

地球と火星の球状鉄コンクリーションの成因と 太古の火星環境の謎を解明！

名古屋大学博物館の吉田 英一 教授、高知大学理工学部の長谷川 精 講師は、岐阜大学教育学部の勝田 長貴 准教授、名古屋大学環境学研究科の丸山 一平 教授・城野 信一 准教授・浅原 良浩 准教授・南 雅代 准教授・山口 靖 教授、名古屋市科学館の西本昌司 主任学芸員らとの共同研究により、地球と火星の地層に含まれる球状鉄コンクリーション^{注1}の成因を解き明かすことに成功しました。

2004年にNASAの火星探査車「オパチュニティ」によって、火星メリディアニ平原の地層中から、鉄を主成分とする大量の丸い粒が発見されました。この丸い粒は色や形状から「ブルーベリー」と呼ばれます。このブルーベリーと形状や組成が類似する球状の鉄コンクリーションは、米国ユタ州の地層でも見られ（図 1）、ユタ州と火星の球状鉄コンクリーションの成因について、十数年来、論争が続いていました。

同研究グループはユタ州の調査によって、球状の鉄コンクリーションは、もともと炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）コンクリーションであり、酸性の地下水との化学（中和）反応によって、鉄コンクリーションに置き換わったことを解明しました。さらに同様の鉄コンクリーションをモンゴル・ゴビ砂漠の地層からも発見し、同じメカニズムで形成されることを確かめました。

さらに、今回明らかとなった地球の鉄コンクリーションの成因は、火星に見られる地質学的な証拠からブルーベリーの成因にも適用でき、もともとは炭酸塩コンクリーションである可能性が高いことを明らかにしました。これは、太古（40 億年前頃）には厚い二酸化炭素の大気が存在し、温暖湿潤な環境だった火星の表層に、なぜか炭酸塩岩がほとんど見られないという従来の謎の解明に繋がる世界初の地質証拠にもなります。この成果は、米国科学雑誌「*Science Advances* 誌」（電子版）に平成 30 年 12 月 6 日付（日本時間午前 4 時）に掲載されました。



図1 米国ユタ州（左）と火星メリディアニ平原（右）の地層中に見られる球状鉄コンクリーション

【ポイント】

- ・球状鉄コンクリーションは、もとは炭酸カルシウム（カルサイト： CaCO_3 ）の球状コンクリーションであった。
- ・球状鉄コンクリーションは、地層中を浸透した酸性の地下水と、炭酸カルシウムの球状コンクリーションとの中和反応によって形成された。
- ・火星の鉄コンクリーション（ブルーベリー）も、地球のものと同じように、炭酸塩コンクリーションが酸性水と反応して形成された可能性が高い。
- ・ブルーベリーは、太古（40~32 億年前）の火星環境変遷史の謎を解く遺物と考えられる。

【研究背景と内容】

米国ユタ州に分布するナバホ砂岩^{※2}には、鉄コンクリーションを多量に含まれることが知られていました。鉄コンクリーションは、数ミリ～数センチの大きさで、非常に丸く、特徴的なのは内部に砂が詰まっていたり、周りは褐鉄鉱（ゲーサイト： $\text{FeO}(\text{OH})$ ）や赤鉄鉱（ヘマタイト： Fe_2O_3 ）の殻からなっていることです（図1左）。

このユタ州の鉄コンクリーションと非常に似たものが、2004年に火星のメリディアニ平原から、NASAの探査車「オポチュニティ(*Opportunity*)」によって発見されました（図1右）。そこでは、黒色～青色の丸い球（大きさ5 mm くらい）がたくさん転がっており、その色と形状とから「ブルーベリー(*Blueberries*)」と名付けられました。ブルーベリーは、ユタ州のものと同様に酸化鉄（特に赤鉄鉱ヘマタイト）を主成分とし、内側が凹んで外側に殻を持った構造を持つものも見つかっています。

