

第32回月惑星科学会議に参加して

出村裕英 Hirohide DEMURA

3月12日から16日にわたってヒューストンで開かれた月惑星科学会議 (LPSC: Lunar and Planetary Science Conference) は、今年も盛況のうちに幕を閉じた。アメリカ国内の大学・大学院だけでなく、欧州や日本からの参加者も年々増加しており、ポスター会場で興味のある箇所を一巡するのにコアタイムだけでは絶望的なほどである。アメリカ中・高等教育・地球惑星科学分野では、惑星探査データを題材にした研究課題が実にありふれて見えるほど定着していて、そのデータ供給・ソフトウェア&ノウハウのサポート体制と併せて羨ましいほどだ。

今年のアブストラクト CD-ROM や冊子の表紙図柄は、火星・小惑星エロス・地球・月・星雲 (隕石物質科学や太陽系起源論を指しているらしい) と、総花的に並べられている。その通り、どのセッションもグループも、のぞいた限りでは同じように賑わっていた。そこで、各天体・対象ごとにセッション数 (オーラル + ポスター) をまとめ、参加者数比に近いものとして順位をつけると以下のようなになる。

①火星 26 (=10+13)、②小惑星・宇宙塵・分化隕石母天体 15 (=5+10)、③始源的隕石 10 (=6+4)、④月 8 (=4+4)、⑤氷天体・ガリレオ衛星 6 (=3+3)、⑤衝突現象一般 6 (=2+4)、⑦太陽系・惑星起源論 5 (=3+2)、⑧宇宙生物学 4 (=3+1)、⑨金星 2 (=1+1)、⑩水星 1 (=0+1)、⑪一般探査技術 (1=0+1)、⑪教育 1 (=0+1)、一見すると火星が圧倒的だが、2・3位がLPSC 伝統の「物質科学分野」とみて一括すれば、その合計は火星とほぼ同数である。続いて探査ミッションデータ解析の月・氷天体・小惑星エロス、衝突現象一般、太陽系の起源・惑星形成論といったものが並ぶ。金星が非常に少ないのは、アメリカの予算配分が火星に重点を置くようになってしまった影響が如実に現れたもので、欧州参加者が気を吐いていた。新顔としては宇宙生物学のセッションが組まれたところが面白い。

このなかから何を目玉に取り上げても独断・偏見との批判は必至だろうが、やはり探査最新データで賑わったセッションを挙げるのが妥当だろう。マーズ・グローバル・サーベヤーの火星、ニア・シューメーカーの小惑星エロス、ガリレオの氷天体……。時間の関係上、私が聞いたのは火星・小惑星エロスの探査成果・月関係のセッションなので、それらの雰囲気と、興味深いトピックをいくつか紹介することにする。

月

私はNASDAの月探査チームにポスドク (学位取得者任期付研究職) で在職すること半年目で、何もかもが目新しく、勉強しながら月セッションを聞いた。昨年までは火星セッションを聞く

のが中心で、裏番組にあたる月セッションはほとんど聞いたことがなかったのだが、今年は主要部については何とか両セッションを聞くことができた。

全体で見るべきものは、ルナ・プロスペクターのガンマ線分光計による元素マッピング成果と、クレメンタイン探査データの解析および宇宙風化実験との突き合わせといったものだろう。いずれも論文で発表済みのものだが、まとめて話を聞ける良い機会になった。画像解析のセッションでは、手法の議論が深化していて、内輪で比較的細かい議論が多いという印象を受けた。次のミッションデータが出るまでの中休み・蓄積段階と見るべきかもしれない。何か解決すべき理学的課題があって皆で集中的に解いている、というのではなく、私としては物足りなかった。

最近のクレメンタイン画像解析の流行は、地形効果の除去である。低位相角撮像の多いクレメンタインデータは、測光関数の位相角依存性表現精度が非常に悪い。そのため、大勾配の見かけ上位相角が大きくなる箇所で補正值がずれてしまう。位相角依存性が似ている近いバンド同士の比演算では大丈夫だが、かけ離れてしまうとうまくキャンセルされずに問題となり、地形効果と一括して呼ばれている。立体視などで高分解能のDTM (Digital Terrain Model: 相対高度地形図。数値標高地図 DEM: Digital Elevation Model ではない。) を得て各地点の勾配・位相角を知り、それに合うように測光関数を再フィッティングして精度を上げていこう、というのが、地形効果除去方法原理の端折った説明である。

また、クレメンタインデータは絶対感度較正ができず、相対感度較正でも系統誤差が除去しきれなかったこともあって、比画像の示す境界と地形単位の境界とが一致しない。このため、クレメンタイン比画像は単独で地質境界画定に用いられることがなく、いまだに地質ユニット判読の主要材料は地形模様・肌理 (texture) である。この現状には、「せっかく多帯分光カメラを持っていったのに」と愚痴が出ているのではないだろうか。クレメンタインの観測機器性能・観測データと解析・研究目標との整合性が今ひとつなのは、もともと軍事偵察衛星の試験を兼ねていたためと、急に決まったことによる準備不足にあるのかもしれない。きちんと較正できる機器構成・運用計画の必要性、地道な測光関数決定作業の重要性が感じられた。クレメンタインデータ解析で出てきた問題点は、そのまま日本が2004年に打ち上げ予定のSELENEのLISM (Lunar Imager / Spectrometer 可視・近赤外光学センサー) 自身に跳ね返ってきて、頭が痛いところである。

火星

西部開拓を彷彿とさせる赤い砂漠、火星。熱狂的火星ファンのいるアメリカの会議では、発表の最大多数派がやはりこの惑星だった。もしかすると生命がいるかもしれない、テラフォーミングできるかもなど、話題には事欠かない。地球上での精密分析には程遠いが、地球の研究手法を移植しての発表も多く、他分野からの参入を許す懐の深さがある。プレートテクトニクス革命以来の第二の“地球”科学ブームかもしれない。何しろ、火星全球の形状の決定精度約13mは地球を上回り、地球よりもよく分かっている火星、というのは冗談ではなく本当である。

