

9. 火星隕石中の生痕 (?) 物質

隕石学的に見た火星隕石 ALH84001

◎ ALH84001 の概要

- 南極の Allan Hills 地域で、1984 年に発見。南極は最大の隕石採取地¹⁾。
 - － 南極氷床は陸から海へ流動しているが、途中に山脈があると上昇流が生まれ、そこに隕石が集積される²⁾。
 - － 氷床が白く、地球産の岩石がほとんど存在しないため、採取・判別が容易。
- 総重量 1.9 kg.
- 発見当初はエコンドライトの一種である diogenite³⁾ に分類⁴⁾。後年の再分析 (特に酸素同位体組成について) により、火星隕石に分類しなおされた。

✂ 火星隕石としての ALH84001

- 他の火星隕石 (これまでに発見されているのは ALH84001 の他に 11 個⁵⁾) は主に玄武岩⁶⁾ からなるが、ALH84001 は斜方輝石からなる。
- 他の火星隕石 (1.3 b.y.a) に比べ、非常に古い形成年代 (4.5 b.y.a) を示す。
 - － 1.3 b.y.a という若い形成年代が、これらの隕石の母天体が火星であると考えられた最初の理由。火成岩をこの時期まで形成しつづけられる天体は惑星だけ。
 - * Zagami (1962 年, ナイジェリアに落下した火星隕石) および EETA79001 (南極で見つかった火星隕石) の中に閉じ込められていたガスの組成が火星大気と類似。他の 9 + 1 個の隕石は酸素同位体組成により上記 2 種の隕石と — よって火星とも — 関係付けられた⁷⁾。
 - － これに対し、ALH84001 はマグマオーシャンに覆われていた原始火星から最初に固化した物質であったと考えられる⁸⁾。
 - * 隕石重爆撃期の火星の高地からやってきた、現時点で唯一の物体。この点だけでも注目に値する隕石。
- ALH84001 には多数の微小な割れ目が存在。ここに、温水中で析出したと見られる炭酸塩 — 例えば方解石 (calcite, CaCO_3) — の“顆粒” (円盤状, 直径 $\sim 50 \mu\text{m}$) が存在⁹⁾。
 - － 他の火星隕石にも炭酸塩を含むものはあるが、いずれも微量。

¹⁾2002 年の時点で総採取数は 33693 個, うち日本の所有数は 16728 個。隕石大国である [1].

²⁾こうした地域ではカタバ風 (斜面降下風) が卓越し、氷床の昇華量を大きくしているらしい [1].

³⁾howardite, eucrite, diogenite はその酸素同位体組成などが類似していることから、同一母天体に起源を持つ隕石であると考えられている。このため、3 種をまとめて HED 隕石と呼ぶ。分光観測により、小惑星 Vesta の鉱物組成がこの隕石に類似していることが示された。このことは、HED 隕石が Vesta からの impact ejecta であることを示唆している。いわゆる Vestoid の発見もこの解釈を支持する [2].

⁴⁾どちらも斜方輝石を主成分とするため?

⁵⁾[2] では 26 個となっている。

⁶⁾火星隕石には ALH84001 の他に shergottite, nakhlite, chassignite があり、頭文字をとって SNC 隕石と呼ばれる。このうち、サンプル数が最も多い (26 個中 18 個) shergottite に玄武岩質なサブグループがある。しかし、他は玄武岩質ではない。

⁷⁾three oxygen isotope plot 上で傾き $\sim 1/2$ の直線上に乗る、ということ。

⁸⁾玄武岩はかんらん岩の部分融解により形成される。しかし、マントルが高温な惑星形成初期には部分融解度が大きく、よりかんらん岩に近い組成のマグマが形成される。実際、地球の太古代に活動が認められるマグマ (コマチアイト質マグマ) は玄武岩に比べ Mg に富み Al に乏しいことが知られている [3].

⁹⁾容積で 1% 程度 (酒井, 2002).

- 地球の岩石では、こうした組織はしばしば割れ目にしみ込んだ温水から生物の作用によって形成.

♀ ALH84001 の履歴

- 4.5 b.y.a ... 火星形成時に結晶化.
- 4.0 b.y.a ... 惑星集積の最後に微惑星衝突. 同位体時計 (のうちの 1 つ¹⁰⁾) がリセットされ, またショック変成を受ける.
- 3.6–1.8 (?) b.y.a ... 炭酸塩の沈殿. 水および生命はこの時期に存在したことになる.
- 1.6 m.y.a ... 小惑星の衝突により宇宙空間へ放出¹¹⁾.
- 13 t.y.a ... 南極に落下.

