



展 TENBO 望

火星の水の進化史 —水素同位体分析からの新たな知見—



臼井 寛裕

Usui Tomohiro

(東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻)

1 はじめに

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わたり相次いで発見され、火星はかつてその表層に液体の水が存在し得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。一方で、現在の火星は極域に少量の氷が発見されているのみである。液体の水の存在は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。そのため、火星表層環境史を理解するためには、火星の H_2O の状態(氷・水・水蒸気)及びその総量が時代とともにどのように変化していったのかを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(図1)¹⁾。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^{*1}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²⁾、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った。

水(海洋・湖)及び氷(極冠氷・地下氷など)を含めた火星の H_2O の総量の変遷を定量的に理解するためには、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

^{*1} レーザーサウンダー：惑星表面にMHz波長領域のレーダー電波を発射し、その反射により惑星の地質構造を調査する科学測機。調査できる地下深度は主に波長に依存する。

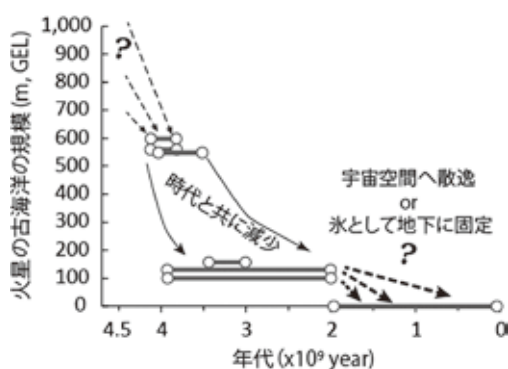


図1 地形学から推定される海水量の変遷
海水量（実線）は海水が火星表面を全て覆ったと仮定した時の深さ（m）で示している（GEL：Global Equivalent Layer）

の惑星であり、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^{*2}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。本論文では、火星隕石に含まれる水の水素同位体（D/H比）分析から得られた、“火星の水の歴史”に関する最新の知見を紹介する。

2 地球外物質の水素同位体分析の課題と解決方法

水の主成分である水素の同位体は、海や氷床の蒸発及び水蒸気を含む大気宇宙空間への散逸過程において顕著な同位体分別を生じることから、惑星表層水の歴史を知る上で優れた化学的トレーサである。一方、水素同位体は二次的変質や分析時の汚染の影響を受けやすいため、火星隕石をはじめとした地球外試料に関して信頼性の高い分析が行われてこなかったというのが現状であった。

筆者らは、NASA 及びカーネギー研究所との

^{*2} リモートセンシング：対象を遠隔から測定する手段。

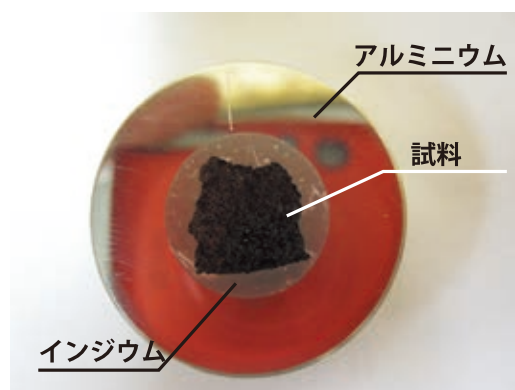


図2 インジウムに固定された火星隕石試料
直径1インチのアルミ製ホルダーを使用

共同研究により、二次イオン質量分析計（SIMS：Secondary Ion Mass Spectrometry）を用いた低汚染での水素同位体分析法を開発した³⁾。SIMSは酸素やセシウムなどを収束一次イオン源として用いることにより、局所領域（一般的には10 μm以下）での高精度同位体分析が可能な装置である。このSIMSを用いることで、火星や地球上で生じた二次的変質部分を避け、未変質部分のみを局所分析することが可能となる。しかしながら、火星隕石は、火星から放出される際の衝撃（>20 GPa⁴⁾により、SIMSの空間分解能を上回る微細なクラックが無数に存在する。従来、SIMS分析で用いる研磨片を作成する際には、試料硬化剤として石油化学系の樹脂を使用する。この石油化学系の樹脂が微細なクラックに浸透し、SIMS分析の際の最も致命的な汚染源であった。そこで我々は、石油化学系樹脂の代わりに液体インジウムを用い、真空下で試料を固定することで、樹脂からの汚染の影響を取り除くことに成功した（図2）。