このように、類似性が見られるユタ州と火星の鉄コンクリーションの形成メカニズムが分かれば火星の環境を知る手がかりにもなりますが、その成因については十数年に渡って論争が続いていました。本研究グループは2014年から研究を開始し、ユタ州のナバホ砂岩だけではなく、モンゴルの地層からも鉄コンクリーションを発見しました。そして、ユタやモンゴルの地層の証拠から、地球や火星の鉄コンクリーションがどのように形成されるのかを解明しました（図2, 3）。

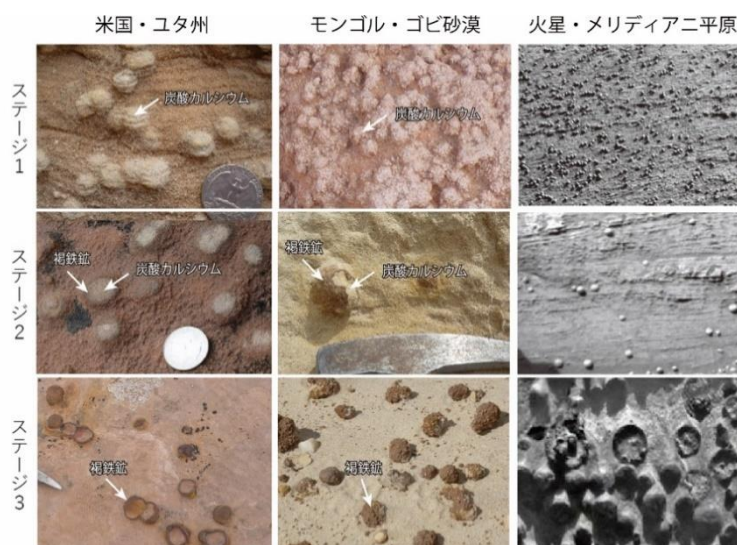


図2 米国・ユタ州（左）、モンゴル・ゴビ砂漠（中）、火星・メリディアニ平原（右）の地層中に見られる、球状の炭酸カルシウムコンクリーションと鉄コンクリーション。ステージ1（上）からステージ3（下）へと段階的に炭酸カルシウムから褐鉄鉱の皮膜に置換していく様子が見られる。

本研究グループがユタ州とモンゴルで、鉄コンクリーションが含まれる地層の調査をしたところ、鉄コンクリーションが、もとは炭酸カルシウム(CaCO_3)コンクリーションであったことがわかりました。図2に示したように、炭酸カルシウムコンクリーションだけが見られるもの(ステージ1)と、炭酸カルシウムの外側に褐鉄鉱(ゲーサイト: $\text{FeO}(\text{OH})$)の皮膜が形成されているもの(ステージ2)、そして、炭酸カルシウムが内側にわずかに含まれ、外側には厚い褐鉄鉱の殻が形成されている鉄コンクリーション(ステージ3)の3つのステージのコンクリーションを確認することができました。さらに、X線によって各ステージのコンクリーションを解析した結果、炭酸カルシウムコンクリーションが段階的に鉄コンクリーションに置き換わったことが分かりました(図3)。

