

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00195

研究課題名(和文) 地下凍土融解地域の地質・微生物調査及び機械学習に基づく火星水環境の理解

研究課題名(英文) Martian aqueous environments from geological and microbiological surveys of ground ice regions and machine learning

研究代表者

関根 康人 (Sekine, Yasuhito)

東京工業大学・地球生命研究所・教授

研究者番号：60431897

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,720,000円

研究成果の概要(和文)：現在の火星における液体の水の存否、生命生存可能性は長年の謎である。本研究では、火星上の水に関連した地形・鉱物とその地球上のアナログ地形に着目し、火星類似環境の野外調査と水循環の理解、火星類似環境の微生物生態系復元、室内模擬実験による地形形成メカニズムの理解、機械学習による水関連地形の発見と分布の理解を目指した。地下での水-岩石反応での塩水の形成、その地下塩水が高低差のある地域から湧水となり地表水を形成し、さらにそれが凍結蒸発することで塩が地表に残るという水・物質循環が明らかになった。その塩の潮解によってバイオマスとしては微小ではあるものの、生態系が形成されることも明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、人類の長年の謎である「地球外に生命はいるか」という問いに対して、現在の火星も液体の存在という意味において、それに適した環境があることを示唆するものである。同時に、現在の火星における水の循環や挙動の理解は、将来の有人火星探査や火星移住においても、現地での水資源となるため重要である。

研究成果の概要(英文)：The existence of liquid water and habitability on Mars today have long been a mystery. In this study, we focused on water-related landforms and minerals on Mars and their terrestrial analogs, and aimed to field survey Mars-like environments and understand the water cycles, reconstruct microbial ecosystems in Mars-like environments, understand landform formation mechanisms through laboratory simulations, and discover and understand the distribution of water-related landforms through machine learning. The hydrogeochemical cycles were clarified as follows: salt water is formed by subsurface water-rock reactions, the subsurface salt water springs from different elevations to form surface water, and salt remains on the surface due to freeze-drying. The deliquescence of salts also reveals that microbial ecosystems can be formed, albeit with a small amount of biomass.

研究分野：惑星科学

キーワード：宇宙・惑星化学 固体惑星探査 陸域水循環・物質循環 大気圏・水圏化学 生物圏地球化学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

「火星には現在、液体の水が存在しているのか。もし存在するならば、いつどこに出現し、そこに生命は存在しているのか」これは太陽系探査における第一級の問いと言える。40億年前の太古の火星には液体の水が豊富に存在し、地球のような風景が広がっていたであろうことは、数多の地質的証拠から強く示唆されている。しかし、現在の火星は荒涼とした大地がどこまでも広がる。果たして、かつて火星に存在した水はどこにいったのだろうか。

この問いに答えることは、生命科学や宇宙工学にまでに影響を与えるインパクトを持つ。地球生命にとって液体の水が必須であるように、火星で生命を探索する場合においても、液体の水の存在する地域が重要な探査対象となる。加えて、火星における水の存否は、国際有人火星探査においても重要である。このように、火星における液体の水の探索は、単なる惑星科学上の問題に留まらず、広く宇宙生物学や宇宙工学にまたがる重要課題となっている。

実は近年、火星において液体の水が現在、あるいは近過去において活動することにより形成された可能性がある地形が周回機観測で見つかり始めている。その例としては、Recurring Slope Lineae、通称“RSL”と呼ばれる地形があり、これは急斜面にくり返し出現する暗い筋模様である。RSLに限らず、火星上には液体の水の関与の可能性がある小規模な地形が、ビッグデータの解析から発見され始めている。しかしながら、これらはリモートセンシングによる地形解析が示唆するだけあり、これらが本当に液体の水によって形成されたのかということに確証的な証拠は乏しい。例えば、当初RSLは塩水が地下凍土層から流出し、水分が土壌を暗くした跡であると推測された。しかし、RSL上に液体の水分子による赤外吸収が見られないことから、塩水流出による土壌の暗化という解釈が疑問視されるようになった。周回機観測のみから小規模地形の成因を制約することの困難さにより、水の流出がRSLを作っているのかといった形成メカニズムの解釈は、現在混とんとしている。

