

特集 「火星生命存在の可能性」

Dr. D. McKayの講演要旨の和訳と総合解説

土山 明¹

1. はじめに

昨年の夏(1996年8月7日)NASAの記者会見がおこなわれ、火星隕石に微生物化石の証拠を発見したという発表がなされたのは、会員皆さんの記憶にも新しいことと思う。その詳細はMcKay et al. [1] によって報告された。そこでは、有機物 (PAHs) の発見とともに、carbonate globules と呼ばれる 100 μ m 程度の炭酸塩鉱物を主成分とするユニークな物質についての、鉱物学をはじめとする物質科学的な証拠が挙げられた。そこで、金沢大学での日本岩石鉱物鉱床学会・日本鉱物学会・資源地質学会平成8年度秋季連合学術会議(通称三鉱学会)において、9月26日に緊急シンポジウム「火星隕石生物発見？」が行われた。またこのシンポジウムの収録として、レビューが日本鉱物学会の英文誌に掲載予定である[2]。さらに、1997年地球惑星関連学会合同大会では、[1] の first author であるDavid McKay 博士も招待して、火星生命存在の可能性についてのシンポジウムが開催される予定である。ここでは、D. McKay 博士の合同大会シンポジウムでの講演要旨を和訳して紹介するとともに、[2] の内容について紹介し、総合解説に代えたい。なお[2] は、内容が物質科学(とくに鉱物学)や隕石学に偏っているが、筆者の研究分野を考慮して、お許し願いたい。

2. Dr. D. McKay の講演要旨の和訳

「火星における過去の生命の探索：

火星隕石にみられる生物活動の痕跡の可能性」

デイヴィッド・S. マッケイ

(NASAジョンソン宇宙センター)

1976年に火星に着陸した2台のヴァイキング宇宙船は、火星表面のサンプルを分析することにより過去の生命を見いだそうとしたが、生命の発見には至らなかった。一方、SNCサブグループに属する12個の隕石は、これらの隕石に閉じ込められた火星大気ガス、鉱物の化学組成、また隕石に特異な酸素同位体組成を総合して、火星からのサンプルを代表しているものとみなされてきた。このSNC隕石のひとつである ALH84001は、45億年の年代をもつことが示され、(a) 特異な鉱物組成と生体鉱物、(b) 珍しい炭素同位体組成、(c) 低温で形成された炭酸塩に伴う環状芳香族炭化水素、(d) ナノバクテリアあるいは微化石に特徴的な構造および形態、をもっている。これら個々の現象はそれぞれ別の解釈もできるが、総合的に判断すると、とくにこれらの空間的な相関も考慮すると、初期火星における原始的な生命の証拠を示すものであろうと結論される。

¹大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

3. 火星隕石

火星起源であると考えられている隕石が、現在12個知られている(表1)。これらは、それらの隕石グループ(シャーゴットイト:shergottites, ナクライト:nakhlites, シャシナイト:chassignite)の頭文字をとってSNC隕石と呼ばれている。しかし最近見いだされた隕石(例えば、今回問題のALH84001など)をすべてこの3種類に分類することは困難になっており、むしろ“火星隕石”と呼んだ方がよいという提案もなされている。これらSNC隕石あるいは火星隕石は、現在表2のように5種類の岩石タイプ[3]に分類されている。なお、火星隕石一般のレヴ

ューは[3]に詳しい。

これらの隕石が火星起源であるという証拠としては、次のものが挙げられる。(a) すべてマグマから結晶作用によって作られた火成岩であり、ALH84001を除き結晶化年代が極端に若い(144 Ma - 1.3 Ga)(表1)。大きな惑星(火星, 金星, 地球)でないかぎり火成活動はこのような時期まで続かない(水星では小さすぎる)。一方、金星からの隕石としての脱出は考えにくい。(b) 特異な3酸素同位体組成をもつ[4]。これにより、地球-月起源のものとの区別できる。(c) 多くのものは、火成岩の中でも集積岩の組織をもつ(表2)。これは、大きな重力場をもつ惑星で結晶作用がおこなわれたことを意味している。(d) 酸化的な条件下で形成された特

表1 火星隕石 (Mikouchi et al. [2] Table 1をもとにした)

