

発行人：惑星地質研究会 小森長生・白尾元理

事務局：〒193-0845 八王子市初沢町 1231-19-B-410 小森方

TEL & FAX: 0426-65-7128

E-mail: motomaro@ga2.so-net.ne.jp

郵便振替口座：00140-6-535608

火星生命探査の課題と戦略

M.V. Ivanov

1976年7月と9月、アメリカのバイキング1号と2号が火星表面への軟着陸をはたし、初の生命探査実験をおこなった。本稿は、バイキングがなしとげた結果を検討することから始めたいが、その前に、19世紀末からの歴史をちょっとのぞいてみよう。

バイキングの100年近く前、イタリアの天文学者G.スキアパレリ(1835~1910)は、火星表面に暗い線状模様のカナリを多数認め、それはアメリカの天文学者P.ローウェル(1855~1916)の人工運河説に発展した。ローウェルの説のもっともらしい論理と、彼の本の華麗な文章は、火星に高度な知的生命体とその文明が存在するという仮説を、多くの人に普及させた。また、ロシアの天文学者G.A.チーホフ(1875~1960)は、スペクトル観測をもとに、火星の暗色模様の変化は植物の生育によるものだと言った。このようにして、探査機による火星の研究が始まる前の1950年代まで、火星に植物や高度な生命体がある、という説が存在していたのであった。

バイキング計画はどのように立てられたか

バイキングによる火星生命探査の基本戦略は、ソ連のマルス計画(1962~1974)とアメリカのマリナー計画(1963~1971)の探査成果にもとづいている。マルスとマリナーの観測データの大部分は、フライバイ軌道上からのものであったが、それでも地球上の望遠鏡で見ると、はるかに細かい対象を識別することができた。とくに初の火星周回衛星となったマリナー9号が撮影した7300枚をこえる表面写真の解析から、火星には高度な生命形態は存在しないことが明白となった。

この結論は、火星の大気や気候の研究からも確かになってきた。火星の表面温度はきわめて低く、水は極地に氷として、また大気中には水蒸気の状態が存在するだけで、その量も少ない。これと似た生態的環境条件をもつ場所は、地球上では南極大陸の荒野くらいである。そこでは、下等なコケ類、地衣類、バクテリアなどが見られるだけである。まさにこのことから、バイキング生命探査の基礎となる地球上での実験が、W. Vishniac教授(南極での調査中に悲劇的な死をとげた)の指導のもとに、南極大陸で始められたのだった。

これまでの探査機から得られた情報によれば、火星の地質学的過去の気候は、今日ほどにはきびしくなかったと考えられた。マリナー9号撮影の画像には、多くの干上がった河床や水たまりの跡などが写っていた。このことは、過去に十分な量の液体の水があり、それゆえに気候もいまよりは温暖で、大気も濃かっただろうことを物語っている。

こうしたことから火星の歴史の初期段階には、地球と同様な生命の発生過程があったのではな

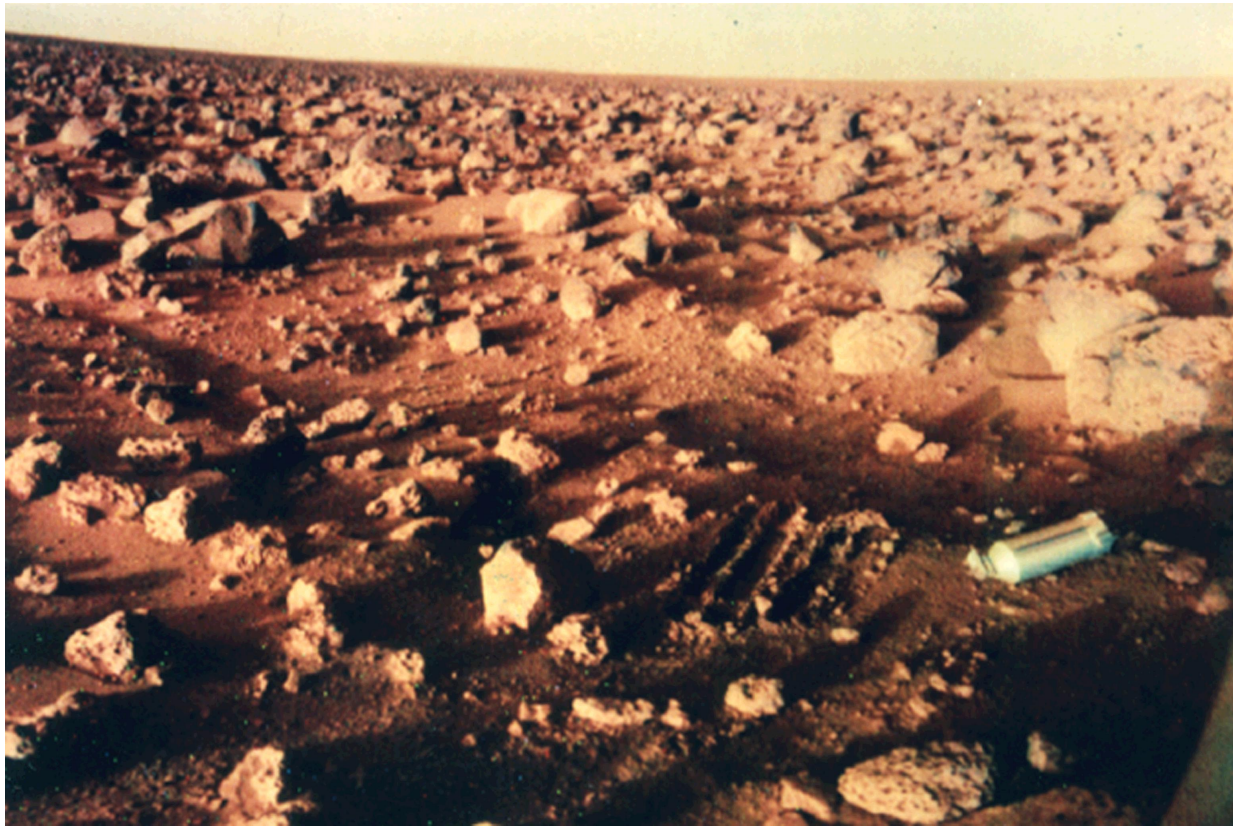


図1 バイキング2号着陸地点での土壌採集。右方に表土をすくった跡が見える。(NASA)

