

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04073

研究課題名(和文) 火星隕石の地球化学的解析に基づく火星の水の散逸史および表層酸化過程の解明

研究課題名(英文) Geochemical study of Martian meteorites for the evolution of water and paleo-environment on Mars

研究代表者

臼井 寛裕 (Tomohiro, Usui)

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・教授

研究者番号：60636471

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,230,000円

研究成果の概要(和文)：過去に液体の水(海)を保持していた火星は、表層水の消失と共に寒冷化・乾燥化していったことが明らかとなっている。表層水の消失過程では、宇宙空間への水素の選択的な散逸により生じた残存酸素が、惑星表層環境の酸化を促すと考えられている。本研究では、唯一の地球外惑星試料である火星隕石に着目し、そこに含まれる表層成分の水素・硫黄同位体比および酸化還元敏感元素の化学種変化から、火星の水の消失過程とそれに伴う表層酸化過程を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星表層環境は、その惑星近傍だけではなく、太陽系全体のダイナミクスの結果を反映しているため、異なる惑星間での表層環境の違いを理解することが、地球表層環境を理解する上でも非常に重要となってくる。地球以外で過去に液体の水を保持していた太陽系天体は火星のみであり、火星は地球との比較対象として、惑星表層環境の解明に適した天体と言える。本研究により、火星の水の散逸史および表層環境進化が明らかとなるだけでなく、異なるサイズ・太陽距離を持つ地球表層環境の理解が飛躍的に進むと期待される。

研究成果の概要(英文)：The Martian geology clearly indicates that there was a large body of liquid water on the surface, whereas climate models have had difficulty simulating a warm environment for sustainable water on the surface. This discrepancy is reconciled by the geologic evidence reflecting the paleo-ocean/lakes under transient warm conditions or by the climate models involving appropriate treatment of the greenhouse effect. Greenhouse gas candidates (e.g., CH₄ and H₂) proposed by recent climate models invoke reducing atmospheres, yet the redox condition of the ancient atmosphere is poorly constrained. This study reports chemical speciation of redox-sensitive elements of nitrogen and sulfur in carbonates from a 4 billion-year-old Martian meteorite ALH 84001. The chemical speciation analyses suggest a neutral/alkaline and anoxic fluid condition, implying the existence of a reducing atmosphere at 4 Ga.

研究分野：惑星科学

キーワード：火星 火星隕石 表層環境 水素同位体 化学種解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

今後の惑星科学における最も重要な科学目標の一つが、生命の存在条件に支配的な影響を及ぼす惑星表層環境の解明である。海をたたえる地球、寒冷で砂漠化した火星、氷が表層を覆う木星衛星ガニメデ・エウロパに見られるように、太陽系天体は様々な表層環境を保持している。一方、多様な表層環境を保持する太陽系天体においても、表層進化の物理的本質は「宇宙空間への水素散逸に伴う不可逆的な酸化の歴史である」という描像に帰着できる。本研究では、表層水を保持していた唯一の地球外天体である火星に着目し、海・表層氷の消失過程とそれに伴う表層酸化過程の解明を目的とした。異なる惑星の表層進化過程を明らかにすることにより、普遍的な汎惑星表層進化を理解することが、本研究課題を含めた我々の研究活動における最終目標であり、かつ研究意義であった。

火星の表層環境に関しては、これまで探査機からのリモートセンシングデータに基づいた研究が精力的に行われてきた。例えば、分光観測に基づく水成変質鉱物の分布図から、火星表層での水-岩石反応の検討が行われてきた。また、過去の海岸線の高度分布から古海洋の体積変化が推定されてきた。しかしながら、このようなリモートセンシングに基づいた研究では、地質記録が残されていない約40億年以前の海の情報や、固体として存在する氷に関する情報、さらには同位体組成のような基礎となる地球化学的情報が得られないといった、手法上の限界が存在していた。

2. 研究の目的

複雑な化学反応過程の積分の結果を反映している惑星表層環境進化を正確に理解するためには、従来のリモートセンシングとは独立なアプローチが必要である。火星は隕石試料が存在する唯一の地球外惑星であり、またその火星隕石コレクションの量は近年著しく増加している。隕石は火星上での産状が不明瞭であるという欠点があるものの、リモートセンシングに頼らざるを得ない探査研究と比較し、実験室での詳細な岩石記載・化学分析により高精度の地球化学的情報を得ることのできる唯一の試料といえる。そこで我々は、火星誕生時から近過去に至るまでの様々な時代情報を保持する火星隕石に着目し、そこに含まれる表層成分の水素・硫黄同位体比と酸化還元敏感元素の化学種変化から、火星の水の散逸と表層酸化過程の関係を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、火星隕石の地球化学的解析に基づき、従来の火星探査では得られなかった、45億年前から現在に至る火星の水の総量変化および表層酸化程度の定量化を目指した。水散逸のトレーサーである水素同位体比、表層酸化のトレーサーである硫黄と窒素の化学状態に着目し、以下の計画に従い研究を遂行した。