隕石名	発見場所	回収年	重量	岩石タイプ*	結晶化年代	宇宙線照射年代
Shergotty	Sergotty, India	1865年(落下)	~5 kg	S-玄武岩	163 Ma	2.5 Ma
Zagami	Zagami, Nigeria	1962年(落下)	~18 kg	S-玄武岩	178-186 Ma	2.6 Ma
EETA79001	Elephant Moraine 南極	1980年(発見)	7.9 kg	S-玄武岩	172-177 Ma	0.6 Ma
QUE94201	Queen Alexandra Range 南極	1994年(発見)	12.0 g	S-玄武岩	144±23 Ma	2.4 Ma
ALH77005	Allan Hills 南極	1977年(発見)	482 g	S-レルゾライト	187 Ma	3.4 Ma
LEW88516	Lewis Cliff 南極	1988年(発見)	13.2 g	S-レルゾライト	—	3.6 Ma
Y793605	Yamato Mountains 南極	1979年(発見)	16 g	S-レルゾライト	—	—
Nakhla	Nakhla, Egypt	1911年(落下)	~40 kg	N-単斜輝石岩	1.3 Ga	10.3-10.7 Ma
Lafayette	Lafayette, Indiana, USA	1931年(発見)	~800 g	N-単斜輝石岩	1.3 Ga	10.3-10.7 Ma
Governador Valadares	Governador Valadares Brazil	1958年(発見)	158 g	N-単斜輝石岩	1.3 Ga	10.3-10.7 Ma
Chassigny	Chassigny, France	1815年(落下)	~4 kg	C-ダナイト	1.3 Ga	9.9 Ma
ALH84001	Allan Hills 南極	1984年(発見)	1939.9 g	斜方輝石岩	4.56 Ga	15 Ma

* S: Shergottites, N: Nakhlites, C: Chassignite(詳細は表2を参照)

徴 (Feが Fe^{2+} , Fe^{3+} として存在することなど)をもつ。(e) 含水鉱物が存在する。またこれらの隕石のもととなったマグマにも水が含まれていたと考えられている。(f) 強い衝撃の痕跡(マスケリナイトなど: 表2)がみられる。これは火星の重力場から脱出したことと調和的である。(g) 希ガスや CO_2 , N_2 のガス組成および希ガス同位体組成が火星大気と一致する。とくに, EET79001の衝撃ガラス中に封じ込められたガス組成は, ヴァイキング探査船によって測定された火星大気とに一致し, 火星起源であることを決定的に裏付けた。

以上のことより, SNC隕石が火星起源であることが, 一般的には認められている。

4. ALH84001の特徴

この隕石は他のSNC隕石と比べて大きく3つの特徴をもっている。即ち, (a) 単斜輝石岩であること, (b) 炭酸塩を多量に含むこと, (c) 4.5 Ga という

極端に古い結晶化年代をもつこと, である。

小惑星(おそらく4 Vesta)を起源とするHED (howardites-eucrites-diogenites)隕石のひとつであるdiogenitesは単斜輝石岩であり, このALH84001も始めはダイオジェナイト(diogenites)に分類されていた。しかしながら, 鉱物の化学組成がダイオジェナイトのものとは異なり(マスケリナイト化した斜長石がダイオジェナイト中のものと比べてNaに富む, またクロム鉄鉱が Fe^{3+} を含んでいるなど), また黄鉄鉱や炭酸塩をもっている。このため再検討がおこなわれ[5], 酸素同位体組成[4]からSNC隕石のメンバーのひとつであることが確認された。また, 希ガスなどの同位体組成も火星起源であることと調和的である。

ALH84001は2次鉱物として多量(~1 vol.%)の炭酸塩鉱物(1~250 μ mサイズ, Mg, Feに富む magnesite-siderite-ankerite)をもっている。これらは, 後に述べるように通常は水溶液から析出したものと考えられている。EETA79001にも少量の炭

表2 火星隕石の岩石タイプ(主として[3]による)