いかと予測できる。そこで Vishniac たちは、バイキング生命探査の目標を次のように設定した。

- (1) 地球と火星の地質学的歴史の類似性からみて、火星上では地球上と同じ頃に生命が誕生したと考えることができる。火星上で現生の、あるいは化石の生命体を探し出すことは見込みのないことではない。
- (2) 火星上の生態的環境条件は南極大陸よりもきびしいとはいえ、バクテリアや地衣類、下等な藻類などの生息を考えることは可能である。
- (3) 地球上での最下等生物の分布密度が表面土壌で最も高いことを考えると、火星上でも最表層の土壌に注目すべきである。そこでの探査対象は光合成独立栄養微生物と従属栄養微生物であり、それらの物質代謝活動の証拠を見つけることである。

以上の3つの課題目標は、1975年から論理的根拠をもつものとなった。

バイキング生命探査の結果と反省に立って

火星の表面土壌中での、光合成独立栄養微生物と好気性従属栄養生物の代謝活動の証拠をつかむために、バイキング探査では次の方法がとられた。

まず、光合成プロセスを調べるために、光をあてた容器の中で土壌サンプルを湿らせ、かきまぜた。その後、サンプルは暗い状態におかれた。光合成がおこったことは、酸素が放出されることで判定した。

次に、湿らせた土壌サンプル上の大気に、トレーサーとして ^{14}C をもつ CO_2 と CO を加えた。その後サンプルを加熱し、その中の有機物が CO_2 になるまで燃焼させた。光合成活動があれば、 ^{14}C は土壌中の有機物にも加わっていたはずである。

さらに、従属栄養バクテリアの活動を知るために、 ^{14}C でラベルした有機物の培養基で土壌サンプルを湿らせた。もし従属栄養バクテリアが土壌中にいれば、加えられた有機物は酸化して

$^{14}\text{CO}_2$ を生じているであろう。

以上の実験は、地球上の環境で、主として南極大陸から採取された各種土壌サンプルで何度もテストされたうえ、実際に火星上で実行された。

その結果は、結論からいうと、生命活動の証拠とはいえないものであった。たとえば、 ^{14}C でラベルされた有機物を加えた土壌からは、 $^{14}\text{CO}_2$ の激しい放出があったが、それは地球上の実験で土壌中の微生物が示した反応とは全く別のものであった。また、湿らせた土壌からの酸素の放出は、暗くした状態でもおこった。これらの実験によるデータを解析したうえでの結論は、火星の表面土壌には、鉄の過酸化化合物が含まれているというである。しかしその化合物がどうしてできたのかは、まだはっきりわかっていない。

バイキングの生命探査実験が否定的結果に終わったことから、火星上で生きた微生物をさがし出す計画は、その後中止されることになった。そして宇宙生物学者の多くは、火星では生命体の化石を探すことのほうが、より实际的であると考えられるようになった。

私は、宇宙生物学者たちのこのような方向（化石を探すこと）の科学的重要性を否定するものではないが、それでもなお私は、火星上で生きた微生物を発見することが、きわめて現実的で重要な課題だと考えている。バイキング探査では、微生物の発見は火星表面の生態系に限定して実施された。しかし地球上では、大量の多種多様な微生物の集団が、いろいろな場所に存在していることを思うと、火星の微生物探査は、より広い見地からおこなうべきではないかと考えるのである。とくに、ロシアとアメリカの微生物学者たちの努力によって、主として嫌気性のさまざまなタイプの微生物が、地球の深さ数 km に達する地下にまで生息していることが、20 世紀に入ってからに明らかになってきたことに注目しなければならない。

地下に生きる微生物を求めて

地下深くの堆積岩中に微生物の存在が知られるようになったとき、まず問題になったのは、ボーリングコア中の微生物が、掘削液中の微生物による汚染ではないかということであった。しかし、この20年間の注意深いボーリング作業の結果、コアの空隙には、少なくとも数1000年間仮死状態をつづけてきた、生きた微生物が存在することがわかってきたのである。

そのような微生物の最初の確かなデータは、ロシア科学アカデミー微生物学研究所の S.S. Abysov によって得られた。彼は南極のボストーク基地で、掘削液を使わないで熱を加えてくり抜くボーリングで掘られた氷のコアを、20年間にわたって調べた。その結果、氷床の表面から深さ3000 m以上までのコアに、生きた微生物が見出されたのである。Abysov のこの調査結果は、同様な生きた微生物を見つけ出したアメリカの2つの研究者グループによって証明された。

南極氷床のコアに含まれる生きた微生物の量は、それほど多くはなかったが、さらに大量の生きた微生物が、ゲリチンスク研究所の研究者たちによって、東シベリア（表1）と南極大陸の、凍結した土壌と堆積岩の中から発見された。ここの土壌や堆積岩の年齢は300万～500万年におよび、しかもこれらの岩石は長い間凍結状態のまま、地下水中の微生物による汚染から守られていた。

表1 東シベリアのコリマ川低地凍結層中に含まれる生きたバクテリアの数量

地層（堆積岩）	年代（×1000年）	生きたバクテリアの個数 log(個体数/g)	生きたバクテリアの群体数 log(群体数/g)
ツンドラ土壌	現 代	8.49	5.51
湖沼性砂質粘土	完新世（7～10）	7.89	3.54
河川性砂質粘土	更新世後期（20～30）	8.51	5.23
湖成砂質粘土	更新世後期（20～30）	7.93	3.90
海成砂	更新世中期（100）	7.87	0
湖成砂質粘土	更新世前期（300～600）	7.91	0
湖成砂質粘土	鮮新世後期（2000～3000）	7.32	2.30

