

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800272

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

研究課題名(英文) Evolution of Martian water reservoirs: constraints from meteorite analysis

研究代表者

臼井 寛裕 (Tomohiro, Usui)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：60636471

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、火星誕生から約4億年の間に火星表層の初期水量の50%以上が大気を通じて宇宙空間へ流出し、また残りの水の大部分は火星の気候変動により氷となって現在でも火星の地下に存在する可能性があることを突き止めた。水が大気を通じて宇宙空間に流出した場合、残存する水の水素同位体比の変化としてその履歴が残ることに着目し、火星隕石に含まれる水の高精度水素同位体分析データを用いた理論計算によって水が失われた時期や量を明らかにした。火星が水を失った歴史を突き止めたことは、今後の火星探査計画への示唆や、地球型惑星が生命誕生にとって重要な海を持つ条件の理解につながると期待される。

研究成果の概要(英文)：We have provided accurate estimation of hydrogen isotope compositions (D/H) of Martian water reservoirs at the time when the meteorites formed. Based on the D/H datasets from Martian meteorites, we have estimated the amounts of water loss due to atmospheric escape and demonstrate that water loss during pre-Noachian was more significant than in the rest of the Martian history. Combining our results with geological and geomorphological evidence for ancient oceans, we propose a possibility that there should be undetected subsurface water/ice of much greater extent than the collective amounts of “visible” current water inventory. Our study further implies that, because such large water inventory automatically calls for significant water loss that cannot be explained by oxygen escape models, unknown mechanisms that effectively consume the remaining excess oxygen should be required.

研究分野：宇宙地球化学

キーワード：火星 水 火星隕石 水素同位体

1. 研究開始当初の背景

火星は地球から最も近い距離にある生命の存在条件を満たした惑星(ハビタブルプラネット)として欧米を中心に数多くの探査研究が行われており、火星に関する我々の知見は近年飛躍的に向上している。特に、約30億年より古い地質体を中心に多くの流水地形や多種類の含水粘土鉱物が広範囲に渡り相次いで発見され、火星はかつてその表層に液体の水(古海洋)が存在しうるほど温暖で湿潤な環境であったことが示唆されている。液体の水の存在は惑星表層環境の指標である惑星表面温度や大気組成に制約を与えるため、生命の存在条件に支配的な影響を及ぼす惑星表層環境を理解するためには、火星のH₂Oの状態(氷・水・水蒸気)およびその総量が時代と共にどのように変化していったのかを定量的に理解することが必要不可欠である。

火星の古海洋の大きさに関しては、これまで地形データを基にした研究が精力的に行われてきた。特に、火星周回機による詳細な地形情報が得られるようになった2000年代以降、三角州などの地形情報を基に推定された海岸線の高度分布と、クレーター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、このような地形学に基づいた推定は、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する。例えば、レーダーサウンダーを用いた地下構造探査により、古海洋に匹敵する量の水が現在でも氷として地下に存在している可能性が示唆されているにもかかわらず、この地下氷の量に関しては全く制約が与えられていないのが現状である。

2. 研究の目的

水(海洋・湖)および氷(極冠氷・地下氷など)を含めた火星の水の総量の変遷を定量的に理解する為には、従来の地形学的研究とは独立なアプローチが必要である。火星は、多くの探査研究に加え、隕石試料が存在する唯一の地球型惑星であり、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が可能である。本研究では、45億年から近過去までの様々な時代情報を保持する火星隕石に着目し、そこに含まれる水素同位体比の変遷から火星の表層水の総量および状態(氷・水)の変遷を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究計画では、火星隕石の水素同位体分析に基づき、以下の手順に従い、火星表層に存在する水の総量および状態(氷・水)の時代変化を明らかにする。

(a) 火星隕石の地球化学的解析に基づく表層水の水素同位体比の推定

異なる地球化学的特徴、結晶化年代、火星放出年代を有する火星隕石試料の分析から、大気・表層地殻・マントルに含まれる水のD/H比を求め、各年代における表層水成分の水素同位体比を明らかにする(図2下)。

(b) 水散逸モデルを用いた水の総量の推定

計画1で得られたD/H比を基に、表層の水・氷の蒸発・昇華、および宇宙空間への大気散逸に伴う水素同位体分別を考慮した水散逸モデルを用い、火星史における表層水の総量変化を明らかにする。

3. H₂Oの状態(氷・水)の時代変化の推定

地形学に基づき得られた海水量の変遷と、計画2で得られた表層H₂Oの総量との比較から、液体水および固体水の時代変化を明らかにする。

4. 研究成果

(成果1)我々は、火星誕生から約4億年の間に火星表層の初期水量の50%以上が大気を通じて宇宙空間へ流出し、また残りの水の大部分は火星の気候変動により氷となって現在でも火星の地下に存在する可能性があることを突き止めた(図1)。水が大気を通じて宇宙空間に流出した場合、残存する水の水素同位体比の変化としてその履歴が残ることに着目し、火星隕石に含まれる水の高精度水素同位体分析データを用いた理論計算によって水が失われた時期や量を明らかにした。火星が水を失った歴史を突き止めたことは、今後の火星探査計画への示唆や、地球型惑星が生命誕生にとって重要な海を持つ条件の理解につながると期待される。

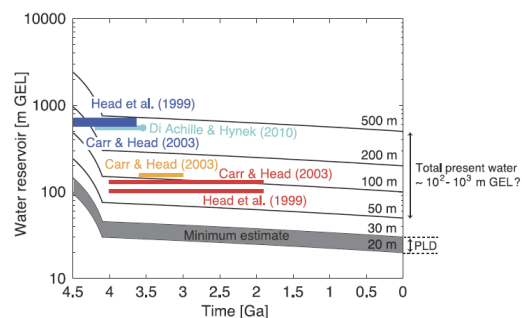


図1: Evolution of water reservoirs for different amounts of present water reservoirs and geological estimates of water amount. The gray area indicates the evolution of surface water reservoir calculated based on the minimum present water reservoir. See Kurokawa et al. (2014) in detail.

