惑星地質ニュース　PLANETARY GEOLOGY NEWS
Vol.17 No.4　Dec.　2005
発行人：惑星地質研究会　小森長生・白尾元理・出村裕英
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

火星の赤土はどうしてできたか

―その性質と起源をめぐる問題

Amos Banin

1976年に2機のバイキングランダーが火星に着陸して以来というもの、火星表面に広く分布する土壌とダストの性質や起源は、われわれの頭を悩ませてきた。火星を赤く色づけている細かな土は、液体の水の存在や岩石の風化プロセス、そしてこの惑星における生命の歴史にさえもかかわっているかもしれない。それは、ダストストームのふるまいが示すように、火星の気候サイクルに重要な役割をはたしてもいるだろう。土やダストは探査活動にとってじゃま者となる場合もあるが、その一方で、水や燃料を供給し、植物の生長と食料生産を助けるなど、貴重な資源となりうることもあるのだ。火星の土壌については、これまでにどんなことがわかっており、そしてどんな謎がのこされているのか。地球の土と似たものはあるのか。火星ローバーのスピリットとオポチュニティ、および地球上からの観測による最近の成果は、われわれの理解を助けると同時に、また新たな疑問を投げかけてもいるのである。

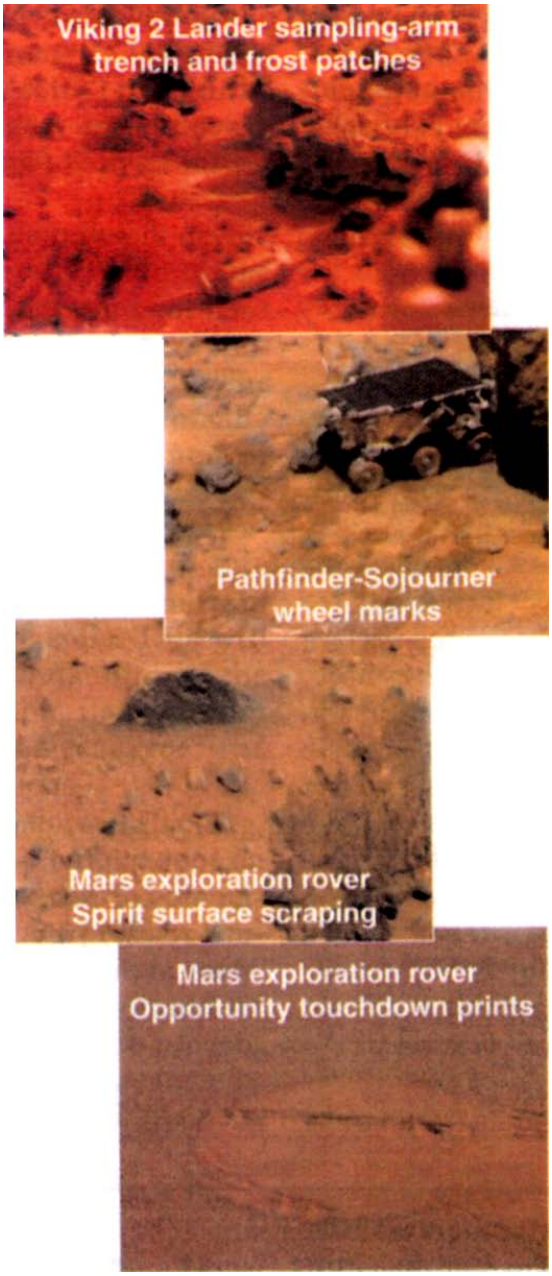
これまでにわかった火星土壌の特徴

バイキングランダーとオービター、ならびにパスファインダーのローバーから得られたデータによると、火星の表面は、大気中のダストとよく似た組成をもつ、細かい土壌でおおわれている。この土は、珪素、鉄、アルミニウム、マグネシウム、カルシウム、チタン、硫黄、塩素などの元素をユニークな割合で含む（地球上の土壌の多くと較べると、硫黄と塩素が比較的多い）。有機物は含まれておらず、生命体を破壊するようなつよい酸化作用があったことを示している。風化したアモルファスなシリケートと酸化鉄には富むが、粘土のような、よく発達した二次的シリケート粒子は含んでいない。カーボネートもないが、塩素と硫黄の塩化鉱物が濃集した蒸発岩や、強磁性鉱物は含んでいる。

スピリットとオポチュニティによって得られた最近の成果によると、ジャロサイト（jarosite、鉄みょうばん石）を含む、水中で形成され変質した岩石が局地的に分布している。ジャロサイトは強酸性の硫酸塩溶液を含む水環境で典型的に形成されている。このようなところは、地球上では鉱山の廃水や、酸性の硫酸塩土壌である。しかしながら、2台のローバーによって分析された土の元素組成は、一般的にみれば上にのべてきたようなものである。

火星土壌は風化で生まれたのか

ローバーのスペクトル観測によって、土壌中にはナノメートルスケールの酸化鉄の粒子が広く含まれていることがわかった。また、ローバーの車輪で地面に溝を掘ったり、岩石削り器で岩石



ランダーやローバーによって撮影された火星の土壌のクローズアップ

の表面をけずったりして、土壌や岩石の断面をとり出し、元素の濃集ぐあいや鉱物種が調べられた。その結果、ナノメートルスケールの酸化鉄粒子と蒸発岩が、通常、土壌と大気の接触面、および岩石と大気の接触面に濃集していることもわかった。

これらの事実は、多くの疑問点を浮かび上がらせることになった。隕石によって運びこまれた、あるいは別の方法でつくられた有機物はどこにあるのか。土壌はほんとうにつよく酸化されているのか。もしそうなら、酸化はどの程度まですすみ、それはどんなメカニズムでおこったのか。蒸発岩は土壌中にどのようにして存在するようになったのか。それは本当に水に運ばれた蒸発岩なのか。それは火星表面に広く水が存在していたことの証拠になるのか。もしそうならば、低温熱水作用による風化で生成するであろう粘土やカーボネートのような鉱物はどこにあるのか。土壌中に豊富にある二次的酸化鉄やシリケートが、鉱物学的により安定な大きな粒子としてよりはむしろ、ナノメートルスケールの結晶の形で存在するのはなぜか。土壌は化学的、鉱物学的に、その土地の表面にある岩石と結びついているのか。そして土壌中には絶滅した、あるいは現存する生命の何らかのしるしがあるのか。

