

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04515

研究課題名（和文）環境科学的アプローチから初期火星における生命存在可能性を探る

研究課題名（英文）Exploring habitability on Early Mars from Environmental Science Approaches

研究代表者

福士 圭介（Fukushi, Keisuke）

金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授

研究者番号：90444207

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,600,000円

研究成果の概要（和文）：火星探査によって得られた鉱物学的・地球化学的データを我々が独自に開発した手法で解析することにより、火星に存在した液体の水の化学組成の進化を検討した。火星では湖沼や海を地表に湛えた大規模な水循環が存在した時代から間欠的な湿潤イベントのみが生じた時代へと水環境が推移したと考えられている。このうち、後者は酸性・酸化性・高塩分に特徴づけられる水質であったことを定量的に明らかにした。また、かつてGaleクレータに存在した湖水は地球のアルカリ塩湖に類似した環境にあったことを推測した。さらに、本研究では将来の火星探査計画や帰還試料分析に水質復元法を適用するための手法・技術開発も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの火星探査から人類は火星に対して“かつて水が存在した惑星”という描像を持つに至っている。一方、水の水質や環境が不明なため、火星における生命に関する議論は推測の範疇を出ていなかった。これに対し、本研究では環境科学分野で培われた手法に基づき、過去の火星に存在した液体の水の水質を定量化するとともに、水の化学組成の進化を明らかにすることに成功した。また、本研究で開発を行った手法や技術を、将来の火星探査計画や帰還試料分析に適用することにより、より詳細な火星の古環境や生命存在可能性の議論が可能となる。

研究成果の概要（英文）：The evolution of the chemical composition of liquid water on Mars was examined by analyzing mineralogical and geochemical data obtained from Mars exploration. It has been recognized that the aqueous environment on Mars transitioned from a period of large-scale water cycles with lakes and oceans to a period of only intermittent wetting events. We quantitatively revealed that the latter was characterized by water quality that was acidic, oxidative, and highly saline. We also infer that the lake water that once existed in the Gale crater was in an environment similar to that of the Earth's alkaline lakes. In addition, this study developed methods and techniques to apply the reconstruction method of water chemistry to future Mars exploration programs and analysis of returned samples.

研究分野：地球化学

キーワード：初期火星 惑星探査 水質復元 古環境 ラマン分光

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

太古の火星に生命は存在したのか？そして、生命が存在したなら、生命の存在を可能にした環境はどのようなものであったのか？現在火星は寒冷・乾燥化した惑星であるが、約 40 億年前は温暖な時期があり、表面では大規模な水循環が存在していたことが明らかとなっている。NASA の火星探査車の Curiosity や Perseverance はかつて湖沼が存在した火星クレータに降り立ち、太古の火星に存在した生命の痕跡を探索している。

水質とは水に溶けた成分の種類とその濃度と定義できる。生命（とくに人間）の生存や健康を考える環境科学分野において、水環境と生命の関わりを議論するためには定量的な水質の理解が必須である。我々のグループは、放射性廃棄物の地層処分研究分野で開発された堆積物間隙水の水質復元手法を応用し、地球外物質の鉱物学的・地球化学的データから、かつて地球外に存在した液体の水の水質を復元することに世界で初めて成功した。本研究では火星探査車により提供される分析データを独自に開発した手法により解析することで、かつて火星に存在した水環境を精密に復元することを目的とする。

### 2. 研究の目的

現在火星は寒冷・乾燥化した惑星であるが、約 40 億年前は温暖な時期があり、表面では大規模な水循環が存在していたことが明らかとなっている。NASA の火星探査車はかつての湖沼に降り立ち、初期火星に存在した水環境および生命の痕跡を探索している。本研究では、我々が独自に開発した手法を NASA 火星探査車により得られる分析データに適用し、初期火星に存在した液体の水の水質を定量的に復元する。復元した水質に基づいて液体水の化学的性質および周辺環境の進化を明らかにすることで、初期火星における生命存在可能性を考察する。また、また同様の検討を将来の火星探査計画や帰還試料分析に適用するための手法・技術開発も行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1)NASA 火星探査車により得られた分析データの解析に基づく水環境の定量的復元、(2)水質復元法を将来の火星探査計画や帰還試料分析に適用するための手法・技術開発を行った。

(1)に関しては NASA 探査車 Curiosity が探査を行っている Gale クレータを対象に、湖成層上部の水質復元を行い、これまでに行ったクレータ最下部の水質との比較を行うことで、かつて水環境の進化を検討した。また、火星表面に海洋や湖など大規模な水循環が存在した後の時代における間欠的な湿潤イベント（後期流体）の化学的特徴を検討した。さらに地球上での類似環境調査に基づき、後期流体により現在では鉱物学的痕跡がかき消されている湖水環境の精密復元を試みた。(2)に関しては、NASA 探査車 Perseverance が搭載されているラマン分光装置から得られたデータから、水質復元法の適用に必要な情報を抽出するための手法開発を行った。なお Perseverance は本手法の適用に必要な湖成堆積物の分析を研究期間中に行うことができなかった。当初は Perseverance が提供する Jezero クレータ堆積物のラマン分光データの解析により、かつて存在した古 Jezero 湖の水質復元を行う予定であったが、その実現には至らなかった。

