

火星探査機マーズパスファインダーの打ち上げ見学記

小松吾郎 Goro Komatsu

運良く、アメリカの火星探査機マーズパスファインダーの打ち上げに招待された。金星の研究をしている友人を伴って、11月28日の感謝祭の夜、夜行便の飛行機でフロリダのオーランドに向かった。これは私にとって初めてのロケット打ち上げを見る機会である。打ち上げまで数日あったので、国定海岸やディズニーワールドなどに行き、楽しく過ごした。ケネディ宇宙基地では、ツアーに参加してスペースシャトルの打ち上げ場などを見て回った。さすがに、宇宙への最前線という感じ、本物という感じである。ここで他の友人たちと合流した。火星探査とパスファインダー関係の会議やパーティに参加して、打ち上げを待った。皆、楽しみと、ほんの少しの心配があるようである。

夜、モーターでテレビを見てみると、スペースシャトルのハッチが開かず、宇宙遊泳ができないとのこと。今回の飛行には、アリゾナ大学出身で私も面識のあるトム・ジョーンズ宇宙飛行士も乗り組んでいる。トムが一生懸命ハッチを開けようと悪戦苦闘しているのをテレビで見て、頑張れと祈ったがだめだった。後で聞くと、どこからかはずれたボルトがはさまっていたためだそうである。あらためて、品質管理の大切さを感じた。10月には、ロシアの火星探査機マーズ96の打ち上げが失敗している。マーズ96の関係者から聞いた話によると、プロトン打ち上げロケットの最終段を担当した技術者たちは、ロシアの振るわない経済のもと、打ち上げの1カ月前まで満身に給料を払ってもらっていなかったらしい。やはり夢だけ食べているわけにはいかないのであろう。マーズ96の失敗は残念だ。マーズ96には、他の火星探査機にはない機器が多数搭載されていた。マーズ96に直接関与していた人々を多数知っているだけに、彼らの心情を察して余りある。人生、なにをするにしても、失敗はつきもの。宇宙探査も例外ではない。大事なのは、そこから学ぶことである。マーズ96の関係者達は早くも、新しく探査機を打ち上げることを議論している。私も応援したい。

さて、パスファインダーのロケットはデルタIIなので、ケネディ基地ではなく、隣の軍のカナベラル基地で打ち上げが行われる。午前2時の打ち上げなので、12時頃基地に着いたが、まだ入れてはもらえない。そこで、基地の手前のバーに入った。軍関係者やそばの港の船員ご用達のバーらしいが、ママさんがビキニを着て客の応対をしているのが、妙にフロリダらしく変だった。打ち上げを見る場所はロケットから約3マイルの地点であり、スタンドが据えてある。そばにはスナックを売る“軍”の車もやってきてまるで野球かなにかの観戦である。スポットライトに照らされたデルタIIの姿が貴婦人のように美しい。ところが、点火93秒前にコンピューターのソフトウエアの同調ミスで、打ち上げがキャンセルされた。その前の日は天候の都合で打ち上げ延

期があったので、2回目である。我々のような招待客の多くはフロリダ州外から来ているので、これ以上滞在できない人が多い。私の友人のほとんどがその日の朝フロリダをたった。私はもう一日だけ待ってみることにした。

今夜は、雲一つない快晴。満天の星ぼしが美しい。夜半には、月も火星も上がってきて役者は皆そろった。12月4日、午前2時。今度はすべてが順調だった。カウントダウンが進むにつれて拍手がおこる。私もワクワクしてきた。点火の瞬間、空の3分の1が輝き、轟音とともにロケットが飛び出した。夜空を焦がして突き進むロケットは、私が数々のSF小説でイメージしたとおりで、感動の嵐だった。デルタロケットでこんなにすごい。はるかに大きかったアポロのサターンVの夜間打ち上げは、いったいどんなであっただろう。打ち上げ後、補助ロケットが分離され、光の点に見えるロケットが離れていく。たまたま私の座っている位置、ロケット、そして火星の位置のため、ロケットがあたかも火星の方向に向かっているように見えた。

打ち上げを見た後は、フロリダのエバグレードやビスケーン国立公園、そして前から行きたかったキーウエストなどを訪れることができた。フロリダの海岸線は保護されている場所を除き、ホテルやコンドミニウムが建ち並び、メキシコのほんとに何も無い海辺を見慣れた目には、がっかりさせられた。フロリダには、全米各地から毎日800人もの人間が移り住んできているそうである。

火星には、すでにグローバルサーバイヤーも向かっているし、日本のPlanet-Bももうすぐ飛ぶ。火星隕石からは、太古の生命の可能性が示唆された。火星の研究はこれからいよいよおもしろくなっていくであろう。