土壌形成のいくつかの仮説

これらさまざまな疑問を説明するために、いくつかの仮説が提唱されてきた。たとえば、“酸性霧”のシナリオもその1つである。それによると、土壌の大部分は、何億年にもわたって、岩石と大気の接触面でおこったミクロなスケールの風化作用によって生成したものだという。このユニークな風化プロセスは、酸性の火山活動で生ずるエアロゾルの霧によっておこるもので、その酸性霧は、地表の岩石中の鉱物との化学反応を通して中性化された。この風化過程に液体の水は関与しておらず、そのために、大きな結晶の成長も、また粘土のような二次的鉱物の生成も起こらなかった。また別の仮説によれば、液体の水—それは浅い海でも、酸性の地下水のしみ出しでもよい—は、ジャロサイトを形成するような水環境をつくり出したとする。

火星が本当に土壌でおおわれているかどうかについては、いくつかの議論がある。S.W.Squyersたち（2004）は、火星の土壌は、“ルーズな固まっていない物質で、岩石や基盤岩、あるいは固結した堆積物とは区別すべきだ。有機物や生命体の存否については考えない”という。

私も同様で、しかもレゴリス（regolith、固体岩石天体の表面をおおうルーズで不均質な物質）よりも土壌（soil）の語を使うほうがよいと思うし、火星の土を表現するのによく使われる“dirt”の語もよいだろう。とはいえ、このような定義はおそらく狭すぎるので、地球上の土壌について一般的に使われる定義により正確にあわせるためには、定義を広げるべきだろう。

大気と水と地殻岩石の相互作用

地球の土壌は、地殻の表面が大気や水や生物の作用によって風化してできた層を構成するものと定義できよう。土壌は、風化した岩片、非風化の岩片、有機物、生物遺体などの混合物を含む、多孔質の鉱物マトリクスからなっている。風化作用の主役は、物理的作用（熱による膨張と収縮、凍結と融解）、および化学的作用（たいていは加水分解作用だが、酸化・還元、その他の反応もある）である。

現在までにわかっている証拠によれば、火星の土壌は地球のそれに似て、大気と水の作用によって風化をうけた地殻表層部の非固結の層であると定義することができる。この定義に、生物の作用が入っていないことに注目してほしい。この土壌の一部が、火星の歴史の初期（そのころの地表は原始地球上の状態によく似ていた）につくられたという考えを排除することはできない。それゆえに、非生物的化学進化から原始生命への進化はおこりえただろうし、土壌をつくり出した岩石の風化作用は、このことによって促進されただろう。しかしながら現在わかっている証拠では、火星における岩石の風化と土壌の形成は、現在にまでつづくひじょうにゆっくりしたプロセスだということである。こうした風化プロセスは、火星の気圏と水圏からもたらされる大気と水の成分が、火星岩石と化学的に相互作用することによって進行する。たとえば、火星を特徴づける典型的な赤色は、大気中で光化学的に生成した酸化ガスによって、岩石中の鉱物に含まれる鉄分が酸化した結果によるものである。サルフェート（硫酸塩）と塩化物の蒸発岩の存在は、火山活動によって大気中にはき出された酸性揮発成分に由来する酸性霧による風化生成物が、土壌につけ加えられた結果であろう。水の流出（淡水であれ、濃い塩水であれ）やカタストロフィックな洪水、あるいは浅い火山活動による永久凍土の融解、などをとおして、火星の水圏は土壌の形成に影響をあたえた。これら放出された水は、火星の岩石と相互作用しあい、岩石の鉱物組成や性質を変えてきたのである。

気圏や水圏との化学的相互作用は、火星地殻表層部の鉱物組成や性質を大きく変えた。そしてそれはもともとの岩石の化学的活動性をいっそう高め、火星のグローバルな土壌層としての土壌圏（pedosphere）を形成した。このようなわけで、火星の土はレゴリスとよぶよりは土壌（soil）といったほうがずっとよい。これとは対照的に、地球の月は、隕石衝突などによって機械的に破砕された初生岩片からなるレゴリスでおおわれている。これらは大気や水による風化作用はまったくうけていないものである。

地球上の火星世界・アタカマ砂漠

火星の土壌によく似た土は、地球上のどこかにあるのだろうか。R.Navarro-Gonzalez たち(2003）は、地球上のもっとも乾燥した地域の 1 つであるチリのアタカマ砂漠に分布する土壌が、

火星土壌のモデルになると主張する。彼らはここで、土壌中の耕作バクテリアの数が南北の断面にそって急激に減少し、もっとも乾燥した地点で極小値に達することを見出した。バイキング生物実験のシミュレーションをもちいて検討すると、熱分解性の有機物は、より湿った地点からより乾いた地点への断面にそって大きく減少する。すなわち、非生物的蟻酸塩分解がすべての地点で見られたのである。この点で、アタカマ砂漠の土壌はまさに、火星の土壌にもっともよく似た地球の例だということができよう。

しかしながら、この発見は論争の的になり、多くの疑問が投げかけられてもいる。R.M.Maierたち(2004)の報告によれば、Navarro-Gonzalezたちと同じ調査地域で、それも表層部からではなく、もっと深い層準の土壌から耕作バクテリアを見つけたが、その数は何ケタも高い値だった。さらにくわしい計算と分析の結果、アタカマ砂漠の土壌は、バイキングの熱分解実験で分析された火星の土壌（その中の有機炭素の量は分析システムの探知限界を示すと考えられる［ほとんどの化合物では数ppb、若干の化合物では数100ppb］）よりもはるかに多くの有機炭素を含んでいた。Navarro-Gonzalezたちが報告したデータを再計算すると、アタカマの土壌からベンゼンや蟻酸として放出された有機炭素の総量は、もっとも乾燥した地点での約13000ppbから、最も湿った地点での約85000ppbまでにわたる。これはバイキングの機器の探知限界をはるかにこえるものである。

