

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：82645

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2019

課題番号：15KK0153

研究課題名（和文）火星の海および表層水の進化史：火星隕石の地球化学的解析からの制約（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Meteoritic Evidence for the History of Water on Mars: (Fostering Joint International Research)

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） 11,000,000円

渡航期間： 2ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、米航空宇宙局（NASA）ジョンソン宇宙センターおよびカーネギー研究所との国際共同プロジェクトにより、二次イオン質量分析計を用いた低汚染での水素同位体分析法を開発、火星隕石の衝撃ガラスに含まれる微量な火星表層水成分の高精度水素同位体分析に成功した。水素同位体分析に基づき、火星地下に新たな水素の貯蔵層が存在することを発見した。水素貯蔵量は過去に火星表面に存在した海水量に匹敵し、現在は地下に凍土あるいは含水化した地殻として存在していることを突き止めた。

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）：We conducted in situ hydrogen isotope (D/H) analyses of Martian meteorites. The hydrogen isotope analyses provide evidence for the existence of a distinct but ubiquitous water reservoir (D/H = 2-3 times Earth's ocean water: SMOW). The origin of this reservoir appears to predate the current Martian atmospheric water (D/H = ~5-6 x SMOW) and is unlikely to be a simple mixture of atmospheric and primordial water retained in the Martian mantle (D/H ~SMOW). We conclude that this intermediate-D/H reservoir (2-3 x SMOW) is likely a global surficial feature that has remained relatively intact over geologic time. We propose that this reservoir represents either hydrated crust or ground ice interbedded within sediments. Our results corroborate the hypothesis that a buried cryosphere accounts for a large part of the initial water budget of Mars.

研究分野：地球化学

キーワード：火星 火星隕石 水 水素同位体

## 様式 F-19-2

### 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は、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、表層酸化過程に重要な役割を果たす、海・氷床の消失過程の解明を目指す。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、本研究を含めた私の研究活動における最終目標であり、かつ研究意義である。

火星の表層水量に関しては、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、過去の海岸線の高度分布と、クレータ密度から得られた年代情報を組み合わせることで、古海洋の体積の時代変化を推定することが可能となった。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

我々は、火星誕生時（約45億年前）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た。火星は隕石試料が存在する唯一の地球外惑星である。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。

これまで我々は、火星隕石に含まれる水の水素同位体比分析および大気散逸モデル計算に基づき、火星史全体を通じ初期水量のほとんどが水素として宇宙空間へと散逸したことを明らかにした (Usui et al. 2012; Kurokawa et al. 2014)。本研究では、我々のこれまでの同位体研究をさらに発展させ、水の「消失時期」および「消失量」を決定し、火星の各地質時代における水の存在量とその状態（氷・水）を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究においては、年代の特定されている隕石から得られた表層水の水素同位体比を入力パラメータとする水散逸モデルを用い、各時代間で消失した表層水・氷の総量を推定した。また、各時代における水の総量（固体水+液体水）と、地形情報から推定されている海水量（液体水）との差分から、固体水と液体水の量比を推定し、惑星表面温度や大気組成といった表層環境を決定付けるパラメータに制約を与えた。

### 4. 研究成果

火星隕石の水素同位体分析の結果、火星には大気（水蒸気）・地殻（地下水）・マントル（構造水）3つの異なる水素貯蔵層が存在し、それぞれ異なる水素同位体比（D/H比）を有することが明らかとなった（図1a）。表層に液体水（海）が存在していた約40億年前には、活発な大気・水循環の結果、大気および地殻に存在する水素貯蔵層は同位体交換を行っていた。一方、海の消失以降は、同位体交換を行わず、表層水は地下水（あるいは含水鉱物）として、大気とは独立な同位体進化をたどっていることが示された。本研究により、火星地下に新たな水素の貯蔵層が存在すること、その水素貯蔵量は過去に火星表面に存在した海水量に匹敵することが示された（図1b）(Kurokawa et al. 2016; Usui et al. 2015, 2017)。

