特集「変遷する火星環境」

マーズローバ,スピリットとオポチュニティの 火星表面探査

佐々木 晶1

1. 火星表面探査の新たなページ

2004年1月4日、スピリット(Spirit)と命名された 火星探査機マーズローバ(Mars Engineering Rover) はエアバックを使って火星の赤道近くのグセフ平原 (Gusev)に着陸した、引き続いて1月25日には、同型 のオポチュニティ(Opportunity)は、火星のちょうど 反対側のやはり赤道付近のメリディアニ平原 (Meridiani)に着陸した、これまでに両探査機は火星 表面に過去に水が存在して堆積岩が形成されたという 重要な成果を挙げている、着陸からすでに半年が経過 しているが、順調に表面移動探査を続けている。

マーズローバは火星に着陸して表面探査を行った4番目、5番目の探査機となった.以前には1976年代のヴァイキングの2機の着陸船、1996年のマーズパスファインダ (Mars Pathfinder) の着陸船とローバが成功している.1999年のマーズポーラーランダ (Mars Polar Lander) は、着陸船からの信号が得られず、着陸に失敗した可能性が高い.これには2機の小型ペネトレータ、ディープスペース2 (Deep Space 2) が搭載されていたが、いずれも着陸成功のシグナルは送られてこなかった.また、今回のマーズローバと同時期にヨーロッパが打ち上げたマーズエクスプレス (Mars Express) のうち、着陸船ビーグル2 (Beagle 2) からはデータが得られず、着陸に失敗したか着陸時に探査機が故障したと考えられている.

着陸時のデータを取得しなかったため失敗の原因が つかめなかったマーズポーラーランダの教訓から、マー ズローバからは火星大気突入、降下、着陸の様子が逐 一送信されてきた. エアバックをつかって着陸の衝撃 を吸収するというマーズパスファインダで使われた機 構が採用された. 搭載された加速度計のデータから, 火星表面に衝突してエアバッグにより何度もバウンド した様子がわかった. そして静止. しばらくして、送 られてきた信号がスピリットの着陸成功を伝え, NASA のコントロール室は歓声に包まれた、そして、 後に火星表面から送られてきた大地の画像は、もう一 度、興奮を呼び起こしたのである. マーズローバには これまでの探査機に無い特徴がある. 着陸船そのもの が探査車で、長距離を移動することができる. 以前の 火星の表面探査は点の探査であった。マーズパスファ インダのソジャーナは表面を動き回ったが、着陸地点 から10m の範囲である. マーズローバの着陸から約 半年、すでにスピリットは3km 以上の踏査を行った。 オポチュニティもクレータ内部突入というミッション を開始している. 火星表面探査は点から線そして面の 探査へと、新たな展開を遂げている. すでに数万枚の 表面画像や様々な分析データが送られてきている.

2. マーズローバと搭載機器

マーズローバのサイズは高さ1.5m 幅2m ほどで、耕 耘機やゴルフカードのサイズである (図1). 太陽電池 パネルの下には6輪の車輪があり、独立に動くことができる。全体的には重心は下にあり安定した構造になっている。直立するマストには、ステレオ視のできるパ ノラマカメラと熱赤外分光計が搭載されている。ローバ下部の前面には、折り畳み式のアームがある。アー



図1:マーズローバ (Mars Rover). 左下側に伸びているの は科学機器が先端に搭載されているアーム. 直立して いるマストの上にはカメラが搭載されている.

