* **73**, 127–147.
Brand, N. W., Butt, C. R. M. (2001) *Geochem.-Explor., Env. A.* **1**, 391–407.
Brimhall, G. H., Dietrich, W. E. (1987) *Geochim. Cosmochim. Acta* **51**, 567–587.
Freyssinet P. *et al.* (2005) In *Economic Geology: 100th Anniversary Volume*, pp. 681–722.
Fu, W. *et al.*, 2014. *J. Asian Earth Sci.* **93**, 74–88.
Golightly, J. P. (1981) In *Economic Geology: 75th Anniversary Volume*, pp. 710–735.
Golightly, J.P. (2010) In *The Challenge of Finding New Mineral Resources: Global Metallogeny, Innovative Exploration, and New Discoveries*, pp. 451–485.
Schellman, W. (1989) *Miner. Deposita* **24**, 161–168.
Sufriadin *et al.* (2011) *Int. Symp. Earth Sci. Tec. 2011*, 447–454.

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 5件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 大竹 翼	4. 巻 3
2. 論文標題 岩石の風化と資源	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 季刊 資源と素材	6. 最初と最後の頁 22-23
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 無
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 Zay Ya, K., Otake, T., Koide, A., Sanematsu, K., Sato, T.	4. 巻 70
2. 論文標題 Geochemical characteristics of ores and surface waters for environmental risk assessment in the Pinpet iron deposit, southern Shan State, Myanmar.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Resource Geology	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) https://doi.org/10.1111/rge.12231	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 Chikanda, F., Otake, T., Ohtomo, Y., Ito, A., Yokoyama, T. D., Sato, T.	4. 巻 9
2. 論文標題 Magmatic-hydrothermal processes associated with Rare Earth Element enrichment in the Kangankunde carbonatite complex, Malawi.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3390/min9070442	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 Shimbashi, M., Sato, T., Yamakawa, M., Fujii, N. and Otake, T.	4. 巻 8
2. 論文標題 Formation of Fe- and Mg-Rich Smectite under Hyperalkaline Conditions at Narra in Palawan, the Philippines	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3390/min8040155	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 Sufriadin, Widodo, S., Ito, A., Otake, T., Sanematsu, K.	4. 巻 5
2. 論文標題 Geochemical study of ultramafic rocks from Latowu area of North Kolaka, Southeast Sulawesi and its implication for CO2 sequestration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Degraded and Mining Lands Management	6. 最初と最後の頁 1403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.15243/jdmlm.2018.054.1403	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 Zhou, S., Sato, T. and Otake, T.	4. 巻 8
2. 論文標題 Dissolved Silica Effects on Adsorption and Co-Precipitation of Sb(III) and Sb(V) with Ferrihydrite	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/min8030101	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 Francisco, P.C.M., Sato, T., Otake, T., Kasama, T., Suzuki, S., Shiwaku, H. and Yaita, T.	4. 巻 52
2. 論文標題 Mechanisms of Se(IV) co-precipitation with ferrihydrite at acidic and alkaline conditions, and its behavior during aging	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Environmental Science & Technology	6. 最初と最後の頁 4817-4826
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.est.8b00462	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 Ito, A., Otake, T., Shin, K.-C., Ariffin, K. S., Yeoh, F.-Y., and Sato, T.	4. 巻 82
2. 論文標題 Geochemical signatures and processes in a stream contaminated by heavy mineral processing near Ipoh city, Malaysia	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Geochemistry	6. 最初と最後の頁 89-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apgeochem.2017.05.007	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 Khamphila, K., Kodama, R., Sato, T., and Otake, T.	4. 巻 5