炭酸塩中の生命の痕跡に関する議論

♂ 各論に入る前に ... 実験室や南極における汚染説

- 滅菌されたバッグで採取, 気密状態で輸送.
- 分析・保存は Johnson Space Center で汚染を最小限に抑えるよう行われた.
 - きれいな石英の円盤を同様の手順で保存・分析. 汚染が起きないことを確認.
- 隕石の内部から切り出された試料のみを分析.
 - 内側になるほど有機分子が増加¹²⁾. 汚染による外側からの拡散ではない.
- 採取前の 13000 年間に汚染が起きた可能性は?
 - 他の南極隕石にも汚染の形跡が見つからないため排除.

以上のことから, 地球上での汚染とは考えづらい. 生命の痕跡かどうかは別として, 火星上で起きた過程による生成物と考えるのは妥当.

♂ 炭酸塩顆粒の組成的層構造, 磁鉄鉱の結晶形

- Ca-rich なコアの周りに Fe-rich (主に磁鉄鉱 [magnetite, Fe_3O_4] からなり, 少量の磁硫鉄鉱 [pyrrhotite, $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_x$] を含む) および Mg-rich (菱苦土鉱 [magnesite, MgCO_3]) な薄いリムが交互に重なって存在.
 - 地球では, バクテリアの関与により形成されることが知られている.
- 化学平衡下で磁鉄鉱, 磁硫鉄鉱, 炭酸塩の共存は困難.
 - 磁鉄鉱, 磁硫鉄鉱が同時に形成されるのは還元的環境下, 炭酸塩は解けてしまう.
 - 生物は化学平衡から大きく外れた環境を作ることが出来るため, これらの物質を共存させることが可能.
- “magnetofossils” との類似性

¹⁰⁾同位体年代測定の見直し. 火星隕石の年代測定には Rb-Sr 法, Sm-Nd 法, K-Ar (Ar-Ar) 法などが用いられているが, こうした二次的加熱の年代はどの方法により求められるか? このように, 異なる元素の同位体時計が示す時刻は元素の性質によりまちまち. そのおかげで様々な履歴を読み解くことが出来る.

¹¹⁾宇宙空間への放出, および地球への落下時期は宇宙線照射年代法により見積もられる... のだが, 詳しくは説明できない.

¹²⁾隕石は大気圏突入時に激しい加熱を受け, その表面に fusion crust と呼ばれる黒い酸化皮膜が形成される. 表面で有機分子が少ないのは, このとき同時に PAH も加熱・破壊されたため.

- 地球上ではバクテリアの化石中に磁性鉱物が見つかることがあるが、炭酸塩中の磁鉄鉱粒子のサイズ・形状がこれに類似。

㉔ PAH の存在

- PAH (多環式芳香族炭化水素) ... ベンゼン環がタイル状に組合わさったもの。それぞれの炭素には水素や水素化合物が結合 (cf., Fig. 9.5).
 - 地球では有機分子の燃焼や分解に伴って生成。よって、火星に有機分子を生成するような生命活動が存在した可能性を示唆。
- 濃度は ppm 程度。南極の雪には地球産の PAH が含まれているが、大きく見積もっても ppb レベル¹³⁾ であるため汚染の影響とは考えづらい。
- 見つかった PAH は主に 3-6 個のベンゼン環を持つ。特に分子量が 178 (phenanthrene, $C_{14}H_{10}$), 202 (pyrene, $C_{16}H_{10}$), 228 (chrysene, $C_{18}H_{12}$), 252 (perylene or benzopyrene, $C_{20}H_{12}$) に顕著なピーク。
- より重い (分子量 270-450) PAH も存在するが、微量であるため分子を同定することは困難。
- 非生物的に生成される可能性もある。火星隕石以外の隕石にも PAH は存在。

㉕ バクテリア状組織の存在

- 炭酸塩の表面に局在し、炭酸塩と同時期に形成。
- 長さ 100 nm, 幅 10-20 nm 程度。地球のバクテリア化石の 1/100。
- サイズが “nanobacteria” (cf., Fig. 9.8) に類似。これは地球の炭酸塩中にしばしば見られる構造で、生物的なものと解釈できるが、異論も多い。これほど小さいにも関わらず生命として機能できる機構が不明なところが難点。
- 形状はバクテリアに酷似。Mckay のチームの一人, E. Gibson が微生物学者の妻に写真を見せたところ, 「これ何てバクテリア?」

¹³⁾ グリーンランドの水床の調査によると、産業革命以前で 10 ppt, 近年は ppb 程度。南極はグリーンランドよりも汚染が少ないと考えられる [5]。

Fig. 2. False-color backscatter electron (BSE) image of fractured surface of a chip from ALH84001 meteorite showing distribution of the carbonate globules. Orthopyroxene is green and the carbonate globules are orange. Surrounding the Mg-carbonate are a black rim (magnesite) and a white, Fe-rich rim. Scale bar is 0.1 mm. [False color produced by C. Schwandt]