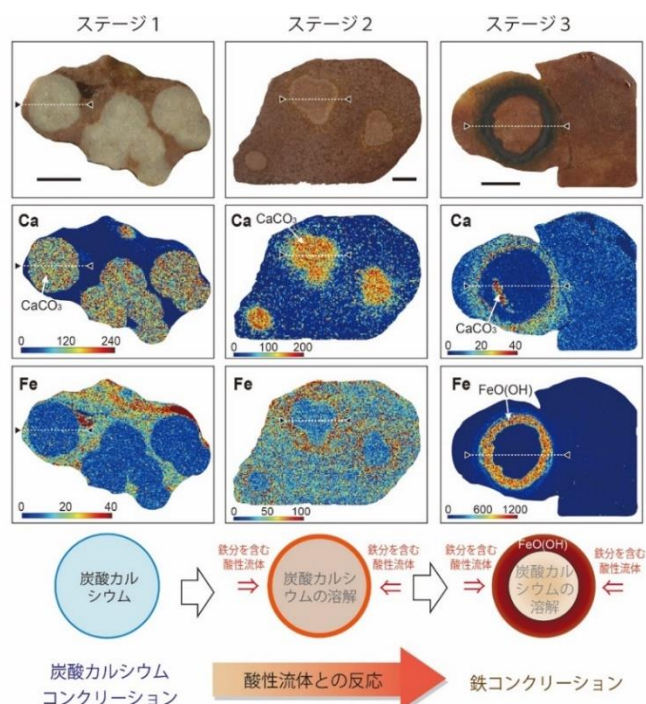


図3 X線顕微鏡(Horiba XGT-5000)を用いた元素マッピング分析により、カルシウムと鉄の濃度分布を解析。炭酸カルシウムの球状コンクリーションが溶解し、褐鉄鉱の殻を持つ鉄コンクリーションに段階的に変化していく様子がわかる。

鉄コンクリーションの形成メカニズム

鉄コンクリーションは次のようなメカニズムで形成されることがわかりました(図4)。

ステージ1: 地下水の蒸発等によって、炭酸カルシウムコンクリーションが砂漠の地層である赤色砂岩中に形成される。

ステージ2: 地層中に鉄分を溶かしつつ酸性流体(地下水)が浸透し、炭酸カルシウムコンクリーション表面では、中和反応により鉄(褐鉄鉱)の被膜が沈殿す。

ステージ3: 炭酸カルシウムの溶解と鉄の沈殿が続き、鉄の殻と砂岩の内部からなる球状鉄コンクリーションが形成される。

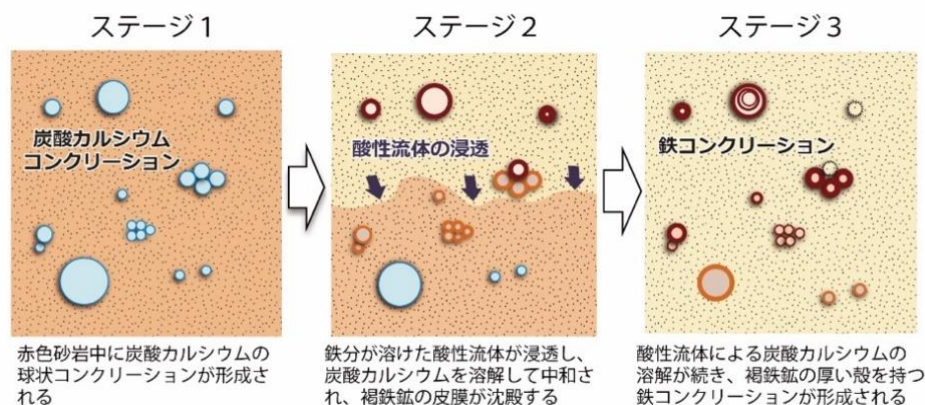


図4 球状鉄コンクリーションの形成メカニズムの概念図

鉄コンクリーションから読み解く火星の太古の環境

今回明らかとなった地球の鉄コンクリーションの成因は、様々な状況証拠から火星の鉄コンクリーション(ブルーベリー)の成因にも適用できることがわかり、ブルーベリーも元は炭酸塩コンクリーションであった可能性の高いことが明らかになりました(図5)。このことは、以下に説明するように、太古(約40~38億年前)の火星には、厚い二酸化炭素の大気が存在し、表層環境は温暖湿潤であったとするこれまでの説とも整合的です。さらに、今回の発見は、現在の火星表層には炭酸塩岩がほとんど見られないという従来の謎の解明に繋がる初めての地質証拠となります。