これからの課題

火星の土壌には、バイキングチームによって結論づけられたように、有機物はまったく含まれていないのだろうか。あるいは、バイキングの機器の検出能力に限界があったのだろうか。この疑問への答えは、火星生命の存否についてのわれわれの考えに大きく影響してくるだろう。将来の火星ミッションでは、何よりもまず、土壌中の有機炭素と、生命にとって重要な元素である窒素の全体量を分析しなければならない。このことは、土壌の形成のしかた、その反応性と毒性、資源としての有用性、そして宇宙生物学へのつながり、といったことへのわれわれの理解に大いに役立つだろう。

上にのべてきたいくつかの疑問にもかかわらず、アタカマ砂漠は地球上でユニークな場所である。それは、これからの科学研究のためにも保護、管理されるべきである。この砂漠のとくに重要な地域を選んで“自然保護区”とすることも考えられる。そうなれば、こうした場所は、将来の火星ミッションにとって、準備や地上実験の場としても役立つだろう。

〈訳者付記〉

①ここに紹介したのは、次の解説論文のほぼ全訳である。

Banin, Amos, 2005, The enigma of the Martian soil. Science,309 (5 Aug. 2005), 888-890.

わかりやすくするために意訳した個所があることをお断りしておく。著者のAmos Baninはイスラエルの Hebrew大学の土壌と水化学部門に属する科学者。NASAのSETI研究所の研究員もつとめる。

火星の土壌の性質や成因については、これまでにもいろいろな議論があるが、どうもはっきり

しないことが多く、第一、この問題についてきちんと書かれたものがあまりない。その点で理解と考察の一助になればと思い紹介した。このなかでふれられている、酸性霧による風化仮説などは興味深い。今後この方面の研究者がふえてくることを期待したい。

② soil の訳語としては、土と土壌の両方がある。従来からの地球上での日本語の定義によれば、土壌は、岩石が砕けてできた粒子の集まりに、動植物の遺体やその分解生成物（有機物）が混合した、地表の最表層を構成するもの、とされている。また土は一般的な用語で、土質工学などでは土壌物質をさすことばとして“土”を使っているともいう（「新版地学事典」平凡社、などによる）。このことからすると、土と土壌の語は学問的にはきちんと区別すべきであり、また火星の soil を土壌とよぶことには抵抗を感ずる人もあるだろう。しかしここではあまり厳密な区別はせず、土と土壌を、文脈におうじて便宜的に同じ意味（岩石の風化で生じた粒子状物質）で使ったことをご了解いただきたい。

〈追記〉 アタカマ砂漠の興味深い調査ルポが、このほど The Planetary Society の機関誌に掲載された。

Hudson, T., 2005, Dry Earth, Wet Mars. The Planetary Report, Vol.25, No.5 (Sept./Oct.), 6-10.

ぜひごらんいただきたい。　（小森長生訳）

論文紹介

火星における岩石の多様性とマグマの進化

Christensen, P.R., ほか 11 名, 2005, Evidence for magmatic evolution and diversity on Mars from infrared observations. Nature, 436 (28 July 2005), 504-509.

近年における探査機の高解像度撮影によって、火星表面の地形は、いろいろなスケールで多様性を示すことが明らかになってきた。しかし、表面物質の岩石学的、鉱物学的、ジオケミカルなデータは、まだそれほど十分には得られていなかった。

最近になって、マーズグローバルサーベイヤー（MGS）搭載の TES (熱放射スペクトロメーター) と、マーズオデッセイ搭載の THEMIS（熱放射画像撮影システム）の観測、および地上望遠鏡での可視／赤外観測などの成果によって、かなり細かいスケールで表面物質の岩石・鉱物学的、化学的性質がようやくわかるようになった。とくに THEMIS は、波長 6.8〜13.6 μm で 8 つのバンドの赤外スペクトルデータを取得し、高い解像度（100 m/pixel）で表面物質の局地的差異を明らかにした。

本論文で著者たちは、TES と THEMIS のデータを結びつけて議論し、火星表面の岩石の多様性とマグマの進化を論じている。

Nili パテラ火山でおこったマグマの進化

火星の代表的な暗色部として知られる大シュルチス（Syrtis Major）は、大火山地帯で、ヘスペリア代（約 20〜30 億年前）に形成されたと考えられる、直径約 1300km におよぶ扁平な大火山体が中心部に存在している。この火山体の頂部には、直径 400×200km の複合カルデラがあるが、その最北部の、直径 50km のカルデラをもつ火山体の部分は、Nili パテラと名づけられている。