(アリゾナ大学惑星科学部)

火星隕石 (ALH84001) とバクテリア起源の磁鉄鉱・磁硫鉄鉱

赤井 純治 Junji Akai

はじめに

昨年、筆者が万国地質学会議 (IGC) で北京にいた8月に、“火星隕石から生命活動の痕跡か” というMcKayらの発表が、世界に大きなニュースとして報じられた。これはIGCの日報のニュースでも紹介された。これまで筆者は電顕鉱物学の応用として、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 (このなかで、非南極産のものには見られなかったC1、C2炭素質隕石のフィロシリケートが熱変成を受けている例を見出した。この詳細とその意義については、別に紹介する機会もあるかもしれない)、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うつりつつあるところであった (表1)。北京の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ので、私も一言コメントしてみたいと考える。

ここでは、データを中心に、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中心に評価してみたい。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、今回のMcKayら(1996)の論文にあるデータだけでは、走磁性バクテリア起源と

は明言できないと私は判断する。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、物的証拠として確認されれば、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。では今後どのようなところで探索する価値があるだろうか、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（他惑星の石からの示唆）として役立つことになる。これらのことについて、私の考えるところを述べてみる。

McKayらの論拠と全体についての論点

McKayら(1996)の論文の論拠はさまざまところで紹介されているが、要約すると以下のようない点にある。1) この隕石は火星起源である。2) 割れ目があり、そのなかに36億年前の年代データをもつ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4種のPAH（多環式芳香族炭化水素）が検出される。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。

McKayら（1996）の論文全体の専門領域にわたって、筆者は論評できる力量をもちあわせていないので、主に鉄鉱物についてのコメントとしたいが、基本的視点として、これらの資試料・全データをどう総合的にみるかについても、隕石をしらべてきた経験等から簡単に触れる。

- 隕石そのものが火星起源かどうかということ。これについては確からしいと大部分の研究者が判断している。
- 南極での汚染について。極地域で風雪にさらされること自体、風化過程であり、また汚染をうけるおそれは充分にある点の検討が必要であろう。極寒の世界に住むバクテリアもいる。有機物が隕石内部にむかって増加するというが、データはほんの1.2mmまでの内部である。なぜもっと内部まで調べないのか？そもそも熔融皮膜部分は緻密で有機物など浸み込みにくいと思われる。
- 火星の歴史と特質にてらしての判断が重要で、地球的基準ですべてを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。
- そういう前提にたって、地球の走磁性バクテリアは、約20億年前にバクテリア進化のなかで出現したと考えられているが、論文での36億年前というALH84001の炭酸塩の年代であつたら、

表1 主な鉄質生体鉱物

鉄水酸化鉱物	ferrihydrite	$5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
	goethite	$\alpha\text{-FeOOH}$
	lepidocrocite	$\gamma\text{-FeOOH}$
	amorphous	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
鉄酸化鉱物	magnetite	Fe_3O_4
	maghemite	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
鉄硫化鉱物	pyrite	FeS_2
	greigite	Fe_3S_4
	pyrrhotite	Fe_{1-x}S
	hydrotroilite:	colloidal hydrous ferrous sulfide (?)
鉄炭酸塩及び硫酸塩鉱物	siderite	FeCO_3
	vivianite	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$
	ferric hydrous phosphate	$\text{FePO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

走磁性バクテリアあるいは類似の鉄鉱物を（後述の制御型のバイオミネラリゼーションで）つくるバクテリアまで、進化するのに時間が足りなかったのではないかと考えられる。●また火星の磁気は現在ほとんど無いが、過去にあったのか？ 走磁性バクテリアでなくて磁性は不必要な生物・バクテリアに由来しうるのか？●地球では、非晶質水酸化鉄はいたるところで見られるが、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。●また、現在の走磁性バクテリアの多くは微好気性で、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。特に水があるならば風化過程があるはずで、その最もふつう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。それとも地球とは全く異なった環境を前提にしうるのか？などの疑問がある。

以上、多くの疑問を提出してみたが、現実のデータを厳格にみるというのは科学の方法であり、これを曲げるわけにはいかない。つねに科学の検証過程は、厳しく批判的である。この批判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のだから。

走磁性バクテリアと磁鉄鉱・鉄硫化鉱物

生体鉱物を作る過程のバイオミネラリゼーションには、一般に2つのタイプ、制御型のBCM（Biologically Controlled Mineralization）と誘導型のBIM（Biologically Induced Mineralization）がある。走磁性バクテリア中の磁鉄鉱はマグネトソームとよばれ、きわめてよく制御された形態にコントロールして形態がつくられているBCMの産物であり、かなり高度に進化したバクテリアのように推定される¹⁾。