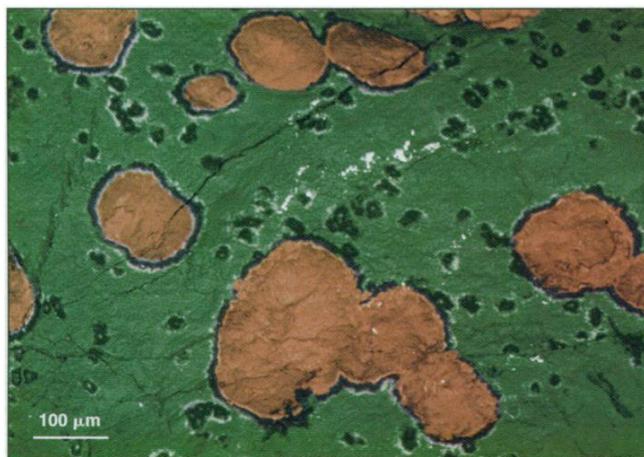


Fig. 3. BSE image and electron microprobe maps showing the concentration of five elements in a carbonate from ALH84001. The element maps show that the carbonate is chemically zoned. Colors range through red, green, light blue, and deep blue, reflecting the highest to lowest element concentrations. Scale bars for all images are 20 μm. (A) BSE image showing location of orthopyroxene (OPX), clinopyroxene (CPX), apatite (A), and carbonate (MgC, C). Iron-rich rims (R) separate the center of the carbonate (C) from a Mg-rich carbonate (MgC) rim. Region in the box is described in Figs. 5 and 6. (B) Iron is most abundant in the parallel rims, ~3 μm across, and in a region of the carbonate ~20 μm in size. (C) Highest S is associated with an Fe-rich rim; it is not homogeneously distributed, but rather located in discrete regions or hot spots in the rim. A lower S abundance is present throughout the globule in patchy areas. (D) Higher concentrations of Mg are shown in the Fe-poor outer region of the carbonate. A Mg-rich region (MgC), ~8 μm across, is located between the two Fe-rich rims. (E) Ca-rich regions are associated with the apatite, the Fe-rich core of the carbonate, and the clinopyroxene. (F) P-rich regions are associated with the apatite.

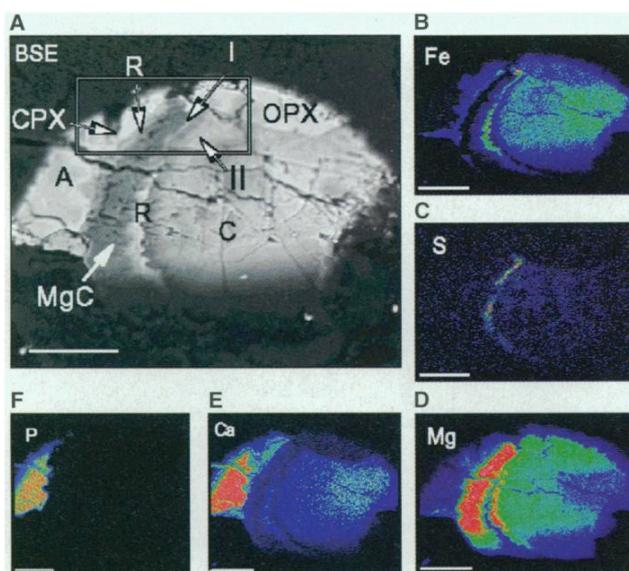


図 9.1: 炭酸塩顆粒とその元素分布. McKay et al. (1996) より引用.

本当に生物由来か？

♪ 炭酸塩の析出温度に関する議論

- 高温¹⁴⁾ であれば非生物起源. ただ, 低温であっても生物起源とは限らない.
- 析出温度の推定方法 1 ... 炭酸塩の鉱物組成
 - 680 °C 付近と予想されるが, より低い温度でも鉱物組成を再現出来るため, 上限値と考えるべき.
 - 変成を受けていないシリケートの岩石中に CO₂ に富む熱水が通じて形成.
 - 組成的層構造は定常的な熱水活動 (火山の周囲や地下) では形成不可. 小惑星の衝突などに起因する “パルス” 的な活動で形成.
- 析出温度の推定方法 2 ... C, O の同位体組成
 - 炭酸塩の析出には軽い同位体が選択的に利用され, 温度が低いほど分別の度合いが大きくなることを利用.
 - O, C の初期同位体組成を知る必要あり¹⁵⁾.
 - O の同位体組成からは 0–80 °C, 生物は十分存在可能.
 - 問題点もあり.
 - * 炭素の同位体組成はこれと一致せず. しかし, (i) 火星表層の炭素の存在度, (ii) 炭素リザーバが少ない環境下での炭酸塩形成プロセス, に依存.
 - * 大気散逸が選択的に軽い同位体を減らし, O, C の同位体組成が変化した可能性. この効果を加味すると, 析出温度は 250 °C 程度まで上昇.
- 析出温度の推定方法 3 ... 磁化鉱物中の残留磁化
 - 高温になると磁化を失うため, 温度の上限を知ることが可能.
 - 上限値は 300 °C.
 - 過去の火星には磁場が存在したことを示唆. 現在の, 磁場は存在しないか, あっても非常に弱い.