(成果 2)我々は、火星隕石の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(図2)。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。水の主成分である水素の同位体組成は、惑星表層水の歴史を知る上で優れた化学的トレーサーだが、二次的変質や分析時の汚染の影響を受けやすいため、これまで信頼性の高い分析が行われていなかった。臼井は米航空宇宙局(NASA)ジョンソン宇宙センター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世界で初めて成功した。

火星はかつて液体の水が海として存在するほど温暖で湿潤な惑星だったが、その水が現在「どこに」「どのように」「どれくらい」存在しているかは惑星科学における大きな謎だった。火星の地下に現在でも大量の水素が貯蔵されているという研究成果は、将来の火星生命探査・有人探査計画の策定に強く反映されることが期待される。

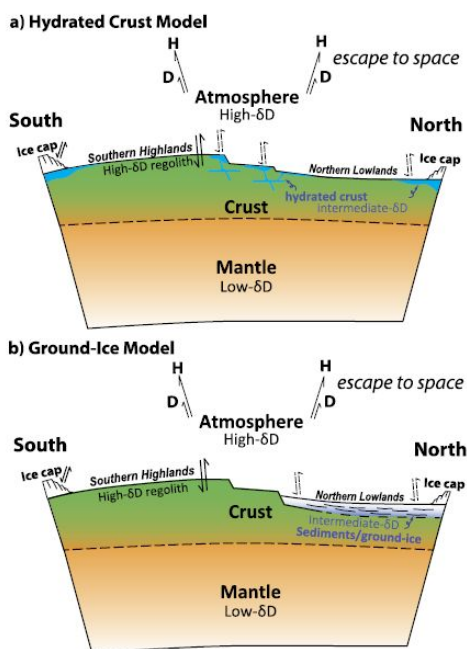


図2 : Schematic cross sections illustrating locations of the Martian water reservoirs based on the models of (a) hydrated crust and (b) ground ice. The intermediate- δD water/ice reservoir occurs as (a) hydrous phases such as clays and amphiboles formed by surface weathering and/or subsurface hydrothermal ground water circulation or (b) ground-ice deposits interbedded within sediments in the northern lowlands. These models require limited interaction between the buried water/ice reservoirs and the atmosphere (shown as dashed arrows). See Usui et al. (2015) in detail.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7件)

1. Kurokawa, H., Usui, T. and Sato, M. (2016) Interactive Evolution of Multiple Water-Ice Reservoirs on Mars: Insight from Hydrogen Isotope Compositions, *Geochem. J.*, 50, 67-79. 【査読有】
2. 宮本英昭, 小松吾郎, ジェームズ・ドーム, 逸見良道, 臼井寛裕, 山岸明彦 (2016) 地形学からみた火星の表層環境史と生命探査, *地学雑誌*, 125, 171-184. 【査読有】
3. 臼井寛裕 (2015) 火星の水の進化史 水素同位体分析からの新たな知見 *Isotope News*, 10, 2-5. 【査読無】
4. Peters, T. J., Simon, J. I., Jones, J. H., Usui, T., Moriwaki, R., Economos, R. C., Schmitt, A. K., and McKeegan, K. D. (2015) Tracking the source of the enriched martian meteorites in olivine-hosted melt inclusions of two depleted shergottites, Yamato 980459 and Tissint, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 418, 91-102. 【査読有】
5. Usui, T., Alexander, C.M.O'D., Wang J., Simon, J.I. and Jones, J.H. (2015) Meteoritic evidence for a previously unrecognized hydrogen reservoir on Mars, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 410, 140-151. 【査読有】
6. 臼井寛裕, 宮本英昭 (2014), 次世代火星探査計画に向けて: 探査史および将来探査計画, *地球化学*, 48, 221-230. 【査読有】
7. Kurokawa, H., Sato, M., Ushioda, M., Matsuyama, T., Moriwaki, R., Dohm, J. M., and Usui, T. (2014) Evolution of Water Reservoirs on Mars: Constraints from Hydrogen Isotopes in Martian Meteorites, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Volume 394, 179-185. 【査読有】

〔学会発表〕(計 3件)

1. Usui, T., Alexander C. M.O'D., Wang J., Simon J. I., and Jones J. H. (INVITED). Evidence from Hydrogen Isotopes in Meteorites for a Subsurface Hydrogen Reservoir on Mars, 25th Goldschmidt Conference, Prague, Czech Republic (August, 2015)
2. Usui, T., Simon, J. I., Jones, J. H., Kurokawa, H., Sato, M., Alexander, C. M. O'D., Wang, J. (INVITED). Hydrogen Isotopes Record the History of the Martian

Hydrosphere and Atmosphere, 46th Lunar and Planetary Science Conference, 1593, The Woodlands, Texas (March 2015).

3. 臼井寛裕 (招待講演). 火星の水の起源および地殻 - マントル相互作用に関する地球化学的研究: 水素同位体組成および揮発性元素濃度分析からの制約, 日本地球化学会第 63 回年会, 横浜国立大学 (2015 年 9 月)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

<https://sites.google.com/site/marsscience3/>

<http://www.freewebs.com/tusui/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

臼井 寛裕 (Tomohiro, Usui)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 60636471

(2) 研究分担者

なし ()

(3) 連携研究者

なし ()