Blakemoreは1975年に走磁性バクテリアを見だし、磁鉄鉱を含むことを確認した²⁾。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。これはマグネトソームとよばれ、淡水および海洋または土壤中からも発見される。従来は、酸素の存在下でこのバクテリアは生息すると考えられてきたが、還元環境では、グリグ鉱（greigite Fe_3S_4 ）、磁硫鉄鉱（pyrrhotite, Fe_7S_8 ）などをつくることを見いだされている。磁石を近づけるとS極方向に集まってくるが、反対にN極では遠ざかる。地磁気の垂直成分である伏角にそって、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って、異なる半球にもってゆくと死んでしまうと言われている。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バクテリアを新潟で飼育し、数ヶ月後に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³⁾。またこのマグネトソームの鉱物学についても、その構造、組成、形態、サイズ、サイズ分布、集合状態等が詳しくわかっている^{3, 4)}。さらに、進化のなかでの位置づけとして、地球の大気および海洋の起源とその変化、特に酸素濃度の変化にもきわめて深く関わっているという点が指摘できる⁵⁾。

堆積性のマグネトフォッシルでありうるか？

この磁鉄鉱が化石になったものをマグネトフォッシルというが、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。磁鉄鉱がみつかったとしても、単独では明瞭に同定できない場合も多い。こういう碎屑性粒子中では、粘土鉱物はじめ岩片、自生鉱物が混在している⁶⁾。判定するポイントは、ここでも総合的判断が重要である。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どうか）、出現頻度（稀な例か一般的か）、産状・産

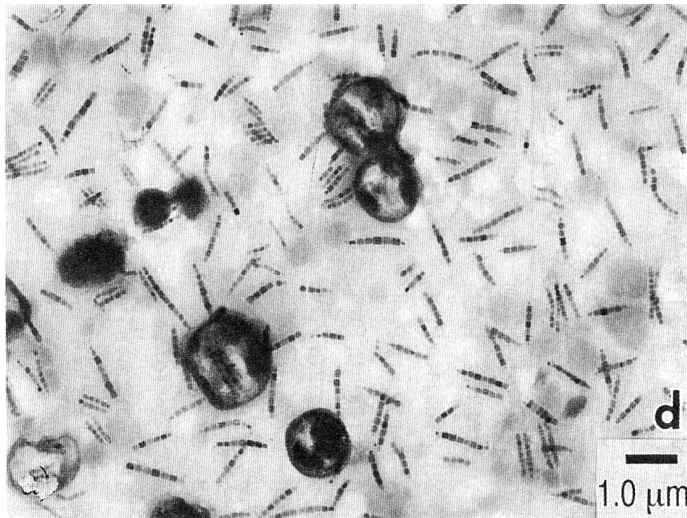


図1 邑知渦産走磁性バクテリアの磁鉄鉱チェーン（マグネトソーム）。（Iida & Akai, 1996）

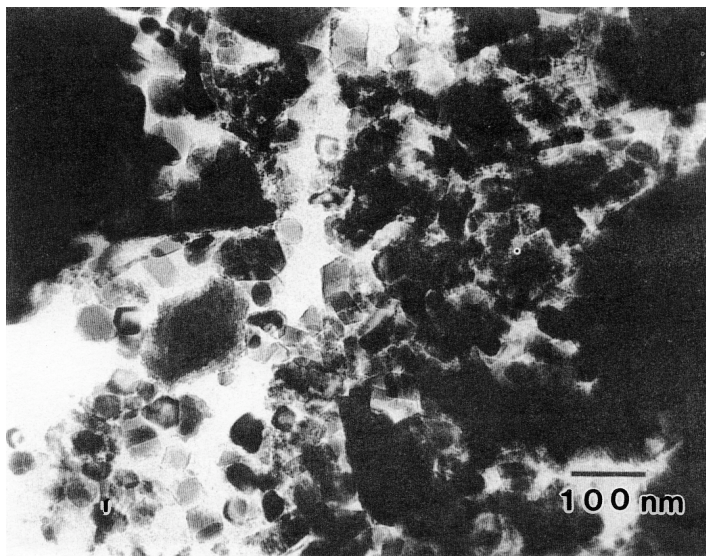


図2 深海底堆積物（太平洋、メラネシア）中の磁鉄鉱物を主に集めたもの。砕屑性およびバクテリア磁鉄鉱、粘土鉱物他の集合体。

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環境である；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（MaKayの論文の場合はこれが無い。特に水圏ならば必ず粘土が伴うと思われるが、それが無い。これほど静穏な堆積環境は可能なのか？）、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としても、論文には明瞭な形態の写真も示されず、チェーン状でもなく、他鉱物との混合もなく、その他上に触れた点を考慮しても、可能性を完全には否定しえないものの、現在のところマグネトソームと確定的には言えないと考える。すなわちバクテリア起源というには、このデータだけでは無理があるように