Nili パテラカルデラの床面は、形成後 300 mほどドーム状に盛り上がり、南北方向の割れ目（グラー

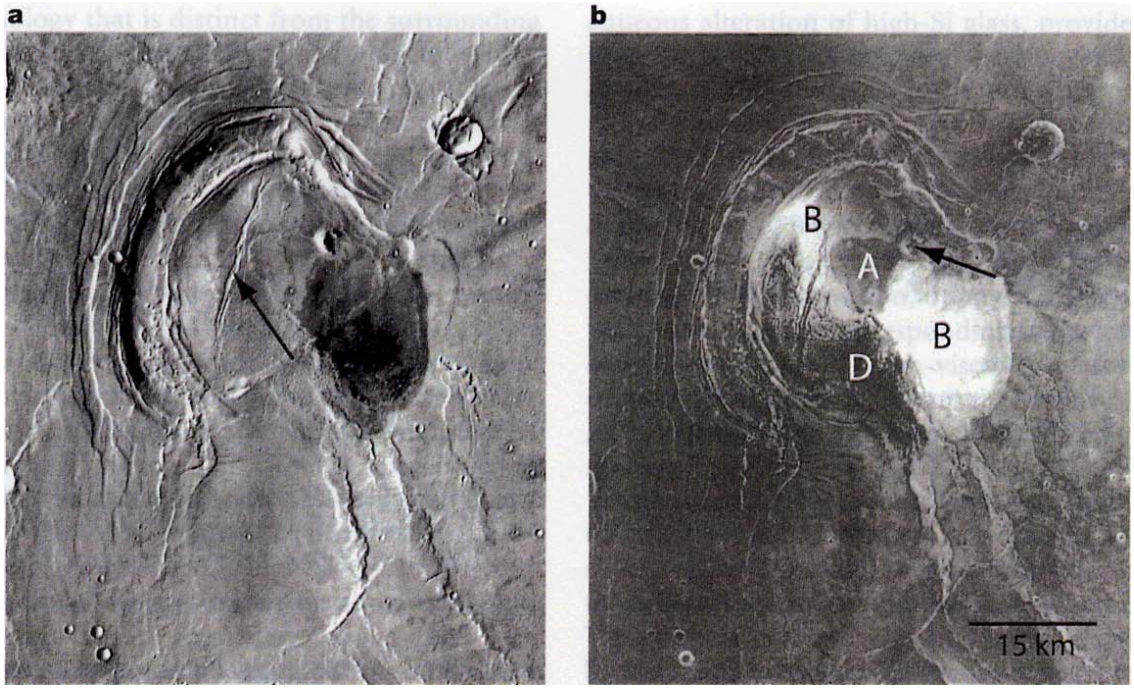


図1 Niliパティラカルデラとその周辺部のTHEMIS画像。a（左）は昼間の撮影。右方の暗い部分が基盤岩部分。矢印はグラーベンを示す。b（右）は夜間の撮影。Bの明るい（青色の）部分が基盤岩で、温度の高いことを示す。Aの暗い（赤色の）部分は舌状溶岩流。Dは砂丘地帯。矢印は砕屑丘。

ベン）が形成された。床面の約1/3の部分（900km²）は、夜間の温度が異常に高く（200〜214K）、固結したかたい岩盤からなることを示している。この岩盤地域の西方部分には、南西にむかって吹く風にはこばれた砂が堆積し、バルハン型砂丘群を形成しているのがみられる。砂丘を含むカルデラ底の他の部分は夜間温度が＞192±1K、熱慣性は＞400J m^{-2} $S^{-1/2}$ K^{-1}で、未固結の粗流物質からなっていることを示している。

THEMISとTESのスペクトル撮影によって、この火山のカルデラ底をつくる物質は2つのユニットに分けられることがはっきりした。まず、カルデラ底中心部の約12×12kmの区域をしめるユニットA（図1の赤色部分）、そしてカルデラ底の東と西の大部分をしめるユニットB（図1の青色部分）、である。またユニットAとスペクトルがよく合うフローユニットが、カルデラの南方50〜60kmにみられる。

ユニットAは、床面から約80mの高さの急斜面でかこまれた舌状の溶岩流で、高さ約300 mの円錐状砕屑丘をとりかこみ、またユニットBにできたグラーベンにまたがっている。ユニットBはユニットAよりも夜間温度が8〜9K高く、両者で表面状態や化学組成が異なっているであろうことを示している。

TESのスペクトルを実験室でのサンプルのスペクトルと比較することによって、2つのユニットの鉱物組成比が決められた。それは次のとおり。

ユニットB：斜長石35%、Caにとむ単斜輝石25%、普通輝石10%、硫酸塩10%、その他ガラス、かんらん石、炭酸塩少々。

ユニットA：斜長石30%、Siにとむガラス30%、単斜輝石15%、硫酸塩と普通輝石、炭酸塩少々。

ユニットBの組成は、南方高地の玄武岩（軌道上からのTESの観測によるタイプIの岩石）の組成によく似ている。同様のものはメリディアニ平原のオポチュニティ着陸地点でも確かめられている。

ユニットAの組成は、玄武岩質のユニットBにくらべると、ずっと珪長質である。計算でみちびき出されたユニットAのSiO_2含有量は60〜63重量%で、TESのタイプII岩石の56〜59重量%よりも多い。これは、これまでにわかったどの火星岩石よりもSiO_2量が高く、その値はデイサイト（石英安山岩）の

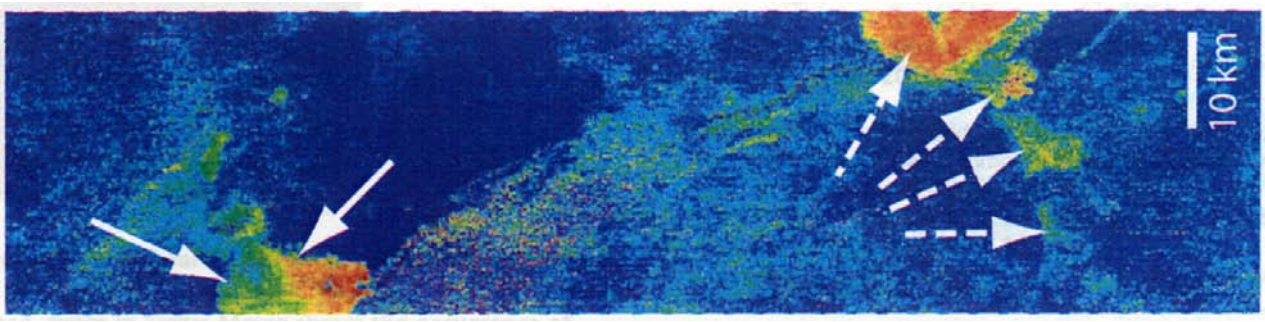


図 2　Nili パテラカルデラ（一部）とその南方の THEMIS 画像。左方が北を示す。左の矢印の明るい部分がデイサイト質舌状溶岩流。右の破線矢印部分は南方斜面上のデイサイト質溶岩流。

