

21世紀、日本は月を目指す

－宇宙開発事業団の月探査計画－

寺蘭 淳也・滝沢 悦貞・大獄 久志・金子 豊

Jun-ya TERAZONO・Yoshisada TAKIZAWA・Hisasto OHTAKE・Yutaka KANEKO

1. はじめに

アポロから四半世紀。あの歴史的な探査から、長いブランクを経て、我々は再び月へ戻ろうとしている。クレメンタイン衛星、LUNAR-A、ルナー・プロスペクタなど、月探査の計画が次々と実行に移されている。宇宙開発事業団（NASDA）では、月利用のための探査ミッションの検討を進めている。本文では、その成果について述べるとともに、現在検討しているミッションについての概要を説明する。

2. 月をどう利用するか？

ひとくちに月を利用するといっても、その立場はさまざまである。例えば、月自体に含まれる物質の利用や、月自体の環境を活用するという考え方もある。ここでは、現在我々が考えている主な月利用の構想について述べることにする。

月資源の利用

これまでのさまざまな探査から、月は鉄やニッケル、揮発性元素などには乏しいことが分かってきている。しかし、斜長石に含まれるアルミニウムや、海の玄武岩に含まれるイルメナイトなどからとれるチタンや鉄など、有望視されている資源が存在することも事実である。これらの資源は、将来月面基地などが構築される場合に活用されることになるであろう。これらを地球上から運んでいくには、コストがかかりすぎるためである。アルミニウムやシリコンなどは、構造物だけでなく、ロケットなどの燃料として使用することもできる。

また、月表面を覆うレゴリスも、重要な資源となる。レゴリスは、クレーター形成時などの衝撃に伴って生成される一種の砂であるが、粒径が非常に細かい（0.01～1mm）ことが大きな特徴である。レゴリスには、太陽風として月に吹き付けられている水素やヘリウム、窒素などの揮発性元素が吸着されている。これらを取り出すことは比較的簡単であり、燃料や生命維持、工業などに役立てることができる。

さらに、月の極地域に氷が存在している可能性も指摘されている。これも資源として利用することが可能である。

エネルギーの利用

月面で活動を行うためには、有人であれ無人であれ、エネルギーの問題を解決しなければなら

ない。特に、14 日間も続く月の夜においては、月の表面での温度は零下 100°C 以下にまで下がる。この厳しい夜間に、観測機器、さらには生命を維持していくためのエネルギー源を確保することは、長期間の月面活動を支える上で最初に解決しなければならない問題である。

月面で得られるエネルギーとして代表的なものは太陽光があるが、これをどのように利用するか、調査・研究を進めている。現在、レゴリスを溶かしてガラス状にしたものを地中に埋め、この中に太陽熱を蓄積することによって温度差発電を行う、「ガラスの海」構想などを検討している。

月面天文台

月面におくべき恒久施設として最も実現性が高いものに、月面天文台がある。月面は、天文観測にとって理想的な環境である。地震が少ないため精度の高い干渉計を設置でき、重力が地球の 6 分の 1 であることから、大型望遠鏡の設置も地球に比べれば簡単である。大気がないため、地球上では観測できない波長の電磁波も捉えられる。月の裏側では地球からの電波雑音が遮られる。月の極地域の永久影領域では、温度差が少なく、望遠鏡にとってはきわめて理想的な環境である。

3. 月利用のために何を観測すべきか？

上述したような月利用の青写真を踏まえて、そのために何を観測すべきかを考えてみる。月資源を利用するために最も基礎的な情報としては、表面の岩石や鉱物組成などのデータであろう。これらはすでに、アポロやクレメンタインなどで大まかな特徴は得られているが、実際に月資源を採掘する段階では、これらの探査機によるデータよりも、空間的にも、あるいはスペクトルとしても、多くの情報が必要となる。また、資源利用の観点からみて、月全面にわたる元素組成分布が得られることが望ましい。

一方、移動探査機（ローバ）による月面探査や、月面天文台などの施設の建設のためには、3 次元での地形情報がなければならない。ローバで動く場合には、空間分解能で 1~10m という高精度のデータを得るべきである。

