

特集：MELOS火星複合探査の科学検討

MELOSの目指す火星表層科学探査

杉田 精司¹，宮本 英昭¹，橘 省吾¹，岡田 達明²，出村 裕英³，
大森 聡一⁴，並木 則行⁵，高橋 幸弘⁶，三浦 弥生¹，長尾 敬介¹，
三河内 岳¹，佐藤 毅彦²

2009年4月21日受領，2009年5月13日受理.

(要旨) 我々はこれまでの火星複合探査ワーキンググループの中で，MELOSの着陸機によってどのような火星表層探査を行うべきか，またどのような測定によって実現されるのか議論を行ってきた。本稿では，その議論で見えてきた火星着陸探査による表面探査の科学目標と搭載機器候補について解説する。

1. 火星探査の魅力は表層探査にあり

この見出しに「MELOSは火星の様々な層や圏を調べる複合探査ではなかったのか?」と危惧される読者もいるかもしれないが，その心配は必要ない。心配が要らない理由は後述することとして，なぜ表層探査が最も魅力的なのかをまず説明したい。例えば，火星大気の散逸機構を理解することがなぜ重要かという問題提起をする際には，MarinerやVikingによって明らかにされた火星表面に残る流水地形[1]やMars Global SurveyorやOpportunityによって発見されたヘマタイト(Fe₂O₃)の存在[2]，さらにはMars ExpressおよびMROが見つけた粘土鉱物(図1，[3, 4])などが必ず挙げられる。これら火星表層に残された地質学的証拠は，現在では全球凍結した寒冷乾燥気候を持つに至っている火星が太古には温暖湿潤気候を持っていた可能性を示している。この惑星気候の大変遷こそ，現代惑星科学上の最大の問題と言っても過言ではない。この問題が存在するからこそ，火星の探査はプラズマ圏も大気圏も固体圏も非常に面白くなるのである。太古の温暖湿潤気候の証拠は，火星の表層に残っている。これ

までの米欧の火星探査計画の歴史は，その証拠を1つずつ発見してきた歴史でもある。ここで，このような寒冷乾燥気候(雪玉地球状態)と温暖湿潤気候の間の遷移は，火星に限られた現象ではなかったのかもしれないことを一言付け加えたい。現在は温暖湿潤気候にある地球も雪玉状態に何度も陥ったことが判明している[e.g., 5, 6]。しかし，地球が何をきっかけとして雪玉状態に陥っていたのかなど，未解明な点も多く残されている。この意味でも火星の温暖湿潤気候の維持機構とその終息の機構を探ることは非常に重要である。

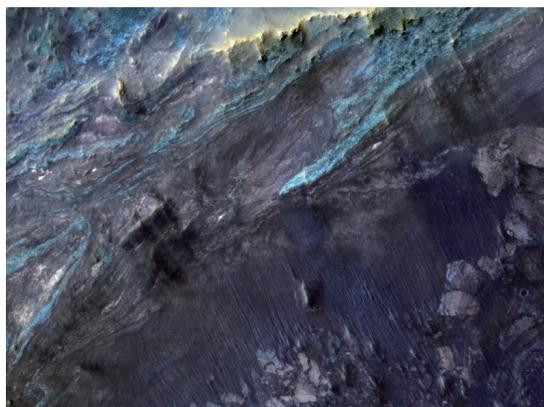


図1：MROに搭載されたHiRISEが撮影したNili Fossae南部の地溝帯の断層崖の擬似色画像(PSP_007200_2005の一部。画像幅は400m)。緑・青色は風化を受けていない塩基性岩を，薄褐色は粘土鉱物を示す。画像の右下に粘土鉱物の数10mの大きさの塊が見える。これらの塊には，さらに層構造が観察される(Mustard et al., 2009)。画像提供：NASA/JPL/University of Arizona.