3 隕石に記録された火星の水の進化史

望遠鏡による分光観測や、火星探査車によるその場同位体分析により、現在の火星大気及び

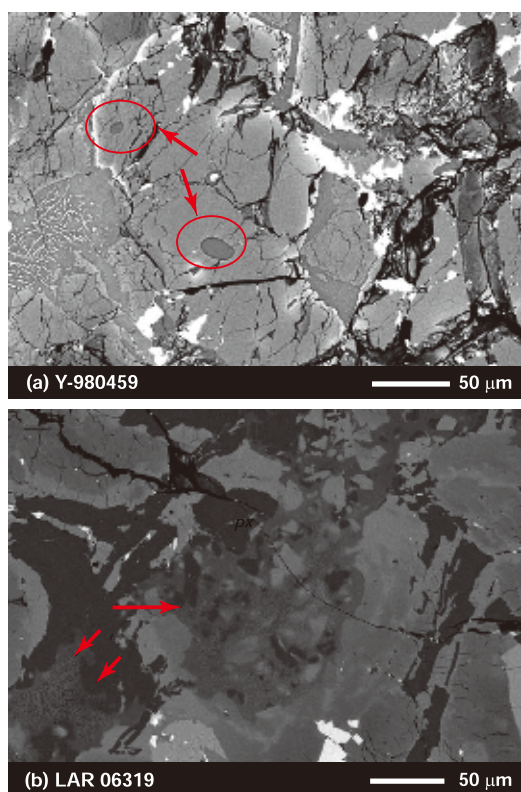


図3 火星隕石の電子顕微鏡写真
(a) メルト包有物 (矢印)。(b) 衝撃ガラス (矢印)

表層水の D/H 比は地球海水の約 6 倍 ($\delta D = \sim 5,000\%$) という高い値が得られている^{5,6)} (δD は地球標準海水との D/H 比の偏差を千分率で表したもの)。一方、筆者らによって開発された水素同位体分析法を始原的な火星隕石に含まれるカンラン石メルト包有物^{*3} (図3) に適用することで、45 億年前の火星誕生時に火星マントルに取り込まれた水 (初生水) が、地球海水と同様な D/H 比 ($\delta D = \sim 275\%$) を示すことが明らかとなった³⁾ (図4)。

このような火星史を通じた D/H 比の大幅な

^{*3} カンラン石メルト包有物：マグマ中の液 (メルト) が地下深部でカンラン石結晶に取り込まれたもの。噴出する前のマグマの情報を保持していることが多く、マントルなど地下深部の始原的な情報を得るのに有用である。

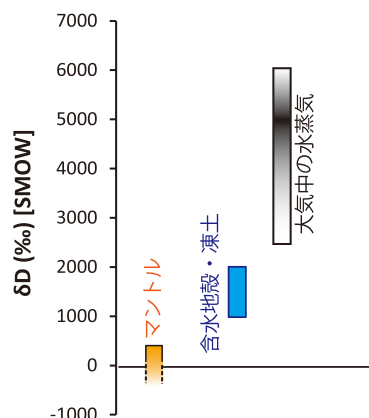


図4 火星の水の水素同位体図
D/H を地球の標準海水 (SMOW) からの千分率で示してある (δD)。衝撃ガラスに含まれる地下水あるいは地殻中の水の水素同位体比は、マントルに含まれる初生水や大気中の水蒸気とは異なる中間的な同位体比を示す

上昇 ($\sim 275\%$ から $\sim 5,000\%$) は、過去の大規模な海や大気の散逸の結果と考えられている。なぜなら、海水や大気中の水蒸気の散逸過程では、相対質量の重い重水素 (D) と比較し軽水素 (H) が選択的に宇宙空間へ流出するからである。筆者らは、水素同位体分別効果を組み込んだ火星大気進化モデルを構築し、火星隕石から得られた約 45 億年前から近過去までの様々な時代における水素同位体データの解析を行った。その結果、火星の初期水量の半分以上が火星誕生後 4 億年間で宇宙空間へ流出したことが明らかとなった⁷⁾。また、筆者らの解析結果と、地形学から得られている古海洋の規模とを比較し、現在、極域で確認されている氷の量をはるかに上回る量の水素が火星の地下に存在している可能性を示した。

4 火星の水の貯蔵層の発見

火星地下の水素貯蔵層の検出を目指し筆者らが新たに着目したのは、火星隕石中に含まれる衝撃ガラスである (図3)。衝撃ガラスとは、火星への小天体の衝突により形成されたもので