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。

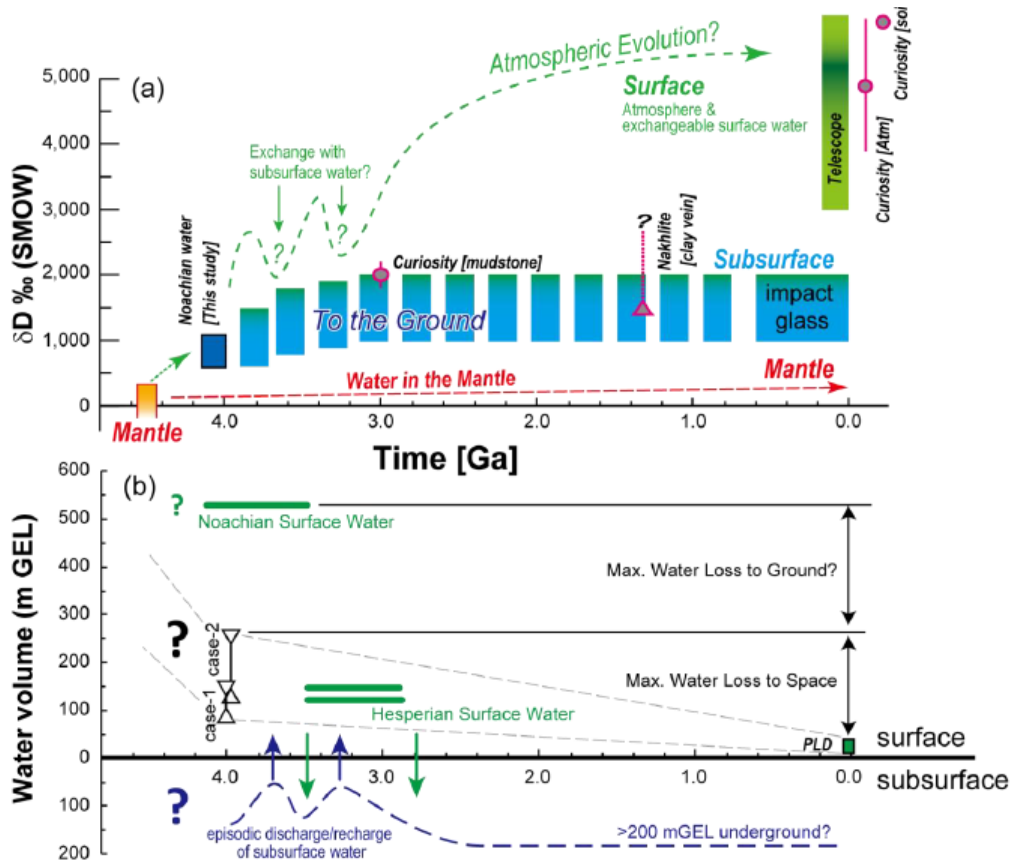


Figure 1:

Interactive evolution of (a) hydrogen isotopic compositions of Martian water reservoirs and (b) the surface/subsurface water inventory of Mars. Thick green bars show the volume of paleo-oceans; note that the length of green bar does not indicate the longevity of paleo-ocean but the period of Noachian or Hesperian. Two bars bracketed with open triangles indicate ranges of water volume calculated in Case-1 and Case-2. Details of this figure are described in Usui et al. 2017.

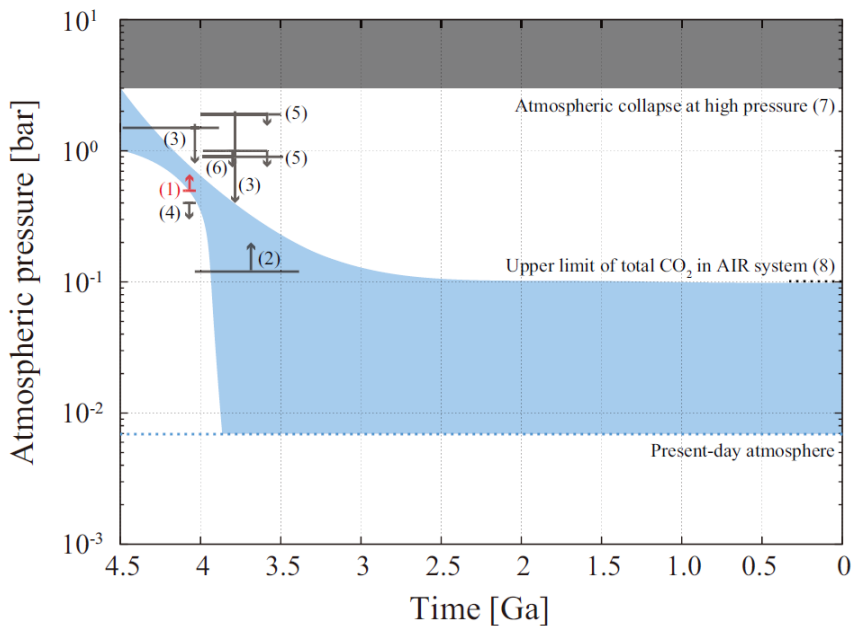


Figure 2: Constraints on the atmospheric pressure on Mars obtained from this study (red line) and other studies (black lines). Possible range of the evolutionary track is suggested by a blue shaded area (Kurokawa et al. 2018).