1. 東京大学
2. 宇宙航空研究開発機構
3. 会津大学
4. 東京工業大学
5. 千葉工業大学
6. 東北大学
sugita@k.u-tokyo.ac.jp

また、火星表層は垂直方向にも水平方向にも非常に変化に富んでいることが分かっている。これまで着陸したことのないタイプの地質区分の土地に着陸すれば、従来の探査では見えていなかった地表の様相が発見される可能性は非常に高い。当初さしたる発見がなかったと思われた火星探査車Spiritも、数kmの道のりを移動するだけで過去の熱水循環系を強く示唆する証拠をつかむなど大きな発見をもたらした[7]。一方、Spiritから数千km離れた地点に着陸したOpportunityは、早いうちから水の存在を示す多くの証拠(斜交層理、ヘマタイト、硫酸塩岩など)を発見するなど大きな成果を挙げた[e.g., 2, 8]。さらに、火星にはこれまでたったの6機しか着陸による科学観測に成功した探査機がない。とても火星の主要な地質区分の全てを見てきたとは考えられない状況である。MELOS探査によってこれまでと大きく異なるタイプの地質区分の土地に着陸すれば、全く新しい火星表層についての発見がある可能性は非常に高い。極論をすれば、惑星地質学的に新奇性のある地点に着陸さえすれば、大した戦略なしに凡庸な観測装置を搭載したとしても大きな発見がなされる確率はかなり高いとさえ言える。

しかし、それでは、多額の予算を投入して行う探査計画には不十分な企画であると言わざるを得ない。火星探査機を日本から送り込むに当たって、どのような戦略で表層環境探査を企画すれば最も大きな発見がなされるのか考えるべきである。そのためには、過去の火星表層探査を振り返り、その実績を踏まえて計画を練ることが重要である。

2. 火星表層探査の現状

米欧の数々の火星探査機によって明らかにされてきた様々な火星表層についての知見をここで包括的にレビューすることは困難である。ここでは、多少の偏りをお許し願った上で、その概略を記すことにしたい。まず、火星表層には、30数億年以上昔の時代において温暖湿潤気候が存在していた可能性が高い[e.g., 1]。しかし、その時代の後には寒冷乾燥気候が卓越し、流水地形の形成や含水鉱物の生成などは全て停止してしまっただと考えられている。しかし、太陽光度が現在よりも3割程度低かった30億年以上昔の当時において温暖湿潤気候を維持することは非常に難しいことが分かっ

ている。当初は、分厚い二酸化炭素大気による非常に強力な温室効果があれば、火星にも温暖湿潤気候がもたらされると予想されたが[9]、CO₂の凝結が障害となるために二酸化炭素の温室効果のみでは火星に温暖湿潤気候をもたらすことはできないことがKasting [10]の計算によって判明している。さらに、温暖湿潤気候が急速に終了した原因については、有力な手掛かりは得られていない。

加えて、最近の詳細なりモートセンシング探査によって解明されてきた火星の表面付近の様相は、非常に解釈が困難なものである。端的に言えば、相互に矛盾したようなデータが幾つも見つかるのである。まず、その例は表面組成の分布である。Mars Global Surveyorの熱赤外線観測によって得られた火星表面には、風化が進んだ玄武岩であることを示唆する成分(SiO₂量に富む)が濃集した地域と新鮮な玄武岩成分(SiO₂量に乏しい)が濃集した地域にはっきりと分かれることが判明している[11]。しかし、Mars Odysseyによるγ線分光計測は火星全球の至る所でK/Th比がほぼ一定であるという結果を出しており[12]、火星の表層物質が水質変成の影響をほとんど経験していないことを示している(Kは水溶性であり、Thは難水溶性であるので、水質変成があればK/Thは大きく変化する)。この観測事実は、風化した玄武岩が地域的に濃集しているという上の推定と非調和的である。第2は流水地形と対応する堆積層の関係である。Mars Global SurveyorのMOCなど種々の撮像カメラからは流水地形が報告されているのに対し[1]、Mars ExpressのMARSIS やMROのSHARADによるレーダーサウンダー計測からは、流水地形の河口部に近い場所に堆積地層らしき成層構造を見つけたという報告はされていない。それどころか、Outflow channelの分布や海岸段丘様の地形分布から大きな海が存在していた可能性が指摘されている北部低地[e.g., 13, 14]の一部であるAcidalia平原やChryse平原に見られる数々の小クレーターの内壁面にできた露頭の近赤外反射分光計測(MRO搭載のCRISM)からは、表面近くの浅い層がカンラン石を含んだ玄武岩質の溶岩でできていることが報告されており、含水鉱物などは見つかっていない[3, 15]。第3は、含水鉱物の組成である。Outflow channelが注ぎ込み太古には海であった可能性の指摘される北部低地には含水鉱物は見られないが、南部