岩石タイプ	岩石組織	主要構成鉱物*	備考
S-玄武岩	ドレライト ¹⁾ ~ ハンレイ岩的	ピジョン輝石 普通輝石 斜長石(マスケリナイト ²⁾ 化)	
S-レルゾライト	集積岩 ³⁾	カンラン石 斜方輝石(包有物: クロム鉄鉱) 斜長石(マスケリナイト化)	Fe-Mg珪酸塩はS-玄武岩のものよりもMgに富む
N-単斜輝石岩	集積岩	Mgに富む普通輝石 Feに富むカンラン石(少量)	
C-ダナイト 斜方輝石岩	集積岩 集積岩	Feに富むカンラン石 Mgに富む斜方輝石	斜方輝石結晶は互いに約120°で交わる

1) ドレライト(dolerites)玄武岩組成の半深成岩。粗粒玄武岩とも呼ばれる。

2) マスケリナイト(maskelynite)斜長石が衝撃によって非晶質化されたもの。

3) 集積岩(cumulates)マグマ中で結晶した鉱物が密度差によって沈降し集積した岩石。

* この他に微量~少量の多くの鉱物を含む

炭酸塩が報告されているが、サイズも小さく($\leq 10\mu\text{m}$), 化学組成も異なる(Caに富むcalcite)。

岩石組織の解析からは、ALH84001が(i) マグマからの結晶作用、(ii) 1回目の衝撃変成、(iii) 熱変成、(iv) 低温での変成(炭酸塩、黄鉄鉱などの形成)、(v) 2回目の衝撃変成、という履歴をもっていると考えられている[6]。4.5 Gaの結晶化年代(Sm-Nd, Rb-Sr法)は(i)に対応し、その後火星表面で複数回の衝撃などを受けてきたものと考えられる。衝撃年代としては、3-4 Ga程度の年代が複数の測定法(Ar-Ar, K-Ar, Rb-Sr法)で報告されているが、0.76-1.28 GPaという若い年代(K-Ar法)も報告されている。一方、隕石が宇宙空間を漂っていた時間を示すと考えられる宇宙線照射年代も15 Maと、他のSNC隕石のものとは異なる(シャーゴットタイトの多くは3 Ma付近に集中し、またナクライトとシャシナイトは10 Ma付近に集中している:表1)。このことは、ALH84001が火星から放出された出来事は、他のSNC隕石とは別のものであることを示唆している。また落下年代(^{14}C)は6000-13000年を示す。炭酸塩の生成年代については、後に触れる。

5. Carbonate Grobules と微化石?の特徴

5.1 炭酸塩の存在

炭酸塩は最大約 $250\mu\text{m}$ の円盤状で、隕石の割れめや空隙に存在しており、carbonate grobules と呼ばれている([1]のFig.1)。その炭素、酸素同位体組成[7]や、衝撃により寸断されていることなどから、このcarbonate grobulesは隕石の落下後地上で生成されたものでないことは確かであろう。一方、この炭酸塩は中心から周縁に向かって複雑な組成変化を示すことが知られている[1](Ca, Mnに富む中心部につづきFeあるいはMgに富むゾーンが繰り返す、またFeやSに富むバンドが存在する:[1]のFig.3)。

このcarbonate grobulesの成因として、(a) 低温($0-80^\circ\text{C}$)の水溶液からの沈殿[7]と、(b) 衝撃にともなう高温の CO_2 に富む流体($\geq 650^\circ\text{C}$)と周囲の岩石との反応[8]という相反する2説が提出された。前者は酸素同位体平衡($\delta^{18}\text{O}$)をもとに主張されており、炭素同位体組成($\delta^{13}\text{C}$)とも調和的である。一方、後者は炭酸塩の主要元素組成をもとにしたものであり、酸素や炭素の同位体組成は衝撃時には非平衡であったとしている。ALH84001に含水鉱物が存在しないことも、(b)の説と調和的である。一方、McKayら[1]は、炭酸塩は生物起源であり、(b)の説のように炭酸塩の主要元素組成を地質温度計としては使えないと主張した。

炭酸塩の生成年代については、問題がある。McKayら[1]が引用した3.6 Gaという年代(Ar-Ar法)は、原著ではpreliminaryであると述べられており、また炭酸塩でなくマスケリナイトの生成年代(従って衝撃年代)ではないかという指摘もある。最近では 1.39 ± 0.10 Gaという年代(Rb-Sr法)も提唱されている[8]。もしこれが正しいとすると、生命活動の可能性も13.9億年前以降ということになり、火星の環境の変遷、また生命の発生と進化の可能性を議論する上で、大きな意味をもつ。