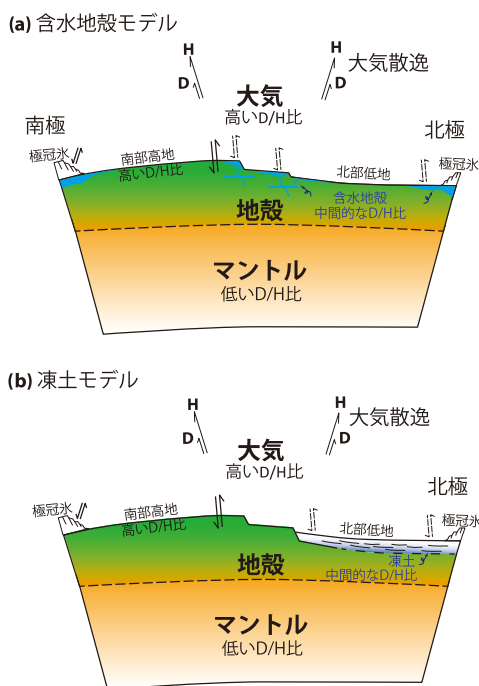


図5 水素の地下貯蔵層の場所を表した火星の模式断面図

水素貯蔵層は、(a) 含水鉱物として地殻中に取り込まれるか、(b) 氷として凍土層を形成する。凍土層として存在する場合は、古海洋が存在したと考えられる北半球に水成堆積物と互層する形で存在すると予想される

あり、その衝撃により火星大気・表土成分が混入していることが示唆されている。SIMSを用いた衝撃ガラス分析の結果、火星表層水成分が、マントルに保持されている初生水 ($\delta D \sim 275\%$) と火星大気中の水蒸気 ($\sim 5,000\%$) とも異なる、中間的な水素同位体比 ($1,000 \sim 2,000\%$) を保持することが明らかになった⁸⁾ (図4)。また、筆者らの発表の約1か月後、火星表層で探査を行っていたキュリオシティローバーにより、過去の湖底粘土堆積物からも同様な中間的な水素同位体比 ($2,000\%$) が報告された⁹⁾。この中間的な水素同位体は、表層水(海・湖)や地下水から成る液体水の循環が活発であった頃(約40億年前)の水素同位体比を反映していると考えられる。このことから、

筆者らは、当時の水循環により形成された含水層が現在においても地下に水素貯蔵層として存在しているという結論に至った⁸⁾ (図5)。

5 今後の展開

筆者らの研究により、一見すると乾燥した砂漠のような惑星である火星に、現在でも大量の水素が氷 (H_2O) あるいは含水鉱物 (OH 基) として地下に存在していることが示された。水素は重要な生命必須元素の1つであるため、この地下の水素を利用した火星生命が、紫外線や宇宙線の影響を逃れるかたちで存在している可能性が示唆される。

一方、今回のような隕石研究では、地下水素の存在地域や存在量を厳密に特定することはできず、火星探査によるグローバルなリモートセンシング観測が必要となってくる。今後は火星サンプルリターンや火星有人探査といった、火星生命(あるいはその痕跡)の検出を第一目的とした探査が国際的に数多く計画されており、この研究成果がこれら探査計画の策定に強く反映されることが予想される。日本においても、現在、本格的な火星探査プログラムが検討されており、その第一弾として2020年代初頭の打ち上げを目指した火星衛星からのサンプルリターンが予定されている。

参考文献

- 1) Di Achille, G. and Hynek, B.M., *Nature Geosci.*, **3**, 459–463 (2010)
- 2) Mouginot, J., *et al.*, *GRL*, **39**, L02202 (2012)
- 3) Usui, T., *et al.*, *EPSL*, **357–358**, 119–129 (2012)
- 4) Nyquist, L.E., *et al.*, *Space Science Reviews*, **96**, 105–164 (2001)
- 5) Villanueva, G.L., *et al.*, *Science*, **348**, 218–221 (2015)
- 6) Webster, C.R., *et al.*, *Science*, **341**, 260–263 (2013)
- 7) Kurokawa, H., *et al.*, *EPSL*, **394**, 179–185 (2014)
- 8) Usui, T., *et al.*, *EPSL*, **410**, 140–151 (2015)
- 9) Mahaffy, P.R., *et al.*, *Science*, **347**, 412–414 (2015)