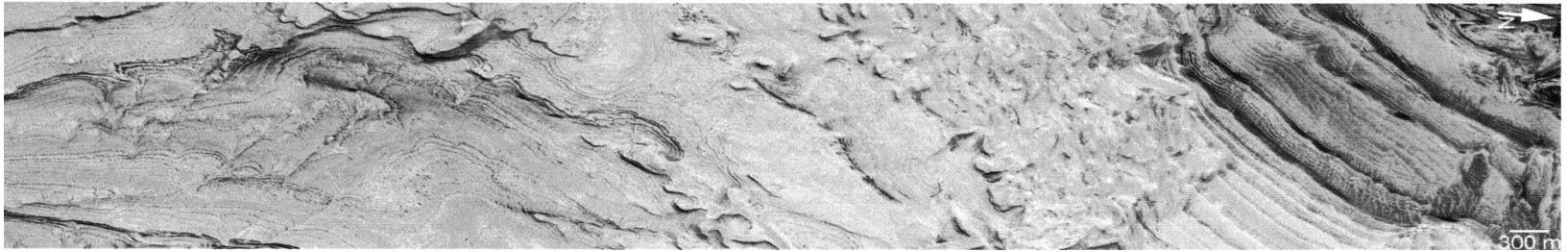


図1 火星のBexquerel クレーター（直径167km）内に露出する層状堆積物．成因には水・風などの諸説がある．写真の幅は15km．

大気も珪酸塩の大地も、気象現象も火山活動も、そして水も？ある新世界は、月よりも身近に感じる研究者が多いようだ。

全体としては、マーズ・グローバル・サーベイヤーのデータ解析プログラム（PDおよび研究助成）の成果が目についた。可視カメラ MOC（Mars Orbiter Camera）の高解像度画像（約2m/pixel）は断片的なものしか得られていないので、トピック成果しか出せていない。バイキング画像で地質学的状況を押さえて、一部を拡大した MOC データを組み合わせるの発表が多い。一方、レーザー高度計 MOLA（Mars Orbiter Laser Altimeter）の統合地形モデルや熱赤外分光計 TES（Thermal Emission Spectrometer）の解析成果にはめざましいものがあつた。MOLA は軌道交差・重複地点を用いての校正済データが公開配布されている。これは面的に均質な標高地図で取り扱いやすく、便利な IDL スクリプト（IDL: Interactive Data Language プログラム言語 & ライブラリパッケージ）も流通している。画像よりもこの数値標高地図の方が溶岩流解析など地質研究の主流になりつつある。TES も同様、CD/DVD での一般配布が進んでいる。

米地質調査所宇宙地質学部門（フラッグスタッフ）の成果発表数も目立っていた。人員の拡充が図られているようだ。元 RAND 研究員の Davies 氏とその同僚とが一手に引き受けていた太陽系天体の経緯座標基準点網（コントロールネットワーク）整備も、彼らの手に移行しつつある。LPSC があわって1月も経たないうちに、Mert Davies 氏の訃報が全世界に流れた。パイオニア、ボイジャー以来の太陽系初期探査の時代が終わったことを感じさせる一報だった。

昨年夏、大きく騒がせた火星トピックといえば「つい昨日流れたような川の跡があつた」という報道だろう。この川はガリー（雨裂）と呼ばれる術語だが、和訳がいかにも降水を示唆してしまうので、ここではガリーのまま使うことにする。発表ではみな起源論に熱中して、これは湧水地形だ、降雪・霜の融雪流だ、水ではなく二酸化炭素と土砂が混合した粉体流だ、と喧々諤々だったが、いずれも決め手に欠けている。着陸機による詳細調査が待たれるが、状況証拠からは地下からの湧水説が有力であり、私の意見とも一致する。

このガリーが意味するところは重大である。クレーター跡のない最も新鮮な地形なので、ここ2～3百万年間に地表近くに液体の水があつたことになる。火星生命の可能性や火星開発の好条件として影響する分野が多い。次の着陸探査の候補選定にとっても重要な材料として注目を浴びた。また、一部の MOC 高解像度画像では、ガリーにそって黒い斑状模様が続いているのが見られた。いかにも地球の乾燥地域にある涸れ川の植生群落分布に似ていて、地衣類か何か、と妙に想像力をかき立てられてしまったりする。着陸しなくても、いま検討されている分解能

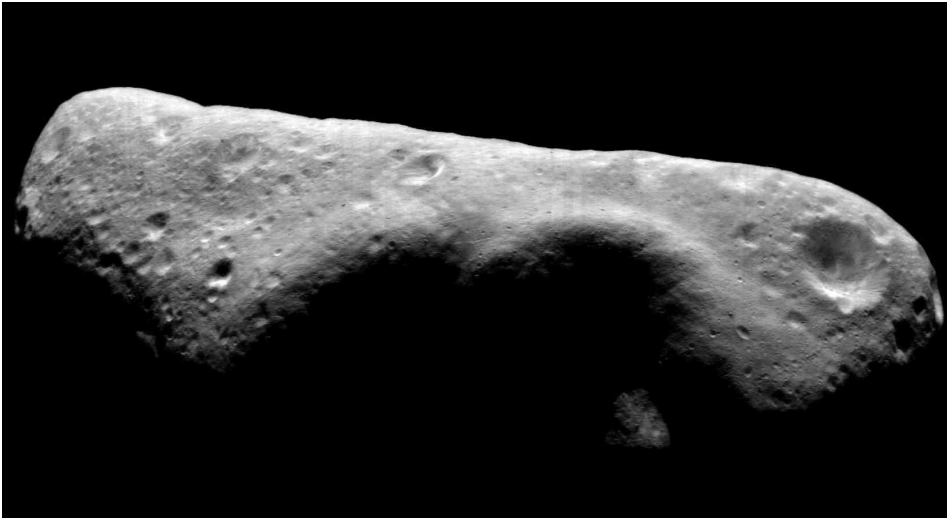


図2 ニア・シューメーカー探査機が2月14日に着陸した小惑星エロス。長径33kmで上方中央部のやや裏側に着陸地点がある。

20～30cm という偵察衛星級の探査計画で、調査する機会が得られるかもしれない。現在巡航中のマーズ・オデッセイなど、今後も火星探査ラッシュが続き、これらのデータから目を離せないだろう。

