

特集 「火星生命存在の可能性」

火星隕石 (ALH 84001) と生体鉱物

赤井 純治¹

1. はじめに

1996年8月のMcKay ら[1]の火星隕石から生命活動の痕跡か、という論文は世界に大きなニュースとして報じられた。筆者は電顕鉱物学の応用として、これまで炭素質コンドライトの電顕的検討を十数年にわたって続けてきており、さらにここ6年ばかりある共同研究がきっかけとなってバクテリア起源磁鉄鉱の研究、さらに生体鉱物の研究にウェイトが移りつつあるところであった。今年のIGCでもバクテリア起源磁鉄鉱の研究結果を発表したばかりであった。標記話題は隕石とバクテリア起源磁鉄鉱の両者がかかわった問題として提起された。

ここでは、現在示されているデータで何が言えるか、言えないのかということをも評価してみたい。結論をさきにのべると、見出された磁鉄鉱は、その可能性は否定しえないものの走磁性バクテリア起源とは明言できないと思われる。しかし、火星の生命について、発生しうる条件はあったともされており、それは発生したかもしれないし、もしその痕跡が事実として、物的証拠として発見されれば、その意義は、科学史上、人類史上もはかりしれないものがあり、さらに精査・検討する意義は大きい。ではどのようなところで探索する価値があるのか、どのような岩石に注目すればよいだろうか、現在の地球にみられる生体鉱物、またそれらをつくる過程であるバイオミネラリゼーシ

ョンの知識がここで他山の石(他惑星の石への示唆)として役立つことになる。これらのことについて、私の考えるその概要を述べてみる。

2. McKayらの論文と論点

McKay ら[1]は火星隕石でみいだされた次の特徴を論拠としている。つまり、1)この隕石は希ガス組成の特徴他から火星起源と考えられるSNC隕石に属するエコンドライトである。2)割れ目があり、そのなかに36億年前と年代データがえられた炭酸塩鉱物が存在する。3)この炭酸塩のまわりに、磁鉄鉱・磁硫鉄鉱に富む鉱物集合体部分が存在する。4)この炭酸塩部分には有機物として4種のPAH(多環芳香族炭化水素)が検出された。熔融皮膜には存在しない。5)炭酸塩の「表面」部分に地球の微生物に形態的に似た微小粒子が存在する。

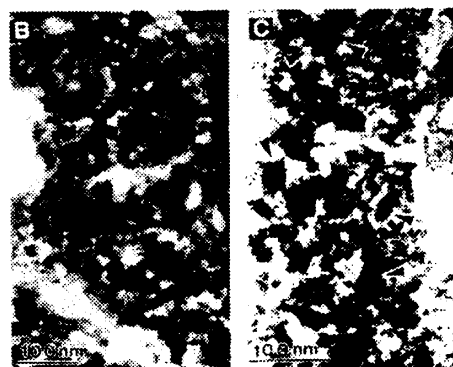


図1 McKayら(1996)の論文の磁鉄鉱(b)及び磁硫鉄鉱(c)濃集部電顕写真(原図Fig.4b,c)

Reprinted with permission from McKay et al. (Science 273, 924-930, 1996).
Copyright 1996 American Association for the Advancement of Science.

¹新潟大学理学部地質科学教室

但し地球の微生物にくらべてはサイズが、1桁から2桁小さい。

このうちの、3)の磁鉄鉱と磁硫鉄鉱は、走磁性バクテリア起源らしいと指摘されていて、筆者の直接的な研究対象との関連がでてくる。そこで主に、この走磁性バクテリア起源といえるのか否かの論点について、以下に述べてみる。図1はMcKayらの論文で示された写真であるが、それぞれのグレインの形態もあまりはっきりしないものである。まず総論的検討課題・検討すべき視点を記してみる。

3. 総論的評価

・隕石そのものが火星起源かどうかということについては、多くの研究者が確からしいと考えている。

・南極での汚染について、極地域で風雪へ曝されること自体、風化過程であり、極寒の世界に住むバクテリアもいるし、汚染をうけるおそれは充分にある。これはとくに4)の有機物の起源にかかわっている。