研究計画1：局所 XAFS (μ -XAFS) 分析による、火星表層成分の S と N の化学種同定

研究計画2：SIMS 分析に基づく、各地質時代における表層水の D/H 比の決定

研究計画3：水散逸モデルに基づく、水の消失時期・消失量および表層酸化との関係性の解明

4. 研究成果

(1) 研究計画1

火星大気・表土成分の混入が確認されている火星隕石 (EETA79001 および LAR 06319) に含まれる衝撃ガラスの S-XAFS 測定を行った。また、流体から晶出したことが判明している火星隕石 (ALH 84001) に含まれる炭酸塩試料局所 XAFS 分析を行い、隕石中に含まれる硫黄および窒素の科学種解析を行った。その結果、流体から晶出したことが判明している火星の炭酸塩には窒素や硫黄が有機物として混入していることが明らかとなった (図1)。その有機物は分析の際の混入や地球上での汚染によるものではなく、火星由来であることを示した (Koike et al. 2020 Nature Comm)。また、硫黄に関しては、多くが硫酸イオンとして炭酸塩の炭酸イオンを構造的に置換した形で存在していることが明らかとなった。

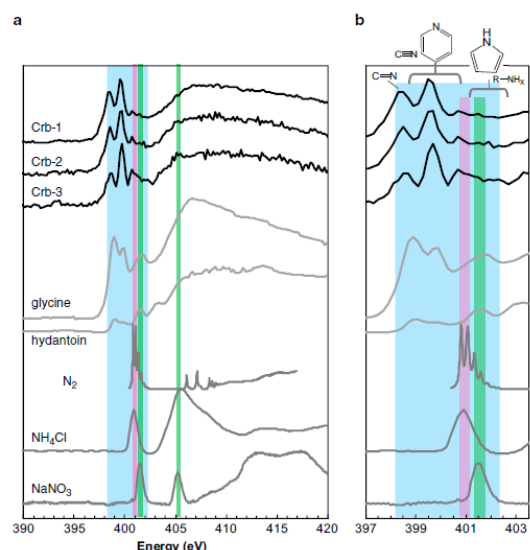


図1： Nitrogen K-edge XANES spectra. (a) A whole spectral image. The upper three (Crb-1 to Crb-3) are ALH carbonates, the others are the selected reference compounds. (b) An enlarged area of the energy between 397 and 403.5 eV. Significant absorption peaks for N_2 (400.8 eV; magenta), $NaNO_3$ (401.4 and 405.2 eV; green), and the organic compounds (398–402.5 eV; light blue) are highlighted in both images. Major N-bearing groups of imino, nitrile, N-heterocyclic, and amino groups in this energy range are plotted (Koike et al. 2020).

(2) 研究計画 2・3

先行研究 (Usui et al. 2012, 2015) で得られた表層水の水素同位体、および窒素・希ガス同位体を組み合わせ、火星の水の消失時期・消失量と密接に関係する火星大気圧の時代進化をモデル化し、表層に水が存在していたとされる約 40 億年前の下限大気圧 (0.5 bar) を決定した (Kurokawa et al. 2018 Icarus) (図 2)。また、火星の地形を考慮に入れた古気候シミュレーションを実施した。結果、火星に海が存在していたとされる約 40 億年前において、その海を安定に維持できる程度の気温と降水量を再現することに成功した (Ramirez et al. 2019 JGR) (図 3)。我々の結果は、火星がかつて温暖・湿潤であったとする火星温暖化説を補強することとなった。