ほかにも火星の層構造（図1）が露頭で見えていることについて、風成層だ、水成層だ、洪水玄武岩だ、などの議論があった。月の露頭には衝突放出物の層構造が見られるが、それらとは桁違いの空間スケール（1000km 以上も続く層などざら）であり、何をいわれてもすぐには実感がわかない。火星は、地球以外で「流体による」堆積層・岩石が記載される可能性のある唯一の天体であり、今後の調査や議論が待たれる。この成因や意味するところの解明は、惑星地質学の重要なターゲットになるだろう。

小惑星エロス

先日ミッションを終了したニア・シューメーカーの成果発表セッション、これまでの小惑星の知見と総合しての議論セッション、の二本立てで聞くことができた。

昨年のバレンタインデー2月14日に合わせて小惑星 Eros の周回軌道に投入されたり、軌道船としてしか設計されていなかったのに一年後エロス軟着陸に成功してしまったり、センセーショナルな報道を御記憶の方も多いだろう（図2）。着陸で、さすがにカメラは使えなくなっていたが、ガンマ線分光計による元素分析はより精度の良いデータが得られ、われわれを驚かせた。最も印象的なホームページとして賞も獲得したらしい（<http://near.jhuapl.edu/>）。

ミッション計画はトラブルによる遅れがあったとはいえ、小惑星エロスの調査に的を絞った短期集中観測自体は成功裏に終わった。周回して重力場モデルを得、可視近赤外カメラ&分光計で地形および鉱物組成と宇宙風化度を調べ、レーザー高度計で形状把握し、エックス・ガンマ線分光計で元素分析が行われた。磁力計も搭載していたのだが、これのきちんとした成果はまだ出ていないようである。

重要な成果としては、分光型 S の小惑星と普通コンドライトとが結びついた点が挙げられるだろう。地上観測によるスペクトル分類と手元の隕石の化学分析成果とが橋渡しされた、歴史的な成果である。見かけのスペクトル形状を変えてしまう、宇宙風化の知見が深まったことも見逃せない。惑星地質学・地形学の観点からは、10m スケール以下の地形がならされてしまっている報告が目をつけた。これは、レゴリスが 10m 厚で覆っていることを示しているのではな

いかと私は思ったが、サイエンスリーダーの Cheng はそこまでは踏み込まず、慎重な態度を示した。確かに、10km オーダーの小天体の微小重力環境で、月の海のそれに匹敵する 10m もの厚いレゴリスがあると主張するのは、成因論を詰めてから判断する必要があるだろう。小惑星のレゴリス生成論は今ホットな話題のひとつであり、物理的に可能か否かの議論は、いまでも続いている。

ミッション報告が終わると、ほとんど新人で構成されていた探査チームと旧来の小惑星研究者・隕石研究者との壮絶なバトルが展開された。新たなデータとそれに基づく知見を持っている方が有利かと思いきや、その解釈を巡ってかなり厳しい質疑の応酬があって驚かされた。議論が活発に行われて理解が深まることがアメリカ流の理想的展開とすると、本ミッションは解くべき今後の課題を量産した点も併せて、大成功といえるだろう。残された課題の筆頭は、宇宙風化の進行様式とその物理化学機構である。これが明らかになると、今回の S 型だけでなく、地上観測に基づく多種の分光型や月惑星一般と手元の隕石とが有機的に結びつき、太陽系の物質科学的理解が立体的に深化することになる。今後の進歩が楽しみである。

補足 1：今回取り上げたのはごく一部の議論であり、詳細や他のトピックについては次のホームページで閲覧できるので、直接読まれることをお勧めする。またここにはアブストラクトが CDROM 化された第 28 回以降のものも閲覧できる。<http://cass.jsc.nasa.gov/publications/meetingpubs.html>

補足 2：残念ながら、次回 33 回 LPSC ではついに第一著者 2 本制限が導入されることになった。その説明などが次のホームページにある (<http://cass.jsc.nasa.gov/meetings/33rdlpssc.html>)。また最近、会場の都合で次回の開催が 2002 年 3 月 4 日～8 日、電子投稿〆切が 2001 年 12 月 5 日 17 時 (U.S. CST) と早められたこともアナウンスされた。

(宇宙開発事業団)

論文紹介

ホワイトマーズ仮説

Hoffman, Nick, 2001, White Mars: The story of the red planet without water. Mercury, Vol.30, No.1 (Jan.-Feb. 2001), 14-23.

火星に存在する大規模な outburst flood channels をはじめとする多くのチャネル地形などは、流水の浸食作用によって形成されたと一般的に考えられている。そしてこのことから、火星は過去に、濃い大気と液体の水をもつ、温暖湿潤 (warm and wet) な気候条件下にあったとみられてきた。これに対して著者は、チャネル地形は液体の水によって形成されたものではなく、液体の二酸化炭素の爆発的噴出で生じたガスとダストと岩石片の混合した、火砕流のようなものの流動で形成された、とする新しい考えを提唱した。あわせて、火星は過去に warm and wet だったことは一度もなく、つねに寒冷で乾燥した (cold and dry) 世界であり続けたとし、この新説を「White Mars」仮説と名づけた。

余談ながら、著者は White Mars の名称を、Kim Stanley Robinson の長大な SF3 部作 (Red Mars, Green Mars, Blue Mars) に刺激をうけて考え出したという。『Red Mars』は最近、創元 SF 文庫で

邦訳が出た。私はそれほどの名作だとは思わないが、惑星地質学の近年の成果をよく勉強してとり入れているのには感心させられる。

3つのパラドックス

それはさておき、著者がホワイトマーズ仮説を主張する根拠は、要約すると次の3点になる。

まず第一は、炭酸塩パラドックスである。もし火星が過去のある期間、表面に液体の水を広くもっていたならば、大気中の二酸化炭素は水中に溶解、炭酸塩岩を大量につくっていたと考えられる。このプロセスは効率よくはたらいださるから、火星の干上がった湖底や海底とみられている場所は、厚い炭酸塩堆積物で満たされているだろう。しかしながら、これまでの探査で火星表面に炭酸塩が存在する確実な証拠は発見されていない。もし存在するならば、マーズグローバルサーベイヤーの熱放射分光計 (TES) が、すでに発見していてもよいはずである。