この 10～15 年間に、さまざまな地質年代の岩石中に含まれる生きた微生物の記載研究が、アメリカ、ロシア、スウェーデン、その他の国々ですすめられた。これらの研究でわかった重要なことは、生きた微生物は堆積岩のあらゆる層準に、しかも最も古い時代にいたるまで、存在しているということである。そのうえ、多孔質で割れ目の多い岩石では、飽和した端水（油田の含油層などに圧力をおよぼす地層中の水）によって、生きた微生物だけでなく、地球化学的に活性化した微生物までもが存在するのである。よく知られた 1 つの例として、ロシアのデボン紀（4.1 億～3.5 億年前）の含油砂岩層がある。この中には、嫌気性の硫酸還元細菌やメタン生成細菌によってひきおこされる、活発な微生物活動のプロセスが見られる。

上にのべた研究の多くは、従属栄養微生物についてのものであり、また研究の基本的対象は、いろいろな年代の堆積岩とその中を循環する地下水であった。しかるに一方、火星の岩石は基本的には火成岩が主であり、その中に含まれる有機物は、本質的に堆積岩よりも少ないと考えられる。したがって、従属栄養バクテリアにとっての生息条件は、決してよいとはいえない。しかし、火星の地下に微生物がいるとした場合、その機能を知るためには、火成岩中の微生物の活動についてもくわしく検討しなければならないことになってくる。

地下にすむ独立栄養生物の生態系

火成岩中の微生物相について、最近までわれわれは、温泉（熱水）中に生息する微生物だけを知っていたにすぎない。地下深部の暖かい地下水中には、基本的に好気性の微生物が存在しているのであるが、嫌気性の微生物も混じっている可能性があると考えられてきた。しかし、これについてはよくわかっていなかった。

ところが、アメリカ、スウェーデン、スイス、その他の国々で、放射性廃棄物の地下貯蔵庫の建設が始まったとき、状況は大きく変化することになった。放射性廃棄物の貯蔵に最も好都合な場所は、フェノスカンジナビア楕状地と、アメリカのコロンビア川流域にある、巨大な玄武岩の岩体なのであった。

一般に火成岩やその中の水の有機物含有量はきわめて少ないが、東部スウェーデンの玄武岩の水を含む層準では、大量の、そして多種多様な微生物がみられることを、P.ペデルソンと彼の協

表2 コロンビア川玄武岩の帯水層準での地下水の組成と、そこに含まれる現生微生物の数

地下水のタイプ		SO ₄ ²⁻ に富んだ水			SO ₄ ²⁻ に乏しい水			
ボーリング孔の番号		DS-06	Jw-3	Jw-1	Pr-4	Pr-3	Pr-5	DV-11
SO ₄ ²⁻ (mM)		1.484	0.346	0.215	0.021	0.004	-----	----
H ₂ S(μM)		31.6	93.3	36.2	9.8	13.9	4.2	0.2
CH ₄ (μM)		2	16	25	135	481	185	209
硫酸還元細菌	CO ₂ + H ₂	4	1	4	1	3	1	1
log(個/ml)	有機物	2	1	3	トレース	4	1	1
メタン生成細菌	CO ₂ + H ₂	1	1	4	4	4	4	2
log(個/ml)	有機物	トレース	1	1	2	2	1	2
アセテート生成細菌	CO ₂ + H ₂	4	4	4	4	3	4	4
・log(個/ml)								
従属栄養細菌	有機物	4	2	1	2	3	3	1
・log(個/ml)								

力者たちがつきとめた。最も深い層準は、嫌気性微生物の硫酸還元細菌、メタン生成細菌、アセテート生成細菌が優勢で、とくにメタン生成細菌の数は全微生物数の 60～80% にも達した。これら嫌気性独立栄養細菌にとっての硫黄と炭素のサイクルでの電子の提供者は、地下水中に 3.8～4.6ml/l 含まれている水素がになっている。

これとよく似た状況は、コロンビア川の大規模な水を含む玄武岩の研究をした T.O. Stevens と J.P. McKinley (1995) がのべている。この地帯での地下水中のメタン含有量は 160 μM、水素の含有量は 110 μM に達した。ここで電子の提供者として水素を利用している嫌気性独立栄養生物（硫酸還元細菌、メタン生成細菌、アセテート生成細菌）の数を表 2 に示す。それらの数は、従属栄養生物の数をはるかに上回っている。地下水中の重炭酸塩の炭素同位体組成は、そのことを確かに証明する。すなわち、独立栄養生物のメタン生成の過程で、重炭酸塩の炭素が消費されるにつれて、残りの重炭酸塩には重い同位体の ¹³C が増加し、その量は δ ¹³C=20 ‰ に達するのである（図 2）。

こうして、地球上の 2 つの離れた地域で、別々の研究者グループによって、地下の火成岩中に光合成によらない嫌気性独立栄養微生物の集団が存在する、という同じ結論がみちびき出されたことは、注目に値する。

このことから考えると、火星の火成岩層中にも、同様な地下のエコシステムが存在する可能性は十分あるように思われる。それゆえに、1988 年 9 月に開かれた宇宙生物学と宇宙医学にかんするソ連とアメリカの研究者グループの会議で、私は、火星に液体の水が存在する可能性の高い地下の岩石中で、いまでも生きている微生物を探索してはどうか、ということを提案したのだった。そのためにはまず、最も若い火山活動がおこった地域に目を向ける必要があると思う。そのような場所には、熱水活動の跡が多く見られることが予想され、そこは、化学合成独立栄養微生物にとって必要な電子の提供者（H₂、H₂S、CO、NH₃、CH₄）に富んでいると思われるからである。