♫ PAH に関する別解釈

- 火星隕石以外の隕石中に見られる PAH
 - 星間雲の CO₂ と H₂O から, ダスト表面を触媒として形成. 原始太陽系星雲での形成機構は不明.
 - 炭素質隕石には, さらに複雑な有機物 (アミノ酸など) も含まれる. 地球や火星 (実在したならば) 生命の素になった可能性.
 - ALH84001 の PAH との関係は?
 - * 形成過程 ... 星間雲で PAH を形成した過程は火星環境下では進まず, 無関係. Miller & Urey の実験 (cf. Fig. 6.1) で想定されたような環境下で進む過程を経て形成されたと考えられる.
 - * 微惑星がもたらした PAH の生き残り? ... 隕石重爆撃期や地質活動が活発な時代を生き延びるのは難しい. また, 火星表層が非常に酸化的事であることも障害.

¹⁴⁾ これまでに見つかっている最も熱に強い古細菌は 113 °C まで生存可能 (ノール, 2005).

¹⁵⁾ 火星隕石の炭酸塩以外の部分から推定? 実際は, 探査機が得た現在の火星大気酸素同位体組成を基準に計算.

- では、生物起源か？
 - － 部分的に還元的な炭素化合物 (アミノ酸やメタン) から無機反応を経て形成された可能性も捨てきれない.
 - － この場合でも、火星に PAH の素となる有機物 (生物とは限らない) が存在したことは間違いない.

B バクテリア状組織に対する反論

- 地球上で最古のバクテリア (3.5 b.y.a) は現在のシアノバクテリアとサイズ¹⁶⁾, 形状などがほぼ同じ. これに比べ ALH84001 のバクテリア状組織ははるかに小さい.
 - － 地球バクテリアと同じ組織を用いた場合, 火星バクテリアは膜だけで出来ていることになる.
 - － ただし, 火星生物が地球生物と同じ組織を用いたとは限らない.
- サイズはむしろ地球のリボソーム, ウイルスに類似.
 - － リボソームは messenger RNA の情報を読み取り, タンパク質を合成する器官で, 細胞の自己複製機構の一角を占める. 重量の 60 % がリボソーム RNA, 残りがタンパク質からなる.
 - － ウイルスは主に核酸とそれを取り巻くタンパク質の殻からなる. 他の細胞の自己複製機構を用いて増殖する.
 - － どちらもそれだけでは代謝・自己複製できない.
- サイズで生命かどうかを判断できるか？
 - － サイズ的には DNA の塩基対 1000 段分を含むことが可能.
 - － 最も単純な地球バクテリアでも, これより遥かに多くの遺伝情報を使用.
 - * 最初の生命はこれより遥かに単純だったはず. よって, 現在の地球の常識を当てはめて生命でないとは断言することはできない.

結局どちら？

◎ 現状では判断不可能

- オッカムの剃刀 ... より単純な解釈を支持すべし, という教え.
 - － どちらが“より単純”かの判断も付き兼ねる.
- 判断には, より多くの情報が必要.
 - － 手元のサンプルをより詳しく調べる.
 - * 分析技術がさらに進歩すれば, 同じサンプルからでもさらに多くの情報を引き出せるはず.
 - * 同様の分析を他の隕石や, 地球の岩石に対しても行い, 比較.
 - － 火星からのサンプルリターン
 - * 地質学的情報が大きなヒントになると期待される.

¹⁶⁾数十 μm (酒井, 2002).

References

本節全体に関するものとして,

- McKay, D. S. et al., 1996. *Science* 273, 924.

また, 一般向けではあるが

- 酒井 均, 2002. 地球と生命の起源, 講談社.
- A. H. ノール, 2005. 生命最初の 30 億年, 紀伊国屋書店.

が参考になる. 特に前者は記述が明快で, 昨年度からの基礎ゼミの内容を広くカバーしている好著. 後者は著名な古生物学者による初期生命史の解説書.

[1] 南極隕石センター, <http://yamato.nipr.ac.jp/AMRC/index.html>

[2] Krot, A. N. et al. 2003. In *Meteorites, Comets and Planets*, Vol. 1 *Treatise on Geochemistry* (Oxford: Elsevier-Pergamon), 83.

[3] Drake, M. J. and Richter, K. 2002. *Nature* 416, 39.