ム先端の架台には、岩石や土壌を直接に調査できる、 顕微カメラ、エックス線分光計、メスバウア分光計が 搭載されている(図2). さらにこの架台には、固い岩 石表面を研磨したり塵を除去できる岩石研磨装置 (RAT: Rock Ablation Tool) がある. これにより、風 化した表面を削り取り新鮮な岩石組織を露出させて、 観測機器で詳細な観察をすることができる. マーズパ スファインダの探査では、エックス線分光計で得られ たデータは岩石表面に積もった塵の影響をかなり受け ていたが、マーズローバでは岩石研磨装置により正確

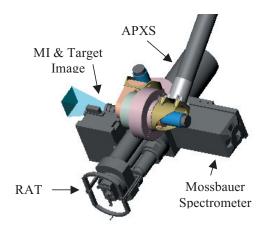


図2:ローバのアーム先端の架台に搭載されている科学機器. RAT は岩石表面を削る装置である. MI は表面を詳細 に観察する顕微カメラ, APXS は X 線分光計, そして メスバウア分光計が搭載されている.

な岩石組成を求めることができる.

マスト上部にはパノラマカメラと並んで45度の広い 視野角をもつ航法カメラがあり、ローバの移動時など に使われる.また、短時間に周囲を撮像するにも有用 で、実際に最初に得られた着陸地点の画像は航法カメ ラによるものだった.また、ローバの前面と後面には 視野角120度の広角の障害物検知用カメラが搭載され ている.ステレオ画像により自律走行時などの障害物 検知に使われている.実際にスピリットの長距離移動 では、航法カメラや障害物検知カメラを利用して、自 律的に障害物を回避して進むことで、高速(最大10m /時間)の移動が可能になった.

マーズローバに搭載されたそれぞれの科学観測機器について、以下に説明を加える.

パノラマカメラ (PanCam):マストに搭載されたス テレオカメラは、パノラマカメラの略称でパンカム (PanCam) と呼ばれている. 立体視の可能な一対のカ メラは、水平視野方向は360度変えることが可能であ る. さらに斜め上下方向にも視野を動かせる. そのた め, ローバの姿勢を変更せずに, 周囲の画像を連続し て撮像することが可能である. 公開されている広範囲 のカラー画像はパノラマカメラが連続して撮影した画 像を繋ぎ合わせたものである. 視野角は16.8度である ので、23-24枚の画像で一周をカバーする、高さ方向 に4画像とるとすると、おそらくパノラマ画像は100枚 程度の画像から構成されるだろう. 左右のカメラには それぞれ8枚のフィルターがあり、可視から近赤外 (0.43-0.98ミクロン) の波長域をカバーする. 0.43, 0.75ミクロンのフィルターは左右共通である. これに より、火星表面の岩石の明るさだけではなく、カンラ ン石や輝石といった基本的な岩石構成成分の情報も得 ることができる. 送られてきた画像から判断すると. パノラマカメラは、直下の岩石もかなりの(数 mm 程度)の解像度で観察を行うことができる.

熱放射分光計 (Mini-TES):これもマスト先端に搭載されていて、カメラと同様に周囲の岩石、土壌の分析を行う. 観測対象の視野角20mrad (1.1度) の範囲

の、5-29ミクロン領域の連続赤外線スペクトルを得る. 視野方向を徐々に移動することで、分解能は高くないが周囲のイメージングを行うこともできる.赤外分光のデータからは地表の構成物質の情報を得ることができる.また夜間の表面温度の情報も得られ、熱慣性のデータから間接的にレゴリス粒度・密度などの表面状態を知ることが可能である.さらに分光計の視野方向を空へむけることで、大気の温度、水蒸気量や浮遊しているダスト量の情報も取得できる.

顕微カメラ (MI): ローバ下部のアームに取り付けられているモノクロカメラである. F値15の光学系で、CCDのサイズは1024x1024 (ピクセル)²である. 10cm離れたところから観測対象の3cm四方の領域を30ミクロンの解像度で写し出すことができる、マーズパスファインダのソジャーナのカメラよりも2桁解像度の良い高分解能カメラである. このため、マーズローバの探査では岩石組織の細かな特徴が明らかになった.