2. 研究の目的

我々は、火星における水に関連した地形に関するボトルネックを解消するには、地球に存在する類似したアナログ地形の発見と、その地質・微生物調査、および長期継続観測がブレイクスルーとなると考える。本研究の目的は、a) 地球における火星アナログ地形の発見、詳細な地質調査と観測、b) アナログ環境での微生物生態系復元、c) さらに室内での模擬物理実験を通じてその形成メカニズムを解明すること、そして地形形成を支配する共通の物理過程を抽出することである。さらには、d) 水が関与した地球上や火星上の地形について機械学習を行い、火星全球にわたる水が関与した地形の探索とその空間分布を得ることを目指す。

これまで地球における、火星RSLの類似地形を研究した例はほとんどない。我々は、本研究を始める前の予備的研究として、Google Earth画像を利用し、全球にわたる乾燥・半乾燥地域において、100m以下の空間規模で地形模様を徹底的に調べあげ、地球上のRSL候補を探索した。その結果、中央アジア・モンゴル国のゴビ砂漠・アルタイ山地地域、南米チリ北部のアタカマ砂漠・アンデス山脈に、火星RSLとよく似たRSL候補地形を発見した。これら地域は乾燥地域であると同時に永久凍土帯に接し、季節的な凍土層の融解が起きている。我々は2018年8月にモンゴルに予備調査を行い、これに基づき形成過程について仮説を提案し、本研究を通じてそれを実証する。

本研究を行うためには、当然のごとく異分野の研究者による協力体制が必要となる。本研究の代表者(関根)は惑星科学を専門とし、他に地質調査・地球化学の専門家(福士)、物理モデルを行う専門家(庄司)、微生物学の専門家(McGlynn)、宇宙工学の専門家(石上)、複雑系科学、機械学習の専門家(Guttenberg)によるチームを構築する。このような異分野融合チームを構築し、分野横断的課題を解決する。

3. 研究の方法

本研究では、上記のa)~d)の目的を達成するため、モンゴルおよびチリでの地球RSLの地質調査を行うと同時に、長期観測を可能とする無人観測ステーションを構築する。表層砂・土壌を採取し粒度分析、鉱物化学分析を行い、地下を簡易コアリングして凍土層の深度変化を調べる。表層流が生じている場合には水を採取し、溶存種・水素同位体組成から水の起源(凍土層融解が降雨)を明らかにする。必要となるX線回折、誘導結合プラズマ質量分析計、粒度分析計は、既存のものをを用いる。また、アナログ地形における微生物採取を行い、生態系の復元を行う。無人観測ステーションは、太陽光蓄電池、衛星通信機、ドローンおよび複数台の土壌水分計、気温/湿度/風速計、カメラからなる。

さらに、砂粒子と高粘性塩水を用いた室内実験により毛管圧力と透水係数の測定を行う。手法自体はすでに長年の水文学分野での研究で構築されており、高粘性塩水でこれを行う点が新しい。砂粒子を円筒容器に入れ上部から高粘性塩水を流し、その下方と側方への浸透をビデオ

カメラで撮影し決定する。これら観測・実験から、地球において火星での流水地形を形成するメカニズムを解明し、必要な表層流の流速を得る。

さらに、火星上での水が関与した地形の発見と空間分布を行うため、特徴形状を教師データとして、このパターン認識を機械学習させ、地球上の地形との類似性を評価する。予備調査の結果、水が関与したと思われるゴビ砂漠には、砂粒子の重力流で形成したと思われる地形も発見されている。本研究では、両者の調査を踏まえて、水に伴う地形形成と重力流による地形形成のパターンを機械学習によって判別させる。火星上の水による地形の空間分布から凍土層の平面的な広がりやを推定する。

4. 研究成果

研究成果については、a) 火星類似環境の野外調査と水循環の理解、b) 火星類似環境の微生物生態系復元、c) 室内模擬実験による地形形成メカニズムの理解、d) 機械学習による水関連地形の発見と空間分布の理解にまとめられる。総じて、地下での水-岩石反応での塩水の形成、その地下塩水が高低差のある地域から湧水となり地表水を形成し、さらにそれが凍結蒸発することで塩が地表に残るといった水・物質循環が明らかになった。その塩の潮解によってバイオマスとしては微小ではあるものの、生態系が形成されうることも明らかになった。以下、これら成果の詳細を述べる。