資源採掘の観点からは、特にさきほど述べた揮発性元素の存在度などを考えて、レゴリスの成熟度（maturity）を調べる必要があるようである。将来の有人活動の可能性を考えると、放射線や隕石・微粒子などの環境を計測しておくべきである。

以上のような観測の要求を踏まえて、行うべき観測項目とそのためのミッション機器を、表 1 にまとめた。この中で、光学イメージングスペクトロメータは、鉱物組成を決定するために、約 20~100 バンドのスペクトル幅と、10~100m 程度の解像度をもったものを考えている。また、月面地図の作成のために、立体視ができることが望ましい。

4. 月探査の 3 段階

現在我々は、月探査には 3 つの段階を踏まえるのがよいと考えている。すなわち、

- ① 周回衛星による探査・着陸実験
- ② ローバによる探査
- ③ サンプルリターン探査

である。それぞれについてみていくことにしたい。

①周回衛星による探査・着陸実験

上で述べたリモートセンシングによる資源探査を行うための周回衛星は、太陽活動が極大期に達する、2001年頃に打ち上げることを計画している。この時期に打ち上げる利点は2つある。まず、蛍光X線スペクトロメータにより検出できる元素が増えること、そして放射線量の極大値を測定することができることである。

衛星の構成例は図1に示した。この衛星の大きな特徴は、前面に着陸実験機を搭載していることである。これは次の表層探査を行うための着陸技術を習得するためである。ミッションは1～2年の期間を予定している。

衛星は極軌道を周回し、クレメンタインとは異なり、円軌道をとる。衛星の高度は100～300kmを予定している。全体の重量は約2000kg（月周回軌道投入時）という大きさである。過去の日本の月惑星探査衛星に比べても大型の本格的な探査機になる。

②ローバによる探査

周回衛星による探査が終了し、月全面にわたってマッピングが完了すれば、ローバによる探査ができるようになる。現在宇宙開発事業団では、月探査を念頭に置いたローバの研究を進めている（図2）。このローバは、自律走行の機能や不整地走行など、月で考えられる環境に対応した機能を持っている。現在、移動速度は時速1km/sほどで、太陽電池で動作するので、月の昼間の間に約300kmの距離を動くことが可能である。

ローバには、カメラやその場測定を行うための各種計測機器を搭載し、月の中でも地質学的、あるいは資源利用の観点から興味のある地域を探査することになるであろう。時期としては、2000～2010年代の中頃を予定している。

表1 月利用のための観測項目とそのためのミッション機器案

観測項目	観測機器	利用可能性のための機器仕様
地形（極域を除く）	レーザー高度計	計測高度 100km 測定精度 1～10km ビーム広がり 0.1mrad
鉱物組成分布	光学イメージング スペクトロメータ	観測波長 0.35～2.5μm バンド数 20バンド バンド幅 10～30nm 空間分解能 10～100m
レゴリス粒度分布		
元素組成分布	蛍光X線スペクトロメータ	エネルギー範囲 1～10keV エネルギー分解能 300eV at 1.5keV 空間分解能 10km×10km
放射線環境	放射線計測装置	TBD（検討中）
微粒子環境	微粒子計測装置	TBD（検討中）