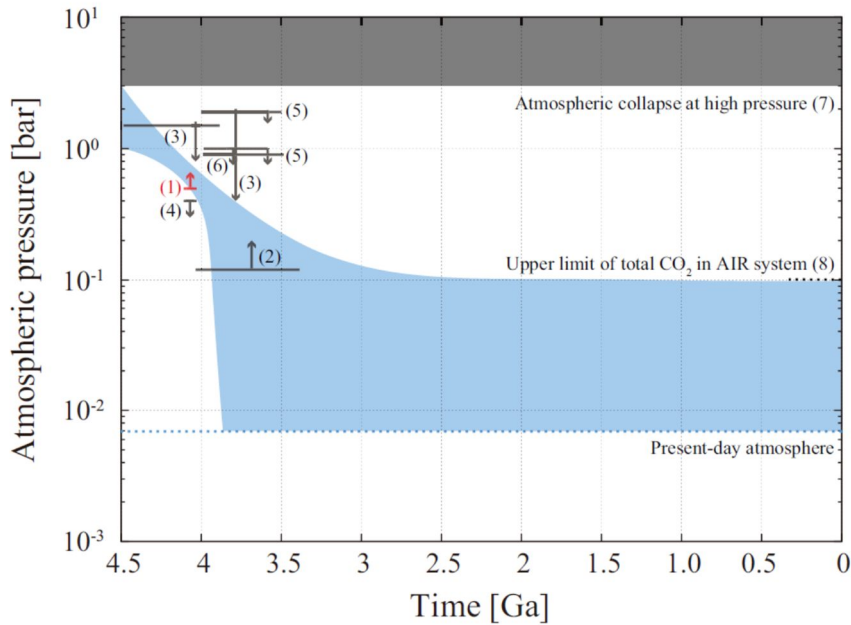


図 2 : Constraints on the atmospheric pressure on Mars obtained from this study (red line) and other studies (black lines). Possible range of the evolutionary track is suggested by a blue shaded area (Kurokawa et al. 2018).