a) 火星類似環境の野外調査については、モンゴル・ゴビ砂漠の地質調査、表層水・地下水の地球化学分析、湖などの堆積物での鉱物分析から、現地の水循環の復元を行った。その結果、表層は乾燥しているものの、地下には地下水の流れがあり、特に夏の温暖期に山間部の地下凍土が融解し、それが地下水の流れによって低地に運ばれて地表付近に湧水することが明らかになった (Sekine et al., 2020) (図1)。さらに、そのような地下水が地表に湧昇し、炭酸塩など大気中の二酸化炭素を固定する鉱物沈殿を引き起こすことも明らかにした (Kitajima et al., 2023)。冬季には、地表に出現した地下水は地表付近に凍結乾燥し、凍土と無水の塩化物を残す (Yoda et al., 2021)。このような無水塩化物が、火星においても地下水の湧水の証拠となることを示した。さらに、地下水以外にも、塩水を含む表層水が存在した場合の痕跡として、タフォニと呼ばれる塩風化の痕跡が残ることも、野外調査から明らかにした (Sugiuchi et al., 2023)。塩風化では、岩石の表面に微小な塩水が析出し、それが蒸発することで塩化物の結晶が残る。これが岩石の風化を引き起こすものであり、環境条件の違いで、できるタフォニの形状に差が出ることで、火星上で見つかるタフォニを地球の環境指標に基づいて分類し、近過去の気候や環境を推定することができた (Sugiuchi et al., 2023)。

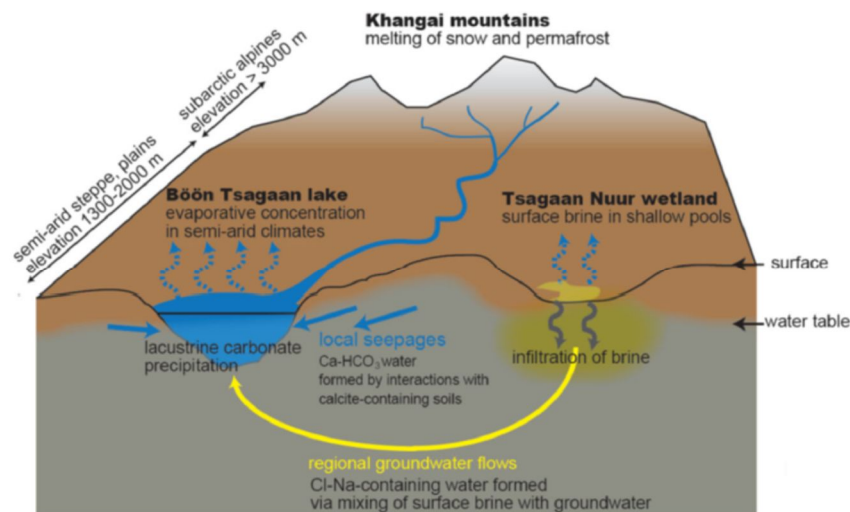


図1 .火星アナログ環境、モンゴル・ゴビアルタイ地域での水・塩循環の概念図 (Sekine et al., 2020)。

b) 火星類似環境の微生物生態系復元では、チリ・アタカマ砂漠において、表面の塩化物の潮解によって生じる鉱物表面の薄い塩水フィルムないで生息する微生物が存在することを初めて明らかにした (Azua-Bustos et al., 2023)。このような微生物は、大気中の光化学反応で生じる酸化剤と、土壌やエアロゾルとして運ばれる有機物の還元剤をつかってエネルギーを得ているであろうこと、また、そのバイオマスは、火星探査車の検出限界を下回るであろうことを示した (Azua-Bustos et al., 2023)。このような塩化物は火星上には普遍的に存在し、かつ火星探査車の着陸地点でも、塩水フィルムを生じる気象条件を満たしていることから、上記のような塩に依存した生態系は現在の火星でも成立可能であることを明らかにした (Azua-Bustos et al., 2023)。

c) 室内実験による地形形成メカニズムの理解については、塩水を含む湧水が斜面上で起

きた場合の地形や表層水の出現を調べた(Imamura et al., 2023)。塩水が斜面上で湧き出すと、表面付近での激しい蒸発によって斜面の土壌の鉱物粒子を埋めるように塩化物が析出する(Imamura et al., 2023)(図2)。この塩化物が析出することで、土壌の空隙率と浸透率は大きく低下し、さらに地表面に現れた塩水が地下に浸透することが妨げられ、効果的に表層流が生じることが明らかになった(Imamura et al., 2023)(図2)。このことは、小さな湧昇フラックスでも、RSLのような表層流を生じさせることができるメカニズムの有力候補であり、火星上のRSL形成を、現実的な気象条件・地下水湧昇条件でも可能にするであろうことが示された。さらに、地下水で、上記のような事象を生じさせる塩水が生じる化学反応過程として、地下深部の比較的高温での水-岩石反応が重要であることを実験的に明らかにした(Noda et al., 2022)。