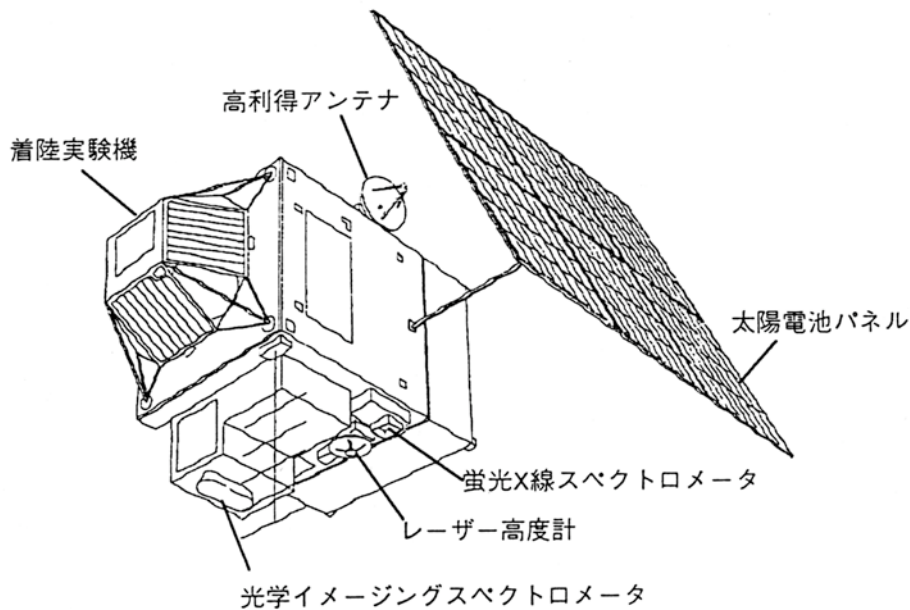


図1 周回探査機のコンフィギュレーション例

③サンプルリターン

ローバなどによる地上近接探査が完了すれば、月表層物質の元素や鉱物の組成などについては、リモートセンシングに比べて格段に詳しい情報が得られる。しかし、最終的には、サンプルを地球に持ち帰り、地上の実験室でより詳しい実験を行う必要が生じるであろう。そのためにも、サンプルリターンミッションを考えなければならない。現在サンプルリターンについては、具体的な検討を始めたところであり、今後ローバや周回観測に検討結果とあわせて、総合的なミッションとしての計画を立てていこうと考えている。サンプルリターンミッションの時期は、2000－2010年代の中頃～末頃になるであろう。

5. その後の月利用

これからの探査ミッションが終了した時点で、月の具体的な開発に入ることになる。最初に月面に設置すべき恒久的な施設としては、無人で長期にわたって運用できるものがよく、月面天文台などが最適である。また、これらの活動をサポートするための施設も必要になる。特に、エネルギー生産・伝送施設や、通信施設などが必須である。これらの施設が整い、月面に無人の観測拠点が成立するのはおそらく2015年以降になる。

その後、有人月面拠点が建設されることになるだろう。有人活動のためには、生命維持のための空気、水の生産装置が必要になるほか、放射線や隕石などから人体を防護するための設備も設営しなければならない。無人施設に比べると格段に規模の大きな基地となることから、月で採掘

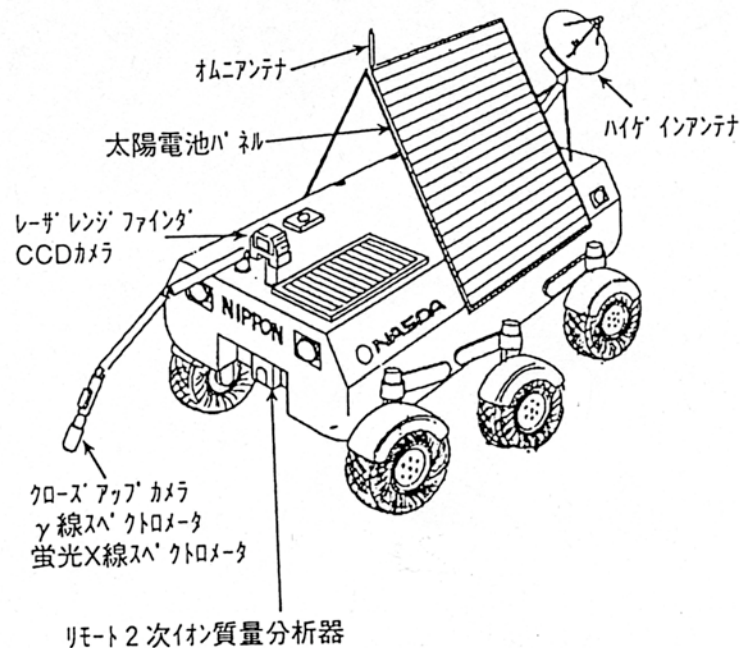


図2 月面移動探査機のコンフィギュレーション例

した資源を利用した施設の建設が必要になる。必要な課題が全てクリアでき、月面に最初の有人拠点ができあがるのは、2020年以降になるであろう。

6. そして、ふたたび月へ…

冒頭にも述べた通り、世界的に再び月への関心が高まりつつある。アメリカもヨーロッパも、周回、あるいは着陸機による月探査を計画している。日本は、LUNAR-Aという、これらの先駆けともいえるミッションを行おうとしている。