思われる。もし涙滴型の明瞭なもの、あるいはチェーン状集合形でも発見されれば、どこのものは別として（地球での汚染も含め）、事実としての意味はあろうが、今回のデータはこのような確実性がまだ無い。ただこれも、あくまで地球の知識を前提とした判断ではある。

他の可能性の検討

ふつうの水圏環境での堆積・沈澱というよりも、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。また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、検討課題であろうと思っている。

また、地球深部のバクテリアの存在の可能性が最近指摘されている^{7, 8)}。火星で、もし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があるかもしれない。そういう場でのバイオミネラリゼーションを、地球の例でも、もっと究明する必要がある。そういう視点からの探索が今後の鍵になるように思う。

隕石にみられる多様な組織・不思議な構造体

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、さまざまな種類の隕石、特に炭素質コンドライト等では、対応する環境にまだまだ未解明の点が多い。最近、CI (C1) 炭素質コンドライトの母天体が火星であるとの学会発表⁹⁾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、今回話題の中心となっている有機物・炭酸塩・磁鉄鉱の3点がそろっている。さらに以前からCIコンドライトのなかに、生物がつくったのではないかという複雑な構造物が見出され、1960年代初めに宇宙生物ではないかと、一時話題になったことがあった。それらはほとんど、地球の先カンブリア代あるいは古生代の化石にそっくりなこともある。CIコンドライトは46億年前に生成し、これらは無機的に生成したとの一般的理解があるが、ではその構造物はどうしてできたのか、との課題はなお残るし、無機的にも多様な形態の構造物ができてしまうことを意味しているかもしれない。形だけにたよった判断が先行するのはどうか、と考えざるをえない点を提起しているように思う。

今後の検討課題と期待

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、これにまさるものはないであろう。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、およ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ために、また生命あふれる豊かな青い惑星、地球のより深い理解のためにも、地球環境の未来予測のためにも重要だろう。

文 献

- 1) Blakemore, R.P., and Blakemore, N.A., 1991: Magnetotactic magnetogens. In Frankel, R.B., Blakemore, R.P., ed. Iron Biominerals. New York, Plenum Press, 51-67.
- 2) Blakemore, R. P., 1975: Magnetotactic Bacteria. *Science* **190**: 377-379
- 3) 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.
- 4) 赤井純治、1993: バクテリア起源磁鉄鉱の電子顕微鏡鉱物学的研究 *電子顕微鏡* **27**, 225-234.
- 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) Fyfe, W.S. (1996): The biosphere is going deep. *Science* **273**, 448.
- 8) James, K. Fredrickson and Tullis C. Onstott (1996) *Microbes Deep inside Earth. Scientific American* **275**, 42-47.
- 9) Brandenburg, J.E. (1996): Mars as the parent body of the CI carbonaceous chondrites: A further examination. *Meteoritics and Planetary Science*, 31, Supplement, A19-A20.

(新潟大学理学部地質科学教室)

論文紹介

火星生命痕跡発見の報に関する議論

"Evaluating the evidence for past life on Mars." Science 274, 2119-2125, 1996 (6 articles)

昨夏世界を驚かせたMcKayらの火星生命のScience論文について、コメント集が掲載された。その6つの記事からなる反論・再反論を紹介する。識者の論調は、生命の痕跡と断言するには否定的である。生命活動は触媒の多い非平衡な化学反応と捉えられ、物理化学的に常識から外れた痕跡をしばしば示す。そのため、説明できないことを安易に生命活動のせいにしてしまう傾向があり、この手の論争は議論が噛み合わないケースが多い。McKayらの論文は大発見というよりも、火星のもつ潜在的な面白さを世界に宣伝したという意味で評価すべきだろう。

McKay, D.S. et al. Science 273, 924 (1996)の骨子

- ①炭素同位体組成 $\delta^{13}\text{C}$ が、火星と同じだろう地球の値よりも軽くなっている（軽くするメカニズムは生命活動以外は顕著でない）。
- ②有機物の一種である芳香族炭化水素（PAHs）が存在し、かつ地球起源の汚染ではない。
- ③化学的に共存できない鉱物（固溶体を作らない鉄炭酸塩とマグネシウム炭酸塩、酸化環境を示す磁鉄鉱&炭酸塩溶解痕と還元環境を示す硫化鉄）が存在している。
- ④細長い生物化石痕、地球生物起源のものに酷似した炭酸塩粒子が見られる。

●反論：Edward Anders

②は無機的に生成する例がある（Fischer-Tropsch触媒反応）うえに、検出された種類が少ないので根拠にならない。炭酸塩粒子との共存から同一起源とされるが、吸着能が大きいので沈積時に無関係のものを掃き集めてきた可能性を否定できない。③については無機過程で生成可能である。溶解度積からはこの炭酸塩の組み合わせも不可能ではなく、炭酸塩が硫化鉄の防殻となれば磁鉄鉱とも共存可能である。それほど強い酸化環境になくとも炭酸塩が溶解する例は地球の雨水が作るカルスト地形にみられる。④についても、形だけからでは形成機構を特定できず、かつ各種非生物起源のものとの比較検討が不十分である。

▲再反論（Andersへ）：McKay, D.S. et al.