火星の岩石中にみられる微生物活動の証拠

火星の地下で微生物活動がおこったことの傍証は、SNC 隕石のくわしい分析と研究からも得

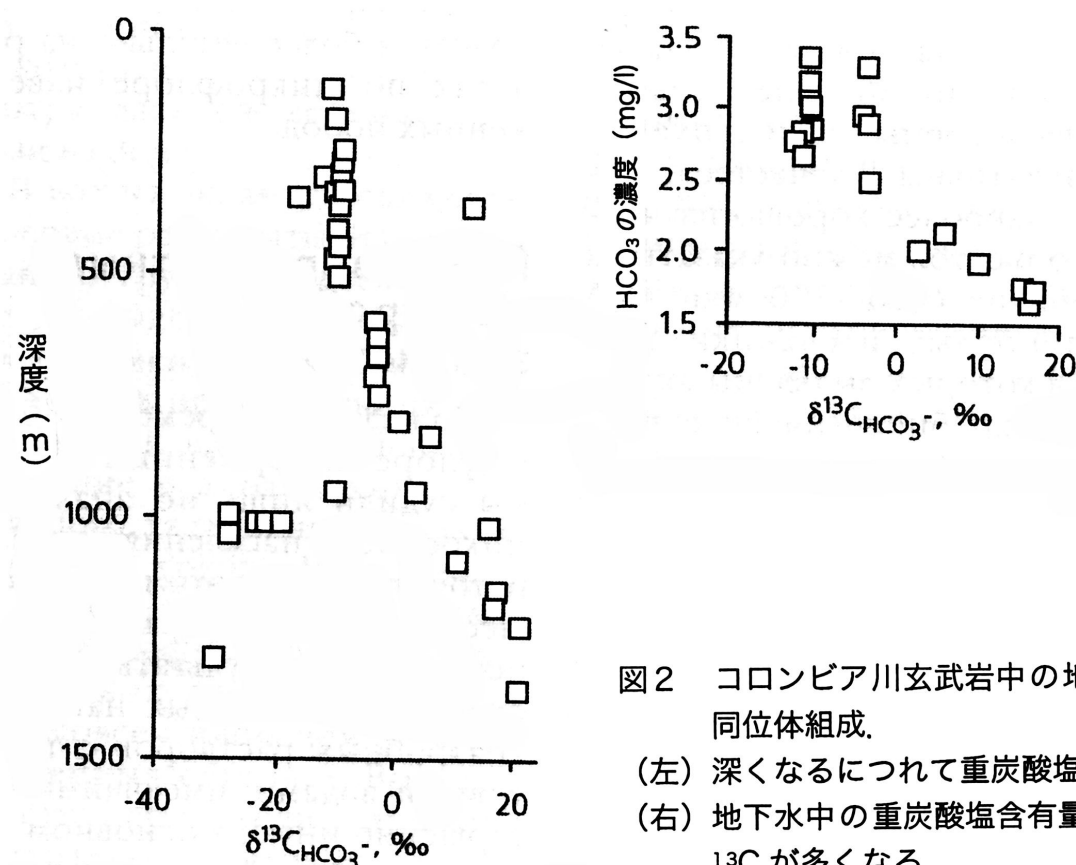


図2 コロンビア川玄武岩中の地下水に含まれる重炭酸塩の炭素同位体組成.

(左) 深くなるにつれて重炭酸塩中に ^{13}C が多くなる.

(右) 地下水中の重炭酸塩含有量が減るにつれて、地下水中の ^{13}C が多くなる.

られた。SNC 隕石の鉱物学的、地球化学的研究は、火星における生命の発生と進化の問題について、生物地球化学の面から重要な成果をもたらしたのである。

イギリスのオープンユニバーシティの地球化学者たちは、SNC 隕石の 1 つに有機物と炭酸塩を見つけ出し、それらにおけるそれぞれの炭素同位体組成に、本質的な差異がみられることに注目した。SNC 隕石の炭酸塩鉱物は、火星大気のコ CO_2 にくらべてかなり ^{13}C に富んでおり、 $\delta^{13}\text{C}$ の平均値は +41.5‰である。これにたいして有機物のほうの $\delta^{13}\text{C}$ は -20.0 ~ -33.0‰と低い (図 3)。このような炭素の安定同位体の大きな分別は、低温の条件下でのみ、そして生きた有機体の活動によってのみおこるものである。

J.L. Gooding によると、SNC 隕石の炭酸塩は二次鉱物の集合体の組成を示し、塩基性岩や超塩基性岩の割れ目や空隙を埋めて存在している。このような二次鉱物の集合体は、pH が約 8 の、低温 (100 °C 以下) の熱水溶液から生成したと考えられる。この条件は、好熱性の嫌気性微生物の発生には十分好都合で、炭素の安定同位体の分別効果をもたらす化学合成独立栄養生物のメタン生成細菌を発生させたのではないかと考えられる。

コロンビア川玄武岩では、現在でもメタン生成のプロセスがおこっていることが明らかにされている。そこには、大気中の二酸化炭素にくらべて 37% も ^{13}C に富む地下水 (炭酸鉱水) が存在している。

SNC 隕石の鉱物学的、地球化学的研究の結果は、火星における微生物探査にとって、ひじょうに重要で基本的な問題を提起することになった。それをまとめていえば次のようになる。

- (1) 炭素の環状の結合様式が、炭酸塩鉱物と有機物とにみられる。これらは生命活動に関係したものである。
- (2) 火成岩の割れ目や空隙に二次的鉱物が生成していることからわかるように、火星の表面に