### 4. 研究成果

#### (1) 初期火星に存在した水の水質復元

##### ゲールクレータ—Murray 層の水質復元

火星探査車 Curiosity はかつて湖が存在していたと考えられる Gale クレータの湖成層の鉱物学的・地球化学的データを提供している。我々はこれまでに、火星湖成層に存在するスメクタイトの層間陽イオン組成と自生鉱物の物理化学的性質を考慮し、キュリオシティが探査を行った最下部である Yellowknife Bay 層(Cumberland サイトと John Klein サイト)におけるかつて存在した湖の詳細かつ定量的な水質復元に成功している(Fukushi et al., 2019)。本研究ではより上層部である Murray 層に位置する Quela サイト(図 1.1)を対象に同様の方法論により水質復元を行った(Fukushi et al., 2022 *Geochemica et Cosmochimica Acta*)。

復元された Quela サイトの水質は、高塩分、低 pH(3.8-5.5)、高 Eh(>240 mV)に特徴づけられる。下層の Yellowknife Bay 層 Cumberland サイトの水質はやや低塩分、中性 pH(6.9-7.3)、酸化還元非平衡にあるので、あきらかに異なる化学的特徴を示した(図 1.1)。Gale クレータでは 40-38 億年前の火星において大規模な水循環があった時代に湖沼が存在し、それ以降湖沼は消失、そのあと間欠的な湿潤イベント(後期流体)が生じたことが推測されている。Fukushi et al., (2019)では中性かつ酸化還元非平衡にある Yellowknife Bay 層の水質は、還元的な環境下で作られた湖沼堆積物と酸化的・酸性環境にあった大気との化学反応を起源とする後期流体が接触することによってもたらされたと推測している。今回 Quela サイトの水質はより酸性かつ酸化的であるため、後期流体の寄与をより色濃く反映しているものと考えられる。

下層の Yellowknife Bay 層が酸性・酸化的な後期流体の影響を受けたものとするならば、後期流体の影響を受ける以前の水質は、より高い DIC(アルカリニティ)と pH を示していたと推測される。そのような環境は地球上では大陸内部の乾燥域に位置するアルカリ塩湖があげられる。近年の研究ではアルカリ塩湖はリン酸やシアン物といった生命の起源において分子進化に必須の成分を濃縮させる機能を有することが指摘されている(Hurowitz et al., 2023)。なお、地球上のアルカリ塩湖では普遍的に炭酸塩鉱物の沈殿が見られるが、ゲールクレータではほとんど存在が認められていない。今回推測した後期流体の水質に基づ

くと、地表に大規模な水循環が存在した時代に炭酸塩が分布していたとしても、それらは後期流体の作用により酸溶解し消失したはずである。すなわち、かつて存在したアルカリ塩湖の鉱物学的痕跡は後期流体により消失した可能性がある。

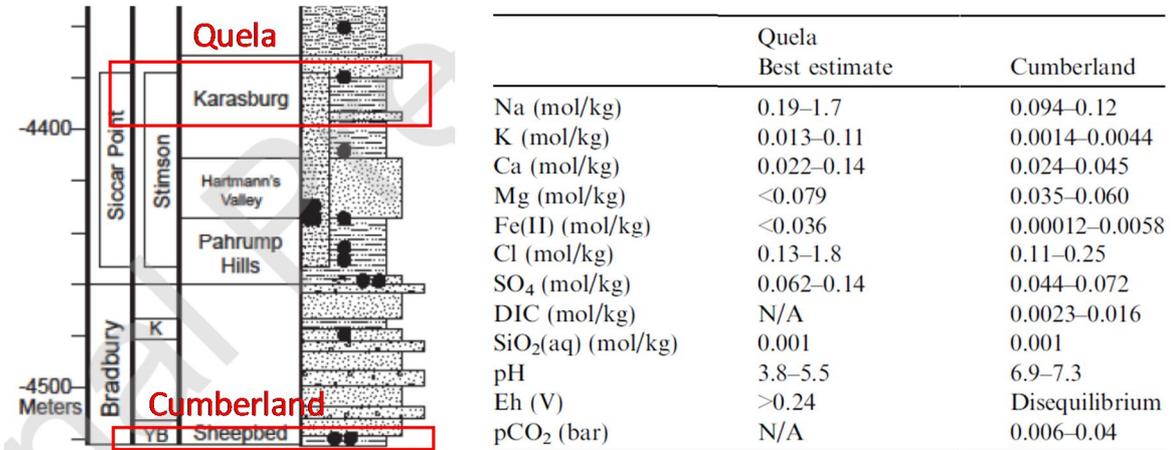


図 1.1 火星 Gale クレータ湖成層の上層部 Quela サイト(本研究)と下層部 Cumberland サイト( Fukushi et al., 2019 ) にかつて存在した液体の水の水質

### 後期流体の化学的特徴の復元：火星のゲーサイト・ヘマタイト問題

Quela サイトの水質復元より、後期流体の水質は酸性・酸化的に特徴づけられることが推測された。火星表層ではフェリハイドライト・ヘマタイト・アカガネアイト・ジャロサイトといった鉄酸化物が普遍的に認められているが、これらの生成は主に酸化的な後期流体の作用により生成したものと推測される。実際にジャロサイトを用いた K-Ar 年代では、この生成は大規模な水循環が存在した時代よりもはるかに後の時代であることが確認されている(Martin et al., 2017)。