太古の火星の表層環境が温暖湿潤だったのは、温室効果ガスである二酸化炭素の厚い大気があったためであると考えられています。火星も太古には二酸化炭素の厚い大気が存在したとすると、地球でもそうであるように、炭酸塩岩の堆積が起こったはずです。ど見られず(図6)謎のままでしれないのは、酸性の水によって溶約37~32億年前に酸性流体が火、ンクリーションであるブルーベリ境変遷史を記録する遺物であるこ

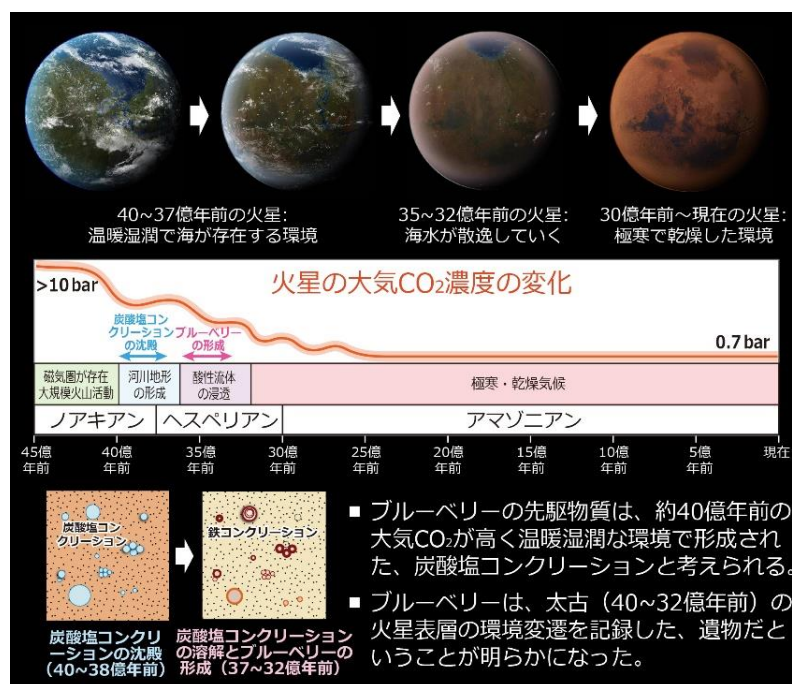


図5 火星表層の環境変遷史とブルーベリー形成のタイミング

塩岩の堆積が起ったはずですが。しかしながら、現在の火星表層には何故か炭酸塩がほとんど見られず（図 6）謎のままでした。しかし、今回の発見によって、炭酸塩岩がほとんど見られないのは、酸性の水によって溶けてしまったからだと考えることができます。このことは、約 37～32 億年前に酸性流体が火星表層を覆ったことを示す証拠とも整合的です。火星の鉄コンクリーションであるブルーベリーは、今回の成果から火星の過去（約 40～32 億年前）の環境変遷史を記録する遺物であることが分かったのです（図 5）。

今後の火星探査により仮説検証される可能性

2020年にNASAは新しい火星探査車 *Mars2020* を火星に送り込むことを計画しています。この *Mars2020* では火星表層からサンプルを採取し、その後、再び火星に送り込む探査機を利用して火星のサンプルを地球に持ち帰る、サンプルリターン計画となっています。

Mars2020 で探査候補地として選定された Jezero Crater は、35 億年前の酸性流体による影響が小さく、炭酸塩岩がわずかながら残されている可能性の高い場所に当たります(図 6 の④)。*Mars2020* が、もし、炭酸塩岩を発見すれば、その表面には酸

化鉄の皮膜が形成され、鉄コンクリーションに置き換わっている様子が見られるかもしれません。我々が仮説として提唱した火星の鉄コンクリーション(ブルーベリー)が、本当に炭酸塩球起源だということが将来的に NASA の探査機によって証明されるかもしれません。