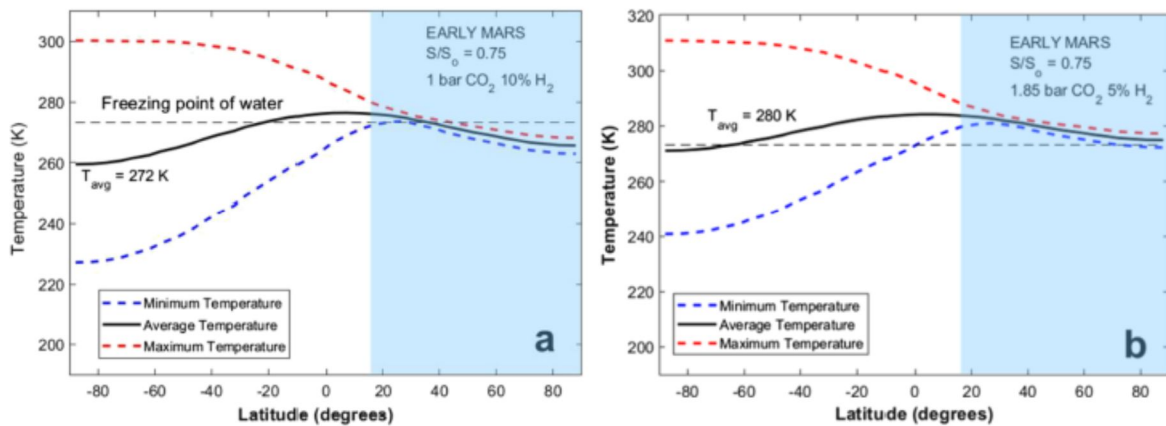


図 3 : Latitudinal mean annual temperature distributions for (a) 1 bar CO₂ 10% H₂ and (b) 1.85 bar CO₂ 5% H₂ atmospheres. Average annual temperatures (black) and minimum (blue dashed) and maximum (red dashed) seasonal temperatures are also shown. The baseline ocean of Di Achille and Hynek (2010) (light blue shaded region) was assumed in these calculations (Ramirez et al. 2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計35件（うち査読付論文 33件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kitadai Norio, Oonishi Hiroyuki, Umemoto Koichiro, Usui Tomohiro, Fukushi Keisuke, Nakashima Satoru	4. 巻 47
2. 論文標題 Glycine Polymerization on Oxide Minerals	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Origins of Life and Evolution of Biospheres	6. 最初と最後の頁 123 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11084-016-9516-z	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 Kurokawa Hiroyuki, Kurosawa Kosuke, Usui Tomohiro	4. 巻 299
2. 論文標題 A lower limit of atmospheric pressure on early Mars inferred from nitrogen and argon isotopic compositions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 443 ~ 459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.08.020	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 Moriwaki Ryota, Usui Tomohiro, Simon Justin I., Jones John H., Yokoyama Tetsuya, Tobita Minato	4. 巻 474
2. 論文標題 Coupled Pb isotopic and trace element systematics of the Tissint meteorite: Geochemical signatures of the depleted shergottite source mantle	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 180 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2017.06.044	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 Usui Tomohiro	4. 巻 552
2. 論文標題 Martian water stored underground	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 339 ~ 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/d41586-017-08670-y	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 Minato Tobita, Tomohiro Usui, Tetsuya Yokoyama	4. 巻 51
2. 論文標題 New constraints on shergottite petrogenesis from analysis of Pb isotopic compositional space: Implications for mantle heterogeneity and crustal assimilation on Mars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 GEOCHEMICAL JOURNAL	6. 最初と最後の頁 81-94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2343/geochemj.2.0446	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 Fukami Yusuke, Tobita Minato, Yokoyama Tetsuya, Usui Tomohiro, Moriwaki Ryota	4. 巻 32
2. 論文標題 Precise isotope analysis of sub-nanogram lead by total evaporation thermal ionization mass spectrometry (TE-TIMS) coupled with a 204Pb-207Pb double spike method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Analytical Atomic Spectrometry	6. 最初と最後の頁 848 ~ 857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C6JA00455E	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 Nakanishi Nao, Yokoyama Tetsuya, Okabayashi Satoki, Usui Tomohiro, Iwamori Hikaru	4. 巻 53
2. 論文標題 Re-Os isotope systematics and fractionation of siderophile elements in metal phases from CBa chondrites	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1051 ~ 1065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1111/maps.13050	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 Akihiko YAMAGISHI, Takehiko SATOH, Atsuo MIYAKAWA, Yoshitaka YOSHIMURA, Satoshi SASAKI, Kensei KOBAYASHI, Yoko KEBUKAWA, Hikaru YABUTA, Hajime MITA, Eiichi IMAI, Takeshi NAGANUMA, Kazuhisa FUJITA, Tomohiro USUI	4. 巻 16
2. 論文標題 LDM (Life Detection Microscope): In Situ Imaging of Living Cells on Surface of Mars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN	6. 最初と最後の頁 299-305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.16.299	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 Ito Lisa, Omori Takayuki, Yoneda Minoru, Yamaguchi Toru, Kobayashi Ryuta, Takahashi Yoshio	4. 巻 202
2. 論文標題 Origin and migration of trace elements in the surface sediments of Majuro Atoll, Marshall Islands	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Chemosphere	6. 最初と最後の頁 65 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2018.03.083	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 Marcus Matthew A., Toner Brandy M., Takahashi Yoshio	4. 巻 202
2. 論文標題 Forms and distribution of Ce in a ferromanganese nodule	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Marine Chemistry	6. 最初と最後の頁 58 ~ 66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marchem.2018.03.005	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 -