アルファ粒子エックス線分光計 (APXS):これは、 岩石や土壌表面の元素組成を調査する機器で、マーズ パスファインダに搭載されたものの改良版である. 放 射線源から出るアルファ線を照射して、岩石・土壌表 面から放出されるエックス線および反跳するアルファ 線のエネルギーを測定して、その分布から元素組成を 調べる. これにより、岩石主要元素 (Mg, Si, Al, K, Ca, Fe) の他に、微量元素 (S, P, Na, Cl, Ti, Cr, Mn) も測定できる. さらに, アルファ線から C, O の量も 原理的には測定可能である. APXS の測定で得られる ものは、アルファ粒子の透過可能な表面付近の数10ミ クロンの組成情報である。正確な測定には10時間ほど かかるため、測定は主に夜間に行っている. また APXS にはセンサカバーがあり、観測を行っていない ときにはカバー内部の試料でキャリブレーション測定 を行うことができる.

メスバウア分光計 (MB): 今回新たに惑星表面探 査機に搭載された科学機器である. これはガンマ線の 共鳴吸収を測定することで, 含鉄鉱物の結晶状態や鉄 の酸化状態を調べる計測器である. この機器により. オポチュニティ着陸地点の岩石に、ジャロサイトという鉄含有の硫酸鉛鉱物が発見されたことが、水の存在の重要な証拠となった。さらに、岩石や土壌中の球状鉱物にヘマタイトが濃集していることを発見したのも、メスバウア分光計である。この機器も1サンプル測定に12時間かかるため、主に夜間に測定を行っている。

3. スピリットの着陸とトラブル

スピリットの着陸地点,グセフ平原は直径150km ほどのグセフクレータの内部である (図3a). 着陸地点は南緯14 34′ 西経184 31′ である. このクレータには,南側に長さ300km ほどの古い時代 (40億年前



(b)

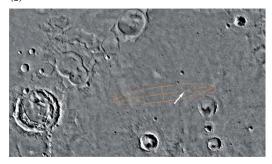


図3:マーズローバ着陸地域のリモートセンシング写真。スピリット着陸地点のグセフクレータ(a)と、オポチュニティ着陸地点のメリディアニ平原(b). 図中の楕円(長径は80km)は着陸予想範囲を表す。白い矢印の先端は実際の着陸地点である。

程度と考えられる)の河川マアディム谷(Ma'adim Vallis)が流入している。この平原は太古の湖沼堆積物で形成されたと考えられていた。河口近くのクレータ内部にはデルタ状の河川堆積物も観察できる。そのため、過去に水が存在した証拠を得る可能性が最も高いということで、グセフ平原は厳しい着陸候補選定に生き残ったのである。

1月4日,着陸したスピリットは周囲の画像を送ってきた.まず、マストにある航法カメラが周囲を撮像した画像が公開された.スピリットの着陸した地点は、ほぼ平坦な平原で、これまでのヴァイキングやマーズパスファインダの着陸地点と比較すると岩石が少ない.障害物が少なくローバの移動探査には有利な場所のようである.2日後には、パノラマカメラによるカラー画像が公開された(図4).これまでの表面探査の画像で見慣れた「赤い」火星の大地が広がっている.点在する岩石の色は黒く、赤い塵をかぶっているようだ.この暗色は、おそらく玄武岩のような火成岩の色と思われる.グセフ平原は、クレータ内部が河川を通じて流入した堆積物で埋められた地域である.岩石の色は.



図4:スピリットのパノラマカメラが最初に送信してきたグ セフ盆地の表面の様子、十数枚の画像を繋ぎ合わせた 画像である。

クレータ内の堆積岩が掘り出されたものではなく、外部から運ばれてきた岩石であることを示唆している. (後の組成分析の結果は予想通り、玄武岩に近いものであった。)河川を通じて運ばれてきたのだろうか. 洪水のように流量の多い場合や氷が流れてくるときには、岩石を運んでくる可能性があるだろう.また、風が表面を浸食して砂や土などの細粒物質が取り去られると、表面に岩石が濃集する可能性もある.