低温条件における結晶性鉄酸化物は、鉄(III)イオンの加水分解によって生じたフェリハイドライトが変質することによって生成することが知られている(Schwertmann and Murad, 1983)。地球上において普遍的にみられる鉄酸化物は赤色を呈するヘマタイトと黄色を呈するゲーサイトであり、これらは似た安定性から競争的な関係にあることが知られている。フェリハイドライトの変質によって生成する鉄酸化物種は溶液の pH が主要な役割を果たすことが知られており、溶液が中性の場合はヘマタイトに、弱酸性やアルカリ性の場合はゲーサイトが生成する(Schwertmann and Murad, 1983)。後期流体の pH は酸性であることが推測されたが、その環境で生成するはずのゲーサイトは火星上ではほとんど認められていない。水質を特徴づけるパラメータには pH の他にイオン強度(塩濃度)がある。後期流体の水質が高塩分に特徴づけられるとすると、イオン強度がフェリハイドライトの変質挙動に影響を与えた可能性がある。しかし、pH とイオン強度を共に制御した条件におけるフェリハイドライトの変質はこれまで検討されていない。本研究では、NaCl 溶液と MgCl<sub>2</sub> 溶液の pH とイオン強度を共に制御して、フェリハイドライトの転移を粉末 X 線回折と X 線吸収分光法によって調べた(深谷他 2024, JpGU, Fukaya et al., submitted)。

中性条件ではどちらの電解質溶液中においても生成する鉱物種はヘマタイトに卓越した(図 1.2)。NaCl 溶液中においてはヘマタイトの寄与はイオン強度に依存せず、MgCl<sub>2</sub> 溶液中においてはイオン強度の増加に伴いヘマタイトの寄与が増加する傾向が見られた。酸性条件においては、低いイオン強度においてゲーサイトに卓越した。一方、イオン強度の増加に伴い、系統的にヘマタイトの寄与が増加する傾向が見られた。特に高いイオン強度では生成する鉄鉱物は酸性条件でほぼ 100%ヘマタイトへと変質していた。これらの結果は、高いイオン強度条件においては、どのような pH 条件でもゲーサイトの生成が阻害されることを示している。したがって、火星においてゲーサイトがほぼ認められずヘマタイトのみに卓越する理由は後期流体の塩濃度が高かったためであると結論付けられる。すなわち、大規模な水循環の後に間欠的に生じた後期流体は、酸性・酸化的・高塩分に特徴づけられる水質であったことが推測される。

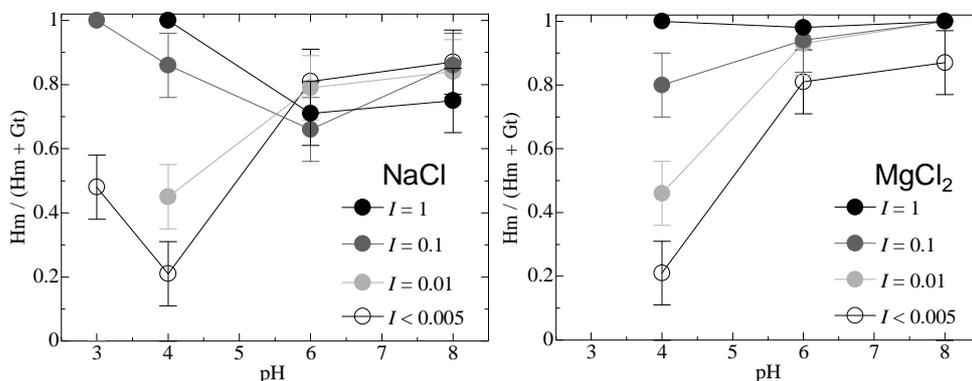


図 1.2 pH およびイオン強度の関数としたヘマタイト形成割合 ( Hm/(Hm+Gt) )

### 低温条件におけるアルカリ塩湖の水質制御機構

今回の研究により、火星に大規模な水循環があった時代、Gale クレータにはアルカリ塩湖が存在したこ

とが推測された。その一方、大規模な水循環が消失した後に起こった間欠的な後期流体により水環境の記録は失われている。我々はこれまでに、地球上のアルカリ塩湖の水質は、準安定なカルシウム炭酸塩であるモノハイドロカルサイトと準安定なマグネシウム炭酸塩である非晶質マグネシウムの生成により制御されることを示している(Fukushi and Matsumiya, 2018)。したがって、において復元した湖水起源の成分濃度と、地球上で認められるアルカリ塩湖水質制御機構を組み合わせることで、かつて存在した火星アルカリ塩湖の水質を復元できる可能性がある。

水質制御に関係するモノハイドロカルサイトに関しては、幅広い範囲の温度条件で熱力学的溶解度が見積もられている。一方、非晶質マグネシウム炭酸塩に関しては、溶解度が見積もられている温度条件は25のみであり、初期火星環境において推測されているより低温条件では見積もられていない。そこで本研究ではモンゴルのアルカリ塩湖における現地調査と、低温下での室内鉱物合成実験を組み合わせることで、低温条件における非晶質マグネシウム炭酸塩の溶解度に及ぼす温度の影響を検討した(Kitajima et al., 2023*ACS Earth and Space Chemistry*)。