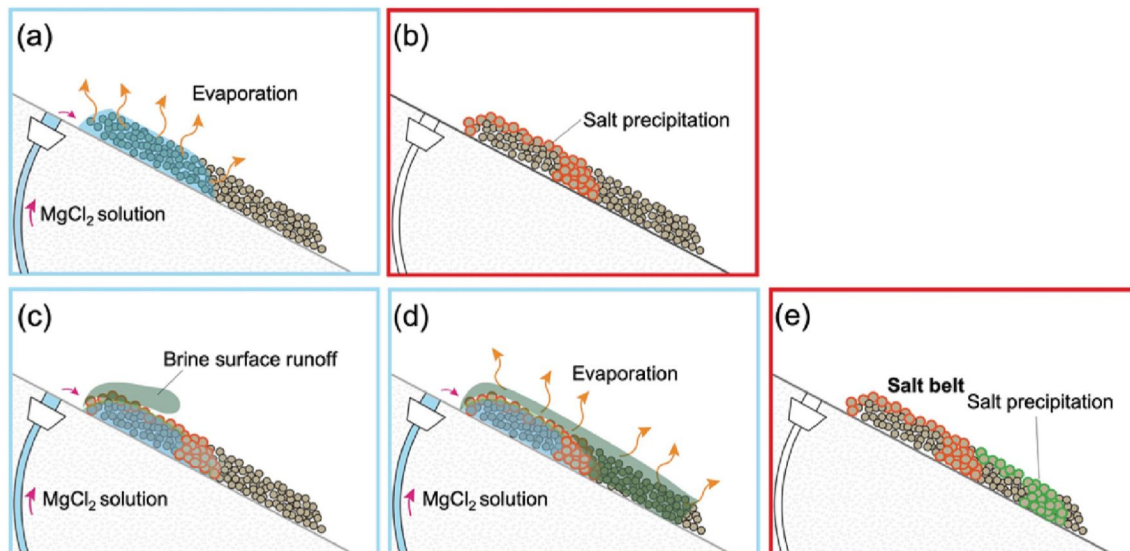


図2 . 土壌中への塩水の供給と蒸発、塩の析出による効果的な表層水の形成メカニズム(Imamura et al., 2023)。

d) 機械学習による水に関連した地形の解析については、地下水の流出による地面の陥没地形であるカオス地形に着目した(Shozaki et al., 2022)。カオス地形は、上記のような地下水の流出によるものと、地下マグマの流動による陥没との2種類のメカニズムによって生じる。我々は、両者の表面画像を機械学習によって高精度で識別できるアルゴリズムを開発し、それを火星上に見られる未分類のカオス地形に適応した(Shozaki et al., 2022)。その結果、火星の南北半球境界付近に存在するカオス地形の多くは、地下水の流出に伴うカオス地形であることが示唆され、一方で、それ以外の領域にはマグマ活動によるものが多く存在していることがわかった(図3)。火星の南北半球の境界には、高低差が多く存在し、そのような高低差がある場所で、地下水が湧き出してカオス地形をつくっていることがわかった(図3)。さらに、流出した地下水は北部平原の中高緯度に流れ着き、そこが現在、水氷の大きな貯蔵地域になっている可能性を示唆した(Shozaki et al., 2022)。