100 μm スケールの非常に小さな領域で共存鉱物が矛盾しているのが問題である。また、隕石や地球の岩石中に、このサイズの火成岩二次変質の鉱物組み合わせはない。炭酸塩粒子はCコンドライトにも低温水質変成して存在するが、これは異なる環境条件を記録した非平衡なものなので比較はできない。無機生成過程の可能性は認めるが、その場合はかなり無理なことを考えなければならない。なお、形態的には隕石や月試料にはない構造が見られるのは確かである。

●反論：C.K. Sheater and J.J. Papike

ALH84001の黄鉄鉱の硫黄同位体を分析して、 $\delta^{34}\text{S}=+5\sim+8$ permilという値を得た。これには、(a)低温（100～150℃）還元環境（pH >9）で生成、嫌気性細菌が同位体分別した、(b)酸化

環境で無機的に生成、硫黄同位体は水溶液と堆積物とで分別しなかった、との2つの解釈が考えられる。しかし、月ではmicro-impactで無機的に硫黄同位体分別しており、38億年前の火星でもこの効果は十分期待される。また地球最古の還元環境硫黄細菌は27億年前であり、38億年前の火星には出現していなかった可能性がある。これらのことから、原因をバクテリアだけで説明する合理的根拠に欠ける。

▲再反論 (Shearer & Papikeへ) : Gibson Jr., E.K. et al.

彼らの測定した黄鉄鉱 ($15\text{--}40\mu\text{m}$) より小さく、熱水生成など別起源の可能性があるため議論に使えない。測定に使っているCs+ビームは $8\mu\text{m}$ までしか絞れないので、細粒の硫化鉄について議論することは無理である。

●反論 : Jaffrey, F. Bell

PAHが無機的に隕石によって供給された可能性を議論していないのは問題である。PAHは隕石中に普遍的にあり、月表面にも1~2%存在する。紫外線による過酸化環境である火星表面では有機物が存在できないが、深成岩なら残存できる。有機分子化合物に富むD型小惑星が低角衝突すれば、有機物を壊しきらずに地下深くに供給が可能である。PAHの質量頻度分布がCMコンドライトと同じことも、類似の履歴の可能性を示唆している。

▲再反論 (PAHの議論へ) : Clemett, S.J. & Zare, R.N.

無機生成PAHを考えるには、有機物と炭酸塩粒子が無関係か、そもそも初めから還元される炭素相が存在したかが問題になる。この隕石では、炭酸塩粒子とPAHの分布に相関が見られた。ただしPAH自身の構造からは生物起源か否かは判断できず、高・低温環境いずれでも生成可能である。また、この隕石の母岩は火成岩でかつ炭素を含まないので、PAHは系外からやってきた二次組成である。

(出村 裕英)

火星と地球における苦鉄質マグマ火山の爆発的活動

Gregg, T.K.P., and Williams, S.N., 1996, Explosive mafic volcanoes on Mars and Earth: Deep magma sources and rapid rise rate. *Icarus*, 122, 397--405.

地球上の苦鉄質マグマの火山活動は比較のおだやかで、ハワイ式やストロンボリ式の噴火をし、流動性の大きな溶岩を出すと一般に信じられている。火星表面にはいろいろな火山体と火山噴出物が広く分布するが、バイキング軌道船からの地形観察、同着陸船による土壌分析、地球からの反射スペクトル観測、火星起源と考えられるSNC隕石の組成などのデータは、火星の火山物質が苦鉄質~超苦鉄質であることをつよく示している。この事実からみると、火星では、大量の火砕物質を生み出すような爆発的火山活動はおこらなかったようにみえる。

しかしながら、いくつかのモデル (例えば L. Wilson and J.W. Head, 1983 など) が示唆するように、火星面上の低い大気圧と低重力の条件下では、玄武岩質マグマの爆発的活動が、地球上よりもおこりやすくなると考えられる。火星表面には、小型のシンダーコーンから、広大な分布を示すイグニブルライトシートに至る、火砕物質と思われるものが認められる。また、中心に