画像の遠方には、衝突クレータと考えられる明るい 凹地がある。明るいものは、風で運ばれてきた塵や砂などの物質であろう。着陸船のそばには、エアバック に引きずられた一見すると粘性の高そうな表土がある (図5). これから表土に水分が含まれているのではないかという推測もあったが、ごく表面の粒度が異なる場合には乾燥している土壌でも画像に見られるような形態を示すようだ。



図5:スピリット着陸地点のエアバックが引きずった表土 (図の右上). 粘性が高い物質がある可能性が指摘された、図3の右下部.

1月15日には、スピリットは台座から移動して火星表面に降り立った。着陸船から小型ローバを送り出したマーズパスファインダと異なり、マーズローバは着陸船そのものがローバと考えてもいい探査機である。このローバは高利得アンテナを使い、地球と直接交信できる。(この他に低利得アンテナを使用して、火星周回中の探査機マーズグローバルサーベイヤやマーズオデッセイを経由して地球にデータを送ることもでき

る). 地表に降りたスピリットは早速, 周囲の土壌や岩石の観察を開始した.

ところがオポチュニティが着陸する直前の1月21日, 熱放射赤外計のデータを取得している間に, スピリットからのデータ送信が停止した. 地球からスピリットにコマンドを送信して必至に復旧を試みた. 当初はマーズローバの担当者から, 非常に深刻な事態であるというコメントも出された. やがて, マーズオデッセイを通じてスピリットからのデータが送られてきたことがわかった. 詳しく調べると, ローバのデータ処理系のフラッシュメモリに不要なデータが残っているために, ローバのシステムが頻繁にリセットされることが原因であることがわかった. そのため, メモリのデータ削除などが行われて, 最終的にスピリットの機能は回復した. (オポチュニティも全く同じシステムを取っているため, 同様のトラブルの可能性がある. そのため, 着陸後直ちにフラッシュメモリの不要データの消去が行われた。)

回復したスピリットは科学観測を再開した.2月6日には、アディロンダック (Adirondack) という岩石の表面を、岩石研磨装置を使って研磨して表面組織を観察した (図6). これは、アメリカインディアンのことばで「偉大な岩」という意味になるニューヨーク州に

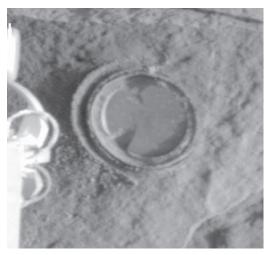


図 6:岩石研磨を行った最初のケース、アディロンダック (Adirondack)と呼ばれた岩石の表面を岩石研磨装置 (RAT)で研磨した、研磨された領域は図の中央部の円 形部で、直径45.5mm、深さは2.65mmである。

ある山地の名前から取ったそうである。岩石の命名方法には、厳密なルールはなく、ローバを実際に動かしている研究者達が好きな名前をつけているようだ。ローバが火星に降りる前に撮像されたアディロンダックより少し遠方にある並んだ岩石には、サシミ、スシといった名前がつけられているものもある。単に形が似ているためらしい。

4. オポチュニティの着陸と水の証 拠の発見

もう1機の探査機オポチュニティは、やはり赤道地域にあるメリディアニ平原に着陸した(図3b). 着陸地点は南緯1°57′西経5°32′でマリネリス峡谷の東方にあり、スピリットの着陸地点とは火星のほぼ裏側になる。マーズグローバルサーベイヤの赤外線観測から、赤鉄鉱(ヘマタイト)が濃集している地域であることがわかっていた[1]. メリディアニ平原そのものは、マーズグローバルサーベイヤの事前の高解像度の観測から成層構造らしき地形が観察されていたが、グセフクレータのような流水地形との直接の関係は観察されていなかった。このヘマタイトが水中の堆積物起源なのか火山性堆積物など他の起源なのかを知るためには、着陸して表面物質の直接観測を行う必要がある.