2. 論文標題 Adsorption and Post Adsorption Behavior of Schwertmannite with Various Oxyanions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering	6. 最初と最後の頁 90-106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/jmmce.2017.52008	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 Ooi, C.-H., Ito, A., Otake, T., and Yeoh, F.-Y.	4. 巻 8
2. 論文標題 Cerium removal by activated carbon derived from palm kernel shell	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advanced Materials Letters	6. 最初と最後の頁 145-149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5185/amlett.2017.7061	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

〔学会発表〕 計35件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 実松 健造
2. 発表標題 ニッケル鉱床中のコバルト資源量 ラテライトと硫化物鉱床
3. 学会等名 資源地質学会第69回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. Chikanda, T. Otake, A. Koide, T. Sato
2. 発表標題 Remediation of heavy metals in Ainai abandoned mine drainage, Akika prefecture, Japan
3. 学会等名 18th International Conference of the Pacific Basin Consortium for Environment and Health (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Murofushi, A. Ito, T. Otake, K. Sanematsu, K. Zay Ya, T. Sato
2 . 発表標題 Formation of Ni-Bearing Minerals during Chemical Weathering of Ultramafic Rocks in Myanmar
3 . 学会等名 Goldschmidt 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Otake, T. Ikeshima, T. Sato, J.-I. Ishibashi, T. Nozaki, H. Kumagai, L. Maeda, CK16-05 onboard members
2 . 発表標題 Mineralogical and Fe isotope correlations between Kuroko-type VMS deposits and a seafloor hydrothermal deposit in Okinawa Trough
3 . 学会等名 Goldschmidt 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Chikanda, T. Otake, A. Koide, T. Sato
2 . 発表標題 Impact of Fe colloids on toxic elements in a passive treatment system
3 . 学会等名 資源地質学会第69回年会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kyaw Zay Ya, T. Otake, K. Sanematsu, T. Sato
2 . 発表標題 Geochemical characteristics of iron ores and surface waters in Pinpet deposit area, southern Shan State, Myanmar
3 . 学会等名 資源地質学会第69回年会
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 池島 拓郎, 大竹 翼, 佐藤 努, 小野 修司, 伊藤 茜, 石橋 純一郎, 野崎 達生, 熊谷 英憲, 前田 玲奈, CK 16-05 乗船者一同
2. 発表標題 伊是名海穴海底熱水鉱床における鉱石鉱物の変質プロセス: 黒鉱鉱床との比較
3. 学会等名 資源地質学会第69回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池島 拓郎, 大竹 翼, 佐藤 努, 伊藤 茜, 小野 修司, 石橋 純一郎, 野崎 達生, 熊谷 英憲, 前田 玲奈
2. 発表標題 Transformation of ore minerals and their geochemical signatures in submarine hydrothermal ore deposits in Izena Hole, Okinawa Trough
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 室伏 文佳, 伊藤 茜, 大竹 翼, 実松 健造, Kyaw Zay ya, 佐藤 努
2. 発表標題 Formation of Ni-bearing minerals during chemical weathering of ultramafic rocks in Myanmar
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Otake, T. Ikeshima, T. Sato, J-I Ishibashi, T. Nozaki, H. Kumagai, and L. Maeda
2. 発表標題 Comparison of ore formation processes between VHMS deposits and a submarine hydrothermal ore deposit in Okinawa Trough
3. 学会等名 Goldschmidt 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 A. Koide, A. Ito, T. Otake, and T. Sato
2 . 発表標題 Fe colloid formation and effects on the mobility of toxic elements in Aina mine drainage
3 . 学会等名 Goldschmidt 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 A. Ito, T. Otake, A. Maulana, K. Sanematsu, and T. Sato
2 . 発表標題 Critical metals mobilization and enrichment associated with Fe isotope fractionation in Ni laterite deposits, Sulawesi Island, Indonesia
3 . 学会等名 Goldschmidt 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 F. Chikanda, T. Otake, Y. Ohtomo, and T. Sato
2 . 発表標題 The role of multi-stage processes on ree enrichment in Kangankunde carbonatites, Malawi
3 . 学会等名 Goldschmidt 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kyaw Zay Ya, T. Otake, K. Sanematsu, and T. Sato
2 . 発表標題 Ore genesis and environmental study of the Pinpet iron deposit in Southern Shan state, Myanmar
3 . 学会等名 資源地質学会第68回年会
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 小出 葵, 伊藤 茜, 大竹 翼, 佐藤 努
2. 発表標題 相内鉱山坑廃水路における有害元素の移動性に与えるコロイド粒子の影響