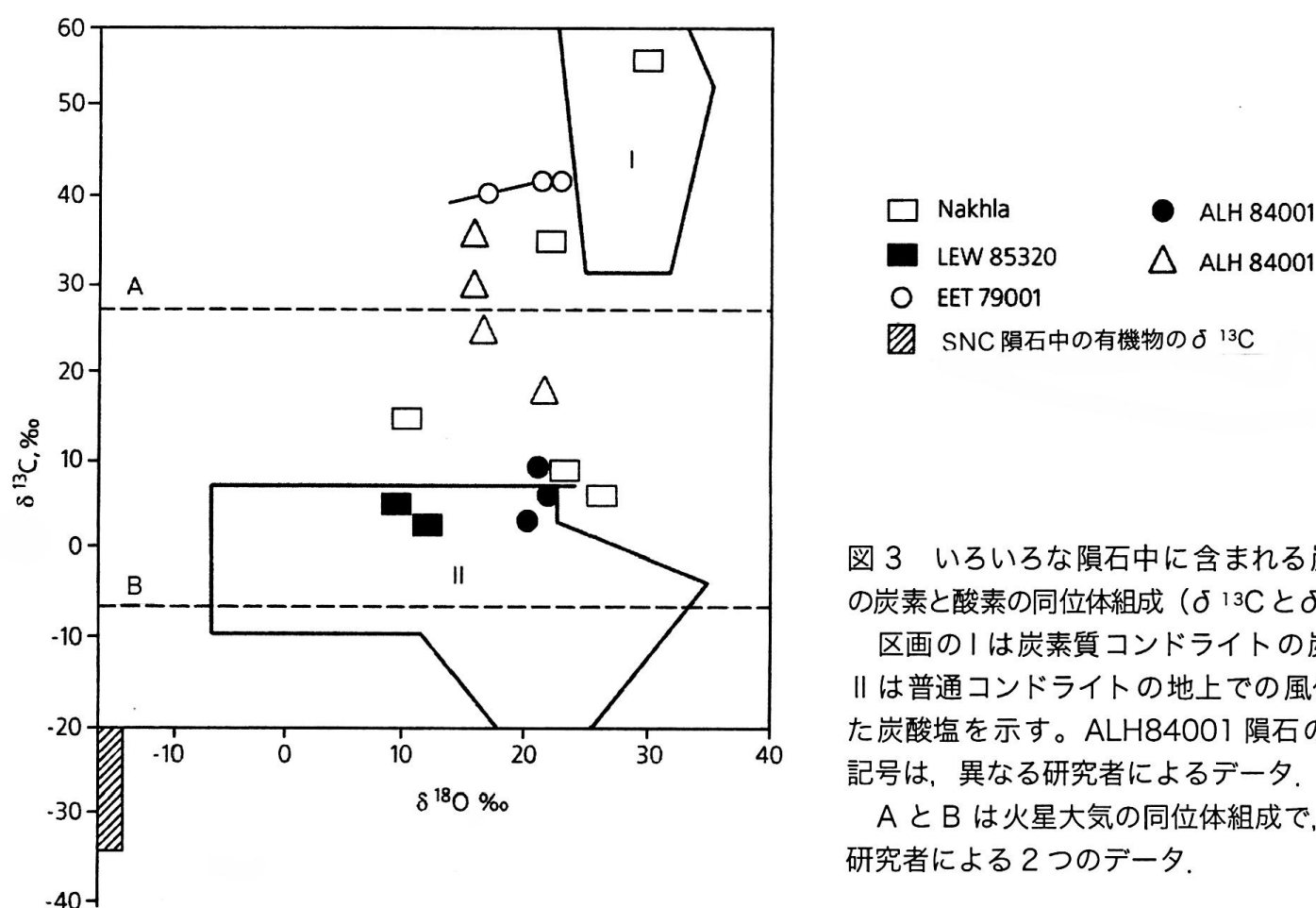


図3 いろいろな隕石中に含まれる炭酸塩中の炭素と酸素の同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$)。

区画のIは炭素質コンドライトの炭酸塩、IIは普通コンドライトの地上での風化で生じた炭酸塩を示す。ALH84001隕石の2つの記号は、異なる研究者によるデータ。

AとBは火星大気同位体組成で、異なる研究者による2つのデータ。

液体の水が存在していた証拠がある。しかもその水は、低温の熱水溶液の特徴をもっていたと考えられる。

(3) 炭素の安定同位体の分別プロセスが見られる。炭素の重い同位体は炭酸塩に、軽い同位体は有機物のほうに多い。この炭酸塩と有機物における $\delta^{13}\text{C}$ の本質的な差異は、分別過程に生物学的メカニズムがはたらいたことを証明するものである。

バイキング探査の結果は、火星の表面で生きた微生物を見つけ出すという希望を打ちくたしてしまっただけで、しかし SNC 隕石の研究結果はその希望を復活させ、新しい探査の道を示してくれるものであり、火星の地下にすむ微生物を調べるための指針をあたえてくれるだろう。

火星生命探査の新しい戦略

火星の生命探査は、地表面から地下の岩石への方向転換が必要であり、嫌気性の化学合成独立栄養生物、すなわちメタン生成細菌、アセテート生成細菌、そして鉄還元細菌や硫酸還元細菌などの探査を目標にすべきであることを、私は強調しておきたい。そのための最も有望な地域は、若い火山活動がおこったところであり、その地中の岩石は深部の熱流によって十分温められている。しかもそのような場所では還元ガスの存在する確率が高く、化学合成独立栄養微生物の活動のために、電子の提供者の役目を果たしてくれる。最終的に地下の暗黒の環境のもとでは、有機物のバイオマスが形成されているだろう。

バイキング探査機のすべての機器が、地球から火星までの長期の飛行と、火星大気圏への突入にもちこたえて、その後も長く作動しつづけたことを考えると、同様な一連の機器をふたたびもちいることを考えてもよいように思える。ただし、それら機器による実験の方法は、バイキング

でなされたものとは根本的に異なってくる。調査研究は、嫌気性の環境条件のもとで実施しなければならないからである。

^{14}C でマークされた実験は、好気性の光合成生物ではなく、嫌気性の化学合成独立栄養生物の存在を明らかにするものでなければならない。バイキング探査では、従属栄養生物を探すために有機物の栄養分が使われたが、化学合成独立栄養生物を活発化させるためには、還元性ガスを使用する必要がある。ガス交換実験では、湿らせたサンプルから放出された水素が化学合成独立栄養生物によって消費されるので、彼らの活動で生成するメタンや硫化水素、アセテートなどを探知しなければならない。また、生命体を構成する元素の安定同位体比を、高い精度で測定できるマスマススペクトロメーターも必要であろう。

将来、火星生命探査のための火星旅行が企てられる際には、さらに持っていきたいものがある。それは、地下の岩層から岩石サンプルを採集するための、しっかりしたボーリング装置である。ボーリング掘削の実施によって、火星のいろいろな地点から、生命発見に役立つ地下深部の岩石を得ることができるようになるだろう。

(小森長生訳)

訳者付記 ここに紹介したのは次の論文の翻訳である。

M.V. Ivanov, Nazemnaya mikrobiologiya i strategiya poiskov zhizni na Marse. Priroda, No.2, 2002, 5-13. (ロシア語を英字で表記) (ミハイル・ウラジーミロヴィッチ・イワノフ「地球上の微生物学と火星上での生命探査の戦略」プリロード、2002年2月号)