・火星の温度、大気組成、水の存在、表面環境他すべての特徴とそれらの歴史的変遷にてらしての判断が重要で、地球的基準ですべて判断してよいかということがある：それは、生命発生・進化上の偶然性と必然性についてもいえよう。この点が全くの未知の世界であるから、すべての判断は慎重にならざるをえないし、地球のものとの類似性にのみたよるわけにもいかない面もある。

・そういう前提にたつて、もし、火星隕石に見いだされた磁鉄鉱(この同定も論文ではデータの明示されていないが)が走磁性バクテリア起源らしいとしたら、地球の走磁性バクテリアは約20億年前にバクテリアの進化のなかで出現したと考えられており、論文で報告された36億年前というALH84001の炭酸塩の年代は古すぎはしないか、と

考える。

・また火星の磁気が現在殆ど無いが、過去にあったのか？ 磁鉄鉱をつくる生物が走磁性をもつ生物でなくて磁性を不必要とする生物に由来しうることも考えなければならないか？、なぜなら、地球の走磁性バクテリアは地磁気を感知して移動すると一般には考えられているからである。

・地球で、他の鉄水酸化物は、特に非晶質鉱物の形で、身のまわりいたるところで見うけられるが、磁鉄鉱のバイオミネラリゼーションはそれほど主要なタイプではない。

・この走磁性バクテリアは多くは微好気性で、水圏環境に住むが、今回のデータで水の存在を示す証拠が弱いと思われる。特に水があるならば風化過程があるはずで、その最も普通の産物である粘土鉱物が全く共存しないのは奇異である。

以上、いろいろ否定的な疑問を多く提起したが、アイデア・仮説創出のような発想過程は自由であろうが、ある仮説・考えの検証過程では、多くの厳しい批判的見地に耐えてこそ事実は事実として、仮説は法則(真理)として定着するものであるから、やむをえない。それをもたない態度はおよそ科学的とはいえないだろう。

4. 生体鉱物とバイオミネラリゼーション

4.1 生体鉱物

生体鉱物の主要なものにカルシウム系(炭酸塩、磷酸塩)とシリカ系があるが、これ以外にも多様な生体鉱物があり、鉄系の鉱物もその一つである。これら鉄鉱物の生物にとっての意義としては、方向探知のセンサ(走磁性バクテリア)、その硬度の利用(ヒザラガイの歯舌)、また生体に必要な成分・養分としての鉄の保存、二価鉄の酸化によるエネルギー抽出とそれに関わる副産物等がある。走磁性バ

クテリアの磁鉄鉱(Fe_3O_4)はチェーン状に連結した特有の形態をもち、マグネトソーム(magnetosome)と呼ばれる。他にサケ、マグロなど海遊魚、ハト、ミツバチ、はては人間の脳で磁鉄鉱が最近見つかった。

4.2 バイオミネラリゼーションの2つのタイプ

生体鉱物の形成過程は一般的に、生物により誘導されるタイプ (biologically induced mineralization: BIM) と生物にコントロールされたタイプ (biologically controlled mineralization: BCM)の2つ[2]があり根本的に異なったタイプのバイオミネラリゼーションである。それぞれ細胞外(extracellular)、及び細胞内(intracellular)のタイプのバイオミネラリゼーションにほぼ対応する。前者はおもに鉄還元細菌、後者の代表が走磁性細菌である。

4.3 走磁性細菌と磁鉄鉱・鉄硫化鉱物

1975年にBlakemoreが最初に走磁性細菌を見だし[3]、磁鉄鉱を含むと確認された。これらの磁鉄鉱は特有の形態をしていて、チェーンをつくって連なっているのが特徴である。マグネトソ

ームと呼ばれる淡水及び海洋また土壤中からも発見され、いずれもべん毛をもっている。従来は酸素の存在下で、この細菌は生息すると考えられてきていたが、還元環境では、グリグ鉱(greigite Fe_3S_4)、磁硫鉄鉱(pyrrhotite, Fe_7S_8)などをつくるものが見いだされている。筆者のいる新潟大学の近く佐潟、福島潟、鳥屋野潟他で採集できた[4]。その写真を図2に示す。様々な形態のマグネトソームを持つものが混在している事がわかる。磁石を近づけるとS極方向に集まってくる、反対にN極では遠ざかる。地磁気の垂直成分、伏角にそって水面から水底方向へまたはその逆へと好ましい環境へと移動するとされている。だから北半球タイプと南半球タイプがあつて異なる半球にもってゆくと死んでしまうと言われていた。筆者らは南半球のオーストラリア、パース近郊の池で採取した細菌を新潟で飼育し数ヶ月後北半球型の泳ぎをするものに転換したことをみだしている。またこの走磁性細菌は堆積残留磁気のキャリア、生物における方向探知能力との関わり、さらに医学薬学工学への広い応用など様々な分野からの関心もたれている。