カルデラをもつ大型で傾斜のゆるいパテラとよばれる火山体は、苦鉄質の火砕堆積物からなると考えられている。一方、地球上の玄武岩質火砕堆積物は、シンダーコーン・アグルチネート、マール堆積物、小火山灰堆積物など、単成火山をつくる小規模なものが普通で、後の2つは一般に水とマグマの相互作用の結果できるものである。

ところが地球上の火山にも、中米ニカラグアのマサヤ（Masaya）カルデラのように、火星のパテラに対比できる火山体が存在する。マサヤは中心性噴火の火山で、大量（約 20km^3 ）の玄武岩質火砕物を噴出した。しかもこれらは、大気や地下水とマグマとの相互作用で生成したものではない。このような火山の活動条件をさぐることは、火星のパテラの形成と進化を理解するうえで大いに役立つ。

火星のチレーナパテラとハドリアカパテラの性質

現在入手可能なデータから火星の火砕堆積物の存在を確言することは、十分にはできないが、①火山体の近くにあること、②舌状溶岩流のような初生的な流動地形がないこと、③メートル規模での風水による侵食の事実、もろく侵食されやすい物質があること、④玄武岩質盾状火山の山腹傾斜（ $6^\circ \sim 11^\circ$ ）よりも小さな傾斜（ $< 3^\circ$ ）をもつ火山体があること、などは、火砕堆積物の存在を示す積極的な事実と考えられる。

チレーナパテラ（Tyrrhena Patera、図1）とハドリアカパテラ（Hadriaca Patera）は、ヘラス盆地の中心から北東方向の、クレーターの多い古い高地にあり、それぞれ 2000km と 1000km の直径をもつ。両パテラとも、山腹傾斜が 3° 以下の低くて広大な盾状火山で、山腹には中心のカルデラから放射状にのびるチャネルが刻まれている。チャネルの形態は地下水のサッピングによる変形を示している。初生的な溶岩流地形はみられない。チレーナパテラの山頂部の高解像度画像には、風食作用で変形をうけた跡もみられる。これらの観察事実は、両火山体が火砕堆積物のような侵食されやすくもろい物質からできていることを示すものである。



図1 火星のチレーナパテラ。写真の横幅は 280km 。

両パテラの火砕堆積物の総量を決めるのは難しいが、著者らによるミニマムな見積もり値は次のようになる。チレーナパテラの火砕物質の広がりは約 $3.3 \times 10^4 \text{km}^2$ 、厚さは約 $200 \sim 500 \text{m}$ 、体積は約 $6.6 \times 10^3 \text{km}^3 \sim 1.7 \times 10^4 \text{km}^3$ 。ハドリアカパテラでは分布面積は約 $1.0 \times 10^5 \text{km}^2$ 、厚さは正確には決められないが平均 100m とすると体積は約 $1.5 \times 10^4 \text{km}^3$ となる。両パ

テラの値は比較的よく似ている。これらは、地球上のバイアスカルデラやロングバレー火山系の大規模な珪長質イグニブルライトのそれに対比できるであろう。

ハドリアカパテラの山頂カルデラは、ほぼ円形で直径77km、凹地の容積は $470\text{km}^3 \sim 1.4 \times 10^3\text{km}^3$ 、チレーナパテラのほうは、直径 $30 \times 15\text{km}$ の南の凹地と直径17kmの北の凹地からなる複合カルデラで、容積は 825km^3 と見積もられる。両パテラの堆積物の量とカルデラ容積は、地球上の珪長質イグニブルライトをつくる火山のそれと似てはいるが、玄武岩質火砕物からなる地球の火山体よりはずっと大きい。ただし、ニカラグアのマサヤカルデラは火星の玄武岩質パテラによく似た規模をもっているので、マサヤカルデラの形成条件の検討は、チレーナパテラとハドリアカパテラの形成を理解するのに役立つと考えられる。

マサヤカルデラの特徴と歴史

マサヤはカルクアルカリ玄武岩とソレアイト玄武岩 ($\text{SiO}_2 \leq 52\%$) の溶岩流の互層と火砕堆積物からなり、地球上の玄武岩質盾状火山よりもむしろ珪長質イグニブルライト堆積物からなる火山に典型的な、ゆるやかな山腹傾斜 ($< 3^\circ$) をもっている。頂上には直径 $11 \times 5\text{km}$ 、容積 15km^3 のカルデラがある。このカルデラは形成以来何度も溶岩流で埋められてきたため、本来の容積はもっと大きかったであろう。マサヤでおこったプリニー式噴火の降下火山灰層とサージ堆積物は、カルデラの縁から200km以上離れた遠方でも観察でき、玄武岩質火砕物質の総量は $15 \sim 20\text{km}^3$ と推定される。火星のパテラのものよりは規模が小さいが、地球上のマザマ火山(クレターレーク)のような、珪長質マグマの爆発的噴火によってもたらされた量とよく似ている。