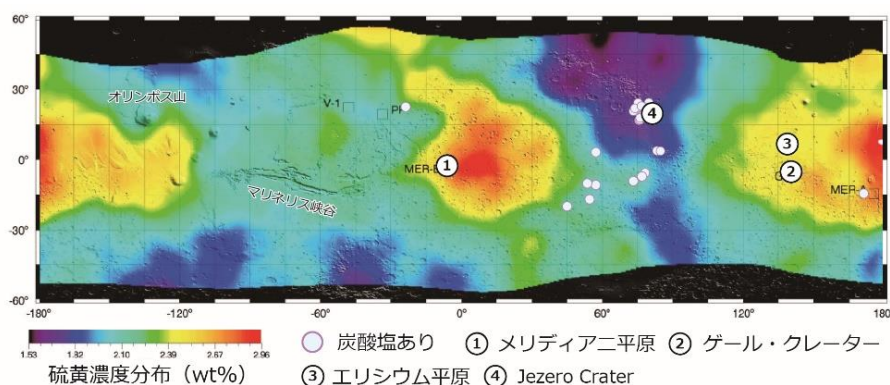


図6 火星表層の炭酸塩と硫黄の分布と、*Opportunity* と *Curiosity* の探査地 (①, ②), *InSight* の探査地 (③), および *Mars2020* の探査候補地 (④). 硫黄濃度が濃い所が酸性流体が表層に浸透したエリアに対応する。炭酸塩が残有している所は硫黄濃度の低いエリアに分布している。探査候補地④は炭酸塩が残有している可能性が高い。

【成果の意義】

米国ユタ州やモンゴルの地層に見られる鉄コンクリーションの成因を解明し、火星メリディアニ平原のブルーベリーも同様に炭酸塩コンクリーションを先駆物質とする可能性を明らかにした。この成果は、太古（40～38 億年前）の火星には厚い二酸化炭素の大気が存在し、炭酸塩岩の堆積が広域的に起こったはずだというこれまでの仮説とも整合的であり、火星表層の炭酸カルシウムは酸性流体によって溶脱したという従来の謎の解明に繋がる初めての地質証拠となります。ブルーベリーは過去の火星の環境変遷史を記録する遺物である可能性が高いことを示しました。

【用語説明】

- 注 1) 球状鉄コンクリーション：米国ユタ州の砂漠の地層中に見られる表面が鉄で覆われた球状の岩塊。
- 注 2) ナバホ砂岩：ジュラ紀前期（約 2 億年前）の恐竜が生息していた時代にアメリカ大陸に広がっていた砂漠の地層。球状鉄コンクリーションを多量に含んでいる場所がある。

【論文情報】

掲載雑誌：*Science Advances* 2018;4:eaau0872

題目：Fe-oxide concretions formed by interacting carbonate and acidic waters on Earth and Mars

著者：H. Yoshida*, H. Hasegawa*, N. Katsuta, I. Maruyama, S. Sirono, M. Minami, Y. Asahara, S. Nishimoto, Y. Yamaguchi, N. Ichinnorov, R. Metcalfe. DOI: 10.1126/sciadv.aau0872

吉田 英一(名古屋大学博物館)*、長谷川 精(高知大学理工学部)*、勝田 長貴(岐阜大学教育学部)、丸山 一平、城野 信一、南 雅代、浅原 良浩、山口 靖(名古屋大学環境学研究科)、西本 昌司(名古屋科学館)、ニーデン・イチノロフ(モンゴル古生物地質研究所)、リチャード・メトカルフェ(英国地質調査所)(*の著者は、本研究に対して同等の寄与を行った)

公開日：12 月 6 日午前 4 時 01 分以降 ※本論文はオープンアクセスです

DOI：[10.1126/sciadv.aau0872](https://doi.org/10.1126/sciadv.aau0872)

【謝辞】この研究は、平成 27 年度～29 年度文部科学省科学研究費助成事業（海外学術調査、基盤研究 B）（代表：吉田 英一）の資金援助を得て行われました。