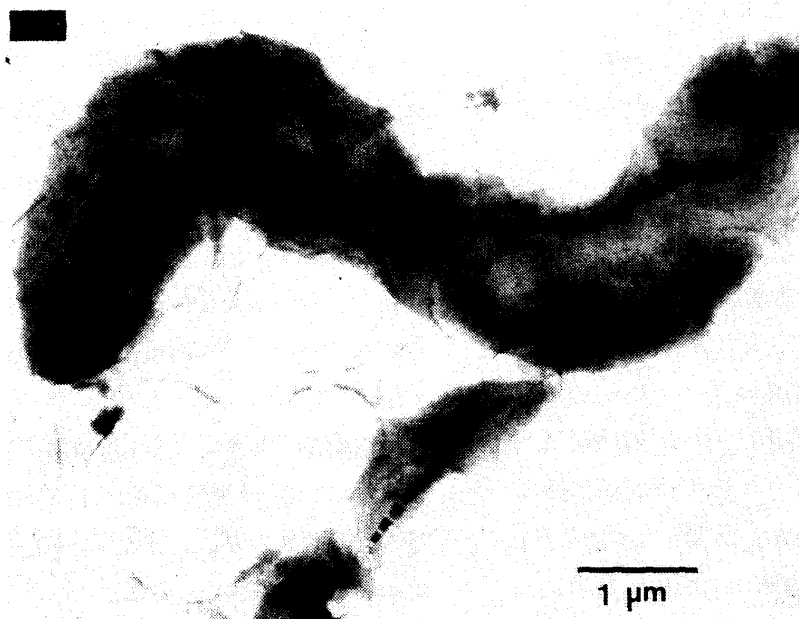


図2 福島潟産走磁性細菌とチェーン状の磁鉄鉱粒子 (マグネトソーム：六方稜柱型と八面体型)

4.4 マグネトソームの鉱物学

サイズ: このマグネトソームの特徴として、サイズ的には30-150nm程度であるがこれは磁氣的性質の点から言えば、単磁区(シングルドメイン)のサイズにあたり、磁氣的にもっとも効率的なサイズとなっている。

形態: 形態が特徴的で、涙滴形または砲弾形といわれるもの、六方稜柱状、及び八面体形(図3)のものが知られている[2, 4]。これらのうち涙滴型は無機的には形成されることは考えられないもので極めて特徴的である。今回の火星隕石産の磁鉄鉱もこの涙滴形ではないかとMcKayらは指摘しているが明瞭な写真は論文には示されていない。

組成: マグネトソームの組成はほぼ純粋な Fe_3O_4 で、ごくわずかのTiを含んだりあるいは含まなかったりするものが特徴である。これに対し、多くの堆積物中に含まれる碎屑性の磁鉄鉱は経験的には多くの場合かなりのTiを含む点で区別できることが多い。