マーズグローバルサーベイヤの観察からへマタイトが確認された地域は他にもあるが、メリディアニ平原のように数百 km におよんで存在するところはない、火星周回軌道を経ずに直接火星に突入して、パラシュートで減速してエアバックで着地という着陸手法では、着陸地点の誤差は数10km 以上である。そのため、確実にヘマタイト地域を観察するためには、他の地域を選ぶことはできなかった。また平原地域であるため着陸安全性が高いということもメリディアニ平原の選定理由の一つである。

オポチュニティの着陸については、おそらく将来に わたって語り継がれるような「運」があった. 平原の 上を何度かエアバッグによりバウンドして、最終的に

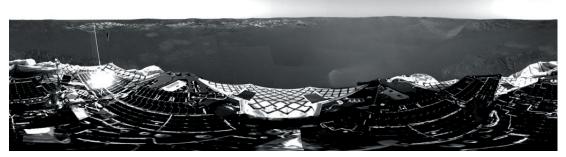


図7:オポチュニティが最初に撮像した着陸地点の画像、イーグルクレータ (Eagle Crater)の内部である、明るい岩石層が観察される。

小さなクレータの内部に止まったのである. 地球から 半年以上, 距離にして3億 km を越える旅路の果てに ホールインワンである. オポチュニティから送られて きたクレータ内部の画像には, これまでに火星表面で は見られなかった明るい色の岩石しかも地層が写って いた (図7). 表面より下の地層が観察できる可能性が あるクレータ内部は, ローバによる表面探査では, 当 初から計画されていたターゲットであった. それが最 初の着陸地点だったのである. さらに, その地層はこ れまで火星表面で観察された玄武岩のような黒色岩石 とは異なり, 堆積岩の期待を抱かせる明るい色である.

ローバは地上に降りて、まず、周囲の表土を観察した。すると、数 mm 程度の球粒が多く含まれている。一見すると火山噴出のときにできるガラス玉のようでもある。そして、いよいよ、岩石層を調べることになった。図8は分析を行った El Capitan と名付けられた岩石である。岩石を顕微鏡など様々な機器で観察すると、驚くべきことが判明した。この岩石は水中で沈殿・堆



図 8 : エルカピタン (El Capitan)と命名された岩石. El Capitan はヨセミテ国立公園にある岸壁の名前である.

積したものだったのである.岩石表面そして内部に球粒がある.どうやらもともとこの地層に含まれていたもののようである (図9).バグと呼ばれる溝 (図9)は,鉱物の成分が水中に溶け出すことにより生成される構造によく似ている.また,ローバのエックス線分光計により観測された岩石中の硫酸塩鉱物は,地球では水のある環境で形成されること,ほとんどの場合は湖や海で形成されることが知られている.さらに臭素や塩素といった,地球では水中で堆積した物質や蒸発で形成される岩石に含まれる元素が確認された.メスバウア分光計でもジャロサイトという鉄の硫酸鉛鉱物が確認された.この鉱物は含水鉱物である.

さらにこの岩石表面の構造をよく観察すると、堆積



図9:イーグルクレータ内の岩石表面に観察される,数 mm サイズの球粒物質.図中央やや左とその下に2つ見える.バグ(vug)と呼ばれる溝も多数観察できる.図では鳥の足跡のように見えるが、個々の溝の形態は中央がふくらんで周囲が薄いディスク状である.この構造は、堆積中で結晶が成長した後に、浸食や溶解で削れたものと、説明できる.

する表面に水の流れがあった証拠である、斜交層理が 観測される(図10). 細かい平行な層が角度の異なる 平行な層で切られている. これから、この地層は浅い 湖か海で形成されたのではないかと推測された. また、 層中の粒度の分別が起きていることも確認された(図 11). これもまた、堆積岩の特徴の一つである.

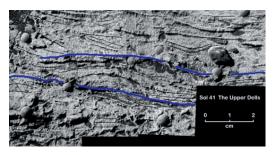


図10:岩石中の層構造に見られる斜交層理. 太線でマークされた層が、細かい層に対して斜交している.

