

令和7年6月11日

各報道機関文教担当記者 様

火星が赤い理由に“塩水”が関係？ 鉄酸化物の変質挙動に新たな知見

金沢大学自然科学研究科博士後期課程1年の深谷創、環日本海域環境研究センターの福士圭介教授、東京大学大学院理学系研究科の高橋嘉夫教授らの共同研究グループは、**太古の火星の水環境を模擬した室内実験を通じて、かつて存在していた水の塩分が火星表面の色に影響を及ぼしていた可能性を明らかにしました。**

火星表面には、水の作用で生成された鉄の酸化物である**フェリハイドライト**（※1）と**ヘマタイト**（※2）が広く分布しており、これらが火星を赤く見せている主な原因であることが確認されています（図1）。フェリハイドライトは水中から析出して生成され、水の存在下で時間の経過によりヘマタイトへと変化することが知られています。

地球では、フェリハイドライトは赤色のヘマタイトだけでなく、黄色の**ゲーサイト**（※3）へと変質することも一般的です。しかし、火星ではゲーサイトは限られた場所で見つかっており、地球では普遍的に見られるこの鉱物が、なぜ火星ではほとんど存在していないのかは、これまで分かっていませんでした。

本研究では、室内実験によりさまざまな塩濃度および pH 条件でのフェリハイドライトの変質挙動を調べました。その結果、**太古の火星に存在したと考えられる高塩分の水環境では、水の pHにかかわらず、フェリハイドライトが主にヘマタイトへと変質することが明らかになりました。**特に、火星に大規模な液体の水が存在した最終期に想定される酸性条件下では、塩分の影響でゲーサイトの生成が大きく抑制されることが分かりました。

火星が赤い惑星であるという事実は、最後の湿潤期において全球的に水の塩分が高かった可能性を示唆しています。水の塩分は、周囲の環境や気候条件と密接に関係しており、これらの知見は、**火星における古環境および古気候の進化を解明するうえで重要な手がかりとなることが期待されます。**

本研究成果は、2025年6月4日に米国化学会が発行する学術誌『*ACS Earth and Space Chemistry*』のオンライン版に掲載されました。



図 1 探査衛星が撮影した火星と、フェリハイドライト、ヘマタイト、ゲーサイトの色の比較。

【研究の背景】

火星は「赤い惑星」として知られており、その色の由来は赤色を呈するフェリハイドライトとヘマタイトが表面を広く覆っているためと考えられています（図1）。フェリハイドライトは水溶液中から直接沈殿することで生成し、ヘマタイトは液体の水の存在下でフェリハイドライトの変質により形成されることが知られています。

一方、地球ではフェリハイドライトが赤色のヘマタイトだけではなく、黄色のゲーサイトへも変質することが知られており、実際に黄色を示す土壌や堆積物は地球上に広く分布しています。しかし、これまでの周回衛星や火星探査機による観測では、火星上でのゲーサイトの存在はごく限られた場所でしか確認されていませんでした。

フェリハイドライトがヘマタイトに変質するか、ゲーサイトに変質するかは、溶液のpHによって左右されることがこれまでの研究で示されています。中性条件では、ヘマタイトへの変質が優勢であり、酸性やアルカリ性条件では、ゲーサイトへの生成が促進されると報告されています。

本研究グループはこれまでに、火星探査機キュリオシティ（※4）がゲール・クレーター（※5）で得た堆積物データをもとに、過去の火星に存在した液体の水の水質を復元する研究を行ってきました。その結果、鉄酸化物が生成したと考えられる火星の最終的な湿潤期には、水のpHは酸性であり、本来であればゲーサイトの生成が優勢であったことが示されました（図2）。しかし、こうした酸性条件下であるにもかかわらず、実際の火星表面ではゲーサイトがほとんど確認されていないという事実については、これまでその理由が明らかになっていませんでした。

【研究成果の概要】

本研究では、ゲール・クレーターの間隙水が過去に経験したと考えられる最高温度 (70 °C) において、pH および塩 (NaCl または CaCl₂) 濃度を変化させ、フェリハイドライトがどのような鉱物に変質するかを室内実験により調査しました。