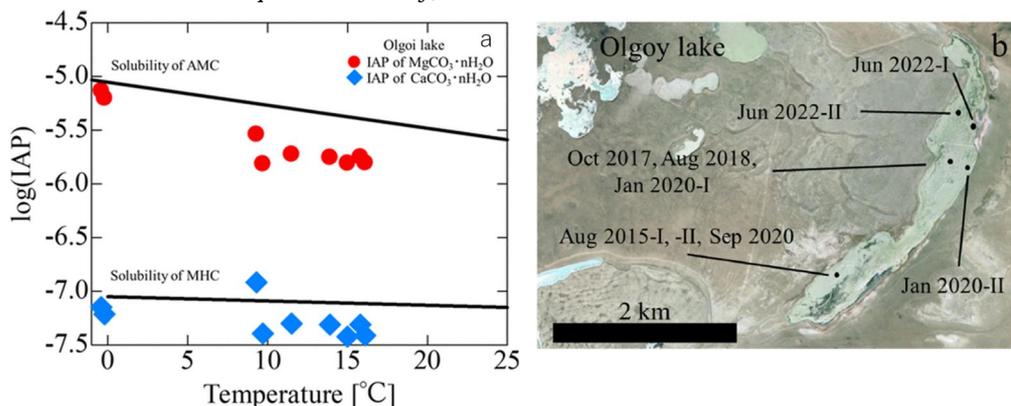


図 1.3 温度の関数とした非晶質マグネシウム炭酸塩(AMC)およびモノハイドロカルサイト(MHC)の溶解度(実線)とモンゴル・オルゴイ湖の各季節に得られたカルシウム炭酸塩およびマグネシウム炭酸塩に関するイオン活量積(IAP) (a)、モンゴル・オルゴイ湖における試料採取地点 (b)

室内実験から7における非晶質マグネシウム炭酸塩の溶解度を過飽和法・未飽和法により見積もった。その結果、いずれの実験方法においても7における溶解度は共通の値が得られた。低温条件における溶解度は25よりもlog単位にして0.5程度高い値を示し、比較的大きな温度依存性を示すことを明らかにした(図 1.3a)。得られた溶解度の自然界における適用性を検討するために、モンゴル南部に位置するアルカリ塩湖であるオルゴイ湖において2015年~2022年の各季節における調査で得られた水質との比較を行った(図 1.3b)。その結果、カルシウム炭酸塩に関するイオン活量積(IAP)は温度によらず比較的類似した値を示す一方、マグネシウム炭酸塩に関するイオン活量積は実験で認められた結果と調和的に強い温度依存性を示すことを明らかにした。

初期火星において大規模な水循環があった時代、地表温度は比較的低温であったことが推測されている(Wordsworth et al., 2017)。そのような条件において、カルシウム炭酸塩に対してマグネシウム炭酸塩は生成が制限されていた可能性がある。もしも低温において水和マグネシウムケイ酸塩(粘土鉱物)の溶解度が低ければ、かつて火星に存在したアルカリ塩湖ではマグネシウム炭酸塩ではなく含マグネシウム粘土鉱物(低結晶性Mgケイ酸塩)を多量に沈殿していた可能性もある。粘土鉱物は高い表面活性を持つため、生命材料物質の吸着場・反応場として機能することがよく知られている。古Gale湖の湖成層に大量に認められる粘土鉱物は、主に碎屑性であったことが指摘されるが(Schieber et al., 2017)本研究から火星の粘土鉱物の生成に関して新たな描像を与えることができる可能性がある。

## (2) 初期火星水質復元法のための手法・技術開発

### 時間ゲートラマン分光法の粘土鉱物への適用

初期火星のJezeroクレータに存在した湖の水質の復元のため、Jezeroクレータを探索中のNASAの火星探査機Perseveranceに搭載されているラマン分光計を模擬したラマン分光装置の開発を行った。ラマン分光装置は装置性能がPerseveranceと同等となるよう、研究室が所有していたレーザーや本課題予算にて購入した部品を用いて、設計および実装した(図 2.1)。初年度は主にラマン分光装置の開発と性能評価を行った(田畑ほか、惑星科学会秋季講演会2022)。

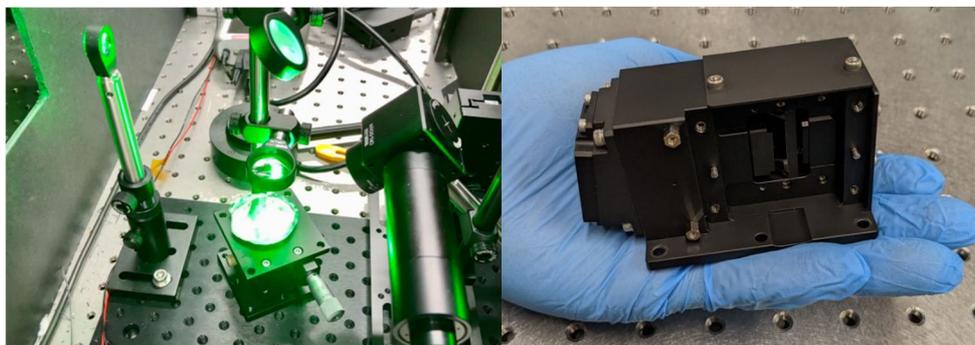


図 2.1 構築したラマン分光装置の照射部(左)と小型分光計(右)