ほぼ全訳であるが、まえがきとバイキング探査の部分は簡略化し、また記述の重複やまわりくどい箇所は一部削除した。著者のイワノフはロシア科学アカデミー微生物学研究所の所長で、ロシア微生物学会会長もつとめる、微生物学と生物地球化学の第一人者。掲載誌の「プリロード」(自然)は、1912年に創刊されたロシアの代表的な月刊総合科学誌で、ロシア科学アカデミーが編集し、アカデミー直属のナウカ出版社が発行している。「Scientific American」や「科学」(岩波)に相当する雑誌といってよく、科学界の最新の話題が第一線の研究者によって執筆されている。最近判型が大きくなり、紙質や印刷も改善されて面目を一新した。

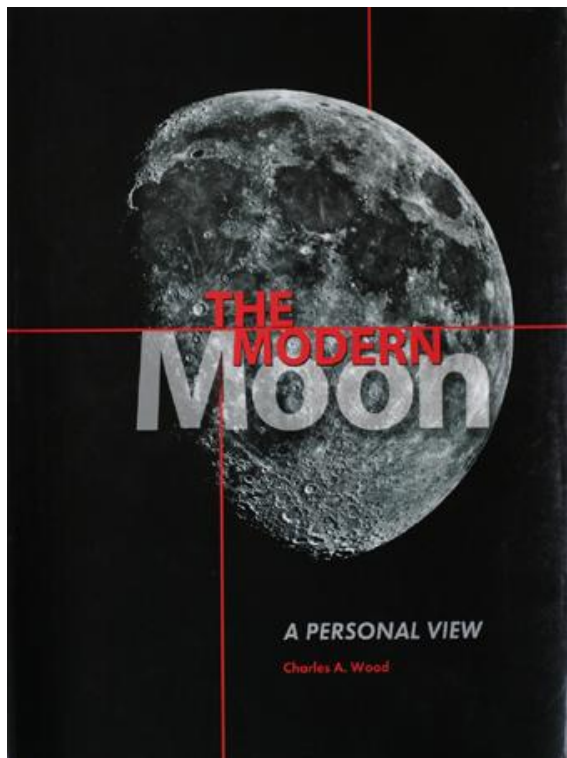
今回紹介したイワノフの論説は、最近地球上で大きく注目され始めた地下生物圏の話題にもとづいて、火星の地下における微生物存在の可能性とその探査の必要性を説いたものである。これからの火星生命探査の方向やあり方を考えるうえで参考になると思い、紹介したしだいである。

新刊紹介

現在の月

Wood, C.A., 2003, The Modern Moon: A Personal View. Sky Publishing, A4判, 209pp, US\$44.95.

2000 年には偶然だろうか、3 冊の月面ガイドブックが発行された。『Atlas of the Lunar Terminator』(Westfall, J.E., 2000, 292pp, Cambridge Univ. Press)、『Observing the Moon』(Wlasuk P.T., 2000, 181pp, Springer-Verlag)、『Observing the Moon: The Modern Astronomer's Guide』(North, G., 2000, 381pp, Cambridge Univ. Press) の 3 冊である。これ



らの本はいずれも、地上からの望遠鏡によるアマチュア観測者を対象としたものである。私は、ようやく月探査機の成果を反映したガイドブックが出版されたかと期待しながら手にしたものだが、失望する結果となった。月探査機の成果をわずかに反映しているものの、1970年代以前に版された記載的な月面ガイドブックから、大した進歩は見られなかったからである。

そんな経緯があっただけに、11月に出版されたばかりの本書は、待望の書がようやく出版された感がある。著者チャールド・ウッド氏は1960～90年代まで活躍した惑星地質学者である。現役を退いた現在、アリゾナのツーソンにある自宅裏庭で望遠鏡による月面観測を楽しむ日々を送っている、いわばアマチュアの目をもったプロとい

える。彼は、その成果を月刊誌『スカイ・アンド・テレスコープ』に5年間にわたってルナ・ノートブックとして連載しているのでご存じの人も多いだろう。本書はこれを大幅に加筆し、新たに1章に月の観測史、2章に月の地質学を書き起こしたものである。

本書では残り16章を、地上から望遠鏡でみえる月の表側だけを対象とし、おもにベイスンごとに16地域に分けて解説している。1970年代になって月のクレーターは小天体の衝突でできたことが明らかになったが、そこにいたるまでは火山説と衝突説の長い論争が続いた。本書では論争の歴史を振り返りながら、アポロ・クレメンタイン・ルナプロスペクターなどの最新の探査機の成果を紹介しているので、より深い理解が得られるしくみになっている。解説が生き生きしているのは、ウッド氏が月探査の最盛期に活躍した人物だからだろう。彼は、1960年代半ばの月地質学の創成期にはアリゾナ大学の大学生であったし、アポロの宇宙飛行士が月の岩石を採集しているときには、モニターでそのようすを地上からながめ、白熱する議論に耳を傾けることができたのだから。

掲載されている地上からの月面写真は Consolidated Lunar Atlas からのものである。これは主に1960年代前半、アポロ計画のために大口径望遠鏡で撮影された写真である。40年以上も経ってはいるが、残念ながら体系的に月表側を撮影したこれに勝る写真はない。これにルナオービター、アポロなどの写真を加えて、月の地形を説明している。また、月研究に関わった数々の人物、たとえばカイパーやユーレイなど合計25人が写真入りで登場している。大研究者の若かりし姿が見られたり、男性だと思っていた研究者が女性だったりして意外性もあって楽しめる。