これらのミッションはいずれも、科学探査をメインに据えている。しかし、クレメンタインは「鉱夫の娘」であり、ルナー・プロスペクターは「月の探鉱者」である。月で得られる資源やエネルギーが地球に持ち帰れる日はまだ先かも知れないが、少なくとも、月面に有人の基地を作る場合には、その材料や維持のためのエネルギーは、かなりの部分を月面で得なければならないはずである。その意味でも、月資源の量や分布を調べ、将来の利用に備えておくことが重要である。また、月は人類の共有財産であり、国際協力という問題が必ず浮上する。この問題についても今後議論を重ねていかなければならない。一方で、日本は月探査について系統的な計画を立てている唯一の国であることから、将来の月探査についてのイニシアチブをとるべき立場にあるともいえる。

いずれにしても、21世紀の幕開けを飾る探査は、我々にもっとも身近な天体、月ということになるであろう。今後、世紀の変わり目に向けて、利用面と科学の両面から、月探査に向けた基礎研究を積み重ねていく必要がある。

(筆者の所属はいずれも宇宙開発事業団)

論文紹介

水星の表面に玄武岩は存在しない

Jeanloz, R., Mitchell, D.L., Sprague, A.L., and de Pater, I., 1995, Evidence for a Basalt-Free Surface Mercury and Implications for Internal Heat. *Science*, 268, 1455-1457.

1974～75 年のマリナー 10 号による水星表面の撮影から 20 年がたったが、水星はまだ多くの謎を秘めた惑星である。水星には弱い磁場（表面での強さは地球の約 0.7%）が存在するので、大きな金属核の一部が融けているとも思われるが、一方では水星の半径は小さいので、火山作用などによる熱流出によって、内部は比較的早い時期に冷えてしまっただろうとも考えられてきた。

内部からの熱放出を考えるにあたっては、マンツルの部分溶融によっておこる玄武岩質火山活動がとくに重要である。現在でも地質学的に活発な地球や金星に比べると、水星は月や火星と同様に熱流出による老衰が早かったにちががなく、地殻－マンツル系の 50%が玄武岩質マグマに分化して噴出したと考えることができる。しかし、表面画像の写真地質学的研究からみると、水星表面に火山岩がどの程度存在するかは大きな問題である。著者らは、水星表面に玄武岩が豊富に存在するかどうかという問題に興味をもち、いろいろな方法でこれを検討して、否定的な結論を得た。

著者らは、水星マンツルが基本的にコンドライト質またはかんらん岩質で、Fe/Si 比が高い組成をもつと仮定し、周波数 4.8～100GHz（波長 6.2～0.3cm）のマイクロウェーブ領域における水星表面からの熱放射を画像化して、モデル画像と比較した。水星の自転と公転は 3：2 の共鳴関係にあり、水星面での昼は 88 日間（1 公転周期分）つづく。この期間の表面加熱は波長に依存し、特有の加熱パターンを示す。得られた熱分布画像を、それに最もよく合致するモデル画像と比較することによって、水星表面における熱分布の変異を知ることができる。

その結果、この画像から求めた誘電損失係数（dielectric loss tangent）は、同一周波数（450MHz）で比較すると地球や月の物質の値よりも低い（すなわち熱損失が少ない）ことがわかった（図 1）。この結果から外挿すると、水星表面にはペロブスカイト（ CaTiO_3 ）が 1～10% 以上は存在しないことになる。ペロブスカイトは原始太陽系星雲中の重要な高温凝縮物であるが、これが少ないことと、水星のまわりにアルカリに富む大気が存在するという観測事実は、水星の地殻組成がとくに難揮発性元素ばかりではないことを意味している。