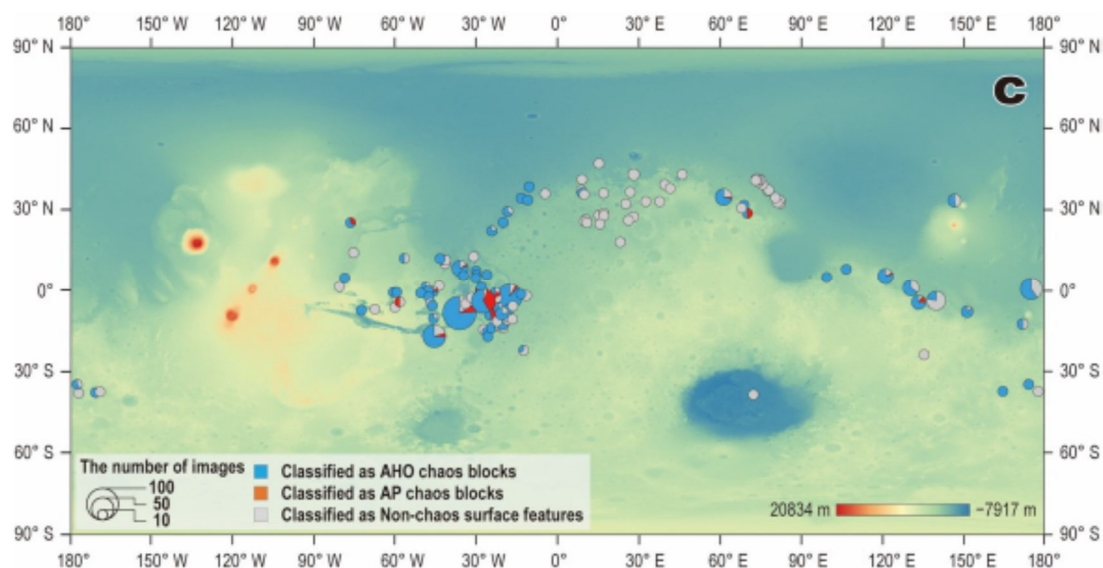


図3 . 火星上に分布する地下水の流出が形成したカオス地形の分布(青丸の領域)(Shozaki et al., 2022)。

以下は、特に重要な本研究課題により出版された論文のリストである。

- Sekine, Y.*, T. Kirajima, K. Fukushi, B. Gankhurel, S. Tsetsgee, et al. "Hydrogeochemical study on closed-basin lakes in cold and semi-arid climates of the Valley of the Gobi Lakes, Mongolia: Implications for hydrology and water chemistry of paleolakes on Mars" *Minerals*, 10, 792, 1–28 (2020)
- Fukushi, K., E. Imai, Y. Sekine, T. Kirajima, B. Gankhurel, D. Davaasuren, et al. "In-situ formation of monohydrocalcite in alkaline saline lakes of the Valley of Gobi Lakes: Prediction of Mg, Ca, and total dissolved carbonate concentrations in Enceladus' ocean and alkaline-carbonate ocean worlds" *Minerals*, 10, 669, 1–15 (2020)
- Tabata, H., Y. Sekine, Y. Kanzaki, S. Sugita "An experimental study of photo-oxidation of Fe(II): Implications for the formation of Fe(III) (hydro)oxides on early Mars and Earth" *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 299, 35–51 (2021)
- Yoda, M., Y. Sekine, K. Fukushi, T. Kitajima, B. Gankhurel, D. Davaasuren, T. Gerelmaa, S. Ganbat, D. Shoji, M. Y. Zolotov, Y. Takahashi "Field investigations of chemical partitioning and aqueous chemistry of freezing closed-basin lakes in Mongolia as analogs of subsurface brines on icy bodies" *Journal of Geophysical Research – Planets*, 126, e2021JE006972, 1–22 (2021)
- Fukushi, K., Y. Sekine, E. B. Rampe "Reconstruction of pH, redox condition, and concentrations of major components in ancient liquid water from the Murray formation, Gale Crater, Mars" *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 325, 129–151 (2022)
- Gankhurel, B., K. Fukushi, D. Davaasuren, E. Imai, U. Udaanjargal, T. Gerelmaa, Y. Sekine, Y. Takahashi, N. Hasebe "Arsenic and uranium contamination of Orog Lake in the Valley of Gobi Lakes, Mongolia: Field evidence of conservative accumulation of U in an alkaline, closed-basin lake during evaporation" *Journal of Hazardous Materials*, 436, 129017, 1–15 (2022)
- Shozaki, H., Y. Sekine*, N. Guttenberg, G. Komatsu "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" *Remote Sensing*, 14, 3883, 1–32 (2022)
- Noda, N., Y. Sekine, S. Tan, S. Kikuchi, T. Shibuya, M. Kurisu, et al. "Characterization of groundwater chemistry beneath Gale Crater on early Mars by hydrothermal experiments" *Icarus*, 386, 115149, 1–13 (2022)
- Azua-Bustos A.* , A. Fairen, C. Gonzalez-Silva, O. Prieto-Ballesteros, D. Carrizo, L. Sánchez-García, V. Parro, M. A. Fernandez-Martinez, C. Escudero, V. Muñoz-Iglesias, M. T. Fernandez-Sampedro, A. Molina, M. Garcia-Villadangos, M. Moreno-Paz, J. Wierzchos, C. Ascaso, T. Fornaro, J. Brucato, G. Poggiali, J. A. Manrique, M. Veneranda, G. Lopez-Reyes, A. Sanz-Arranz, F. Rull, A. Olilla, R. Wiens, A. Reyes-Newell, S. Clegg, M. Millan, S. Johnson, O. McIntosh, C. Szopa, C. Freissinet, Y. Sekine, K. Fukushi, K. Morida, K. Inoue, H. Sakuma, E. Rampe "Dark microbiome and extremely low organics in Atacama fossil delta unveil Mars life detection limits" *Nature Communications*, 14:808, 14pp (2023)
- Imamura, S., Y. Sekine, Y. Maekawa, H. Kurokawa, T. Sasaki "Effective formation of surface flow due to salt precipitation within soils upon repeated brine seepages on Mars" *Icarus*, 396, 115500, 1–11 (2023)
- Kitajima, T., K. Fukushi, B. Gankhurel, D. Davaasuren, S. Ganbat, U. Udaanjargal, T. Gerelmaa, Y. Sekine, et al. "Solubility of amorphous magnesium carbonate at low temperature: Implications for carbonate mineral formation in alkaline lakes" *ACS Earth and Space Chemistry*, 7, 1227–1234 (2023)
- Sugiuchi, M., Y. Sekine, S. Takahashi "Comparative study on cavernous weathering features formed by coastal processes and acidic alteration: Implications for rounded pits on Martian rocks" *Icarus*, 410, 115889, 1–13 (2024)
- Tan, S., Y. Sekine, T. Kikuchi, H. Suematsu, T. Hama, Y. Takahashi "Comparing the radiolytic oxidation of sulfur and chloride within ice on Europa and Mars" *Icarus*, 410, 115873, 1–11 (2024)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 11件）