SiO_2 量の下限値に相当する。

両ユニットに含まれる硫酸塩の量は、火星全体の平均値よりはやや高い。THEMIS が得た 8 つのスペクトルは TES のスペクトルとよく合致し、100 m のスケールでデイサイトの定量的判定を可能にした。ユニット A に付随する砕屑丘コーンもデイサイト質なので、この砕屑丘とユニット A の溶岩流は同一噴出源をもっているのだろう。南方へのびる、スペクトル的に同じ溶岩流は、おそらく別の噴出源からのデイサイトだろう。

THEMIS と TES のどちらのスペクトルからも、砂丘群は玄武岩質物質からなると判断される。おそらく風上にある玄武岩質基盤岩の浸食によってもたらされたものである。

ユニット B は、カルデラ形成後に床面を満たした玄武岩質溶岩であり、ユニット A はその後に噴出した、よりシリカにとむ火山岩である。マグマだまりの中でおこるマグマの分別結晶作用は、時間とともに、噴出する溶岩の SiO_2 量を変化させるのが一般的である。大シュルチス地域におけるマグマの進化は、塩基性の玄武岩質マグマにはじまり、しだいに SiO_2 にとむデイサイト質マグマにまですすんだのであろう。

MGS 搭載の TES によって軌道上から得られたデータからは、火星表面に 2 つの岩石タイプ（I と II）のあることが明らかになったが、これは SiO_2 量の差異にもとづくものである。SiO_2 に富むタイプ II の岩石物質は、北方低地の多くの部分にみられ、火山ガラスにとむ玄武岩質安山岩を表しているとみられている。ただし別の考えとして、タイプ II の物質が、シリカの多い風化生成物や水による変質鉱物とからなっているとする見方もあるが。

火星におけるマグマの分化と進化が、局地的に限定されたものであったのか、今回の考察内容だけからはまだわからない。

かんらん石にとむ玄武岩

火星の岩石におけるかんらん石（オリビン）の存在は、それが、①マントル由来の初生的マグマの生成を示す重要なしるしであること、②水のあるところで変質・風化しやすく、過去の環境をしめす指標となること、の 2 点で重要である。

かんらん石にとむ岩石は、軌道上の観測からいくつかの地域で見つかっているが、THEMIS のデータによれば、それらはたいてい局地的なスケール（数 100 m程度）である。その 1 例として、ガンジス峡谷（Ganges Chasma）西部のすぐ南のオーロラ平原（Aurorae Planum) にある直径 60km のクレーター底がある。このユニットは、THEMIS と TES のスペクトルから、かんらん石にとむ玄武岩であることがわかった。THEMIS 画像によるとその夜間温度は周辺よりも 10〜12 K高く、熱慣性は＞800J m^{-2} $S^{-1/2}$ K^{-1} で、十分かたい岩石物質である。このかんらん石玄武岩は、オーロラ平原をつくる厚い岩層の最上部層を構成するもので、平原形成の最終段階に流れ出した溶岩流である。

同様なかんらん石玄武岩は、ガンジス峡谷の壁面の、地表から4.5km下の場所にも露出している。このユニットは約100 mの厚さをもつ。この岩層は、約15%のかんらん石を含む玄武岩で、かんらん石の組成はMg/(Mg+Fe)が0.60〜0.70（$Fo_{60\sim70}$）である。

以上のように、層準の異なる玄武岩層がいろいろ見られるということは、かんらん石にとむマグマが、平原形成時代をとおして何度となく噴出したことを物語っている。

かんらん石にとむ玄武岩の他の例は、アレス峡谷（Ares Vallis）、ニリフォッサ（Nili Fossae）などにもみられる。また、超塩基性火山岩であるピクライト玄武岩も、スピリットローバーによってグセフクレーターで見つけられている。かんらん石にとむ玄武岩がこのように広く見つかってきたことは、あまり進化していないマグマからうまれたものが多いことを示し、なかにはマントルのゼノリスを含んでいるものもあるのだろう。

石英を含む花こう岩的岩石

石英は、マグマの分別結晶作用が極度にすすんでできた岩石を知るうえで重要な存在であるが、火星ではこれまで見つかってこなかった。かんらん石とは異なって、石英は風化作用につよく、古い岩石や堆積岩の中でも存続しうる。

THEMISのデータは、大シュルチス火山体の北斜面にある2つの衝突クレーター（直径30km）内の中央丘に、石英を含む岩石が露出していることを示した。これに対応するTESのスペクトルも、石英や斜長石からなる花こう岩的岩石の実験室でのスペクトルと合致する。

中央丘のこうした性質は、中央丘をつくる岩石が、衝突のはね返りで地下数kmから上昇したことを示すものであろう。花こう岩的岩石が発見された2つのクレーターは95km離れており、同様な岩石はこれら以外の場所では見つかっていない。2つの発見地点の岩石が、地下の同一深成岩体にぞくするものかどうかはわからないが、SiO_2にとむ巨大な深成岩体は考えにくいのではないかと思われる。

火星地殻の形成と進化を考える

高解像度のマルチスペクトル赤外画像の撮影によって、詳細な局地的地質過程を研究するのに適した岩石学的組成分布を明らかにすることが、初めて可能になってきた。これによって、かんらん石の含有量が20%をこえる玄武岩（地球上ではピクライトとして分類される）のユニットが存在することが明らかになった。これらの岩石が露出しているところは、現在のデータでは限られた場所だけであるが、火星の古い地殻では比較的一般的なのであろう。

大シュルチスの火山地帯で見られる例のように、ある特定の場所では、玄武岩質からデイサイト質にいたる組成の進化が観察され、マグマの分別結晶作用がおこったことが明らかになった。こうしてできた岩石組成の多様性は、地球上の火山地帯で見られるものとよく似た火成作用の結果である。石英を含む花こう岩的岩石が見られることも注目されるが、全体からみればこれはおそらくまれなもので、火星の地殻は基本的には玄武岩質であると考えられる。

〈紹介者付記〉

新しい探査成果をふまえて、火星岩石の多様性について論じた興味深い論文である。筆頭著者のフィリップ・R・クリステンセンは、アリゾナ州立大学教授をつとめる惑星地質学者で、火星表面物質研究の第一人者。TESとTHEMISはクリステンセンたちのグループが開発した。