3. 学会等名 資源地質学会第68回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Chikanda, T. Otake, Y. Ohtomo, T. Sato
2. 発表標題 Magmatic and post-magmatic processes involved in the enrichment of rare earth elements in the Kangankunde carbonatites, Malawi
3. 学会等名 資源地質学会第68回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤 茜, 大竹 翼, Maulana Adi, 実松 健造, Sufriadin, 佐藤 努
2. 発表標題 インドネシアSulawesi島のNiラテライト鉱床におけるレアメタル濃集とFe同位体分別
3. 学会等名 資源地質学会第68回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 実松健造
2. 発表標題 ニッケル鉱床の副産物としてのコバルト
3. 学会等名 資源地質学会第68回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤 茜, 大竹 翼, Maulana Adi, 実松 健造, Sufriadin, 佐藤 努
2. 発表標題 インドネシア, Sulawesi島のNiラテライト鉱床におけるFe同位体分別に伴うNi濃集
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. Chikanda, 大竹 翼, 大友 陽子, 佐藤 努
2. 発表標題 マラウィ・カンガンクンデにおけるカーボナタイト中の希土類元素濃集プロセス
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kyaw Zay Ya, T. Otake, K. Sanematsu, T. Sato
2. 発表標題 Ore genesis and environmental study of Pinpet iron deposit in Southern Shan State, Myanmar
3. 学会等名 Asia Africa Mineral Resources Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Ito, T. Otake, A. Maulana, K. Sanematsu, Sufriadin, T. Sato
2. 発表標題 Geochemical and mineralogical variations in weathering profiles of Ni laterite deposits in East Sulawesi, Indonesia
3. 学会等名 Asia Africa Mineral Resources Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Otake, S. Nakamura, R. Yamada, K. Shin, S. Ono, T. Sato
2. 発表標題 Large Fe isotope fractionations found in sulfide ores and ferruginous cherts in volcanogenic massive sulfide deposits
3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Ohtomo, R. Nakajima, T. Otake, T. Kakegawa
2. 発表標題 Micro to nanoscale observations of carbonaceous matters in 3.2 Ga Banded iron formations, Sheba Gold mine, Moodies Group, Barberton Greenstone Belt and >3.7 Ga schist, Isua Supracrustal Belt
3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤茜, 大竹翼, 申基澈
2. 発表標題 超苦鉄質岩の風化に伴う元素移動と鉄同位体比変動
3. 学会等名 第7回同位体環境学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小出 葵, 伊藤 茜, 大竹 翼, 佐藤 努
2. 発表標題 相内鉱山坑廃水路における鉄コロイド生成と有害元素への影響
3. 学会等名 資源・素材&EARTH 2017 (札幌)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島 亮, 大友 陽子, 大竹 翼, 掛川 武, 佐藤 努
2. 発表標題 南アフリカ・パーバトン緑色岩帯ムーディーズ層群の縞状鉄鉱層における有機物の地球化学的特徴と微細構造観察
3. 学会等名 2017年度日本地球化学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村峻介, 大竹翼, 山田亮一, 申基澈, 小野修司, 佐藤努
2. 発表標題 火山性塊状硫化物鉱床の鉱石および鉄石英の鉄同位体組成
3. 学会等名 資源地質学会第67回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 C. Frances, Y. Ohtomo, T. Otake, T. Sato
2. 発表標題 Geochemical and petrological characteristics of carbonatites and associated fenites in Kangankunde, Malawi
3. 学会等名 資源地質学会第67回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤茜, 大竹翼, Adi Maulana, 実松健造, Sufriadin, 佐藤努
2. 発表標題 インドネシア, Sulawesi島Niラテライト鉱床における化学風化プロセス
3. 学会等名 資源地質学会第67回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大竹翼, 中村峻介, 山田亮一, 申基澈, 小野修司, 佐藤努
2. 発表標題 火山性塊状硫化物鉱床における鉄同位体分別と鉱床形成プロセス
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大友 陽子, 加藤 丈典, 大竹 翼, 掛川 武
2. 発表標題 Depositional environment of graphite-bearing metasedimentary rocks and banded iron formations in >3.7 Ga Isua Supracrustal Belt, West Greenland
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中島 亮, 大友 陽子, 大竹 翼, 掛川 武, 佐藤 努
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層群の3.2億年前の縞状鉄鉱層中の鉄鉱物に伴う有機物の地球化学的特徴と微細構造観察
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 実松健造, 昆 慶明, 横山隆臣, Adi Maulana
2. 発表標題 ラテライト型ニッケル鉱床のスカンジウム含有鉱物について: インドネシアSoroako鉱山の例
3. 学会等名 資源地質学会第67回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 実松健造
2. 発表標題 鉱床の成因研究と探査への応用
3. 学会等名 地圏資源環境研究部門研究成果報告会
4. 発表年 2017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	実松 健造 (Sanematsu Kenzo) (40462840)	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 (82626)	
研究分担者	申 基チヨル (Shin Ki-Cheol) (50569283)	総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・准教授 (64303)	
研究協力者	マウラナ アディ (Maulana Adi)		
研究協力者	チヨウ ザヤ (Kyaw Zay Ya)		