5.2 特異な鉱物の組み合わせ(磁鉄鉱-硫化鉄-炭酸塩)

Carbonate grobules内には、磁鉄鉱(Fe_3O_4)-硫化鉄(磁硫鉄鉱 Fe_{1-x}S ;とおそらくグレイジャイト Fe_3S_4)-炭酸塩($(\text{Mg,Fe,Ca})\text{CO}_3$)の鉱物組み合わせが存在することが、透過型顕微鏡(TEM)による研究でわかった[1]。一般には磁鉄鉱はやや酸化的な、一方磁硫鉄鉱などの硫化鉄は還元的な条件で生成される。McKayら[1]は、これらの鉱物組み合わせは無機的にも生成されうるが困難で、生物起源と考える方がより説明しやすいと主張した。確かに、これまでに知られているこれらの鉱物の安定関係

[9]からは、これら3つの鉱物が安定に共存するためには、ややアルカリ性で強度に還元的な水溶液の条件、低い酸素および硫黄のガス分圧と高いCO₂分圧を必要としており、pH-EH-分圧の範囲はかなり限定されるようである。しかしながら、上記の安定条件は地球の表層環境(1気圧, 25℃)について推定されているものであり、火星環境(低温あるいは高温)についての安定条件については、改めて議論する必要がある。また、[1]では磁鉄鉱-硫化鉄が炭酸塩を溶解して置き換えており、このような炭酸塩が不安定になる条件は無機的には説明困難であるとしているが、必ずしも炭酸塩が溶解したとは断定できない。

ALH84001には環状芳香族炭化水素(PAHs)が見いだされ、生物活動の可能性についての大きな証拠のひとつとなった[1]。一方、有機物が100-200℃で脱水素反応によって、U⁶⁺のような重金属を還元してより原子価の低いU(+5,+4)を含む鉱物を生成することが実験的に確かめられている[10]。ALH84001においても、PAHsの脱水素反応によってFe³⁺が還元され、複合原子価状態(Fe²⁺, Fe³⁺)を示す硫化鉄と磁鉄鉱の組み合わせが生成される可能性があると考えられる。従って、生物の直接関与しない、このような有機物-無機物相互作用により、特異な鉱物の組み合わせの説明が可能かもしれない。

5.3 生体鉱物学からの検討

(1) マグネトソーム

Carbonate globules 中にみられる磁鉄鉱は微細(10-100nm)で欠陥のない単結晶として存在している[1]。McKayら[1]は、このような化学組成、構造、形態の特徴が、走磁性バクテリアによってつくられたものと類似していることを指摘した。また微細な硫化鉄も、地球上の硫黄に富む環境において走磁性バクテリアによってつくられることが知ら

れている。

走磁性バクテリアの発見は比較的新しく、マグネトソームと呼ばれる磁性鉱物体(通常は磁鉄鉱)をセンサーに用いて泳ぐことが知られている。一般には、生体鉱物化作用は、生物によって制御され鉱物が形成される BCM (biologically controlled mineralization) と、生物活動の副産物としての BIM (biologically induced mineralization) とに分けられる。マグネトソームの生成はBCMに属し、マグネトソーム自身特徴的な構造・形態を有している。すなわち、一般には単一磁区サイズ(30-150 nm)で、八面体、六角柱状、あるいは涙形の形態をもち、これらが鎖状に並んでいる[11]。涙形の形態をもつ磁鉄鉱結晶は無機的には作りにくい。McKayら[1]にも涙形の形態の記載はあるが、詳細は不明である。一方、鎖状の配列は認められていない。

BCMに分類されるような生物活動をもつ走磁性バクテリアは、バクテリアの進化の結果として2.0 Ga 頃始めて地球上に姿を現したと考えられている。もし、carbonate globules の生成年代が3.6 Ga であるとする、火星上での進化の方が早かったことになる。また、マグネトソームが磁性センサーとして有効に働くような磁場を、少なくとも現在の火星はもたないことも問題である。さらに、地球において堆積物中からバクテリア起源の磁鉄鉱を探すことは、他の碎屑性の鉱物や粘土鉱物が存在するので、極めて困難な作業である。ALH84001のように、極めて純粋に近い磁鉄鉱-硫化鉄-炭酸塩が存在していることは稀である。