構造と高分解能電顕像: いくつもの高分解能電顕像が撮られていて、乱れのない規則的構造をもっている。

ベシクル: 有機質のベシクル(小胞)がこのマグネトソームを薄く覆い、そのサイズおよびその種に特有な形態を直接的にコントロールしていると思われる。

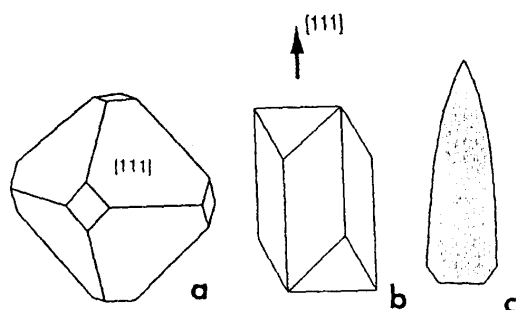


図3 マグネトソームの3形態 (a: 八面体型, b: 六方稜柱型, c: 涙滴型)の模式図

5. 地球でのマグネトフォッシルは どういう特徴をもつか: 火星隕石ALH84001中のマグネトソームらしいとされる磁鉄鉱との比較

5.1 磁鉄鉱化石

マグネトソームは固体物質であるため、生物の遺骸として化石になりやすい。マグネトソームが化石として見つかることはこれはマグネトフォッシルと言われ、例えばストロマトライト(プレカンブリアンの古い時代から更新世まで見つかる化石)のなかで、最も古いものは約20億年前のガンフリント縞状鉄鉱層から発見されている[5]。しかし、一般には無機起源のものとの区別基準が大切であり、経験的にはこれが時として難しい。例えば特徴的形態、サイズの分布、チェーン等の特徴的集合状態、組成的特徴、堆積場の特徴等が判別基準としてあげられる。

5.2 堆積物中のマグネトソーム

このマグネトフォッシルを実際に太平洋、日本海の堆積物中からさがすのはそれほど容易ではない[6]。磁鉄鉱が見つかったとしても単独では明瞭に同定できない場合も多い。図4に太平洋、日本海の堆積物中の磁鉄鉱を示す。図4aではすべてのグレインがバクテリア起源のものではない。こういう碎屑性粒子中では、粘土鉱物はじめ岩片、自生鉱物も混在している。バクテリア起源か否かについては総合的に判断することが重要である。例えば、結晶構造、組成、形態、サイズ、集合状態(とくにチェーンをなしているか)、出現頻度(稀な例か一般的か)、産状・産出の場の妥当性(全体として産出する場か否か; 火星環境は全くの未知である; 地球でも例えば海底堆積物なら存在してもよいのに、特殊条件下では見出せないこともある)、海底堆積物

なら多種粒子の混合物(Mckayらの論文の場合は無い;特に水圏ならば~粘土が必ず伴うと思われるが、これが無い。これほど静穏な堆積環境は不可能ではないか?, 特異な環境ではありうるか?), 生成後の変化, 等々が堆積性の場合を評価する基準となる。今回の試料はこれらの基準にてらすと, 論文には明瞭な形態の写真も示されず, チェイン状でもなく, 他の主要な鉱物との混合もなくマグネトソームらしくはない。つまりバクテリア起源をいう裏づけにはなっていないと考えられる。もし涙滴型の明瞭なもの, あるいはチェイン状集合形態でも発見されれば, どこのものかは別として(地球での汚染も含め), 事実としての意味はあろう

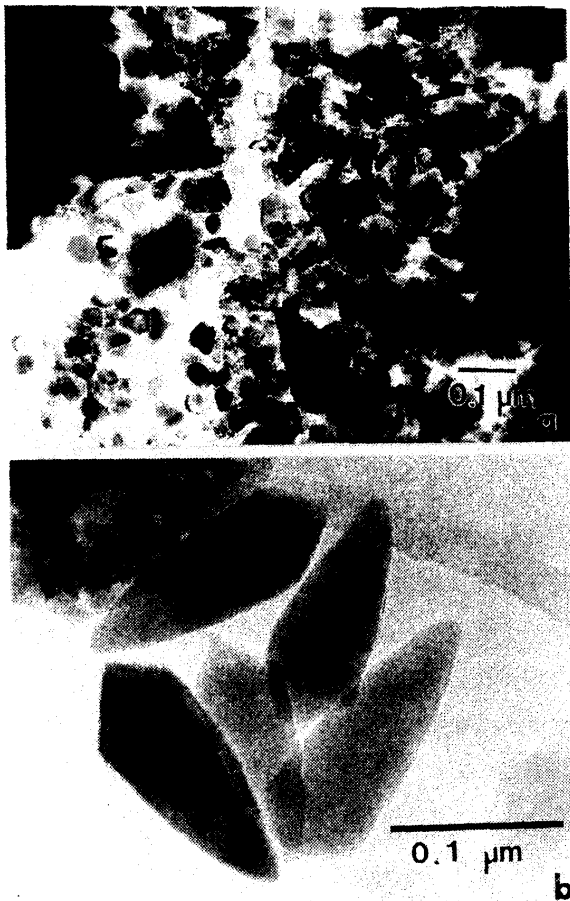


図4 a: 太平洋の海底堆積物中の磁性粒子と, b: 日本海海底堆積物中のマグネトソーム(涙滴型)