マサヤの火砕堆積物の粒子の形態分析によると、広範な分布を示す玄武岩質火砕堆積物を生み出した噴火は、マグマ中の揮発成分の激しい解離によっておこされた可能性がたかい。マグマと地下水のつよい相互作用の証拠はなく、マサヤカルデラ内に湖が存在した証拠もない。著者らは、マサヤの地下深くにのびる断裂をつたわって玄武岩質マグマが深部から急速に上昇し、揮発成分の分離でマグマがくだけ、プリニー式噴火がおこったものとする。おそらくチレーナパテラとハドリアカパテラでも、同様のことがおこったのであろう。

玄武岩質マグマの爆発的噴火はどのようにおこったか

玄武岩質マグマがプリニー式の爆発的噴火をおこすためには、マグマの上昇率が、中に含まれるガスの気泡のそれと同じ程度に大きいにちがいないと考えられる。マグマの上昇率は、マグマの粘性、降伏応力、重力、マグマと周囲の地殻の密度差などによって決まり、著者らの計算によると、マサヤでの玄武岩質マグマの上昇率は $10 \sim 10^3\text{m/s}$ のオーダーになる。この値は、プリニー式噴火をおこす珪長質マグマでの見積もり値にきわめて近い。

マサヤの地下では、80~125kmの深さで地震がおこる(ハワイでの震源の浅い地震とは異なる)。この事実は、マサヤの下に非常に深い所でマグマが発生し上昇してくることを示している。このような深所での H_2O と CO_2 の溶解度は大きく、より浅い所でできるマグマよりも、揮発成分を多量に含むと考えられる。したがって、深い所 ($\geq 100\text{km}$) で生成したマグマが揮発成分を十分に含み、分離した揮発成分の上昇よりも速くマグマ自身が上昇すれば、プリニー式の噴火がおこって、玄武岩質の降下火山灰やイグニブルライト、サージ堆積物などをつくり出すであろう。

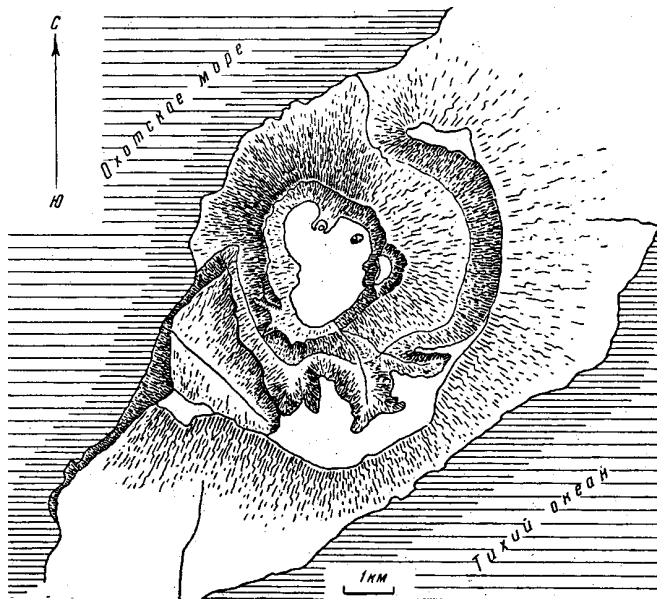


図2 サバリツキカルデラの構造（「ソ連活火山カタログ」ソ連科学アカデミー編・発行、1957より）

著者らはマサヤの例を参考に、深い地震を伴い、断層がリソスフェア深くに存在すると思われる、似たような条件の火山が他にないかどうか探した。その結果、南太平洋のバヌアツのアムブリム（Ambrym）火山と、千島列島のザバリツキー（Zavaritski）火山が該当することがわかった（図2）。両火山ともマサヤに似て、玄武岩質イグニブライトをつくり出している。

南太平洋の168° 08' E、16° 15' Sに位置するアムブリム火山は、バヌアツで最も活動的な火山で、サブダ

クションゾーン上にある。山体は35×50kmの大きさで、頂上に直径12kmのカルデラをもつ。火砕堆積物の約70%は玄武岩か玄武岩質安山岩である。イグニブライトとサージ堆積物の多くは、マグマと水の相互作用の事実を示していない。K₂Oの含有量が高いことから、マグマの源は深い所にあると推定される。ただし、この火山の調査はまだ不十分で、火砕堆積物の量と組成についてはさらに詳しい調査研究が必要である。ザバリツキー火山は千島列島のシムシル島の南半分を占め、ベニオフ帯上に位置する。高さ624mの頂上に入れ子状の複合カルデラがある。最新の噴出物は苦鉄質安山岩と玄武岩からなる溶岩流とドームであるが、古い噴出物はプリニー式とストロンボリ式の苦鉄質火砕物である。この火山もあまり研究されていないのが残念である。