次に、450MHz における損失係数から、G.H.Heiken et al.の方法（「Lunar Sourcebook」Cambridge Univ. Press, 1991）にもとづいて、水星表面の岩石の $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ 含有量を 1.2 重量%と見積もった（図 2）。これは月の高地をつくる斜長岩の $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ 量（<6.0 重量%）よりも低い。全体的にみても $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ 存在度の空間的変異は月（>15%）よりも水星（<5%）でずっと小さい。

以上のことから、水星の表面は、Fe と Ti が大きく枯渇した斜長岩質の物質からなっていると結論できる。この考えは、可視、近赤外、中赤外波長での観測ともよく一致する。とくに水星表面の中赤外反射スペクトルからは、斜長石に富んだ地殻の存在が直接に推定されている。こうして

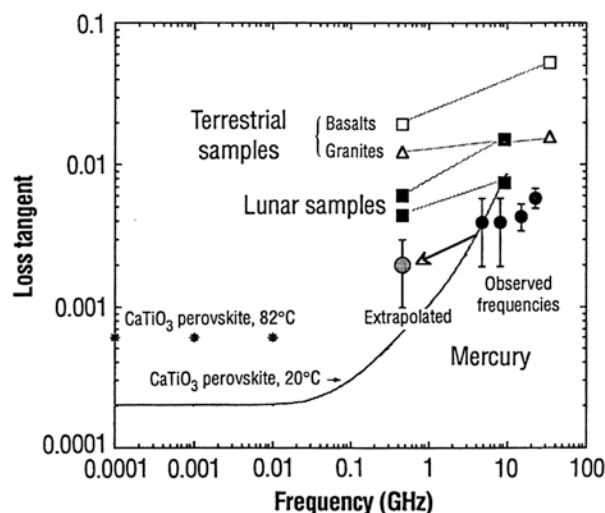


図1 水星表面のマイクロウェーブ画像から求めた誘電損失係数の値。地球と月の岩石の実験室での測定値との比較を示す。水星の値は4.8~15GHzでの測定値を0.45GHz (450MHz) の値に外挿したもの(矢印の先)を示す。

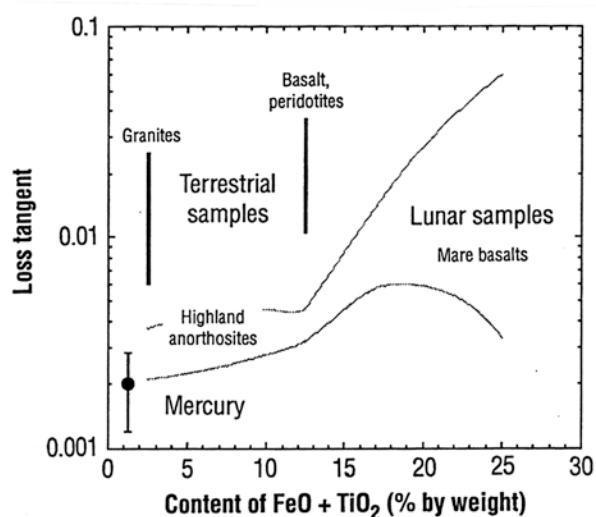


図2 水星の表面と地球の岩石、月の岩石についての、450MHzにおける誘電損失係数の値とFeO+TiO₂量との関係。

水星の地殻は月の高地に似たものであると考えられる。

水星のグローバルな溶融はジャイアントインパクトによって誘発され、マグマオーシャンの凍結によって、月と同様な単一プレートの惑星になった。ジャイアントインパクト後に残った薄いマントル(厚さ数百km)における対流とそれによる熱放出は不活発であった。衝突後の冷却と収縮で、水星表面は圧縮テクトニクス場となったので、玄武岩質火山活動は停止し、内部からの熱の放出は、水星の歴史を通してきわめて限定されたものとなった。したがって水星内部は熱く保たれつづけており、このことが、マントルが薄いにもかかわらず磁場が存在する(融けた核がある)という、一見矛盾するような事実をうまく説明する。