第二は水の量にかんするパラドックスである。アウトバーストチャネルの形成には、碎屑物を運ぶために大量の水が必要で、しかも急速に流れなければならない。もし水が十分になくスピードもおそければ、岩石の碎屑物は粘性のある泥流状になって、それほど遠くまでは流れないだろう。火星面上で実際にみられる規模のチャネル地形が形成されるためには、洪水の発生源と思われるカオス地帯の陥没した体積の10倍以上の水が必要である。これだけの量の水が、帯水層として地下にたくわえられ放出されたと考えることはむずかしい。

第三のパラドックスは、初期の弱々しい太陽にかんする問題である。恒星進化論によれば、46億年前の太陽のエネルギー放出量は、現在の70%程度でしかなかった。アウトバーストチャネルの形成が火星の歴史の中期ごろだとすれば、太陽の明るさは現在の85%ほどだっただろう。火星の巨大火山群が大量の温室効果ガスを放出していたとしても、大気が温暖な環境をつくり出すには、太陽エネルギーは不十分だったにちがいない。

火星における二酸化炭素のふるまい

火星の水について議論が高まる一方で、ほとんど無視されてきたのが二酸化炭素である。二酸化炭素の揮発性は、水の5000倍以上も高い。二酸化炭素が0で液体の状態を保つためには、

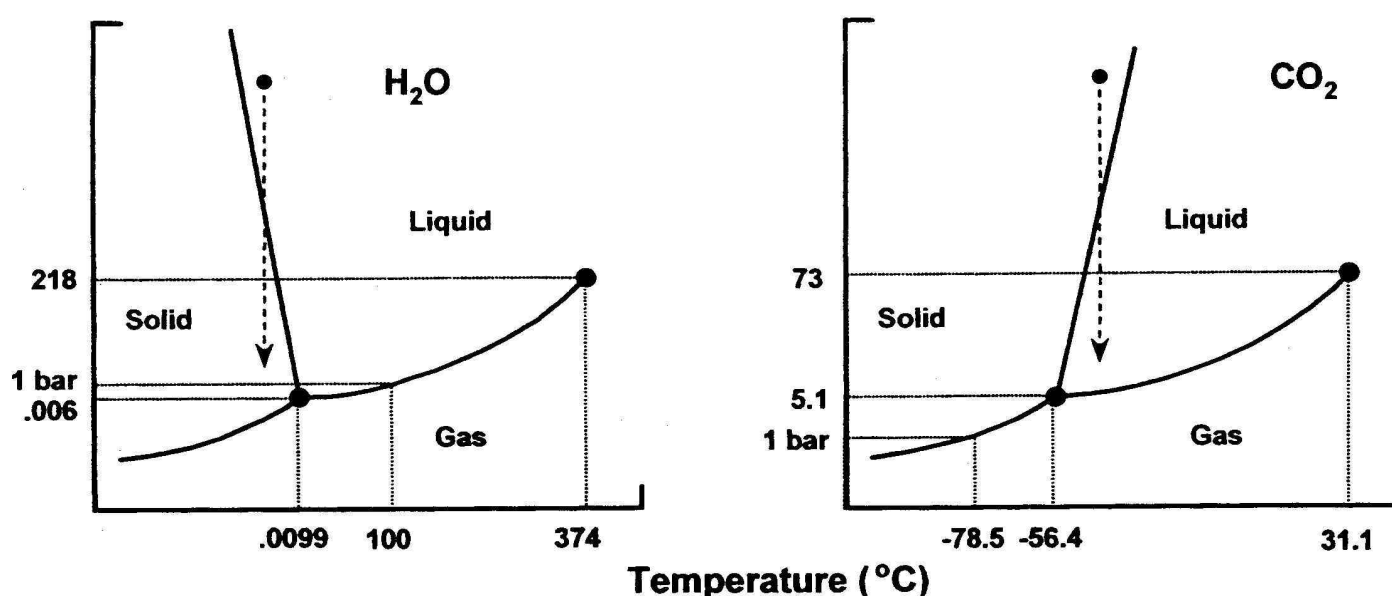


図1 H₂O と CO₂ の相平衡図 (同著者の Icarus の論文から)

地球大気圧の 35 倍以上の圧力が必要である。地球上では、二酸化炭素は-56.4 と 31.1 の間で液化可能であるが、-56.4 の低温でも液化するためには5気圧以上が必要となる（図1のCO₂の相平衡図を参照）。

火星の表面温度幅は、二酸化炭素にとって理想的なようにみえるが、大気圧がきわめて低いために、表面では液体の形で存在できない。しかし地下なら話は別である。液体の二酸化炭素が安定に存在できるための圧力は、数百mも地下にもぐれば十分に得られる。もちろん、二酸化炭素が気化して逃げてしまわないためにある種のシールは必要で、不浸透性の岩石層か水の氷の被覆層があればよい。地下数 km 以上の深さになれば、液体の二酸化炭素は常時安定に存在できるだろう。

温度と圧力の条件からみると、火星の地下は、二酸化炭素が液体として存在するための絶好の場所である。そこでは岩石の空隙が、水ではなく液体の二酸化炭素で満たされているかもしれないのだ。Dimitri Vlassopoulos は aquifer（帯水層）からのアナロジーで、二酸化炭素で飽和した岩石層を liquifer とよんでいる。

さて、液体の二酸化炭素が何かの原因で表面近くに上昇してくると、爆発的に気化して噴出するだろう。空中に放出された碎屑物と二酸化炭素ガスは混合して雲をつくる。液体の二酸化炭素が十分にあれば爆発はつづき、雲はどんどん厚くなる。そしてこの雲はあたかも液体のように流れ下ることができる。雲の中では粒子の分級がおこり、大きな岩片は下方に沈降して地表をえぐり、チャンネル状の溝を浸食することになる。