(2) 微化石類似の構造

McKayら[1]によって示された火星生命のもう一つの証拠は、高分解能走査型電子顕微鏡に(SEM)よってcarbonate globules 表面上に見いだされた、20-100nmサイズの卵形~チューブ状のバクテリア微化石類似の構造である([1]のFig.6)。これらがど

のような物質からなるかは、小さすぎて残念ながらSEMではわからない。細菌は通常1000 nm程度のサイズをもつが、20-200 nmサイズのナノ細菌の存在も指摘されている[12]。但し、これらは小さいので、ナノ細菌であることを示すのは一般には困難である。

Folk [12] は細菌が存在したとことを示す基準として、次の5つを挙げている。(a) 体がクラスターを作っていること、(b) ナノ細菌も含めて、生きている細菌と同サイズの体をもつこと、(c) 生きている細菌と類似の形態をもつこと、(d) 体にFeを含まないこと、(e) 体が鉱物や人工物と混同されてはならないこと。微化石類似の構造は(d)を除いて当てはまる。また、上記の基準ではマグネトソームについては考慮されていないので、(d)は除外して考えて良い。また、[1]の写真に類似した、細菌微化石集合体が押し潰されているような構造も、地球上のもので知られている。

以上のように、微化石類似の構造はFolkの基準と矛盾はしないが、形のみから生物-非生物の起源を一意的に決めることはできないことはいまでもない。1960年代に炭素質コンドライト中の微化石類似構造が議論されたことがあったが、やがてそれらは非生物起源であることが結論づけられた[13]：“火星の運河”を見ている可能性もあることを念頭に置く必要がある。

6. まとめ

以上述べたように、ALH84001が他の11個のSNC隕石とともに火星起源のものであることは、ほとんど疑いのないものである。また、carbonate globules とその中に含まれる微細な磁鉄鉱-硫化鉄粒子が火星で生成されたことも、ほぼ確実なようである(但しその生成年代については、3.6 - 1.39

Ga と大きく幅があり、まだよくわかっていない)。一方、過去の火星における原始的な生命の存在については、多くの問題がある。McKayら[1]は、個々の証拠はそれぞれ別の解釈もできるが、総合的に判断すると、生物起源であると結論した。しかしながら、鉱物学的あるいは生体鉱物学的な証拠は、すでに述べたように必ずしも生物起源を積極的に示唆するものだけではなく、むしろ否定的な要素も多いと言わざるを得ない。

火星隕石であるALH84001に有機物が発見されたことは、他の火星隕石や月隕石にはない大きな成果である。Pillingerらのグループにより、ALH84001と同様に炭酸塩をもつEETA79001(玄武岩質シャープゴットイト)にも、1000ppmに及ぶ有機物が発見されたという新聞発表(1996年11月1日付)がなされた。これは、このグループの以前の研究[14]をもとにしているが、その詳細は不明である。この隕石の結晶化年代と宇宙線照射年代はそれぞれ 180 Ma および 0.6 Ma であり、このことから現在の火星でも生命が存在する可能性も指摘されている。

一方、炭素質コンドライト隕石は、PAHsを始めとする有機物を多く含んでいる。しかしながらこれらの有機物は旋光性を示さないことなどから、非生物起源であると考えられている。また、とくにCI, CMコンドライトには、そのマトリックスに磁鉄鉱、磁硫鉄鉱、炭酸塩が存在しており、有機物と鉱物の組み合わせは、carbonate globules と極めて類似している。また、ALH84001に見いだされたPAHsは、CM2コンドライトに含まれるものとおおまかには類似している[1]。さらにALH84001のもつ大きな $\delta^{13}C$ の正の値も、CM2コンドライトのものと類似している。火星に落下したCM2あるいはCM2類似の隕石が、今回のPAHsおよびcarbonate globulesの起源とはなりえないであろうか? 今後、炭素質コンドライトとのより詳細な比較も必要であろう。

これまで、火星生命について、どちらかといえど否定的な批判を多く挙げてきた。しかしながら、現状では火星生命の存在を完全に肯定できないのと同様に、完全に否定することも勿論できない。個々の研究者の考え方(希望も含めて)は、どちらにより偏っているかという程度の差こそあれ、この肯定と否定の間にあるものと思われる。