しかしこうした結論は、水星表面における火山活動を必ずしも否定するものではないと著者らは言う。深部で生成した玄武岩質マグマは表面には噴出しなかったが、地殻下部に滞留してアルカリ火山岩マグマに分化し、二次的に噴出したかもしれない。実際、表面の中間赤外スペクトルはアルカリ火山岩ともよく合い、水星大気がアルカリ富む事実を無理なく説明するようにも見える。

全体としての結論は、水星表面では玄武岩質火山活動はおこらなかったということであり、このことはハッブル宇宙望遠鏡や将来の探査機による観察で検証可能な予測である、と著者らは結んでいる。

(小森長生)

論文抄録

金星のラダ高地とラビニア平原の期限と進化

Magee, K.P., and Head, J.W., 1995, The role of rifting in the generation of melt: Implications for the origin and evolution of the Lada Tera—Lavinitia region of Venus. *Jour. Geophys. Res.*, 100, E1, 1527-1552.

金星の南半球にあるラダ高地と、初期のマントル下降流の場とみられるラビニア平原の境に沿って、長さ 6000km 以上のリフトゾーンがある。ここには多様な火山地形や洪水玄武岩に相当する大規模な溶岩流が分布する。これらはマントル上昇流の場にできたと考えられ、プリュームの上昇によって起こった地殻の薄化と、減圧によるマントル物質の溶融の結果生成したものである。(K)

金星表面における揮発性金属元素の移動

Brackett, R.A., Fegley Jr., B., and Arvidson, R.E., 1995, Volatile transport on Venus and implications for surface geochemistry and geology. *Jour. Geophys. Res.*, 100, E1, 1553-1563.

高温の金星表面では、揮発性金属ハロゲン化物とカルコゲニド (Cu, Zn, Sn, Pb, As, Sb, Bi など) の蒸気圧が高い。これらの金属蒸気は高地へ運ばれると、8.5K/km の高度による温度減率に対応してそこで凝縮、集積する。このことは地球の火山の火道で観察される事実からも類推される。金星での低地から高地への揮発性金属の移動量は、厚さにして $0.01 \sim >10 \mu\text{m}/\text{年}$ と見積もられる。(K)

床に割れ目をもつ金星の衝突クレーター

Wichman, R.W., and Schultz, P.H., 1995, Floor-fractured impact craters on Venus: Implications for igneous crater modification and local magmatism. *Jour. Geophys. Res.*, 100, E2, 3233-3244.

床面に割れ目をもつ金星のクレーターを、月にある同類のクレーターと比較すると、金星ではより局地的な、クレーター内に限定されたマグマの活動があったものと推定される。特に低高度に位置する 3 つのクレーターについて、マグマの貫入による変形モデルを考えると、マグマの圧力は 200~300bars、貫入の深さは 1~6km のオーダーである。これは、大気圧の高い低地ではマグマの浮力が中立になる深さが浅いという理論と一致する。(K)

マニコーガンクレーターにみられるインパクトメルトから類推した火星の表面物質

Morris, R.V., Golden, D.C., Bell III, J.F., and Lauer Jr., H.V., 1995, Hematite, pyroxene, and phyllosilicates on Mars: Implications from oxidized impact melt rocks from Manicouagan Crater, Quebec, Canada. *Jour. Geophys. Res.*, 100, E3, 5319-5328.

カナダのマニコーガンクレーターから得たインパクトメルト岩の酸化物には、ヘマタイト、輝石、フィロシリケイト (スメクタイト) などが含まれている。これらの分光学的性質は、火星の反射スペクトル中にみられるヘマタイトや輝石の性質とよく一致する。このことから、火星ではインパクトメルトの岩層が酸化されて変質し、これらの鉱物を含む表土が生成したと考えられる。(K)

火星の北方平原における大陸氷河の作用

Kargel, J.S., Baker, V.R., Beget, J.E., Lockwood, J.F., Pewe, T.L., Shaw, J.S., and Stom, R.G., 1995, Evidence of ancient continental glaciation in the Martian northern plains. *Jour. Geophys. Res.*, 100, E3, 5351-5368.