この論文で議論の中心になっている大シュルチス地域の火山は、比較的最近になって詳しいことがわかってきた。タルシス地域とエリシウム地域に分布する大型火山については、バイキング探査などによって、すでに1970年代からかなりくわしいことがわかってきていた。しかし、大シュルチス地域が一大火山地帯であることは、誰も思い至らなかったのだ。それが、マーズグローバルサーベイヤー以降の探

査で、本当の姿が初めてわかってきたのである。大シュルチスのニリパテラ火口に、デイサイト質溶岩流が認められるという観測結果は興味深いが、それがここだけの局地的・特殊的なものなのか、あるいは他にも多くの例があるのか。それは今後の探査に待つほかないだろうが、デイサイトのような珪長質の火山岩が火星にそれほど多くあるとは思えない気はするのだが……。いずれにしても、火星におけるマグマの進化と火成岩の多様性の一端が解かれはじめたことには興味をそそられる。

なお、同じ著者による、本論文の内容も含めた一般向け解説論文として、次のものがある。

Christensen, P.R., 2005, The many faces of Mars. Scientific American, July 2005, 22-29（邦訳：クリステンセン, P.R., 阿部豊他訳, 2005, 変化に富む火星の姿．日経サイエンス，2005 年 10 月号，26―35．）

あわせてご参照いただければと思う。（小森長生）

タイタンの雲は激しい雨を降らせるか

Kerr, R.A. 2005, Titan clouds hint of heavy rains, methane gurglings. Science, 310 (21 Oct. 2005), 421.

タイタンを地球上から観測している天文学者たちと、カッシーニ探査機をとおして注視しつづけている惑星科学者たちは、この土星最大の衛星でおこっている奇妙なできごとを報告した。タイタンの中緯度でしばしば発生する雲は、あたかも煙突からはき出される煙のように立ちのぼり、風下側にメタンの雨を降らせる。しかし、これら中緯度に発生する雲は、いくつかのごくせまい場所にしか現れないようにみえる。このことは、雲が何か特別な場所の上に現れていることを意味するものかもしれず、たとえば、メタンを噴出する火山か間欠泉の存在をあらわしているのかもしれない。

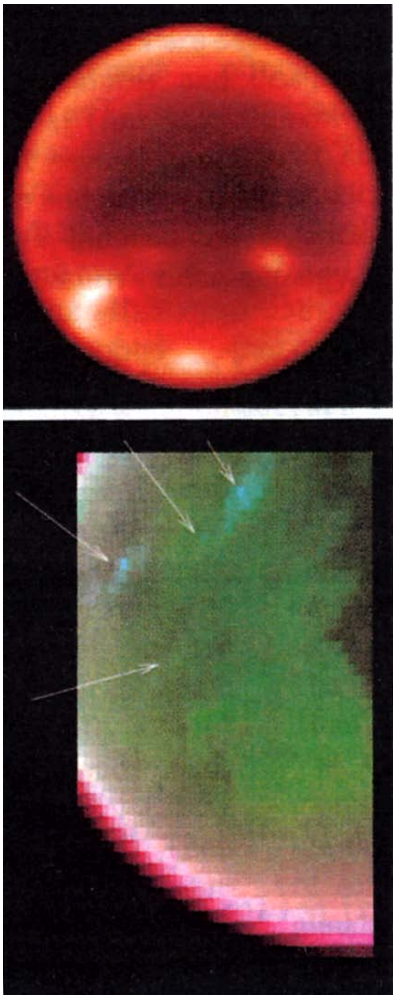
アリゾナ大学の惑星科学者 Caitlin Griffith と彼女のチームメンバーは、カッシーニが今年 1 月 15 日にタイタンに接近したさいにおこなった、可視／赤外マッピングスペクトロメーター（VIMS）の観測結果を報告している。それによると、このとき 4 つの雲が観測されたという。

近赤外のせまい波長域での観測によると、小さなコアをもつ雲のプルームは、夏の午後に発生する入道雲のように、時速 36km でムクムクと上昇した。「これは大気層中に活発な対流がおこっていることを示すものだろう」と Griffith はいう。ある雲は、42km の高度に達すると、1 時間のうちに 10km もくずれて東に吹き流された。こんなに速くくずれ落ちるなんて、この雲の粒子は、ミリメートルサイズの液体メタンの雨滴からなっているにちがいない、と VIMS チームの人びとはいう。

惑星科学者の Ralph Lorenz（アリゾナ大学）たちは、「タイタンの下層大気では、メタンの濃度は高いが、太陽から遠く、しかも、もやにつつまれているので熱エネルギーは不足している。このようなところでは、まれではあるがはげしい対流がおこりうるものだ」と今年のはじめにのべていた。メタンの雨は、こうしてできた雲から地表にまで降ってくるのだろう。ホイヘンスプローブが撮影した氷の大地に刻まれた谷地形は、この雨によって説明できるかもしれない。

一方、カリフォルニア工科大学の天文学者 Henry Roe たちは、マウナケア山頂のケック望遠鏡とジェミニ望遠鏡を使って、タイタンの観測を長い間続けてきた。彼らの報告によると、82 夜におよぶ観測で 24 の雲を見つけ出したという。これらの雲のうち、タイタンの南極地域にできるものは別として、少なくとも観測可能な大きさの雲のほとんどは、南緯 40˚付近に限って形成されることが確かめられた。

Griffith たちが見た雲も、これと同じ緯度のものである。これは、大気の大規模な循環がそこでおこり、プルームを発生させているためだ、と彼らは考えている。他の人たちの理論とモデルも、現在夏を迎えている南半球の南緯 40˚近くで、地表近くに上昇気流が発生していることを示唆している。これはその緯度で活発な対流がおこっていることの表れだろう。