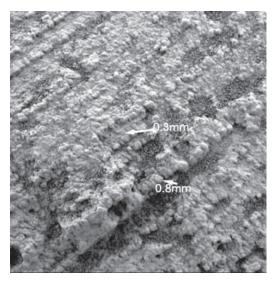


図11: Slickrock と呼ばれる岩石の表面の拡大図. 粒子サイズの異なる (0.3-0.8mm) 層から構成されている.

一方, 地層に含まれる球粒物質にはヘマタイトが含まれることがメスパウア分光計の測定から判明した. 球粒物質は火山ガラスなどではなく, 堆積岩中で形成されたものらしい. ちょうど, 地球の岩石でも似たようなヘマタイト粒子が観測されていた. Chan et al. (2004) は, アメリカ, ユタ州南部のナバホ砂岩層中に, 地層形成後に地下水との反応で形成されたヘマタイト

球粒物質を発見している[2]. これは、オポチュニティが発見した粒子にサイズも産状も非常に似ている.これから逆に、この球状粒子の存在することが、地層が堆積岩であるとともに堆積後に地下水による再結晶作用を受けた証拠であると、考えられるようになった.

5. スピリットの旅

着陸地点の探査を終えた後に、スピリットはまず、そばにあるボネビルクレータを目標地点とした(図12).前にも述べたように、クレータ内には地下の岩石が露出している可能性がある.しかし着陸後66日目に辿り着いたリムからクレータを観察すると、残念ながら探査対象となるような地層や岩石の露出は無かった.

そこで、次のターゲットとして、南東方向にある丘陵地帯、コロンピア・ヒルを目指すことにした (図12).この地域はクレータ内部の堆積物ではなく、クレータ形成時に地下から盛り上がった地域である、おそらく地下の岩層が露出しているのではないかと考えられていた.しかしコロンビア・ヒルまでの距離は遠い.そこで、ほぼ3kmを自動操縦で進むことになった.まず改良した自動操縦プログラムをスピリットに送信した.これにより、航法カメラや障害物検知の画像から、進行方向で障害物の少ない安全なルートを探して移動することができるようになった.このスピリットの長

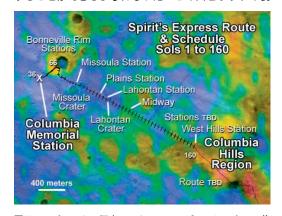


図12:スピリットの探査ルート、コロンビア・ヒルまで、着 陸地点が Columbia Memorial Station で、ルート上 の数字は着陸してからの火星日 (Sol) を表す.

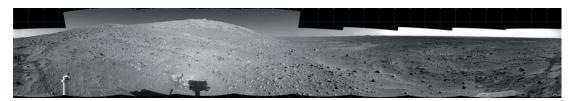


図13:コロンビア・ヒル (Columbia Hill) を麓から望む.

距離移動は、工学的には大きな成果である. そして、 スピリットは6月10日にコロンビア・ヒルの麓に到達 した(図13).

そこで Pot of Gold と名付けられた奇妙な形の岩を観察したところ (図14), ヘマタイトが発見された.この岩は浸食や溶解を受けたような凹凸の激しい表面構造があるが,残っている部分に数ミリサイズナゲット状の塊があり,オポチュニティの発見した球粒物質と類似している.分析の結果,これがヘマタイトであると同定されて,オポチュニティの発見したヘマタイト球粒物質と同じものと結論づけられた.前章で述べたように,ヘマタイト球粒物質は今では堆積岩とその後の再結晶作用の証拠と考えられている.やはり,グセフクレータ内部にも,水中での堆積物が存在したのである.Pot of Gold はおそらく,後の衝突で掘り出された岩石なのであろう.

その後スピリットは、コロンビア・ヒルの West



図14: Pot of Gold と名付けられたコロンビア・ヒルの麓で発見された岩石. 図の左側のビーズ状のものが混じっている部分が Pot of Gold である. この球粒にはヘマタイトが濃集していることが明らかになった.