火星のチレーナパテラとハドリアカパテラは、ヘラス盆地から放射状の方向に一直線に並んでおり、ヘラス盆地のまわりの放射状と同心円状の割れ目構造の網に関係していることは明らかである。両パテラの下には火星のリソスフェアにはりめぐらされた断層が存在し、地下深くで生じた苦鉄質マグマが揮発分を失うことなく上昇するのを助けたのであろう。

結論として、火星と地球では、①マグマが地下深く（≧100km）で生じ、②リソスフェア中のマグマの上昇速度が気泡の上昇速度と同じかそれ以上であれば、マグマと水の相互作用なしに、玄武岩質マグマのプリニー式噴火がおこるのであろう。

〈紹介者付記〉玄武岩質マグマの火山で爆発的噴火がどの程度におこるかは、火山学上の興味ある問題の1つである。一般的な（教科書的な）常識に従えば、プリニー式噴火のような大爆発はおこり得ないということになるのだろうが、自然現象はそう簡単に割り切れるものではない。この問題については筆者もすでにのべたことがあり（藤井・白尾・小森編『惑星火山学入門』日本火山学会、1995、p66参照）、ニュージーランドのタラウェア火山や日本の伊豆大島や古富士火山の活動にも、プリニー式噴火の例がみられる。しかし、大量の玄武岩質火砕物を生み出した火山を、火星と地球の例を比較して本格的に論じたものはこれまで見たことがなく、その意味で本論文はたいへん興味深い。火山の活動史と火山体の形成史を比較惑星学的に追求するために基礎として、地球上の火山をもう一度くわしく見直していくことも必要なのではないかと思われる。

（小森長生）

新刊紹介

NASA版太陽系アトラス

Greeley, R., and Batson, B., 1997, The NASA Atlas of the Solar System. Cambridge Univ. Press, 370pp. 505×313×28mm.

数年前から近日発売と宣伝されていた本書が、ようやく発行された。GreeleyはPlanetary Landscapeなど多数の著作がある惑星地質学者、Batsonは1963年以来、アメリカ地質調査所で月・惑星・衛星の地図製作にたずさわってきたこの分野の第一人者である。

本書の特徴は、大きな判型を生かして地形図、地質図、コンポジット写真をわかりやすく配列していることである。惑星や衛星表面の全体的な特徴は、細分化された地図や写真ではとらえにくい。本書を眺めていると、著者らが意図する内容を表現するためにはこのサイズが必須だったことがわかる。地図や写真のみではなく、各天体にはわかりやすい解説も加えられているので、おそらくアメリカでは高校図書館などの書架にも並べられることを、前提に作られているのだろう。巻末の2500にもおよぶ地名-人名録も有用で、いろいろな天体の地名の由来を知ることができる。本書は広げると50cm×60cmにもなる。このような本がゆっくりと広げられる机をもちたいものである。（（有）ピー・エム・エスから24,700円で購入）（白尾元理）

INFORMATION

●“火星の生命？ 隕石からの証拠” D.マッケイ博士講演会

本号でも話題となったScience論文の著者D.マッケイ博士（NASA）の講演会です。名古屋大学で開催される1997年地球惑星科学関連学会合同大会（3月25日～28日）の期間中に行われます。

日 時：3月26日（水）午前10:00～11:00

場 所：名古屋大学シンポジウムホール（交通 JR名古屋駅→地下鉄東山線13分→本山駅下車徒歩15分）

この講演会以外に合同学会のシンポジウムとして、25日午後「火星生命存在の可能性：物質科学的、生物学的、惑星科学的側面からのアプローチ」、27日午前「太陽系探査の世界的流れと果たすべき役割」、28日午前「全地球ダイナミクスー新しい地球観の創成にむけてー」など、惑星科学関連の講演があります。

●第22回南極隕石シンポジウム

日 時：6月10日（火）～12日（木）

場 所：国立極地研究所（東京都板橋区加賀1-9-10）

連絡先：国立極地研究所隕石資料部門

（TEL.03-3962-2938、FAX.03-3962-5711、E-mail.kojima@nipr.ac.jp）

編集後記：今回ははからずも火星特集号のように内容になりました。火星の生物問題について、前号の田崎さんとは異なる視点からの論考を赤井さんが、またサイエンス誌上での議論の要旨を出村さんが寄せてくださいました。大いに議論が盛んになるのは楽しいことです。紙面が一杯になりましたので、論文抄録は次号まわしに。お許しください。（K）