液体の二酸化炭素が気化しておこるアウトバーストは、地表の下をも掘りおこしてしまう。これによって地面は陥没し、カオス地帯が形成されたと考えられる。アウトバーストは二酸化炭素の liquifer が枯渇するか碎屑物でふさがれるまで、数時間から数日もつづく。こうして放出された大量の碎屑物とガスの流動物は、カタストロフィックな洪水のように流れ出し、チャンネルを浸食するわけである（図2）。

このような現象は、地球上の火山で発生する火砕流とよく似ている。火山灰や軽石とガスの混合物からなる火砕流は、流動性のある濃い雲のようなもので、密度流ともよばれている。密度流はきわめてスピードがはやく、大きな障害物ものりこえて前進をつづける。熱い空気のクッションは、自動車ほどの巨礫を数 km も容易に運ぶことができる。

密度流がつくった火星の地形

地球の火山と同様に、火星の火山にも火砕流堆積物がある。しかし、火星のカオス地帯のような大規模な陥没地帯や、そこから発して数千 km ものびるチャンネルとその堆積物は、火山性のものではない。著者の主張するモデルによると、火星の赤道地帯から北方平原に向かって運ばれた物質はすべて、従来考えられてきたような液体の水の洪水ではなく、二酸化炭素ガスと碎屑物の混合した密度流によるものである。

この密度流は、巨大なダスト雲を立ち上げながらチャンネルを浸食し、運ばれた岩石片は、屋根瓦の列のように流動方向に傾いて堆積した。マーズパスファインダー着陸地点の、ロックガー

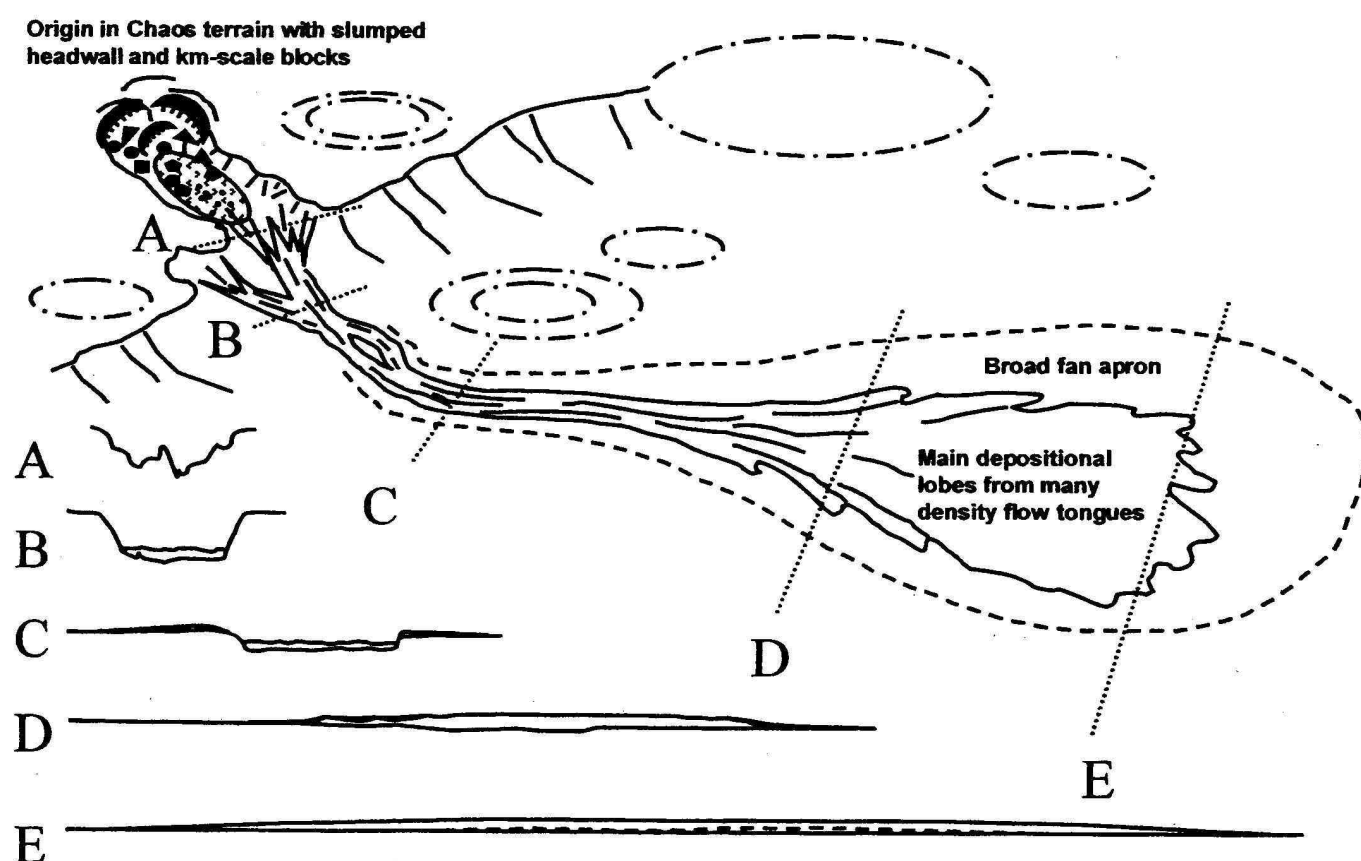


図2 火星のアウトバーストフラッドチャネルの形成模式図 (同著者の Icarus の論文から)

A~B: 長さ 5~50km, 幅 1~50km B~D: 長さ 100~2000km, 幅 10~250km D~E: 長さ と 幅 1000km 以上

デンと名づけられた場所での傾いた巨礫の群れは、まさにこのようにしてできたと考えられる。この巨礫にみられる凹みや傷あとは、水中ではなく、冷たくドライな流れの中で岩片がたがいにつつかりあった結果できたものである。巨礫にみられる丸みも、密度流として流動したことを示すものであろう。