1. 著者名 Chan Queenie H. S., Zolensky Michael E., Kebukawa Yoko, Fries Marc, Ito Motoo, Steele Andrew, Rahman Zia, Nakato Aiko, Kilcoyne A. L. David, Suga Hiroki, Takahashi Yoshio, Takeichi Yasuo, Mase Kazuhiko	4. 巻 4
2. 論文標題 Organic matter in extraterrestrial water-bearing salt crystals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	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) 10.1126/sciadv.aao3521	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 Takahashi Yoshio, Fan Qiaohui, Suga Hiroki, Tanaka Kazuya, Sakaguchi Aya, Takeichi Yasuo, Ono Kanta, Mase Kazuhiko, Kato Kenji, Kanivets Vladimir V.	4. 巻 7
2. 論文標題 Comparison of Solid-Water Partitions of Radiocesium in River Waters in Fukushima and Chernobyl Areas	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-017-12391-7	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 Watanabe Yusuke, Kashiwabara Teruhiko, Ishibashi Jun-ichiro, Sekizawa Oki, Nitta Kiyofumi, Uruga Tomoya, Takahashi Yoshio	4. 巻 471
2. 論文標題 Different partitioning behaviors of molybdenum and tungsten in a sediment-water system under various redox conditions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 38 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2017.09.009	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 Nakada R., Shibuya T., Suzuki K., Takahashi Y.	4. 巻 55
2. 論文標題 Europium anomaly variation under low-temperature water-rock interaction: A new thermometer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochemistry International	6. 最初と最後の頁 822 ~ 832
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S001670291709004X	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 Nakada Ryoichi, Tanaka Masato, Tanimizu Masaharu, Takahashi Yoshio	4. 巻 218
2. 論文標題 Aqueous speciation is likely to control the stable isotopic fractionation of cerium at varying pH	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 273 ~ 290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.1016/j.gca.2017.09.019	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 Kurokawa Hiroyuki, Kurosawa Kosuke, Usui Tomohiro	4. 巻 299
2. 論文標題 A lower limit of atmospheric pressure on early Mars inferred from nitrogen and argon isotopic compositions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 443 ~ 459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.08.020	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 Kitadai Norio, Nakamura Ryuhei, Yamamoto Masahiro, Takai Ken, Li Yamei, Yamaguchi Akira, Gilbert Alexis, Ueno Yuichiro, Yoshida Naohiro, Ono Yoshi	4. 巻 4
2. 論文標題 Geoelectrochemical CO production: Implications for the autotrophic origin of life	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aao7265	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 Aoyama Shinnosuke, Nishizawa Manabu, Miyazaki Junichi, Shibuya Takazo, Ueno Yuichiro, Takai Ken	4. 巻 491
2. 論文標題 Recycled Archean sulfur in the mantle wedge of the Mariana Forearc and microbial sulfate reduction within an extremely alkaline serpentine seamount	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 109 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2018.03.002	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 Suda K, Gilbert A, Yamada K, Yoshida N, Ueno Y	4. 巻 206
2. 論文標題 Compound- and position-specific carbon isotopic signatures of abiogenic hydrocarbons from on-land serpentinite-hosted Hakuba Happo hot spring in Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 201-215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2017.03.008	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 Saitoh M, Ueno Y, Matsu'ura F, Kawamura T, Isozaki Y, Yao J, Ji Z, Yoshida N	4. 巻 135
2. 論文標題 Multiple sulfur isotope records at the end-Guadalupian (Permian) at Chaotian, China: Implications for a role of bioturbation in the sedimentary sulfur cycle in the Phanerozoic	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Asian Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 70-79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jseaes.2016.12.009	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 Mishima K, Yamazaki R, Satish-Kumar M, Ueno Y, Hokada T, Toyoshima T	4. 巻 464
2. 論文標題 Multiple sulfur isotope geochemistry of Dharwar Supergroup, Southern India: late Archean record of changing atmosphere	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 69-83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2017.02.007	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 -