2 年目以降は開発したラマン分光装置を用い、古 Jezero 湖の水質を記録していると考えられる粘土鉱物のラマン分光実験を行った。その結果、Perseverance は saponite や montmorillonite など火星周回衛星が分光法により検出している粘土鉱物に由来するピークの検出は、ナノ秒時間ゲート型ラマン分光計によっても難しいことが分かった(Tabata et al., JpGU2023)。一方で、saponite および montmorillonite の層間に含まれるイオン種を室内実験により単一イオン種に置換した試料を測定する実験を行ったところ、ラマン分光装置の運用法を変えることで測定可能な蛍光スペクトルではイオン種依存性が見られることが分かった(田畑ほか、惑星科学会秋季講演会 2023; Tabata et al., 2024, LPSC; 図 2.2)。このことは、ラマン分光装置を用いて粘土鉱物の層間イオン組成を制約し、水質の復元に応用できる可能性があることを示唆している。また、火星においてこれまで検出されていない粘土鉱物も含めた幅広い試料に対し、測定実験を行った。その結果、Perseverance は hectorite や antigorite などいくつかの未検出の粘土鉱物に対し検出感度を持つことが分かった。これらの粘土鉱物について得られた知見について学術誌に論文を投稿する準備を進めている。

また、粘土鉱物と並行して炭酸塩鉱物や塩素酸塩鉱物についてもラマン分光実験を行った。両者とも過去の探査機によって火星上で広く存在が報告されている鉱物であり、炭酸塩鉱物は火星の大気二酸化炭素量、塩素酸塩鉱物は火星が乾燥化して以降の気候や酸化還元状態などをそれぞれ反映していると考えられている。実験の結果、既に検出されている炭酸塩鉱物に加えて準安定相の炭酸塩鉱物や、ラマン分光スペクトルが未検討であった塩素酸塩鉱物について、Perseverance は検出可能な性能を有することが分かった(Tabata et al., 2024, LPSC)。これらの鉱物は Curiosity が搭載していたドリルで採取した試料の X 線回折分析でも検出は可能だが、遠隔かつより簡易なラマン分光装置を用いることでも検出できるという点でラマン分光法の有意性を示している。この結果についても学術誌に論文として投稿する準備を進めている。現時点では Perseverance はこれらの鉱物を未検出だが、今後の惑星探査において参照され得るデータとなると期待される。

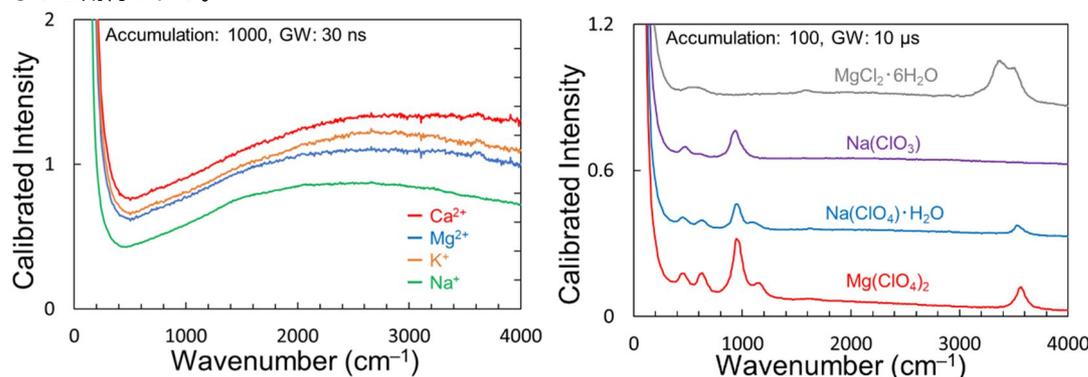


図 2.2 本研究で構築した時間ゲート型ラマン分光装置によって取得したラマンスペクトル。(左)層間陽イオン組成を変化させたモンモリナイトのスペクトル。(右)塩化物と過塩素酸塩のスペクトル。