北方低地に流れこんだ密度流は、細かい物質ほど遠方に運ばれ、それらは広い範囲に沈殿して被覆堆積層を形成した。これによって地形は平坦化され、海底を思わせるような平原が生まれた。マーズグローバルサーベイヤーのレーザー高度計 (MOLA) は、北方平原がいちじるしく平坦であることを明らかにしたが、これこそ著者のモデルが予言した通りである。

火星の谷地形には、Nanedi Vallis や Nirgal Vallis のように蛇行の目立ったものがあり、これらは長期間にわたる水のゆるやかな流れによって形成されたものだとされている。しかし地球上でも、密度流が蛇行したチャネルをつくることがしばしばある。密度流が同一の谷をくり返し流れ、しかも勾配がゆるやかな場合には、Nanedi や Nirgal によく似た蛇行谷ができる。

一方、Ares Valles や Kasei Valles のように、幅広くまっすぐにのびる大きなチャネルは、カタストロフィックな水の大洪水でできたとされている。しかし、流路の勾配がますと、密度流はより大きなエネルギーをもつことになるので、直線的に流動し、まっすぐなチャネルを刻むだろう。つまり、密度流はどちらのタイプのチャネルもつくることのできるものである。

ところで、ホワイトマーズ仮説にもとづく火星像は、生命の存在にとっては好ましいものではない。火星の表面で液体の水が流れたりたまったりしたことは、一度もなかったであろうか

らだ。とはいえ、火星に水が存在しないわけではない。火星の水は、極冠や地下に氷（または永久凍土）として、かなり豊富に存在しているはずである。将来の火星探査者は、適切な技術が開発されれば、地下深くにドリリングして、火星基地で使用するための水分を得ることができるだろう。また、火星に生命が存在するならば、それは地下深くの火山の根の近くに見つかるかもしれないと著者はのべている。

紹介者付記

この論文が掲載された『Mercury』は、サンフランシスコに本部をおく太平洋天文学会（The Astronomical Society of the Pacific, ASP）の隔月刊の機関誌である。著者の Nick Hoffman は、オーストラリアのメルボルンにある La Trobe 大学の、ビクトリア地球惑星科学研究所の地質学者である。この論文は一般向けに書かれた解説的なものであるが、そのもとになった原著論文は下記の通りである。

Hoffman, Nick, 2000, White Mars: A new model for Mars' surface and atmosphere based on CO₂. Icarus, 146 (Aug. 2000), 326-342.

このような論文を権威ある Icarus 誌が掲載したことは注目してよいだろう。Hoffman の考えの詳細を知るために、この原著もぜひ参照していただきたいと思う。

火星のチャネルをはじめとするさまざまな浸食地形や、低地を埋める堆積物などの形成には、液体の水（流水）の作用が大きく関与しているらしいことは、今日ではほぼ定説化している。Hoffman の仮説は、この定説に正面からいどむものである。彼があげる3つのパラドックスのうち、とくに炭酸塩物質がきちんと確認されていないことなどは、たしかに大きな問題である。しかし、浸食・堆積地形のすべてを火砕流的な密度流のはたらきで説明してしまってよいものかどうか、このへんになると戸惑いを感じてしまう。

とはいっても、火星がその長い地質時代を通して、ずっと cold で dry な環境であったのか、あるいは warm で wet な時代があったのか、本当のところはまだよくわかっていないのである。前号 Information 欄でも紹介したが、火星の暗色模様の地域に未風化のオリビンが豊富に存在することから、火星は cold で dry な環境を保ちつづけてきたのではないか、という考えも生まれている。Hoffman の考えは一見突飛なようにみえるが、傾聴に値する部分も少なくないように思える。火星にはまだそれだけ未知（未解決）の問題がたくさんあり、定説化したようにみえる考えにも、まだ流動的な部分が多いということなのだろう。これからの火星探査がますます期待されるゆえんでもある。

（小森長生）

論文抄録

火星の太古のジオダイナミクスとグローバルな水循環

Phillips, R.J., 他10名, 2001, Ancient geodynamics and global-scale hydrology on Mars. Science, 291, 2587-2591.

火星のタルシス高地は 3000 万 km² の広大な面積を占め、10km におよぶ高まりをもつ。この巨大な高地の形成は、火星のグローバルな形と重力場に大きな影響をおよぼした。この高地の地殻への荷重は対極点にアラビア高地を形成させた。タルシス高地をとりまく負の重力異常帯は、この地域の低地（トラ

フ)を埋める低密度の堆積物に対応する。タルシス高地をつくり上げたマグマの量は $3 \times 10^6 \text{ km}^3$ (2kmの厚さで火星全体をおおう量に相当)にのぼり、この噴出にともなって大気中に放出された揮発成分は、1.5気圧の CO_2 大気と、120 mの厚さで火星をつつむ量の水をもたらした。これによってノアキス代後期(4.3~3.5Ga)には、現在より暖かい気候となり、多くのチャネル地形がつけられた。(K)

オールト雲形成期における彗星の急速な衝突進化

Stern, S.A., and Weissman, P.R., 2001, Rapid collisional evolution of comets during the formation of the Oort cloud. *Nature*, 409, 589-591.

彗星のオールト雲は、大惑星(木星~海王星)形成期に、その領域に存在した氷の微惑星が、大惑星の重力摂動を受けて太陽系外縁部へ放り出された結果つけられたものと考えられている。これまでのオールト雲形成モデルは、こうした重力効果だけにたよっていたのであるが、著者らはさらに別の要因も重視して再検討した。著者によると、太陽系初期の大惑星領域では、彗星と他の小天体片との衝突がはげしかったので、彗星の寿命は、力学的放出の時間スケールよりもはるかに短かったと考えられる。したがって彗星が大惑星領域から脱出することは困難で、脱出する前に破壊してしまったものが多かっただろう。こうした点を考慮すると、オールト雲を構成する彗星の数と総質量は、これまで信じられてきたよりもかなり少ないかもしれない。(K)

金属に富むコンドライト中のコンドルール形成条件

Krot, A.N., 他5名, 2001, A new astrophysical setting for chondrule formation. *Science*, 291, 1776-1779.