タイタンの南半球中緯度に出現したメタンの雲。上は地球からの望遠鏡による赤外画像。下はカッシーニ探査機からの画像。

Roeたちはタイタンの雲のもう1つの特徴、すなわちその地理的分布に注目している。発生する雲の4分の3は、南緯40°地帯の4分の1の部分に出現しているのだ。それは西経350°のあたりに集中している。また、残りの4分の1の雲は、これより西方の幅広い地帯に現れており、南緯40°帯のそれ以外の地域では、雲はまったく見られなかった。これらの事実から考えられることは、雲の下の地表に何かが、地球でなら山地か、太陽に暖められた海岸のようなところがあり、それが上昇気流のプルームをつくり出しているのではないか、ということだ。しかし、タイタンでのこのような雲の経度分布は、まだまったく謎のままだ、とGriffithはのべている。

Roeたちもまだ答えを見出しているわけではないが、1つの重要なことに気付いている。南緯40°にある雲は時間とともに少しずつ東西方向に位置を変えるのだ。これは、地表に固定された山などが雲の生成の原因となっているのではないということを示している。しかも、南緯40°の雲はかなり速く行き来するので、夏の太陽で地面が加熱されてできるものでもない。

このことから考えると、氷の地下から噴出するメタンの火山噴火か間欠泉の可能性も残されているとRoeはいう。大気中に噴き出したメタンは大気の状態を不安定にし、プルームの上昇をひきおこすだろう。カッシーニ探査機はすでに、このような氷火山活動でできた氷溶岩や火山状の地形を見つけ出しているが、現在進行中の火山活動のはっきりした証拠は、いまのところまだ見つかっていない。

〈紹介者付記〉

ここに紹介したのは「Science」2005年10月21日号に掲載された次の2つの論文に対する、Richard A. Kerrの論評的解説である。

Griffith, C.A., ほか26名, 2005, The evolution of Titan's mid-latitude clouds. Science, 310 (21 Oct. 2005), 474-477.

Roe, H.G., ほか4名, 2005, Geographic control of Titan's mid-latitude clouds. Science, 310 (21 Oct. 2005), 477-479.

くわしくはこれらの論文を参照していただきたいが、とりあえずはKerrの解説で論旨は十分理解できるだろう。いつものことながら、Kerrの要を得た適切な解説には感服させられる。

さて、タイタンの大気中でおこる雲の生成の様子はまことに興味深い。南緯40°付近に数多く生成する雲が、本当に氷火山活動に結びついているのだとしたら、タイタンの気象現象は、地球のように太陽熱を主因としているのではなく、むしろ主に内部エネルギーに支配されている可能性が大きいのではないか、とさえ思えてくる。

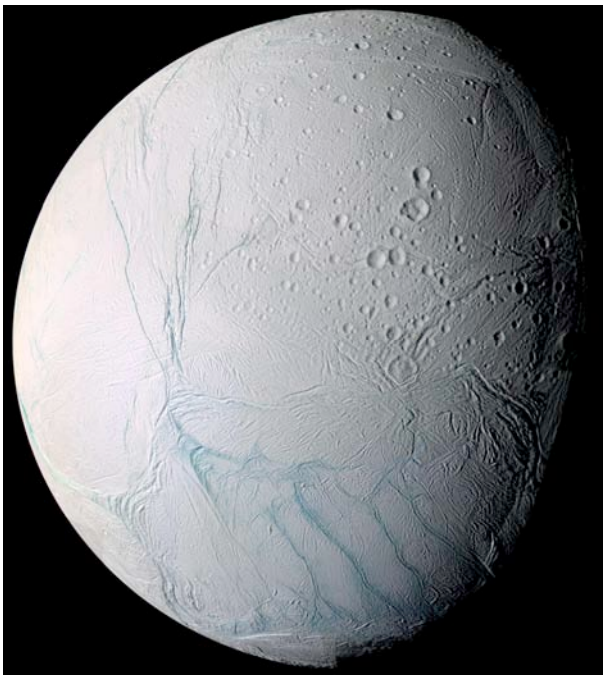
また、ムクムクと成長した雲が急速にくずれて大粒のメタンの雨を集中的に降らせるとなれば、ホイヘンスが撮影した樹枝状の谷地形の形成も現実のものとなるかもしれない。私は本誌前号で、「メタンの雨が谷をうがったのが事実ならば、相当大量の雨がある時期に集中して降ったことになるのではないか」と書いた。この予測は本当のことになるかもしれないと思うとわくわくさせられる。タイタンの世界はますますおもしろくなってきそうだ。（小森長生）

INFORMATION

●エンケラドスに氷火山の活動か？

土星を周回しながら土星本体と衛星群の観測をつづけているカッシーニは、2005 年 7 月 14 日、衛星エンケラドス（直径 500km）に、表面から 175km という至近距離に接近した。このときの観測と撮影で、新たな興味深いことがわかってきた。

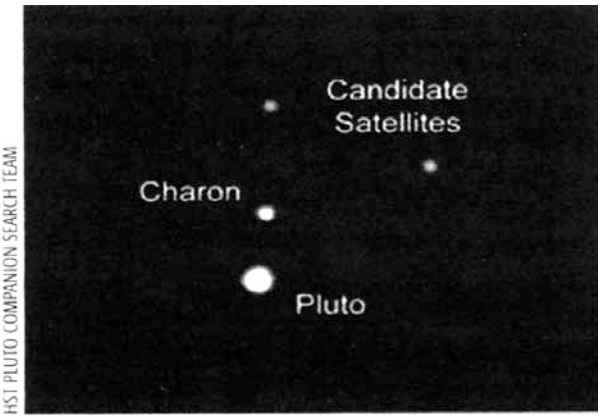
新しい画像によると、エンケラドスの南極地帯は“トラ縞模様”の平行にはしる断層や割れ目に刻まれている。この地域には衝突クレーターがほとんど見られないことから、きわめて若い地帯だと考えられる。



カッシーニ搭載の Composite Infrared Spectrometer (CIRS) での温度測定によると、エンケラドスの表面温度は、赤道で約 80K（-193℃）だったのに対し、南極のトラ縞地帯は 110K 以上もあった。この南極の高温は太陽光による加熱だけでは説明できず、内部から熱が流出するホットスポットがトラ縞地帯に存在するのではないかと考えられる。そのホットスポットは、潮汐加熱で内部の氷が気化し流出する氷火山のようなものかもしれない。