火星の北方平原には多くの場所に、2~6km 間隔のうず巻き状リッジと幅 150km の舌状パターンの地形や、それに伴わない曲がりくねったトラフなどがみられる。これらは、モレーン、エスカー、トンネルチャネルなど地球上の氷河地形に似る。ドラムリンがみられない点が地球と異なる。これらの地形は、アマゾン代初期に北方平原をおおった大陸氷河によって形成されたと考えられる。(K)

火星ヘラス地域の地質と景観進化

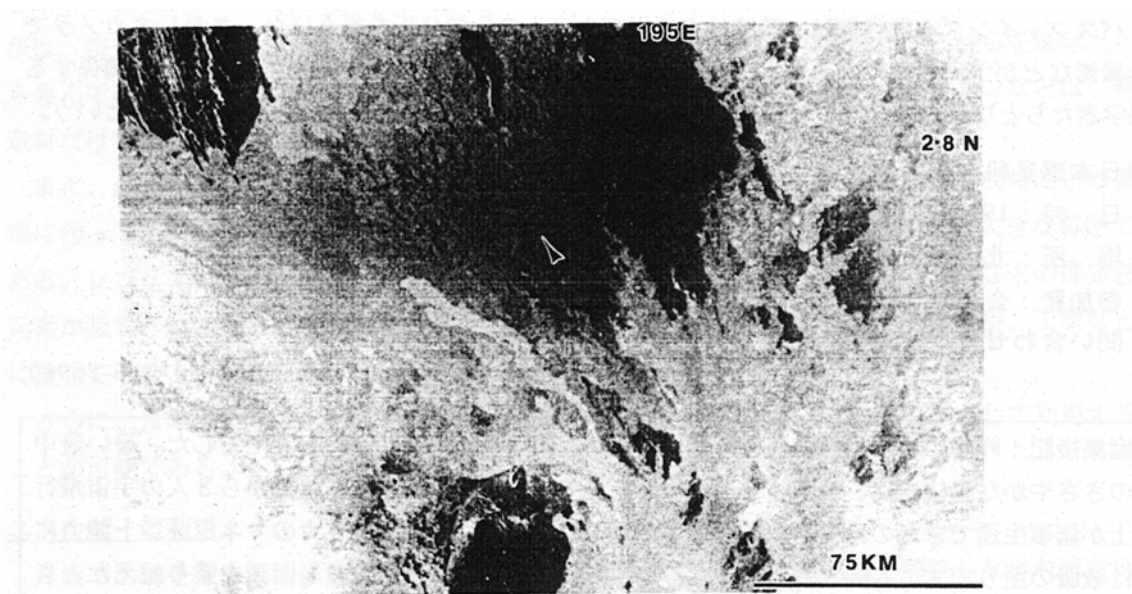
Tanaka, K.L., and Leonard, G.J., 1995, Geology and landscape evolution of the Hellas region of Mars. Jour. Geophys. Res., 100, E3, 5407-5432.

ヘラス盆地は 40 億年以上にわたって、火山活動、構造運動、流水による侵食、マスウエイスティング、風成作用などの場であった。ノアキス代後半に盆地は溶岩流で埋められ、ヘスペリア代の初めに暑さ 1~2km の細粒風成層が盆地内に堆積した。ヘスペリア代後期からアマゾン代にかけては盆地のへりや床、周辺高地を風成層がおおった。これらは侵食をうけたが、氷河による侵食があったという考えには賛成できない。(K)

金星マート山の大規模火山活動

Robinson, C.A., Thornhill, G.D., and Parfitt, E.A., 1995, Large-scale volcanic activity at Maat Mons: Can this explain fluctuations in atmospheric chemistry observed by Pioneer Venus? Jour. Geophys. Res., 100, E6, 11755-11763.