Spur という山に登るルートを取ることになった. 右前輪が劣化していることが確認されたため, 残りの5輪を使って後ろ向きに進んでいる. 傾斜の緩い斜面を選んで, 北側に迂回して上るルートが選択された. 今後は, コロンビア・ヒルを構成する岩石の調査をしながら, さらに踏査を行なう計画である.

6. オポチュニティの旅

着陸地点のイーグルクレータを探査した後、オポチュニティは、600m ほどの距離にあるエンデュランス (Endurance) という直径130mのクレータを目指した (図15). 途中で断層と考えられる地表の割れ目を観測している. これはトルコにある断層の名前から、アナトリアと名付けられた.

図16はオポチュニティの撮像したエンデュランスの 全景である.マーズグローバルサーベイヤの画像から、 このクレータ内には明るい岩石の地層が露出している

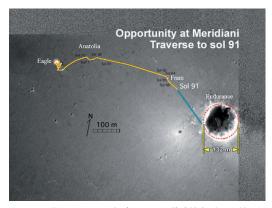


図15: オポチュニティの探査ルート. 着陸地点 (イーグルクレータ) から, エンデュランスクレータまで. ルート上の数字は着陸してからの火星日(Sol) を表す.

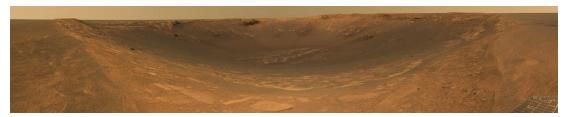


図16:エンデュランスクレータ(Endurance Crater)の全景.

ことは予想されていた.確かにクレータ内部に、イーグルクレータで観察されたものと同様の白色岩石層が確認された.それだけではなく、急傾斜のリムの下には高さ10m 近い明瞭な縞模様の層構造が観察された(図17).この場所は Burns Cliff (燃える崖)と命名されている.ここでは、明るい色の岩石層とは異なる岩石も観察できる可能性もある.オポチュニティは、このクレータ内部の探査を行うことになった.クレータの外縁部を半周して、クレータ内に入るルートを探索した.そして、カラテペ (Karatepe)と呼ばれる地点からクレータ内部へと降りることになった (図18).

6月9日にクレータ内部へと降り始めた. 傾斜が20度近くになるため、事前に地上で模型を使って運行試験を行った. まず、タイルのように広がっている明るい色の岩石層に到達して、観察を行った(図19). 調査の結果この地層は、最初に観察したイーグル(Eagle)クレータの岩石と同じ地層であることがわかった. 地

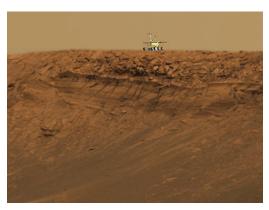


図17:エンデュランスクレータの縁にある Burns Cliff と名付けられた崖、厚さ10m ほどの明瞭な地層構造が観察できる。サイズの比較のため、ローバの画像を合成してある。

上観察からも、硫酸塩に富んで水中で堆積したと考えられる地層が少なくとも 1 km 近い広さで存在していることが確認されたのである. これから、堆積物の生まれた水の存在する領域が、ごく狭いものではなく、湖沼や海洋といった広いものである可能性が高くなった. おそらく、メリディアニ平原のかなり広い地域に、

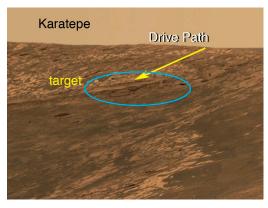


図18:オポチュニティのエンデュランスクレータ内部への探査ルート、カラテベ (Karatepe)と命名された地点から傾斜20度余りの斜面を降りた。

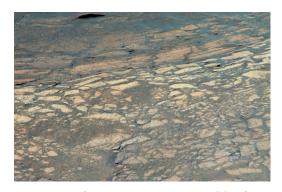


図19:カラテペ直下のエンデュランスクレータ内部の表面. 図で白く見える岩層は、イーグルクレータで発見された蒸発岩を多く含む岩層と同じものと考えられる.