近年発見された2つのコンドライト、Hammadah al Hamra 237 (HH237)とQUE94411は、いちじるしく金属に富む特異な隕石で、約70vol%のFe-Ni金属を含み、このうち20vol%はFe-Ni金属の粒子である(多くのコンドライトのFe-Ni量は通常7~10vol%程度)。またコンドルールの量も約30vol%に達するが、コンドルール中にFe-Ni金属は含まれない。これらの特徴から、この隕石は、原始太陽系星雲のダストが完全に蒸発するほどの高温環境(1800K以上)の中から形成されたと考えられる。コンドルールは、Fe-Ni金属が凝縮するよりも先にダスト成分が液滴として凝縮し、それが急速に冷却固結したことを示している。このようなでき方は一般のコンドライトの形成機構と異なり、他の多くのコンドライトよりも早期(太陽の誕生後数百万年以内)につけられたものであろう。(K)

火星内部にマグマ性の水が存在する証拠

McSween Jr, H.Y., 他6名, 2001, Geochemical evidence for magmatic water within Mars from pyroxenites in the Shergotty meteorite. *Nature*, 409, 487-490.

火星にはかつて海が存在したことが、表面地形の観察から推測されている。この海の大量の水は、火山性の脱ガスによって火星内部から供給されたと考えられるが、火成岩である火星隕石の分析では水の含有量は少なく、水の起源の説明は困難であった。著者らは1.75億年前に火星から放出されたシャーゴッティ隕石(玄武岩質)中の輝石の微量元素分布を、含水および無水結晶作用実験とともに調べ、噴出前のマグマの水の含有量は1.8%に達していただろうと結論した。シャーゴッティ隕石では、輝石結晶の内核部分(火星地殻の深部でつけられた)は、外殻部分(表面近くでできた)にくらべて可溶性の微量元素に富んでいる。このことは、輝石は地下深部では水に富んでいたが、マグマの上昇で表面に運ばれるにつれて水を失ったことを示している。(K)

INFORMATION

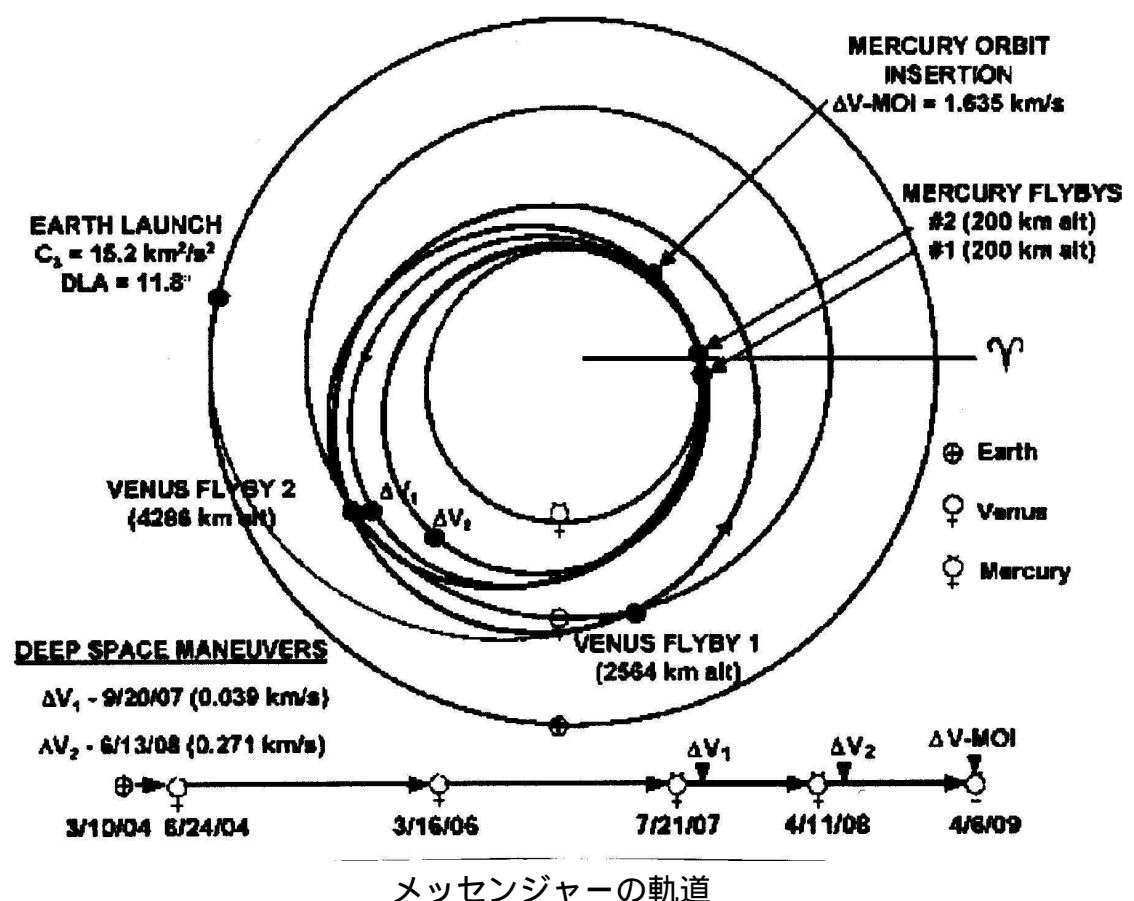
● 水星周回探査機が承認される

6月7日、NASAは初の水星周回探査機メッセンジャー計画（MESSENGER：MErcury Surface ENvironment、GEochemistry and Ranging に由来する）を承認した。水星探査は1974～75年のマリナー10号のフライバイ以来のことで、メッセンジャーは2004年3月に打ち上げられ、2009年4月から1年以上にわたって周回軌道上から水星を観測する。