1. 著者名 Genda H, Sasaki T, Ueno Y, Iizuka T, Ikoma M	4. 巻 470
2. 論文標題 Ejection of iron-bearing giant-impact fragments and the dynamical and geochemical influence of the fragment re-accretion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 87-95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2017.04.035	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 Aoyama S, Ueno Y	4. 巻 16
2. 論文標題 Multiple sulfur isotope constraints on microbial sulfate reduction below Archean seafloor hydrothermal system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geobiology	6. 最初と最後の頁 107-120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/gbi.12268	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 Usui Tomohiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Hydrogen Reservoirs in Mars as Revealed by Martian Meteorites	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Volatiles In The Martian Crust	6. 最初と最後の頁 71 ~ 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/B978-0-12-804191-8.00004-0	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 Tobita, M., Usui, T., Yokoyama, T.	4. 巻 51
2. 論文標題 New constraints on shergottite petrogenesis from analysis of Pb isotopic compositional space: implications for mantle heterogeneity and crustal assimilation on Mars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochemical Journal	6. 最初と最後の頁 81-94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2343/geochemj.2.0446	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 Ehlmann, B. L. et al. (incl. Usui, T.)	4. 巻 121
2. 論文標題 The sustainability of habitability on terrestrial planets: insights, questions, and needed measurements from Mars for understanding the evolution of Earth-like worlds	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research-Planets	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) 10.1002/2016JE005134	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 Kurokawa, H., Usui, T., Sato, M.	4. 巻 50
2. 論文標題 Interactive evolution of multiple water-ice reservoirs on Mars: Insight from hydrogen isotope compositions	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Geochemical Journal	6. 最初と最後の頁 67-79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2343/geochemj.2.0407	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 T. Kashiwabara, S. Kubo, M. Tanaka, R. Senda, T. Iizuka, M. Tanimizu, Y. Takahashi	4. 巻 204
2. 論文標題 Stable isotope fractionation of tungsten during adsorption on Fe and Mn (oxyhydr)oxides	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochimica. Cosmochimica. Acta	6. 最初と最後の頁 52-67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2017.01.031	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 K. Tokunaga, T. Uruga, K. Nitta, Y. Terada, O. Sekizawa, S. Kawagucci, Y. Takahashi	4. 巻 447
2. 論文標題 Application of arsenic in barite as a redox indicator for suboxic/anoxic redox condition	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 59-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2016.10.016	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 M. Kurisu, Y. Takahashi, T. Iizuka, and M. Uematsu	4. 巻 121
2. 論文標題 Very Low Isotope Ratio of Iron in Fine Aerosols Related to Its Contribution to the Surface Ocean	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Atmospheres	6. 最初と最後の頁 11119-11136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JD024957	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 S. Mitsunobu, M. Zhu, Y. Takeichi, T. Ohigashi, H. Suga, M. Jinno, H. Makita, M. Sakata, K. Ono, K. Mase, and Y. Takahashi	4. 巻 31
2. 論文標題 Direct detection of Fe(II) in extracellular polymeric substances (EPS) at the mineral-microbe interface in bacterial pyrite leaching	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Microbes Environ	6. 最初と最後の頁 63-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1264/jsme2.ME15137	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 Y. S. Togo, Y. Takahashi, Y. Amano, H. Matsuzaki, Y. Suzuki, Y. Terada, Y. Muramatsu, K. Ito, T. Iwatsuki	4. 巻 91
2. 論文標題 Age and speciation of iodine in groundwater and mudstones of the Horonobe area, Hokkaido, Japan: Implications for the origin and migration of iodine during basin evolution	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Geochim. Cosmochim. Acta	6. 最初と最後の頁 165-186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2016.07.012	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 Y. Takeichi, N. Inami, H. Suga, C. Miyamoto, T. Ueno, K. Mase, Y. Takahashi, K. Ono	4. 巻 87
2. 論文標題 Design and performance of a compact scanning transmission X-ray microscope at the Photon Factory	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Rev. Sci. Instru.	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) 10.1063/1.4940409	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 Koike Mizuho, Nakada Ryoichi, Kajitani Iori, Usui Tomohiro, Tamenori Yusuke, Sugahara Haruna, Kobayashi Atsuko	4. 巻 11
2. 論文標題 In-situ preservation of nitrogen-bearing organics in Noachian Martian carbonates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-020-15931-4	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 Ramirez Ramses M., Craddock Robert A., Usui Tomohiro	4. 巻 125
2. 論文標題 Climate Simulations of Early Mars With Estimated Precipitation, Runoff, and Erosion Rates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	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) 10.1029/2019JE006160	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55件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 27件)