#### 引用文献

- Fukushi K. and Matsumiya H. (2018) Control of Water Chemistry in Alkaline Lakes: Solubility of Monohydrocalcite and Amorphous Magnesium Carbonate in  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-Na}_2\text{CO}_3$  Solutions. *ACS Earth Sp. Chem.* 2, 735–744.
- Fukushi K., Sekine Y., Sakuma H., Morida K. and Wordsworth R. (2019) Semiarid climate and hyposaline lake on early Mars inferred from reconstructed water chemistry at Gale. *Nat. Commun.* 10, 1–11.
- Fukushi, K., Sekine, Y. and Rampe, E (2022) Reconstruction of pH, redox condition, and concentrations of major components in ancient liquid water from the Karasburg member, Murray formation, Gale Crater, Mars. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 325, 129-151.
- Hurowitz, J.A., Catling, D.C. and Fischer, W.W. (2023) High Carbonate Alkalinity Lakes on Mars and their Potential Role in an Origin of Life Beyond Earth. *Elements* 19, 37-44.
- Martin P. E., Farley K. A., Baker M. B., Malespin C. A., Schwenzer S. P., Cohen B. A., Mahaffy P. R., McAdam A. C., Ming D. W., Vasconcelos P. M. and Navarro-González R. (2017) A Two-Step K-Ar Experiment on Mars: Dating the Diagenetic Formation of Jarosite from Amazonian Groundwaters. *J. Geophys. Res. Planets* 122, 2803–2818.
- Kitajima, T., Fukushi, K., Gankhurel, B., Davaasuren, D., Ganbat, S., Udaanjargal, U., Gerelmaa, T., Sekine, Y., Takahashi, Y., Yoda, M. and Hasebe, N. (2023) Solubility of Amorphous Magnesium Carbonate at Low Temperatures: Implications for Carbonate Mineral Formation in Alkaline Lakes. *ACS Earth Sp. Chem.* 7, 1227-1234.
- Schieber, J., Bish, D., Coleman, M., Reed, M., Hausrath, E.M., Cosgrove, J., Gupta, S., Minitti, M.E., Edgett, K.S. and Malin, M. (2017) Encounters with an unearthy mudstone: understanding the first mudstone found on Mars. *Sedimentology* 64, 311–358.
- Schwertmann, U. and Murad, E. (1983) Effect OF pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite. *Clays Clay Miner.* 31, 277-284.
- Wordsworth R. D., Kalugina Y., Lokshantov S., Vigasin A., Ehlmann B., Head J. W., Sanders C., Wang H., Kerber L., Pierrehumbert R. T., Forget F. and Head J. W. (2017) Transient reducing greenhouse warming on early Mars. *Geophys. Res. Lett.* 44, 665–671.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Fukushi Keisuke, Okuyama Akihiro, Takeda Natsumi, Kosugi Shigeyori	4. 巻 134
2. 論文標題 Parameterization of adsorption onto minerals by Extended Triple Layer Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Geochemistry	6. 最初と最後の頁 105087 ~ 105087
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apgeochem.2021.105087	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 Noda Natsumi, Yamashita Shohei, Takahashi Yoshio, Matsumoto Megumi, Enokido Yuma, Amano Kana, Kawai Takahiro, Sakuma Hiroshi, Fukushi Keisuke, Sekine Yasuhito, Nakamura Tomoki	4. 巻 11
2. 論文標題 Anaerobic Microscopic Analysis of Ferrous Saponite and Its Sensitivity to Oxidation by Earth's Air: Lessons Learned for Analysis of Returned Samples from Mars and Carbonaceous Asteroids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 1244 ~ 1244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/min11111244	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 Tabata Haruhisa, Sekine Yasuhito, Kanzaki Yoshiki, Sugita Seiji	4. 巻 299
2. 論文標題 An experimental study of photo-oxidation of Fe(II): Implications for the formation of Fe(III) (hydro)oxides on early Mars and Earth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 35 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2021.02.006	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 Fukushi Keisuke, Sekine Yasuhito, Rampe Elizabeth B.	4. 巻 325
2. 論文標題 Reconstruction of pH, redox condition, and concentrations of major components in ancient liquid water from the Karasburg member, Murray formation, Gale Crater, Mars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 129 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2022.02.005	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 Sugiuchi Mitsuteru, Sekine Yasuhito, Takahashi Satoshi	4. 巻 410
2. 論文標題 Comparative study on cavernous weathering features formed by coastal processes and acidic alteration: Implications for rounded pits on Martian rocks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115889 ~ 115889
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2023.115889	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 Tan Shuya, Sekine Yasuhito, Kikuchi Takashi, Suematsu Hisayuki, Hama Tetsuya, Takahashi Yoshio	4. 巻 410
2. 論文標題 Comparing the radiolytic oxidation of sulfur and chloride within ice on Europa and Mars	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115873 ~ 115873
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2023.115873	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 Imamura Shoko, Sekine Yasuhito, Maekawa Yu, Kurokawa Hiroyuki, Sasaki Takenori	4. 巻 396
2. 論文標題 Effective formation of surface flow due to salt precipitation within soils upon repeated brine seepages on Mars	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115500 ~ 115500
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2023.115500	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 Shozaki Hiroki, Sekine Yasuhito, Guttenberg Nicholas, Komatsu Goro	4. 巻 14
2. 論文標題 Recognition and Classification of Martian Chaos Terrains Using Imagery Machine Learning: A Global Distribution of Chaos Linked to Groundwater Circulation, Catastrophic Flooding, and Magmatism on Mars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 3883 ~ 3883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs14163883	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 Azua-Bustos Armando他	4. 巻 14