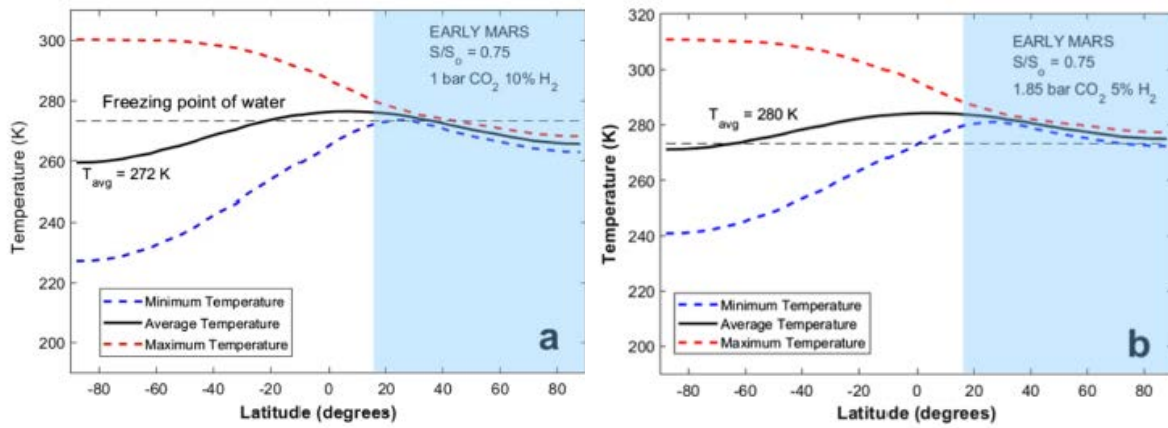


Figure 3 : Latitudinal mean annual temperature distributions for (a) 1 bar CO<sub>2</sub> 10% H<sub>2</sub> and (b) 1.85 bar CO<sub>2</sub> 5% H<sub>2</sub> atmospheres. Average annual temperatures (black) and minimum (blue dashed) and maximum (red dashed) seasonal temperatures are also shown. The baseline ocean of Di Achille and Hynes (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20件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Usui Tomohiro	4. 巻 -
2. 論文標題 What Geology and Mineralogy Tell Us About Water on Mars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrobiology	6. 最初と最後の頁 345 ~ 352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-13-3639-3_21	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 Beatty D. W., Usui, T. et al.	4. 巻 54
2. 論文標題 The potential science and engineering value of samples delivered to Earth by Mars sample return	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 S3 ~ S152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13242	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 Usui Tomohiro	4. 巻 -
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 -

1. 著者名 白井 寛裕	4. 巻 27
2. 論文標題 火星地下圏探査の科学的意義および戦略	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌遊星人	6. 最初と最後の頁 296 ~ 301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14909/yuseijin.27.4_296	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 吉村 義隆、長沼 毅、三田 肇、藤田 和央、臼井 寛裕、山岸 明彦、佐藤 毅彦、宮川 厚夫、今井 栄一、 佐々木 聡、小林 憲正、癸生川 陽子、藪田 ひかる	4. 巻 27
2. 論文標題 火星生命探査のための生命探査顕微鏡の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌遊星人	6. 最初と最後の頁 147 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14909/yuseijin.27.3_147	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 倉本 圭、諸田 智克、長岡 央、中川 広務、中村 智樹、小川 和律、大嶽 久志、尾崎 正伸、佐々木 晶、 千秋 博紀、橋 省吾、川勝 康弘、寺田 直樹、臼井 寛裕、和田 浩二、渡邊 誠一郎、MMX study team、藤 本 正樹、玄田 英典、平田 成、今村 剛、亀田 真吾、松本 晃治、宮本 英昭	4. 巻 27
2. 論文標題 太陽系ハビタブル惑星の成立を探る火星衛星探査計画MMX	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌遊星人	6. 最初と最後の頁 207 ~ 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14909/yuseijin.27.3_207	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 小池 みずほ、森脇 涼太、臼井 寛裕	4. 巻 27
2. 論文標題 火星研究における「火星隕石」の役割：これまでの貢献と将来の展望	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌遊星人	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) 10.14909/yuseijin.27.3_180	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 Greenwood James P.、Karato Shun-ichiro、Vander Kaaden Kathleen E.、Pahlevan Kaveh、Usui Tomohiro	4. 巻 214
2. 論文標題 Water and Volatile Inventories of Mercury, Venus, the Moon, and Mars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-018-0526-1	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 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 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	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. and 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

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 臼井寛裕
2. 発表標題 今後の惑星探査における地球化学の役割
3. 学会等名 日本地球化学会年会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 臼井寛裕
2. 発表標題 将来惑星探査が次世代分析技術に期待すること
3. 学会等名 量子ビームを用いた次世代非破壊分析技術とその応用（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 臼井寛裕
2. 発表標題 火星の水と表層環境の進化史
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 高校生のための冬休み講座2018（招待講演）
4. 発表年 2018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
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
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 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1件

1. 著者名 Tomohiro Usui	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 432
3. 書名 Volatiles in the Martian Crust	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Usui Research Group <a href="https://planetb.sci.isas.jaxa.jp/aqua/index.html">https://planetb.sci.isas.jaxa.jp/aqua/index.html</a>
--

## 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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	アレキサンダー コーネル  (Alexander Conel)	カーネギ研究所・Department of Terrestrial Magnetism・ Staff Scientist	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	サイモン ジャスティン  (Simon Justin)	アメリカ航空宇宙局・Johnson Space Center・Research Scientist	