1. 発表者名 Yoshio Takahashi
2. 発表標題 Future application of X ray microscopy (STXM etc.) to Hayabusa 2 asteroid samples
3. 学会等名 Joint meeting of Multi scale asteroid science & Aqua planetology (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋嘉夫
2. 発表標題 XAFSを用いた状態分析による微量元素の環境挙動解析
3. 学会等名 第28回 日本 微量元素学会学術集会特別シンポジウム「高輝度放射光を利用した微量元素計測 の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshio Takahashi
2. 発表標題 Importance of chemical process study for the precise prediction of environmental change
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint meeting (Session: Future Earth - Implementing Integrated Research for Sustainable Future) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋聡, 中田亮一, 渡辺勇輔, 高橋嘉夫
2. 発表標題 深海相ベルム紀-三疊紀境界層に記録された鉄・モリブデンの化学種記録
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 青木翔吾, 坂田周平, 中田亮一, 柏原輝彦, 大野剛, 高橋嘉夫, Tsikos Harilaos, 小宮剛
2. 発表標題 古原生代Transvaal超層群Hotazel層の縞状鉄鉱層およびMn堆積物の地質学・地球化学的研究 : 希土類元素組成から示唆される堆積環境の酸化還元と熱水の影響の変化
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 青木翔吾, 坂田周平, 中田亮一, 柏原輝彦, 大野剛, 高橋嘉夫, Tsikos Harilaos, 小宮剛
2. 発表標題 縞状鉄鉱層の遷移金属元素濃度の空間分布 : 海洋生命必須元素濃度の経年変化と生物進化への影響
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 伊藤元雄, 中田亮一, 大東琢治, 兒玉優, 奈良岡浩
2. 発表標題 STXM-XANESを用いた硫黄の化学種別高解像度イメージング法の開発 : 地球外有機物の形成環境の解明に向けた第一歩
3. 学会等名 2017年度地球化学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 四垂将志, 中田亮一, 臼井寛裕, 清水健二, 高橋嘉夫, 横山哲也
2. 発表標題 X線吸収端近傍構造分析による火星隕石衝撃ガラス中の硫酸塩成分の検出
3. 学会等名 2017年度地球化学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田辺学, 中田亮一, 臼井寛裕, 四垂将志, 横山哲也
2. 発表標題 X線吸収微細構造分析による火星隕石中の炭酸塩の鉄化学種解析
3. 学会等名 2017年度地球化学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永石一弥, 中田亮一, 石川剛志
2. 発表標題 多重検出器型ICP質量分析計と脱溶媒試料導入装置を用いた極微量鉛同位体比分析
3. 学会等名 2017年度地球化学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中田亮一, 佐藤雅彦, 潮田雅司
2. 発表標題 斜長石単結晶での鉄化学種分析: 斜長石中でのマグネタイト離溶条件解明に向けて
3. 学会等名 日本鉱物科学会2017年年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中田亮一, 早稲田周, 奥村文章, 高橋嘉夫
2. 発表標題 泥火山から採取した原油の希土類元素地球化学
3. 学会等名 日本地質学会第124年学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤雅彦, 潮田雅司, 中田亮一
2. 発表標題 Precise determination of Fe species in plagioclase crystals
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第142回総会・講演会
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 R. Nakada, Y. Takahashi, and M. Tanimizu
2 . 発表標題 Cerium stable isotope ratio in ferromanganese deposits and its potential as a paleoredox proxy
3 . 学会等名 The 27th Goldschmidt Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Shidare, R. Nakada, T. Usui, M. Tobita, and T. Yokoyama
2 . 発表標題 Sulfur K-edge XANES Analyses of Shergottites: Implication for Aqueous Alteration Processes on Mars
3 . 学会等名 49th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Kurokawa, H
2 . 発表標題 Gas dynamics of Martian primary atmosphere
3 . 学会等名 Circumplanetary Disks and Satellite Formation (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kurokawa, H., Ehlmann, B. L., Ammannito, E., De Sanctis, M. C., Lapotre, M., Usui, T., Stein, N. T., Prettyman, T., Raponi, A., and Ciarniello, M
2 . 発表標題 A Bayesian Approach to Deriving Ceres Surface Composition from Dawn VIR Data: Initial Quantification of Bright Spot and Typical Dark Material Phases with This Method
3 . 学会等名 49th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 黒川 宏之, 谷川 享行
2. 発表標題 原始惑星系円盤ガスと惑星大気のリサイクリング:等温・非等温計算の比較
3. 学会等名 日本天文学会 2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kurokawa, H. and Tanigawa, T
2. 発表標題 Suppression of atmospheric recycling of protoplanets in a protoplanetary disk by buoyancy barrier: implications for the formation super-Earths
3. 学会等名 DTA SYMPOSIUM VIII: Challenge to Super-Earths and Their Atmospheres Where do they come from? (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒川 宏之, 黒澤 耕介, 臼井 寛裕
2. 発表標題 火星大気進化モデルの構築: 元素・同位体組成からの制約
3. 学会等名 第19回惑星圏研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kurokawa, H. and Tanigawa, T
2. 発表標題 Recycling of the planetary atmospheres embedded in a protoplanetary disk: a comparison between isothermal and non-isothermal simulations
3. 学会等名 Tubingen Winter-Workshop 2018 on the Formation of Low-Mass Early Planetary Atmospheres (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kurokawa, H
2. 発表標題 Volatile delivery and evolution of terrestrial planets: a theoretical and geochemical perspective
3. 学会等名 Joint meeting of Multi-scale asteroid science & Aqua planetology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 地球型惑星の大気と海の形成と進化
3. 学会等名 宇宙生命計算科学連携拠点第3回ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Foriel, J., and Laneuville, M
2. 発表標題 Evolution of the water cycle since the Archean as constrained by hydrogen isotopes
3. 学会等名 Goldschmidt 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Usui, T., and Foriel, J.
2. 発表標題 Cycles and escape of water on Earth and Mars: implications from hydrogen isotopic compositions
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Kurosawa, K., and Usui, T
2. 発表標題 Tracing the Origin and Evolution of Volatiles on Mars: Constraints from Elemental and Isotopic Compositions of Nitrogen and Noble Gases
3. 学会等名 48th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ueno Y
2. 発表標題 Reducing early atmosphere and carbon cycle
3. 学会等名 DCO workshop on global geodynamical models, Moscow (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ueno Y, Endo Y, Zang X and Kawade W
2. 発表標題 Revisiting Redox State of the Early Earth's Atmosphere and Prebiotic Synthesis
3. 学会等名 XVIIIth International Conference on the Origin of Life (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ueno Y