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 1~22
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 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 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 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 Noguchi, R., Ishiyama, K., Kumamoto, A., Uemura, C., Kasaba, Y., Usui, T., Oura, A., Shoji, D	4. 巻 47
2. 論文標題 Radar Sounding of Subsurface Structure in Eastern Coprates and Capri Chasmata, Mars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letter	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL088556	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 Sekine, Y.	4. 巻 48
2. 論文標題 Habitability and planetary redox	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Viva Origino	6. 最初と最後の頁 1-13
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 -

1. 著者名 Sekine, Y., T. Kirajima, K. Fukushi, B. Gankhurel, S. Tsetsgee, D. Davaasuren, H. Matsumiya, T. Chida, M. Nakamura, N. Hasebe	4. 巻 10
2. 論文標題 Hydrogeochemical study on closed-basin lakes in cold and semi-arid climates of the Valley of the Gobi Lakes, Mongolia: Implications for hydrology and water chemistry of paleolakes on Mars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/min10090792	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 Fukushi, K., Imai, E., Sekine, Y., Kitajima, T., Gankhurel, B., Davaasuren, D., Hasebe, N.	4. 巻 10
2. 論文標題 In-situ formation of monohydrocalcite in alkaline saline lakes of the Valley of Gobi Lakes: Prediction of Mg, Ca, and total dissolved carbonate concentrations in Enceladus' ocean and alkaline-carbonate ocean worlds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/min10080669	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 Goto, K. T., Sekine, Y., Ito, T., Suzuki, K., Anbar, A. D., Gordon, G. W., Harigane, Y., Maruoka, T., Shimoda, G., Kashiwabara, T., Takaya, Y., Nozaki, T., Hein, J. R., Tetteh, G. M., Nyame, F. K., Kiyokawa, S.	4. 巻 567
2. 論文標題 Progressive ocean oxygenation at ~2.2 Ga inferred from geochemistry and molybdenum isotopes of the Nsuta Mn deposit, Ghana	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2021.120116	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 Goto, K. T., Sekine, Y., Shimoda, G., Hein, J. R., Aoki, S., Ishikawa, A., Suzuki, K., Gordon, G. W., Anbar, A. D.	4. 巻 280
2. 論文標題 A framework for understanding Mo isotope records of Archean and Paleoproterozoic Fe- and Mn-rich sedimentary rocks: Insights from modern marine hydrothermal Fe-Mn oxides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 221-236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2020.04.017	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 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 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 Gankhurel Baasansuren, Fukushi Keisuke, Davaasuren Davaadorj, Imai Eigo, Kitajima Takuma, Udaanjargal Uyanga, Gerelmaa Tuvshin, Sekine Yasuhito, Takahashi Yoshio, Hasebe Noriko	4. 巻 436
2. 論文標題 Arsenic and uranium contamination of Orog Lake in the Valley of Gobi Lakes, Mongolia: Field evidence of conservative accumulation of U in an alkaline, closed-basin lake during evaporation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Hazardous Materials	6. 最初と最後の頁 129017 ~ 129017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhazmat.2022.129017	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, 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Azua-Bustos Armando, Fairen Alberto G., Gonzalez-Silva Carlos, Prieto-Ballesteros Olga, Carrizo Daniel, Sanchez-Garcia Laura, Parro Victor, et al.	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 1-14
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 -

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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