同じ堆積物が存在するのではないだろうか.

7. 今回の成果の意味すること

オポチュニティの探査結果は、河川や湖沼といった 明瞭な地形的な証拠が無い場所でも、過去に水が大量 に存在していた場所のあることを示している。これま でのリモートセンシング探査では火星上の様々な場所 で、層構造の断面と考えられる地形が発見されていた。 しかし堆積層のような地層の成因としては、溶岩が何 度も流れたため形成されたという説や、衝突による放 出物(エジェクタ)が繰り返し堆積したために形成さ れたという説が主張されていた。またクレータ内部で 確認されるような層構造では、風成堆積物により地層 が形成された可能性が指摘されていた。オポチュニティ の探査結果により、火星の広い範囲で確認されている 地層構造の中には、湖沼や海洋で堆積したものもかな りあるのではと考えられるようになった。

また、火星表面には「ホワイトロック」と呼ばれる、アルベドの高い岩石層が露出している地域がある。これまでは、分光観測などから「ホワイトロック」は火山灰堆積物によるものではないかと考えられていた。しかし「ホワイトロック」の色は、オポチュニティの発見した明るい色の岩石層に近い、「ホワイトロック」が水中堆積物ならば、火星の広範囲に水が存在して堆積物が形成されていた証拠になる。また、「ホワイトロック」が確認される地域は、将来の地表探査やサンプルリターン探査の重要なターゲットになるだろう。

8. 終わりに

今回のミッションで画期的なことは、ほぼ同一の探査機を2機火星に送り込んだことだ。科学機器を含めた衛星の製作費用は、同じものを2機作るための費用は1機の倍よりはずっと少ない。一方、同じものを2セットつくることは、科学機器や衛星のそれぞれの部品、また衛星全体のシステムの信頼性を向上させる。結果として、1機それぞれの成功確率も高くなる。このため、以前のミッションでは同型の探査機を2機打ち上

げることがしばしば行われた.アメリカのヴァイキング探査機やボイジャー探査機がその例である.また,厳密には同じものとはいえないが,アポロの有人探査や旧ソ連の月着陸船,金星着陸船は2機以上作られている.今回,マーズローバが2機のミッションで行われたことは,アメリカの火星に対する並々ならぬ意気込みを示している.

また、些細なことかも知れないが、マーズローバは「火星環境に優しい」探査機である.着陸のときにエアバックを使ったため、スラスタの燃料などで大気や表土を汚染していない.実際にヴァイキング探査機では、土壌分析のときに燃料中のアンモニアなどによる汚染の影響が表れた.また、原子力電池を使っていたヴァイキング着陸船とは異なり、太陽電池で駆動する.今のところ塵の付着による太陽電池の劣化の影響はあまり表れていない.ローバが移動するために、塵の付着が押さえられている可能性がある.

現在、スピリットの左前輪の動きが悪くなっているというトラブルがあるが、ローバの移動は残りの5輪を使うことで十分に達成できるので、致命的なものではない、今後マーズローバは、日照時間の一番短い時期には、移動活動を控えて保護モードに入る計画と聞く、その後、再び活動を開始して、おそらくトラブルが無い限り、火星表面の探査を続けることだろう。

9. 謝辞

査読者の小高正嗣氏には有益なコメントをいただきました.本論文の図版はすべて、NASA Mars Roverのホームページ (http://marsrovers.nasa.gov/home/index.html)から入手しています.一部の図については、サイズ変更などでオリジナルのものに手を加えてあります.

10. 参考文献

- [1] Christensen, P. R. et al, 2001, J. Geophys. Res., 106, 23873-23885
- [2] Chan, M. A. et al, 2004, Nature 429, 731-734