2. 発表標題 Large ¹³ C-depletion by solar UV CO ₂ photolysis and its implication to Late Archean ecosystem
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ueno Y
2. 発表標題 Decoding redox evolution before oxygenic photosynthesis,
3. 学会等名 EON workshop "Cosmic perspective of Earth" (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ueno Y
2. 発表標題 Late Archean Earth as a window to Astrobiology
3. 学会等名 IAU meeting Astrobiology 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Crockford P.W., Wing B.A., Ueno Y
2. 発表標題 Paleoarchean Microbial Activity Revealed by Multiple Sulfur-Isotope Measurement of Nanomolar Quantities of H ₂ S in Fluid Inclusions
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Gilbert A., Giunta, T., Sherwood-Lollar B., Yamada K., Yoshida N., Ueno Y
2. 発表標題 Position-specific ¹³ C isotope analysis of propane from Southwest Ontario
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kawade W., Zang X., Ueno Y
2. 発表標題 Influence of redox environment on UV organic synthesis
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Zang X., Kawade W., Ueno Y
2. 発表標題 Experimental study on synthesis of ammonia and organic nitrogen species by photochemistry on terrestrial planets
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Murai T., Ueno Y., Foriel J., Genda H
2. 発表標題 Hydrogen isotopic compositions of Archean sea water and isotopic evolution
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomohiro Usui
2. 発表標題 Hydrogen reservoirs in Mars as revealed by SNC meteorites
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 白井寛裕, 佐藤毅彦, 亀田真吾, 宮本英昭, 山岸明彦, 藤田和央, 石上玄也, 火星着陸 RG
2. 発表標題 着陸機による火星環境探査リサーチグループの成果報告
3. 学会等名 第50回 月・惑星シンポジウムプログラム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白井寛裕
2. 発表標題 揮発性物質探査の意義と無人・有人探査のメリット
3. 学会等名 第50回 月・惑星シンポジウムプログラム(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白井寛裕
2. 発表標題 火星 衛星圏への日本の将来探査計画
3. 学会等名 日本地球化学会第64回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白井寛裕, 佐藤毅彦, 亀田真吾, 宮本英昭, 山岸明彦, 藤田和央, 石上玄也, 火星着陸 RG
2. 発表標題 着陸機による火星環境探査計画の検討
3. 学会等名 2017 日本惑星科学会 秋季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomohiro Usui
2. 発表標題 Future Japanese Exploration of the Mars-Moon System
3. 学会等名 ELSI/EON International Workshop on Life Detection Technology: For Mars, Enceladus and Beyond (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白井寛裕, 岡崎隆司, 高野淑識, 橘省吾, 藤谷渉, 三浦弥生, 澤田弘崇
2. 発表標題 MMXのサンプルサイエンス検討
3. 学会等名 第18回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白井寛裕, 佐藤毅彦, 亀田真吾, 宮本英昭, 山岸明彦, 藤田和央, 石上玄也, 火星着陸 RG
2. 発表標題 着陸機による火星環境探査リサーチグループの成果報告
3. 学会等名 第18回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白井寛裕
2. 発表標題 火星表層と世界の生命探査計画
3. 学会等名 アストロバイオロジーセンターシンポジウム 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Usui
2. 発表標題 The Importance of Phobos Sample Return for Understanding the Mars-moon system
3. 学会等名 Europlanet & International Space Science Institute Workshop "Role of Sample Return in Addressing Major Outstanding Questions in Planetary Sciences" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 臼井寛裕
2. 発表標題 火星の水の歴史と分布
3. 学会等名 第19回惑星圏研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Usui
2. 発表標題 Japanese Exploration of the Mars-Moon System
3. 学会等名 Circumplanetary Disks and Satellite Formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Usui, T., Kurokawa, H., Alexander C. M.O'D., Wang J., Simon J. I., and Jones J. H.
2. 発表標題 The Evolution of Water in the Martian Atmosphere, Hydrosphere, and Cryosphere: Insights from Hydrogen Isotopes
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Usui, T., Kurokawa, H., Alexander C. M.O'D., Wang J., Simon J. I., and Jones J. H.
2. 発表標題 Hydrogen Isotopic Constraints on the Evolution of Surface and Subsurface Water on Mars
3. 学会等名 48th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中田亮一, 臼井寛裕, 潮田雅司, 高橋嘉夫
2. 発表標題 局所XANES分析に基づくYamato 980459火星隕石の酸素分圧進化
3. 学会等名 日本鉱物科学会2016年年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 四垂将志, 中田亮一, 臼井寛裕, 清水健二, 高橋嘉夫, 横山哲也
2. 発表標題 X線吸収端近傍構造分析による火星隕石の硫黄化学種解析
3. 学会等名 2016年度地球化学会年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Shidare, R. Nakada, T. Usui, K. Shimizu, T. Yokoyama, and Y. Takahashi
2. 発表標題 Detection of martian sulfate from impact glasses in shergottites by X-ray absorption near-edge structure analysis
3. 学会等名 48th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Nakada, T. Usui, M. Ushioda, and Y. Takahashi
2. 発表標題 Micro-XANES determination on the oxidation states of V and Fe in olivine-hosted glass inclusion and groundmass glass of Yamato 980459
3. 学会等名 79th Annual Meeting of the Meteoritical Society (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kurokawa, H., Kurosawa, K., Usui, T.
2. 発表標題 Tracing the Origin and Evolution of Volatiles on Mars: Constraints from Elemental and Isotopic Compositions of Nitrogen and Noble Gases
3. 学会等名 48th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Tomohiro Usui	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 432
3. 書名 Volatiles in the Martian Crust	

1. 著者名 Tomohiro Usui	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 465
3. 書名 Astrobiology	

〔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	高橋 嘉夫 (Takahashi Yoshio) (10304396)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	
研究分担者	中田 亮一 (Nakada Ryoichi) (50726958)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・技術 研究員 (82706)	
研究分担者	黒川 宏之 (Kurokawa Hiroyuki) (80713643)	東京工業大学・地球生命研究所・研究員 (12608)	
研究分担者	上野 雄一郎 (Ueno Yuichiro) (90422542)	東京工業大学・理学院・教授 (12608)	