2. 論文標題 Dark microbiome and extremely low organics in Atacama fossil delta unveil Mars life detection limits	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 808
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36172-1	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 Noda Natsumi, Sekine Yasuhito, Tan Shuya, Kikuchi Sakiko, Shibuya Takazo, Kurisu Minako, Takahashi Yoshio, Fukushi Keisuke, Rampe Elizabeth B.	4. 巻 386
2. 論文標題 Characterization of groundwater chemistry beneath Gale Crater on early Mars by hydrothermal experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115149 ~ 115149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2022.115149	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 Yoda Masahiro, Sekine Yasuhito, Fukushi Keisuke, Kitajima Takuma, Gankhurel Baasansuren, Davaasuren Davaadorj, Gerelmaa Tuvshin, Ganbat Shuukhaaz, Shoji Daigo, Zolotov Mikhail Y., Takahashi Yoshio	4. 巻 126
2. 論文標題 Field Investigations of Chemical Partitioning and Aqueous Chemistry of Freezing Closed Basin Lakes in Mongolia as Analogs of Subsurface Brines on Icy Bodies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 e2021JE006972
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JE006972	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 Koyama Shungo, Terada Naoki, Nakagawa Hiromu, Kuroda Takeshi, Sekine Yasuhito	4. 巻 912
2. 論文標題 Stability of Atmospheric Redox States of Early Mars Inferred from Time Response of the Regulation of H and O Losses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 135 ~ 135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf0ac	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 Mori Shoki, Cho Yuichiro他	4. 巻 240
2. 論文標題 Fraunhofer line-based wavelength-calibration method without calibration targets for planetary lander instruments	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 105835 ~ 105835
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2023.105835	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 Ulamec Stephan他	4. 巻 210
2. 論文標題 Science objectives of the MMX rover	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 95 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2023.05.012	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 Moral Andoni G.他	4. 巻 54
2. 論文標題 Deuterated PET: The new verification target of the Raman spectrometer for the MMX mission to explore Phobos	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Raman Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 1268 ~ 1279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jrs.6569	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 Yumoto Koki, Cho Yuichiro, Kameda Shingo, Kasahara Satoshi, Sugita Seiji	4. 巻 205
2. 論文標題 In-situ measurement of hydrogen on airless planetary bodies using laser-induced breakdown spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 106696 ~ 106696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sab.2023.106696	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 Cho Yuichiro他	4. 巻 73
2. 論文標題 In situ science on Phobos with the Raman spectrometer for MMX (RAX): preliminary design and feasibility of Raman measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01496-z	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 Inoue Kosuke, Nishiki Yuto, Fukushi Keisuke, Suma Reo, Sato Tsutomu, Sakuma Hiroshi, Tamura Kenji, Yokoyama Shingo, Shimbashi Misato, Mizukami Tomoyuki, Unami Kensuke, Noji Yohei, Kitajima Takuma, Fukaya So, Takeichi Yasuo, Yamashita Shohei, Suga Hiroki, Takahashi Yoshio	4. 巻 245
2. 論文標題 Systematic comparison of Mg K-edge XANES spectra of magnesium-bearing clay minerals and magnesium silicate hydrates: A promising tool for identifying magnesium silicate hydrate in natural samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Clay Science	6. 最初と最後の頁 107152 ~ 107152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.clay.2023.107152	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 Kajitani Iori, Koike Mizuho, Nakada Ryoichi, Tanabe Gaku, Usui Tomohiro, Matsu'ura Fumihiro, Fukushi Keisuke, Yokoyama Tetsuya	4. 巻 620
2. 論文標題 Identification of carbonate-associated sulfate (CAS) in a Noachian Martian meteorite Allan Hills 84001	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 118345 ~ 118345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2023.118345	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 Morida Koki, Fukushi Keisuke, Sakuma Hiroshi, Tamura Kenji	4. 巻 237
2. 論文標題 Systematic comparison of the hydration and dehydration of Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -saturated montmorillonite, nontronite, hectorite, saponite, and Fe-saponite by in situ X-ray diffraction measurements	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Clay Science	6. 最初と最後の頁 106898 ~ 106898
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.clay.2023.106898	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 Kitajima Takuma, Fukushi Keisuke, Baasansuren Gankhurel, Davaadorj Davaasuren, Shuukhaaz Ganbat, Uyangaa Udaanjargal, Tuvshin Gerelmaa, Sekine Yasuhito, Takahashi Yoshio, Yoda Masahiro, Hasebe Noriko	4. 巻 7
2. 論文標題 Solubility of Amorphous Magnesium Carbonate at Low Temperatures: Implications for Carbonate Mineral Formation in Alkaline Lakes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Earth and Space Chemistry	6. 最初と最後の頁 1227 ~ 1234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsearthspacechem.3c00030	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 Sakuma Hiroshi, Morida Koki, Takahashi Yoshio, Fukushi Keisuke, Noda Natsumi, Sekine Yasuhito, Tamura Kenji	4. 巻 107