エンケラドスには希薄な大気が存在するが、7 月 14 日の接近時に、紫外画像スペクトロメーター（UVIS）とイオン中性子質量分析計をもちいて、大気のくわしい観測がなされた。その結果、大気の組成は H_2O65%、$H_2$20%、CO_2、CO、N_2 がともに少量であることがわかった。ところが、とら縞模様の上空だけは大気の濃度が高く、このことはホットスポットからのガスの放出がいまもつづいているためではないかと考えられる。エンケラドスでは現在、なぜ南極に内部活動が集中しているのか。また新たな謎が生まれてきたようである。（「Sky & Telescope」Nov.2005，「Astronomy」Nov. 2005，などによる）

●冥王星に２つの新衛星発見



H.A. Weaver と S.A. Stern（米コロラド州サウスウエスト研究所）たちのチームは、ハッブル宇宙望遠鏡（HST) による 2005 年 5 月 15 日と 18 日の観測で、冥王星に 2 つの新衛星と思われる天体を発見したことを、10 月 31 日に NASA が発表した。この天体は、S/2005P1、S/2005P2 と仮符号がつけられた。正確な軌道は未決定であるが、既知の衛星カロンの軌道面上の円軌道を仮定すると

	S/2005P1	S/2005P2
軌道半径	64700±850km	49400±600km
周期	38.2±0.8 日	25.5±0.5 日

明るさはいずれも冥王星本体の 5000 分の 1 程度。

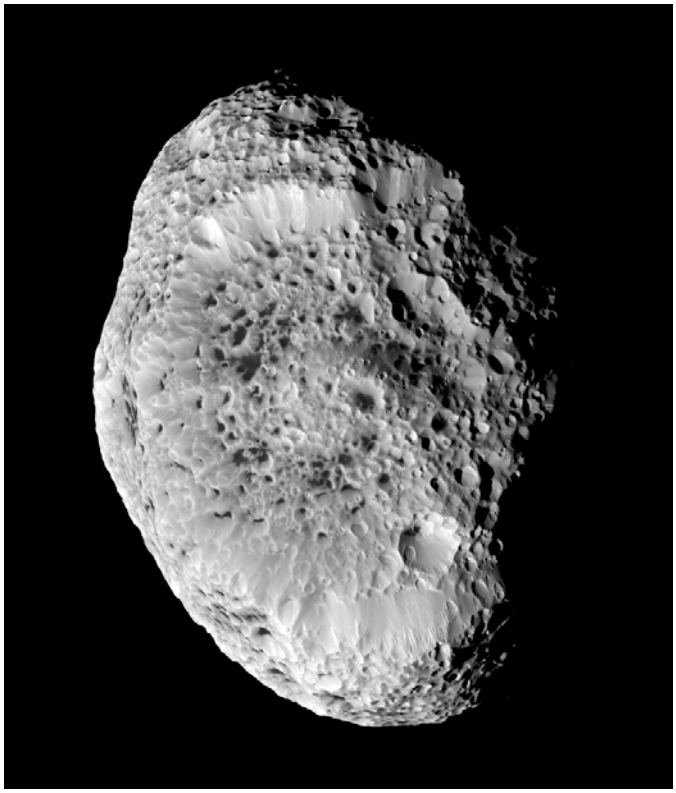
すでに2002年6月14日になされたHSTの観測記録データによると、この軌道から予想される位置に2つの衛星らしい天体があったので、今回の発見は信頼性があると思われる。さらにくわしい追跡観測は、2006年2月にHSTを使ってなされる予定。これらが衛星であることが確定すれば、冥王星は3個の衛星をもつことになる。

「今回の観測結果は、他のカイパーベルト天体にも、複数の衛星をもつものがあるだろうことを示唆する。それは冥王星系やカイパーベルトの形成について、さらなる探究と理解に役立つだろう」とSternはのべている。（「IAUC」No.8625, 2005. 10.31をもとにした「天界」2005年12月号,「Aviation Week & Space Technology」7 Nov. 2005, などによる）

●ニューホライゾンズ打ち上げせまる

冥王星とカイパーベルト天体をめざす太陽系外縁部探査機「ニューホライゾンズ」は、2006年1月15日の打ち上げにむけて、ケープカナベラルの米空軍基地にこのほど運びこまれた。NASAの打ち上げ公式決定は9月7日になされた。打ち上げ可能な窓は1月15日から2月14日まで。万事が順調にすすみ、打ち上げ窓の速い時期に打ち上げが成功すれば、2007年2月に木星スイングバイ、2015年1月に冥王星とその衛星カロンをフライバイする。そして2020年までに、1個か2個のカイパーベルト天体に遭遇する予定。

●ヒペリオンの奇妙な姿とふるまいの謎



カッシーニ探査機は今年9月26日、土星の衛星ヒペリオンに500kmの至近距離まで接近し、これまでにない鮮明な画像を撮影した（写真参照）。表面は、シャープなリムをもつ深いクレーターに一面おおわれており、あたかも、風呂場か台所で使うスポンジのように見える。こんな奇妙な景観はこれまでどの衛星にも知られていない。

ヒペリオンは長径360km、短径250kmの細長い形をしている。これと同程度のサイズの衛星はどれも球形かそれに近い形をしているのに、ヒペリオンだけがどうして細長い形をしているのか。また、ほとんどの衛星では、自転周期と公転周期は同期しているのに、ヒペリオンだけは無秩序な自転運動をしている。これはどういうわけなのか。ヒペリオンをめぐる謎は深まるばかりである。

編集後記：新しい事実がわかってくると、また新たな謎がつぎつぎと生まれてきます。私たちはいま、本当におもしろい、幸せな時代に生きているのだと実感させられます。本誌の会費更新の時期がまいりました。2006・2007年度分の会費1200円を同封の振替用紙でお送りいただきたく、どうかよろしくお願いいたします。みなさまのご支援でつづけられることを感謝し、来年もがんばりたいと思います。 (K)