が, 今回のデータはこのような確実性が未だ無い段階である。

6. 他の可能性, 他に探索すべき試料

水圏環境での堆積・沈澱というより, 無機的過程の(あるいは部分的に生物が関与しているかもしれない)熱水性の脈である可能性の検討もALH84001を含めた火星試料については, 必要ではなかろうか? 筆者は最近新潟県の温泉性沈澱物に炭酸塩と鉄硫化物, 非晶質鉄水酸化鉱物が沈澱している例を見出した。これに似た過程があったのではないかという可能性も考えられる。とくに最初から磁鉄鉱であったのか, 別の鉄鉱物から磁鉄鉱へ変化したのかも検討課題であろう。詳細については別にのべる予定である。地球深部の生物が最近指摘されている。地下2 km以深の深さの岩石中からバクテリアが発見されている。火星でも生命が一度発生していたら, このような地下深部に逃げ込んでしばらくは生存していた可能性は大いにありそうである。

7. 炭素質コンドライト隕石中の不思議な構成物

ところで, 別な観点として, これを一つの隕石としてみた場合, 様々な隕石では対応する環境にはいまだ未解明の点が多い。最近, CI (CI) 炭素質コンドライトの母天体が火星との学会発表があったが, その真偽のほどは不明としても, CIコンドライトには有機物(多くのアミノ酸)・炭酸塩・磁鉄鉱の3点がそろっている。さらに以前からこのなかに, 生物が造ったのではないかという複雑な構造物が見出され[7], 宇宙生物か, と1960年代はじめに話題になったことがあった。CIコンドライトは46億年に生成しこれらは全く無機的に生成した

との一般的理解があるが、ではその構造物は何であるか、どうしてできたかの課題はなお残る。

8. 今後の課題

今後の方向として現在利用できる火星隕石でのクロスチェックが大切だろうし、将来、火星からの直接サンプリングが行われるなら、それに優ることはない。ただ今回の論文で、地球外生命への関心を喚起した意義、われわれの手がとどく物質的な根拠をもって火星の生命にせまろうという意図と意欲は評価できる。また、地球の深部のバクテリア活動も含めた地球の多様な場における生物と鉱物の相互作用、バイオミネラリゼーションの研究、及び隕石試料自体の基礎的検討等は、今回のような生命活動の痕跡探査の為に、また緑あふれ生命あふれる豊かな青い惑星、地球自体のより深い理解の為に、重要だろう。

参考文献

- [1] McKay, D. S., Gibson, E. K. Jr., Thomas-Keprta, K. L., Vali, H., Romanek, C. S., Clemett, S. J., Chillier, X. D. F., Maechiling, C. R., and Zare, R. N., 1996: Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001. *Science* **273**, 924-930.
- [2] Blakemore, R. P., and Blakemore, N. A., 1991: Magnetotactic magnetogens, in *Iron Biominerals* (Frankel, R. B., Blakemore, R. P., Eds). Plenum Press, New York, 51-67.
- [3] Blakemore, R. P., 1975: Magnetotactic Bacteria. *Science* **190**, 377-379.
- [4] Iida, A and Akai, J., 1996: TEM study on magnetotactic bacteria and contained magnetite grains as biogenic minerals mostly from Hokuriku-Niigata region, Japan, *Science Report of Niigata University, Ser. E No.11*, 43-66
- [5] Chang, S. R., Stolz, J. F., Kirschvink, J. L. and Awramik, S. M., 1989: Biogenic magnetite in Stromatolites. II. Occurrence in ancient sedimentary environments, *Precambrian Res.* **43**, 305-315.
- [6] Akai, J., Sato, T. and Okusa, S., 1991: TEM study on biogenic magnetite in deep sea sediments from the Japan Sea and the western Pacific Ocean *Journ. Electron Microsc.* **40**, 110-117.
- [7] Nagy, B., 1975: Carbonaceous meteorites. Elsevier Sci. Publ., Amsterdam. pp.730.