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 -

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 丹秀也、関根康人、葛原昌幸、黒川宏之
2. 発表標題 水衛星エウロパの表層物質環境の理解に向けた室内実験・望遠鏡観測研究
3. 学会等名 第22回惑星圏研究会、オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhang N., Snyder, G.T., Lin, M., Nakagawa, M., Gilbert, A., Yoshida, N., Matsumoto, R., Sekine, Y.
2. 発表標題 Identifying the sources of methane hydrate from the doubly substituted isotopologues of methane: $^{13}\text{CH}_3\text{D}$ and $^{12}\text{CH}_2\text{D}_2$
3. 学会等名 第4回水惑星学全体会議、金沢大学、金沢市、石川県
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平井英人、関根康人、Zhang Naizhong
2. 発表標題 タイタン北極域における蒸発岩の形成に関する実験的研究
3. 学会等名 第4回水惑星学会議、金沢大学、金沢市、石川県
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丹秀也、関根康人、葛原昌幸、黒川宏之、菊池崇志、末松久幸、高橋嘉夫
2. 発表標題 エウロパ表面物質の物理化学特性
3. 学会等名 第4回水惑星学会議、金沢大学、金沢市、石川県
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平井英人、関根康人、Zhang Naizhong
2. 発表標題 Experimental and numerical study on evaporite formation around the north pole of Titan
3. 学会等名 第8回衛星系研究会、オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 庄司大悟
2. 発表標題 埋没によるイオのパテラの一様分布への自己組織化
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting2020, Virtual (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 依田優大
2. 発表標題 モンゴル南部塩湖群の結氷時における鉱物生成と水-氷-堆積物間元素分配
3. 学会等名 金沢大学環日本海域環境研究センター2020年度共同利用成果報告会、オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoda M., Sekine, Y.
2. 発表標題 Laboratory investigations of eruption and salt precipitation of subsurface seawater on Europa and other geologically active icy bodies
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shozaki, H., Sekine, Y., Guttenberg, N.
2. 発表標題 Classification of Martian chaos terrains using imagery machine learning: Implications for ground ice distributions and dynamics
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaneko, K., Sekine, Y., Shibuya, T., Ueda, H., Noda, N., Genda, H., Takahashi, Y.
2. 発表標題 Impact-induced hydrothermal systems on early Earth: Potential places for efficient CO2 reduction and formation of complex organic molecules
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sugiuchi, M., Sekine, Y., Tan, S., Noda, N., Takahashi, Y., Ramirez, R.
2. 発表標題 Effective Formation of Al-Rich Surface Clays Through Highly Acidic Water Activity on Early Mars
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaneko, K., Sekine, Y., Shibuya, T., Ueda, H., Noda, N.
2. 発表標題 Impact-induced hydrothermal systems on early Earth: CH4 production and the origin of life
3. 学会等名 Goldschmidt 2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sugiuchi, M., Sekine, Y., Tan, S., Noda, N., Takahashi, Y., Ramirez, R.
2. 発表標題 Effective Formation of Al-Rich Surface Clays Through Highly Acidic Water Activity on Early Mars
3. 学会等名 Goldschmidt 2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoda M., Sekine, Y., Fukushi, K., Kitajima, T., Gankhurel, B., Davaasuren, D., Shoji, D., Takahashi, Y.
2. 発表標題 Field investigation on capturing of lake water salts within surface ice on ice-covered saline lakes in Mongolia: Implications for icy shell compositions of Solar System icy bodies
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shozaki, H., Sekine, Y., Guttenberg, N.
2. 発表標題 Recognition and classification of Martian chaos terrains using imagery machine learning