今後鉱物の分野では、ALH84001のcarbonate globulesだけでなく、EETA79001などについて、炭酸塩やその中に含まれる鉱物についての、より詳細な研究が必要である。Carbonate globulesに隣接してアパタイトが記載されているが[1]、アパタイトはPを含む生体鉱物のひとつであり、その存在がどのような意味をもつかも興味深い(但し、アパタイトは他のSNC隕石にも含まれており、その起源の議論には困難を伴う)。また有機物-無機物相互作用も含めた火星環境での安定関係についての実験や、このときの実験生成物と天然物との比較も重要である。一方、火星生命と関連した探査は、(a) 南極での新しい火星隕石の探査と、(b) 宇宙船による火星探査とに分けられる。現在知られている隕石には、火星隕石の候補はもうないようである。極地研究所は1998年と1999年に南極で新たな隕石探査を計画している。しかしながら、火星隕石の個数が隕石全体のおおよそ1/1000であることを考えると、南極で新しい火星隕石が発見され、さらにその隕石に炭酸塩や有機物が含まれている確率は、かなり小さい。やはり火星へ探査船を送る方が、生命探査としては直接的でもあり、効果的であると思われる。有人探査船を送ることが当面できないとすると、サンプルリターンが必要不可欠である。日本でも、小天体へのサンプルリターン計画であるMUSES-Cの後、あるいはこれと平行して、火星へのサンプルリターン計画を是非検討すべきである。

参考文献

- [1] McKay, D. S., Gibson, E. K. Jr., Thomas-Keperta, K. L., Vali, H., Romanek, C. S., Clemett, S. J., Chilliier, X. D. F., Maechling 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] Mikouchi, T., Tsuchiyama, A., Akai, J., Nakashima, S., Tazaki, K., Itaya, T., and Yanai, K. (1997) Mineralogical consideration on possible microfossils in martian meteorite ALH84001. *Min. Jour.*, in press.
- [3] McSween, H. Y. Jr., 1994: What we have learned about Mars from SNC meteorites. *Meteoritics* **29**, 757-779.
- [4] Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 1996: Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **60**, 1999-2018.
- [5] Mittlefehldt, D.W., 1994: ALH84001, a cumulate orthopyroxenite member of the martian meteorite clan. *Meteoritics* **29**, 214-221.
- [6] Treiman, A. H., 1995: A petrographic history of martian meteorite ALH84001: Two shocks and ancient age. *Meteoritics* **30**, 294-302.
- [7] Romanek, C. S., Grady, M. M., Wright, I. P., Mittlefehldt, D. W., Socki, R. A., Pillinger, C. T. and GIBSON, E. K. JR., 1994: Hydrothermal activity on Mars: The record from ALH84001. *Nature* **372**, 655-656.
- [8] Harvey, R. P. and McSween, H. Y. JR., 1996: A possible high-temperature origin for the carbonates in the martian meteorite ALH84001. *Nature* **382**, 49-51.
- [9] Garrels, R. M. and Christ, C. L., 1965:

- Solutions, minerals and equilibria. Freeman, Cooper and Co., San Fransico, pp. 450.
- [10] Nakashima, S., 1992: Kinetics and thermodynamics of uranium reduction by natural and simple organic matter. *Organic Geochem.* **19**, 421-430.
- [11] Iida, A. and Akai, J., 1996: TEM study on magnetotactic bacteria and contained magnetite grains as biogenic minerals mostly from Hokuriku-Niigata region, Japan. *Sci. Report of Niigata University*, Ser. E, No. 11, 43-66
- [12] Folk, R. L., 1993: SEM imaging of bacteria and nanobacteria in carbonate sediments and rocks. *J. Sediment. Petrol.* **63**, 990-999.
- [13] Nagy, B., 1975: Microstructures in carbonaceous meteorites. in *Carbonaceous meteorites*, Elsevier Sci. Pub., Amsterdam, 611- 692.
- [14] Wright, I. P., Grady, M. M. and Pillinger, C. T., 1989: Organic materials in a martian meteorite. *Nature* **340**, 220-222.