2. 論文標題 Synthesis of ferrian and ferro-saponites: Implications for the structure of (Fe,Mg)-smectites formed under reduced conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 1926 ~ 1935
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2022-8231	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27件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 福土圭介・関根 康人・Rampe, E.B.
2. 発表標題 火星ゲールクレータ湖沼堆積物の間隙水水質復元: Murray 層 Quela サイトへの適用
3. 学会等名 日本地球化学会第68回年会, オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fukushi, K., Sekine, Y., and Rampe, E.B.
2. 発表標題 Reconstruction of water chemistry in ancient liquid water from the Murray formation, Gale Crater, Mars
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021, オンライン (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北島卓磨・福士圭介・関根康人・依田優大・ガンフレル パーサンスレン・ダバースレン ダバードルジ
2. 発表標題 非晶質マグネシウム炭酸塩の溶解度：初期火星の閉塞湖におけるMg炭酸塩の希少性.
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会，オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北島卓磨・福士圭介・関根康人・依田優大・ガンフレル パーサンスレン・ダバースレン ダバードルジ・高橋嘉夫
2. 発表標題 低温条件における非晶質マグネシウム炭酸塩の溶解度
3. 学会等名 日本鉱物科学会2021年年会，オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kitajima, T., Fukushi, T., and Sekine, Y.,
2. 発表標題 Solubility of amorphous magnesium carbonate: Implication for Mg-carbonate formation on Early Mars.
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021, オンライン (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野路陽平・福士圭介・徳門弘都
2. 発表標題 サポナイト層間における陽イオン交換選択係数の測定
3. 学会等名 日本鉱物科学会2021年年会，オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐久間博・森田康暉・福士圭介・高橋嘉夫・野田夏実・関根康人・田村堅志
2. 発表標題 鉄サボナイトの合成と酸化・還元の可能性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会, オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 依田優大・関根康人・福士圭介・北島卓磨・Gankhurel, B.・Davaasuren, D.・Gerelmaa, T.・Ganbat, S.・庄司大悟・高橋嘉夫
2. 発表標題 Field investigations on salt partitioning in frozen closed-basin lakes in Mongolia as terrestrial analogues of subsurface brine reservoirs on Solar System icy bodies
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会, オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fukushi, K. and Suyama, M.
2. 発表標題 Formation condition of CaCO <sub>3</sub> /2H <sub>2</sub> O: Implication for water chemistry of alkaline lakes
3. 学会等名 IMA2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北島卓磨・福士圭介
2. 発表標題 非晶質マグネシウム炭酸塩の溶解度：火星表層におけるマグネシウム炭酸塩の希少性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gankhurel, B., Fukushi, K., Davaasuren, D., Imai, E., Kitajima, T., Udaanjargal, U., Gerelmaa, T., Sekine Y., Takahashi, Y. and Hasebe, N.
2. 発表標題 Arsenic and uranium contamination in Orog lake in the Valley of the Gobi lakes, Mongolia: Field evidence of conservative accumulation of U in an alkaline, closed-basin lake during evaporation
3. 学会等名 AGU annual meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kitajima, T. and Fukushi, K.
2. 発表標題 Solubility of Amorphous Magnesium Carbonate
3. 学会等名 IMA2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野路陽平・福土圭介
2. 発表標題 スメクタイト層間主要陽イオンの分光学的キャラクタリゼーション
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野路陽平・福土圭介・徳門弘都
2. 発表標題 スメクタイト層間主要陽イオンの分光学的キャラクタリゼーション
3. 学会等名 日本鉱物科学会2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野口里奈・白井寛裕・庄司大悟・福士圭介・依田優大・三平舜
2. 発表標題 東南極昭和基地周辺露岩域の火星アナログサイトとしての利用可能性評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳門弘都・福士圭介・関根康人
2. 発表標題 サボナイトによるアンモニウム取り込み挙動
3. 学会等名 日本鉱物科学会2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋嘉夫・清水優希・河合敬宏・蓬田匠・竹田早英桂・板井啓明・田中啓資・孫静・福士圭介・田中雅人
2. 発表標題 2:1型層状ケイ酸塩の構造中の鉄による酸化還元反応：環境中の電池としての役割
3. 学会等名 2022年度日本地球化学会第69回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深谷 創・福士 圭介・高橋 嘉夫
2. 発表標題 火星のヘマタイト・ゲーサイト問題：塩溶液中におけるフェリハイドライトから結晶性鉄酸化物への変質挙動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fukaya, S., Fukushi, K. and Takahashi, Y.
2. 発表標題 Hematite-Goethite Problem on Mars: Transformation of Ferrihydrite to Crystalline Fe Oxides in Salt Solutions
3. 学会等名 Water-Rock Interaction WRI-17 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 深谷 創・福士 圭介・高橋 嘉夫
2. 発表標題 火星のヘマタイト・ゲーサイト問題：塩溶液中におけるフェリハイドライトから結晶性鉄酸化物への変質挙動
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北島 卓磨・酢山 真衣・福士 圭介・ガンフレル パーサンスレン・ダバドルジ ダバースレン
2. 発表標題 炭酸カルシウム1/2水和物を実験的に見積った溶解度に基づきアルカリ湖に探す
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kitajima, T., Suyama, M., Fukushi, K. Gankhurel, B. and Davaasuren, D.
2. 発表標題 Finding Calcium Carbonate Hemihydrate in Alkaline Lakes Using the Experimentally Estimated Solubility
3. 学会等名 Water-Rock Interaction WRI-17 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野路 陽平・福士 圭介・長 勇一郎・田畑 陽久
2. 発表標題 スメクタイト層間陽イオン交換選択係数の測定と分光学的キャラクタリゼーション
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥山 晃浩・柏原 輝彦・福士 圭介
2. 発表標題 マンガン酸化物へのモリブデン吸着に伴う同位体分別の精密評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Okuyama, A., Fukushi, K. and Kashiwabara, T.
2. 発表標題 Molybdenum Isotopic Fractionation Associated with Adsorption on Three Different Manganese Oxide Minerals
3. 学会等名 Water-Rock Interaction WRI-17 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥山 晃浩・柏原 輝彦・福士 圭介
2. 発表標題 -MnO <sub>2</sub> 、パーネサイトおよびドロカイトへの吸着によるモリブデン同位体分別の比較
3. 学会等名 日本地球化学会第70回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田畑 陽久・長 勇一郎・湯本 航生・森 晶輝・日向 輝・杉田 精司・関根 康人・松木 篤・福士 圭介
2. 発表標題 Nanosecond time-gated Raman spectroscopy of clay minerals for the reconstruction of water chemistry on early Mars
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023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	長 勇一郎  (Cho Yuichiro)  (00737687)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教   (12601)	
研究分担者	関根 康人  (Sekine Yasuhito)  (60431897)	東京工業大学・地球生命研究所・教授   (12608)	
研究分担者	松木 篤  (Matsuki Atsushi)  (90505728)	金沢大学・環日本海域環境研究センター・准教授   (13301)	

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