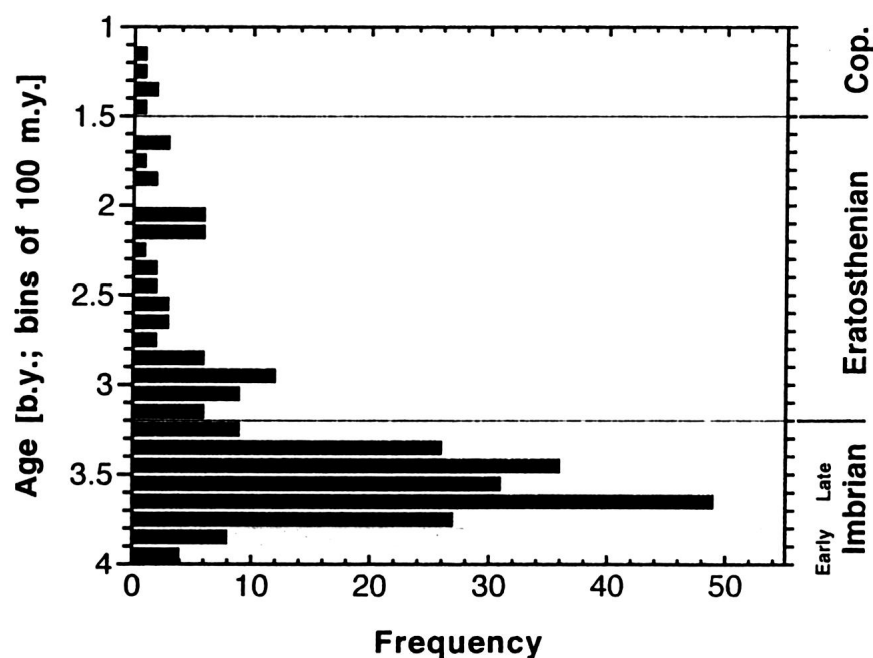
本書は、英語で書かれているからといってひるむことはない。やさしい英語で書かれているので、とりあえずは関心のある地域だけを読めばよいし、さらに通読すれば月の地形学・地質学の初歩をマスターできるので、惑星科学の入門書としても役立つことは間違いない。また現在、月探査に関わっている研究者にとっても、月の地質学の何がわかっていて、何がわかっていないのかを整理するのに役立つ。月に興味をもつすべての人に一読をお薦めする。 (白尾元理)

論文抄録

嵐の大洋・雲の海・知られた海・島々の海の玄武岩の年代と層序

Hiesinger, H., Head III, J.W., Wolf, U., Jaumann, R., and Neukum, G., 2003, Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum. Jour. Geophys. Res., 108, E7, 1-1-1-27.

筆者らは、月表側西部の上記の海をクレメンタイン探査機の高解像度カラーデータを用いることによって86の同じスペクトルの特徴を示す地域に細分した。さらに、それぞれの地域をルナオービター4号画像でクレーター密度を計測することによって年代を求めた。求めた年代は39.2～12億年前と長期間にわたり、噴出量からみると37～33億年前の後期インブリウム代が最大であった。最新の12億年前の玄武岩はアリストルコス台地南側に分布し、これは従来、最新と考えられていたリヒテンベルグ～フラムスチュード周辺に分布する玄武岩よりもさらに新しいものである。(S)



月の主な海の玄武岩の年代頻度分布。今回調査した地域に加えて晴れの海、雨の海、豊かな海、湿りの海、フンボルト海、南の海の結果をまとめた。

マリウス丘台地の火山活動：クレメンタインのマルチスペクトルデータによる分析

Heather, D.J., Dunkin, S., and Wilson, L., 2003, Volcanism on the Marius Hills plateau: Observation analyses using Clementine multispectral data. Jour. Geophys. Res., 108, E3, 3-1-3-16.

嵐の大洋にあるマリウス丘台地は、面積3500km²で周囲よりも数100m高く、ドーム・碎屑丘・蛇行谷などが分布する。筆者らはクレメンタインのマルチスペクトルデータとルナオービターの写真を用いて、この地域の火山発達史を調べた。台地をつくる玄武岩は主にエラトステネス代の高Ti玄武岩で、厚さは120m以上で5320km³以上の体積をもつ。ドームや碎屑丘は、これらの玄武岩に埋め立てられているので、年代はさらに古く、いろいろな噴火形式や噴出率によってできたものらしい。(S)

火星ダストに含まれる炭酸塩鉱物の存在量

Bandfield, J.L., Glotch, T.D., and Christense, P.R., 2003, Spectroscopic identification of carbonate minerals in Martian dust. Science, 301 (22 Aug.), 1084-1087.

火星における炭酸塩鉱物の量や分布の観測は、過去の火星の大気と水の環境を解明するうえで重要である。炭酸塩鉱物は、近赤外と熱赤外領域のスペクトルでユニークな吸収帯をしめす。著者たちは、火星面の30°Sと15°Nの間の、ダストにおおわれたアルベドの高い地域を選び、マーズグローバルサーベイヤー(MGS)の熱放射スペクトロメーター(TES)によるスペクトル分析をおこなった。その結果、火星の表面ダストには、マグネサイト(MgCO₃)に優勢な炭酸塩が2～5%含まれていることがわかった。この濃度は低すぎるようにもみえるが、もし深さ1～3kmまで2%の炭酸塩を含むグローバルな層があれば、過去の火星大気のCO₂量は1～3バール程度あっただろうと考えられる。(K)

アタカマ砂漠の火星に似た土壌と微生物の生存限界

Nararro-González, R.,ほか11名, Mars-like soils in the Atacama desert, Chili, and the dry limit of microbial life. Science, 302 (7 Nov.), 1018-1021.

バイキングの生命探査の結果、火星の表面土壌は有機物が欠乏し、生命は存在しないこと、および反応性のつよい酸化物が存在していることが明らかになった。著者たちは、チリのアタカマ砂漠の極度に乾燥した地域に、火星土壌によく似た土壌が分布することを見つけ出し、そのサンプルには有機物がごく微量にあるのみで、バクテリアも極端に少ないことを見出した。2つのサンプルからDNAの検出を試みたが、発見できなかった。バイキングで実施されたラベル放出実験を模しておこなわれた培養実験も、非生物的なプロセスを示すだけのものであった。この実験結果は、極端に乾燥したこの地域は、極限的環境での微生物の生存の乾燥限界を示すものである。しかし、将来の火星探査のための実験には、価値ある場となるだろう。(K)

液体の水の作用でできた火星の砂丘上の岩屑流

Mangold, N., Costard, F., and Forget, F., 2003, Debris flows over sand dunes on Mars: Evidence for liquid water. *Jour. Geophys. Res.*, 108, E4, 8-1--8-13.

火星の大規模な砂丘、とくにラッセルクレーター（直径138km、54° S、345° W）中の砂丘に見られるガリーは、液体の水を含んだ岩石デブリの流れで形成された。ガリーの自然堤防（levee）などの地形的特徴は、ビンガム流体的性質のデブリ流が生じたことを物語っている。(K)

地下氷の昇華による火星のlobate debris apronsの変化

Mangold, N., 2003, Geomorphic analysis of lobate debris aprons on Mars at Mars Orbiter Camera scale: Evidence for ice sublimation initiated by fractures. *Jour. Geophys. Res.*, 108, E4, GDS2-1--2-3.