その結果、塩濃度が低い条件では、先行研究の報告の通り、中性条件ではヘマタイトの生成が卓越し、酸性条件ではゲーサイトの生成が優勢となることが確認されました。一方で、酸性条件下において塩濃度が増加すると、ゲーサイトの生成率は次第に低下し、塩濃度が 0.1 mol/kg を超えると、その生成は大きく抑制されることが明らかとなりました (図 3)。

また、本研究グループがこれまでに火星探査機キュリオシティのデータから復元した火星の最終的な湿潤期の塩濃度は、下限値であっても 0.1 mol/kg を超えると推測されています (図 2)。本研究成果は、太古の火星において比較的高い塩分条件が存在していた場合、赤いヘマタイトの生成が有利となり、黄色いゲーサイトの生成が大きく抑制されることを示すものです。

【今後の展開】

約 35~38 億年前に存在したとされる湖沼では、比較的塩分が低く、中性に近い水質であった可能性が指摘されています (図 2)。一方で、本研究は、火星の最終的な湿潤期 (20~30 億年前) に存在した水が、全球的に高い塩分を有していた可能性を示しました。水の塩分は周囲の気候条件とも密接に関連しているため、本研究の知見は、火星の気候進化を推定する手掛かりとなることが期待されます。

さらに本研究では「火星がなぜ赤く、黄色くならなかったか」という色に関するパラドックスに着目し、フェリハイドライトの変質挙動への塩濃度の影響という新たな視点を導入することに成功しました。この成果は、地球における地質記録の解釈にも応用でき、過去の水環境や気候変動の復元にも貢献することが期待されます。

本研究は、科学研究費補助金 (21H04515、22H00166、23H03986、24H00268、24K22346) および JST SPRING (JPMJSP2135) の支援を受けて実施されました。

			火星	火星
			35億年前の湖	20～30億年前の間隙水
pH	ピーエイチ	(-)	6.9–7.3	3.8–5.5
Na (mol/kg)	ナトリウム	(mol/kg)	0.094–0.12	0.19–1.7
K (mol/kg)	カリウム	(mol/kg)	0.0014–0.0044	0.013–0.11
Ca (mol/kg)	カルシウム	(mol/kg)	0.024–0.045	0.022–0.14
Mg (mol/kg)	マグネシウム	(mol/kg)	0.035–0.060	<0.079
Cl (mol/kg)	塩化物イオン	(mol/kg)	0.11–0.25	0.13–1.8
SO ₄ (mol/kg)	硫酸イオン	(mol/kg)	0.044–0.072	0.062–0.14
HCO ₃ (mol/kg)	重炭酸イオン	(mol/kg)	0.0023–0.016	N/A
文献			Fukushi et al., (2019)	Fukushi et al., (2022)

図 2 ゲール・クレーター堆積物から復元された 35 億年前に存在した湖と、20～30 億年前の最終的な湿潤期の間隙水の水質 (Fukushi et al., 2019 *Nature Communications* **10**, 4896; Fukushi et al., 2022 *Geochimica et Cosmochimica Acta* **325**, 129-151)。