パイオニア金星号の UV スペクトロメータの観測では、1978 年の金星大気中の SO_2 濃度は 100ppm で、他の年の約 10 倍も多かった。大気中の SO_2 は H_2SO_4 のエアロゾルに急速に変化するので、このことは 1978 年に巨大噴火があったことを示す。いっぽう、マート山（山頂は半径 6051km の基準面よりも 9km 以上高い大型盾状火山）は、金星面で最高の放射率を示す。金星の大気下では、火山活動で噴出した玄武岩の鉱物組み合わせが不安定で、数千万年かけて放射率の低い他の鉱物組み合わせに変化する。したがって放射率は、年代の尺度として利用できる。このことからマート山の高放射率の部分は最近の噴出物で、SAR 画像による判断では火砕流堆積物のようにみえる。1978 年の巨大噴火は、マート山のこの堆積物をもたらしたプリニー式噴火であった可能性が大きい。(S)



マート山北部の新鮮な火砕流状の堆積物

S≠NC：火星の隕石は一ヵ所から来たのではない

Treiman, A.H., 1995, S≠NC: Multiple source areas for Martian meteorites. Jour. Geophys. Res., 100, E3, 5329-5340.

SNC 隕石は、火星での単一衝突によって地球にもたらされたとみられてきたが、岩石学的、科学的、年代学的なデータを総合すると、N（ナクライト）と C（シャシナイト）は、S（シャーゴッタイト）とは別の場所からきたと考えられる。火星表面の比較的若い（ $\leq 1300\text{Ma}$ ）場所から 2 種類の隕石がきたということは、これらの起源となったクレーターがより小さなものか、またはクレーターの生成率がこれまでよりも高かったのかどちらかであろう。 (K)

INFORMATION

●マーズパスファインダー計画の近況

アメリカの次期火星探査計画「マーズパスファインダー」については先に紹介したが（本誌 Vol.7、No1 小松吾郎氏の記事参照）、その後の情報が Planetary Society 発行「Mars Underground News」Vol.7、No.2（1995）に掲載されている。

それによると、この計画の準備のために、今年 9 月 24～29 日、計画にたずさわる科学者と技術者たちのグループが、ワシントン州のチャネルドスカブランド（Channeled Scabland）でフィールドエクスカーションを行い、近くのスポケーン市でのワークショップを開催するという（本誌発行の頃にはちょうど実施中であろう）。

マーズパスファインダーは 1997 年 7 月 4 日、火星のアレス峡谷（Ares Valles）に着陸が予定されている。ここは、かつて火星で起こった大洪水によって流し出された物質が、広大な平原をなして堆積している所である。一方、ワシントン州の中部から東部にかけて広がるチャネルドスカブランドは、1 万 3000 年前の最終氷期の終わり頃に、融氷河水の湖が決壊して大洪水をおこした地帯で、規模こそ火星のアレス峡谷に及ばないが、地形的には非常によく似た場所である。パスファインダー計画の予行演習に絶好の地をして目をつけられたのも当然と思われる。

パスファインダー探査機は、着陸地点の岩石や表土の化学分析を行うほか、ステレオカメラでの撮影などが予定されているが、スカブランドではこれらのテストが実施される。また関係する科学者たちとワシントン州から運ばれて参加する学校教師たちとの交流も計画されるという。

●日本惑星科学学会秋季講演会のお知らせ

日 時：1995 年 11 月 13 日（月）～14 日（火）

場 所：北海道大学学術交流会館

問い合わせ先：北海道大学低温科学研究所 香内晃

(TEL. 011-716-2111 ext. 5469 FAX.011-716-5698)

編集後記：昨年にも劣らぬ猛暑続きの夏でしたが、ようやく快適な季節を迎えました。暑い最中のささやかな息抜きに、映画「アポロ 13」を見てきました。絶望的な状況から 3 人の宇宙飛行士が無事生還できたのはまさに奇跡ですが、それを可能にしたアメリカのマネジメント能力には敬服の至りです。人間が最も偉大にみえるのは、成功したときよりも困難を乗り越えたときであるという、ある人の言葉を思い出しました。 (K)