火星のデウテロス・メンサとプロトニルス・メンサ地帯（35° N～50° N）に見られる耳たぶ状デブリ地形（lobate debris aprons）は、マーズオービターカメラ（MOC）の高解像度画像では、複雑な表面パターンを示す。これは、網目状の割れ目（fractures）にそって地下氷の昇華がすすんだ結果と考えられる。(K)

火星極冠の特徴を南極ドライバレーの氷河の状態から考える

MacClune, K.L., Fountain, A.G., Kargel, J.S., and MacAyeal, D.R., 2003, Glaciers of the McMurdo dry valleys: Terrestrial analog for Martian polar sublimation. *Jour. Geophys. Res.*, 108, E4, 12-1--12-12.

火星の北極と南極の永久氷冠には、深さ1km、幅10km、長さ300kmにおよぼうず巻状のトラフが発達し、また南極冠にはスイスチーズ状の円形ピット模様が見られる。これと似た地形は小規模ながら南極ドライバレー地帯の氷河にも見られ、その生成は氷の昇華が優勢なことに関係している。火星極冠の独特な地形も同様な成因で説明できる。(K)

火星のガリーの分布と成因

Treiman, A.H., 2003, Geologic settings of Martian gullies: Implications for their origins. *Jour. Geophys. Res.*, 108, E4, GDS12-1--12-13.

火星のガリーは南半球中緯度に最も多く分布するが、北半球の極地や平原、赤道地帯の火山などにも見られる。ほとんどが若い地形で古いものは稀である。地形と堆積物の様子から考えると、液体の水の流出でできたとは考え難く、地球上の雪崩に似た風成物質（ダストやシルト）の乾いた流れによって形成されたと考えたほうがよい。(K)

火星の岩石氷河とプロテラス地形

Whalley, W.B., and Azizi, F., 2003, Rock glaciers and protalus landforms: analogous forms and ice sources on Earth and Mars. *Jour. Geophys. Res.*, 108, E4, GDS13-1--13-17.

マーズオービターカメラ（MOC）撮影によるカンドール峡谷（Candor Chasma）の画像から、岩石氷河（rock glacier、内部に氷をもち、氷河のように流動する舌状地形）と、プロテラスローブ（protalus lobe、急傾斜の雪溪の前面に堆積した岩屑がつくる堤防状地形）と判断される地形が見出された。それらをめぐる議論。(K)

INFORMATION

●火星の地下生命探査のためのボーリング実験はじまる

NASA エームズ研究センターとスペインの宇宙生物学センターの科学者たちは、南スペインのリオチント (Rio Tinto) の赤くにぎった川の水源近くで、深度 150 m のボーリングを開始した。その目的は 2 つある。1 つは、地下に生きる嫌気性バクテリアの生態と作用を知ること、もう 1 つは、無人火星探査で実施するためのボーリング技術を開発することである。この実験は Mars Analog Reserch and Technology Experiment (MARTE) とよばれ、3 年間にわたってすすめられる。火星の地下には液体の水が存在する可能性がある。そこにリオチントの地下に生きるものと似た嫌気性独立栄養バクテリアがいるのだろうか。スペインでのこのボーリング実験が、火星の地下生命をさぐる一助になることを、MARTE チームは期待している。(「Aviation Week & Space Technology」Sept. 29, 2003 による)

●ESAのスマート1月へ

ヨーロッパ宇宙機関(ESA)の月ミッション「スマート1」は、9月27日フランス領ギニアのクールー基地からアリアン5ロケットによって打ち上げられ、順調に飛行中である(12月17日現在)。スマート1にはイオン推進エンジンが搭載され、近地点付近でこのエンジンを噴かすことによって次第に軌道を大きくし、2005年3月頃、月回周軌道に投入される予定である。重量367kg(燃料約70kgを含む)、ほぼ1m立方の小型衛星で、月表面を撮影する小型カラーカメラ、氷を検出するレーザー、化学組成を調べるX線スペクトロメーターなど合計約15kgの科学機器を搭載している。月周回軌道は近月点高度約300km、遠月点高度10000kmの極軌道が予定されており、月の南極付近が重点的に調べられる。(http://www.ssc.se/ssd/smart1.html#Payload、http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=34386 などによる)

●始源天体小研究会—小惑星・彗星・流星の起源に迫る—開催のお知らせ

ここ数年活発だったしし座流星群を機として、プロとアマチュアの緊密な連携も生まれました。また2004年にはリニア彗星とニート彗星などの肉眼彗星の出現も期待されています。今回は原始太陽系の情報を色濃く残した流星・彗星・小惑星についての講演・議論などをおこないますので、プロ・アマチュアを問わず多くの方々に参加していただければ幸いです。

開催日：2004年1月30日(金)・31日(土)

場 所：宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究本部(ISAS)(旧宇宙科学研究所相模原キャンパス)

主 催：宇宙航空研究開発機構、国立天文台、理化学研究所

共 催：東亜天文学会(交渉中)、日本流星研究会、彗星会議

問い合わせ先：矢野創(ISAS/JAXA, yano.hajime@jaxa.jp)

●惑星地質研究会会費納入のお願い

惑星地質研究会では『惑星地質ニュース』の発行経費として、会員の皆様から2年ごとに1200円(600円/年)の会費をいただいております。2004・2005年度会費納入の時期となりましたので、同封の郵便振替用紙でご送金くださるようお願いいたします。

編集後記：上記の月探査機 SMART-1 をはじめとして、ESA のマーズエクスプレスは 12 月 25 日、NASA のスピリット、オポチュニティの 2 機のローバーは 1 月 4 日と 1 月 25 日の火星着陸に向かって順調に飛行中です。一方、日本は 11 月 29 日、H2A ロケットの固体ロケットが分離できず打ち上げ失敗、12 月 9 日には「のぞみ」の通信の回復不能から火星軌道への投入断念など、災難続きです。原因がしっかり解明され、来年からは 2 度のこのような事故のないように祈りたいものです。(S)