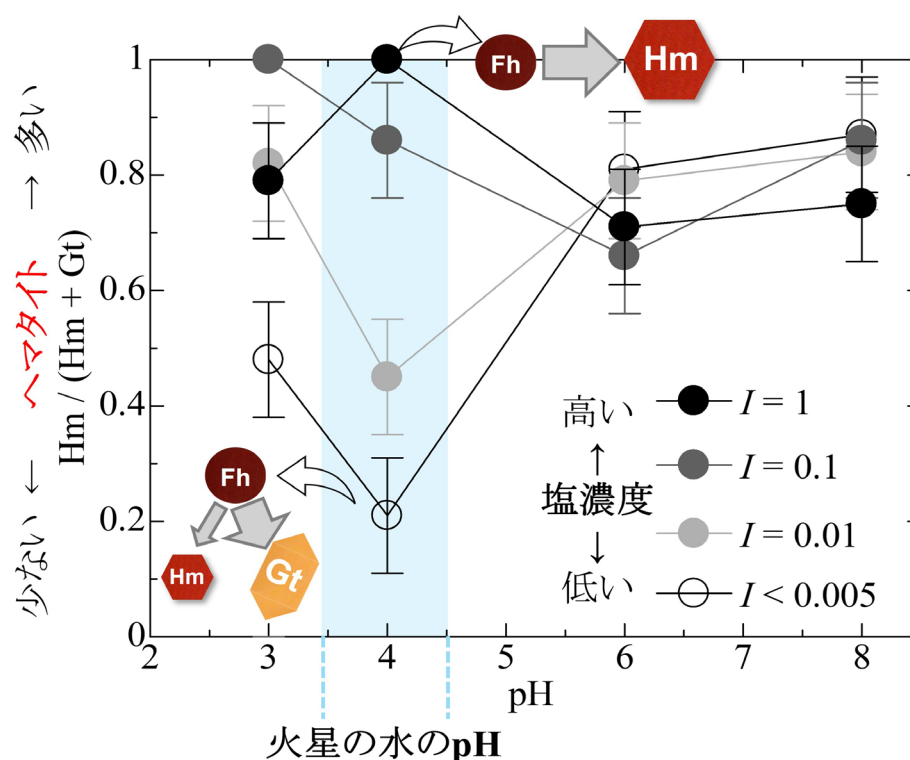


図 3 本研究で得られたさまざまな pH、塩濃度条件におけるヘマタイトの割合。図中の Fh はフェリハイドライト、Hm はヘマタイト、Gt はゲーサイトを示す。I は塩濃度の指標であるイオン強度を示し、単位は mol/kg である。

【掲載論文】

雑誌名 : *ACS Earth and Space Chemistry*

論文名 : Transformation of Ferrihydrite to Crystalline Fe Oxides in Salt Solutions: Implications for the Scarcity of Goethite on Mars

(塩溶液中におけるフェリハイドライトの結晶性鉄酸化物への相転移：火星におけるゲーサイト希少性への示唆)

著者名 : So Fukaya, Keisuke Fukushi, Yoshio Takahashi

(深谷創、福士圭介、高橋嘉夫)

掲載日時 : 2025 年 6 月 4 日にオンライン版に掲載

DOI : doi.org/10.1021/acsearthspacechem.5c00066

URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsearthspacechem.5c00066>

【用語解説】

※1 フェリハイドライト

結晶性に乏しい水酸化鉄鉱物の一種。水の存在する環境で鉄が酸化することによって生成されることが多く、地球では、温泉の沈殿物や鉄バクテリアの活動によっても形成される。最近の研究により、火星にも広く分布していることが確認されている。

※2 ヘマタイト

結晶性の酸化鉄鉱物の一種。強い赤色から銀灰色を示し、和名では「赤鉄鉱」と呼ばれる。水が存在する環境において、フェリハイドライトの変質によって形成されることが多く、フェリハイドライトと同様に火星にも広く分布していることが確認されている。火星表面におけるヘマタイトの存在は、過去の火星に液体の水が存在していた可能性を示す重要な証拠とされている。

※3 ゲーサイト

結晶性の水酸化鉄鉱物の一種。黄色から黄褐色を示し、和名では「針鉄鉱」と呼ばれる。ヘマタイトと同様に、水のある環境でフェリハイドライトの変質によって形成されることが多い。地球では、土壌や鉄鉱床、酸性鉱山廃水などによく見られる。

※4 火星探査車キュリオシティ

NASA による火星探査ミッションであるマーズ・サイエンス・ラボラトリにおける探査車。キュリオシティはその探査車の愛称である。2012 年から現在に至るまで、火星の

ゲール・クレーター内に存在する湖底堆積物の探査を続けている。キュリオシティには、高性能カメラや温度・湿度・速度計などの環境計測装置に加え、火星の土壌や堆積物の化学組成や鉱物組成、有機物を分析するための装置が搭載されている。

※5 ゲール・クレーター

火星探査車キュリオシティが探査を行っている火星のクレーター。火星の赤道付近にある直径約 154 km の衝突クレーターである。クレーター内部には、水が流れた跡や湖沼堆積物など、過去に水が存在していた証拠が見つかることから、生命の痕跡を探る上で重要な調査拠点となっている。

【本件に関するお問い合わせ先】

■研究内容に関すること

金沢大学環日本海域環境研究センター 教授

福士 圭介（ふくし けいすけ）

TEL：076-264-6520

E-mail：fukushi@staff.kanazawa-u.ac.jp

■広報に関すること

金沢大学理工系事務部総務課総務係

小橋 直（こばし なお）

TEL：076-234-6826

E-mail：s-somu@adm.kanazawa-u.ac.jp