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaneko, K., Sekine, Y., Shibuya, T., Ueda, H., Noda, N.
2. 発表標題 Impact-generated hydrothermal systems that can promote organic synthesis: Implications for the origin of life
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉内光輝、関根康人、丹秀也、野田夏実、高橋嘉夫、Ramses M. Ramirez
2. 発表標題 Effective formation of Al-rich surface clays through acidic water activity on early Mars
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 依田優大、 関根康人
2. 発表標題 Laboratory investigations of eruption and salt mineralization of subsurface seawater on Ceres and other geologically active icy bodies
3. 学会等名 第4回水惑星学全体会議、金沢大学、金沢市、石川県
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子和夢
2. 発表標題 初期地球の衝突熱水系における二酸化炭素の還元と有機化合物の生成
3. 学会等名 第4回水惑星学全体会議、金沢大学、金沢市、石川県
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉内光輝
2. 発表標題 初期火星における強酸性表層水による表層のAlに富む粘土鉱物形成の可能性
3. 学会等名 第4回水惑星学全体会議、金沢大学、金沢市、石川県
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 依田優大、 関根康人、 福土圭介、 北島卓磨、 Gankhurel Baasansuren、 Davaasuren Davaadorj、 庄司大悟、 高橋嘉夫
2. 発表標題 モンゴル凍結塩湖における水-氷間の塩の分配と氷天体地下海への応用
3. 学会等名 第8回衛星系研究会、オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 庄崎弘基、 関根康人、 N. Guttenberg
2. 発表標題 機械学習によるカオス地形の識別と分類：火星・氷天体への応用
3. 学会等名 第8回衛星系研究会、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、Baasansuren Gankhurel、Davaadorj Davaasuren、武市泰男、高橋嘉夫
2. 発表標題 低温条件におけるモノハイドロカルサイトの生成
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会第67回オンライン年会、オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fukushi, K., Sekine, Y.
2. 発表標題 Water Chemistry of Early Mars Recorded in Interlayer of Smectite and Secondary Minerals from Gale
3. 学会等名 57th Annual Meeting of the Clay Minerals Society, Discovery Hall, Richland, Washington, US (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福士 圭介、関根 康人
2. 発表標題 Evolution of aqueous environment on Early Mars inferred from reconstructed water chemistry at Gale
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北島 卓磨、福士 圭介、ガンフレル パーサンスレン、関根 康人、依田 優大、ダバースレン ダバードルジ
2. 発表標題 氷形成を駆動力とした鉱物形成過程の検証：南モンゴルのアルカリ塩湖凍結時にみられる自生炭酸塩鉱物生成
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting2020, Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福士 圭介、関根 康人、佐久間 博、森田 康暉、Robin Wordsworth
2. 発表標題 Habitable aqueous environment on Early Mars inferred from reconstructed water chemistry at Gale
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting2020, Virtual (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Yasuhiro SEKINE's page http://www.aquaplanetology.jp/sekine/index.html</p>
--

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	McGlynn Shawn・E. (McGlynn Shawn) (10751084)	東京工業大学・地球生命研究所・准教授 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	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	庄司 大悟 (Shoji Daigo) (10831109)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・ 招聘研究員 (82645)	
研究分担者	福士 圭介 (Fukushi Keisuke) (90444207)	金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授 (13301)	
研究分担者	石上 玄也 (Ishigami Genya) (90581455)	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授 (32612)	
研究分担者	GUTTENBERG NICHOLAS・RYAN (Guttenberg Nicholas) (10747132)	東京工業大学・地球生命研究所・研究員 (12608)	

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