水星周回探査機は、いままで費用がかさみ、複雑で高度な推進系が必要だと考えられてきた。メッセンジャーでは次の3つの新機軸を採用することによってこれを克服して、「faster, better and cheaper」を目標に掲げるNASAのディスカバリー計画のなかでやりくりができるようになった。①飛行計画：メッセンジャーは水星に追いつくのに必要な速度を得るために、金星と水星へ2回ずつフライバイすることによって重力アシストを受ける。②探査機の設計：燃料タンク、観測機器やそれらの取付部分を効果的に設計・配置することによって軽量化し、水星に到達するのに必要な燃料を搭載することができる。③観測機器：最新の技術を用いることによって観測機器の重量を軽減する。メッセンジャーに搭載される観測機器は以下の6つである。望遠・広角カメラ、ガンマ線中性子スペクトロメーター、磁力計、レーザ高度計、大気・表面組成スペクトロメーター、エネルギー粒子・プラズマスペクトロメーター、X線スペクトロメーター。この他、探査機の数値変化を利用して、水星の重力を測定する。

メッセンジャーは打ち上げ3か月後の2004年6月に金星との最初のフライバイをおこない、さらに太陽の回りを3周後の2006年3月、金星との2回目のフライバイをおこなう。水星とのフライバイは2007年6月と2008年の4月の2回で、30年ぶりに水星のクローズアップ画像を送ってくる。いずれのフライバイも明暗境界線付近から接近し、マリナー10号では撮影できなかった昼側を観測しながら離れる。これら2回のフライバイでの観測データを検討し、2009年4月から1年間にわたる水星周回軌道からの観測計画を立てる。水星周回軌道上のメッセンジャーでの12か月は、水星の4年、2太陽日（地球の176日）に相当する。周回軌道は大きな離心率の楕円で、軌道傾斜は 80° 、周期12時間、近水点高度200km、遠水点高度15000kmとなる。最初の1太陽日はさまざまな機器でグローバルに観測し、残りの1太陽日で特定地域を観測する。

水星は、地球型惑星の一つであるが、小さく、重く、もっとも古い表面をもち、1日の温度差が500Kを超えるなど極端な惑星である。このような地球型惑星のエンド・メンバーを観測することによって、水星のみならず地球型惑星全体の理解も飛躍的に進歩することになるだろう。（詳しい内容は <http://messenger.jhuapl.edu> を参照）（白尾元理）



- 火星のガリーは地下水のしみ出しによるものか？

マーズグローバルサーベイヤーのマーズオービターカメラ（MOC）が撮影した、クレーター内部斜面などに見られるガリー（gully、小谷）は、ごく新しい時代におこった地下水のしみ出しによるものだ、という見解を昨年 M. Malin らが発表して話題になった（Science, 288, 2330-2335）。最近、パリ南大学の地形学者 Francois Costard たちは、グリーンランド東部のジェームソンランドで、火星のガリーによく似たものがあることを、1980 年代に撮影した古いスライドから見つけ出した。このガリーは、雪解けの水の流下でできたもので、地下水のしみ出しによるものではない。同様のガリーは、アメリカの SETI 研究所の地質学者 Pascal Lee たちも、カナダ北方のデボン島で見出している。このことから、火星のガリーの形成には、必ずしも地下水のしみ出しを考えなくてもよい、という意見が JPL の惑星科学者 Michael Hecht たちによって出された。以上は、3 月にヒューストンで開かれた月惑星科学会議の話題で、R.A. Kerr が Science 誌（Vol.292, 6 April 2001）の会議報告欄で伝えている（本号の出村氏の記事も参照）。

- 火星の海岸線を表す段丘はテクトニックな成因か？

火星の北半球をおおう広大な平原低地は、かつて海が存在した場所といわれ、周辺にみられる段丘状地形が古い海岸線をしめすものとされてきた。アリゾナ大学月惑星研究所の Paul Withers らは、これらの地形をマーズグローバルサーベイヤーのレーザー高度計（MOLA）のデータをもとに調べ直した結果、海食段丘と思われてきたものは、むしろテクトニックな運動によって形成されたとみたほうがよいという新しい結論に達し、その概要を Nature（Vol.410, 5 April 2001）の短報として報告している。それによると、ユートピア盆地の近くの海岸線地形は陸側（高地側）にリッジを、アルバパテラ火山近くのそれは海側（低地側）にリッジをそれぞれもつ平坦面を形づくっている。このような地形は海水の浸食作用でできたと考えるのはむずかしく、テクトニックな地殻の活動でできたとみるほうが納得がいくという。これらリッジの断面は、月などで知られる、圧縮応力によって形成された wrinkle ridges の特徴をよくそなえている。火星の北方平原には多くのリッジのネットワークがみられ、テクトニックな活動の重要な場だったと著者たちは考えている。

- ガリレオ探査機が 2003 年まで観測を延長

木星探査機ガリレオは、1997 年末に観測を終了するという当初の計画を大幅にこえて、今日までガリレオ衛星（4 大衛星）の観測などに目ざましい成果をあげてきたが、まだ余力があるので、NASA はさらに 2003 年まで観測を継続することを決めた。今年はカリストへの最後の接近後、イオに 2 回接近して撮影をおこなう。2002 年には木星の磁場の観測のほか、イオよりも内側をまわるアマルテアへ数百 km 以内に接近、そして 2003 年 8 月にガリレオ号は木星大気圏に突入してその使命を終える予定である。

- 2001 年惑星科学夏の学校のお知らせ

今年のテーマは「惑星の起源」です。お問い合わせは ss2001@geo.titech.ac.jp まで、参加申込みは <http://www.geo.titech.ac.jp/nakazawalab/wakusei01/wakusei01.html> へお願いします。締切は 7 月 2 日です。

開催日：7 月 16 日（月）～19 日（木）（地球電磁気夏の学校と同時開催）

場 所：グリーンパル南山城 / 京都府立南山城少年自然の家（京都府相楽郡）

編集後記：Information でも紹介したように、6 月 7 日に NASA は水星周回探査機メッセンジャー計画を正式に承認しました。この計画にかかる費用は約 300 億円で、費用がかさむと思われていた水星探査が安上がりなディスカバリー計画の一つとして実施され、3 年足らずで打ち上げというから驚きです。探査のスケジュールもよく練られており、アメリカの惑星探査にかかわる人材の豊富さとパワーをまざまざと見せつけられます。10 年後の成果に期待したいものです。（S）