高地の崖地には含水鉱物が多々観測されている[e.g., 3, 16, 17, 18]. ただし、火星に発見された含水鉱物には、酸性環境で不安定な粘土鉱物と酸性環境で形成される硫酸塩鉱物の両方が含まれている。この両者が同時に安定に存在できる条件を作ることは大変に難しい。火星の表層環境は、アルカリ性であったのか酸性であったのか、地域的に大きな違いがあったのか、難しい問題である[3, 17]。このように、どの観測データを重視して解釈を行うかによって、描かれる火星の表層環境の描像は大きく揺らいでしまう状況となっている。現在の火星研究は、詳細が分かれば分かるほど解釈が難しくなるというフェーズにあるのかもしれない。

このような、相互に矛盾したように見える表層環境の記録をどのように解釈すべきかについては、確立した解はまだ見つかっていない。しかし、手掛かりがないわけではない。例えば、火星表面に残された相互に不調和な地質記録は、火星の異なる気候モードの痕跡の重ね合わせであると解釈すれば、矛盾なく理解できる可能性がある。例えば、流水地形が形成した温暖湿润気候の時代にも2つの区分があり、前期にはpHが高い環境が卓越し、大規模火成活動を境にpHが低い環境に遷移したという提案が出されている[3, 17]。もしこの仮説が正しければ、粘土鉱物(アルカリ性環境下で安定)と硫酸塩鉱物(酸性環境下で安定)の両者が同時に地表に存在した必要がなくなるため、鉱物安定性についての上記の矛盾は解消される。もちろん、なぜ一時期のみに火成活動が活発化したのか、またそれが火星表層全体のpH変化を起こすのに充分であったのか否かなど不明な点は多々ある。しかし、粘土鉱物の産する年代区分が硫酸塩鉱物を産する年代区分より系統的に古いという観測事実が二つの種類の含水鉱物が共存できない問題の解決に繋がるのかもしれないとの指摘は一考に値する。さらに、その後現在の地球凍結型の乾燥寒冷気候に遷移があったとすれば、火星は2度の大きな環境遷移を経て進化してきたことになる。

このような火星環境システムの大きな遷移があったとすれば、大気圏のみあるいは固体内部構造のみを対象とした単一の探査では、その実像に迫るのは大変に難しいことが予想される。それは、このような環境システムの大きな遷移は、非線形システムに特有な多重解の間の相転移である可能性があるからである。気候非線形システムは多層間の相互作用の影響を複雑な形

で受けるため、地球の超長期の気候進化の理解に必要なように、惑星を構成する全ての層の基礎量および各層間のエネルギーおよび物質の輸送量を知る必要が生じる。しかし、これまでの米欧の火星探査計画は、このような惑星システムの理解という視点が強く意識されたようには見えない。むしろ、惑星システム全体の理解より先に水や含水鉱物の発見に主眼が置かれてきたように見える。つまり、火星という惑星システムを制御している基礎量(例えば、中心核半径、地殻厚、大気散逸量、地殻熱流量など)の観測にはあまり力が注がれてこなかった。その結果、記載学的視点からは大変に重要な発見は多数あったものの、火星の表層環境システムの本質的な理解はあまり進展してこなかったという現状に繋がっている。

3. MELOS着陸機による表層探査の科学目標と搭載候補機器

このような認識に基づき、本探査計画の火星表層探査では従来の米欧の探査計画とは異なった考え方で臨みたいと考えている。本探査計画では、火星表層に面白い発見を目指すことを最優先するのではなく、表層を固体圏と大気圏の相互作用の境界面と捉え、この境界面を通してどのような物質交換がなされてきたのかを調べることを第一の目標とする。具体的には、火成活動による脱ガス過程(固体層から大気へのガス付加)、表土と大気の化学反応過程(大気から固体層へのガス取り込み)という大気層と固体層の間のガスのフラックスの解明が中心課題となる。

これらは、プラズマ圏を通した大気の散逸過程[19]、大気中の水蒸気輸送過程[20]、固体火星の内部活動[21]と並んで、火星の多層間物質循環を理解する上で非常に重要な過程である。このように火星の主要な多層間物質循環についての理解が同時に進展すれば、火星の表層環境システム全体の描像を塗り替えることができることが期待される。逆に言えば、表層探査のみを行ったのでは火星表層の真の理解には繋がらず、従来の米欧の探査計画が軽視してきた点も含めてプラズマ圏、大気圏、固体圏の全てを総合的に調査し、相互作用因子を定量的に把握することが火星の表層環境システムの理解に繋がるのである。これが、冒頭で「心配はない」と述べた理由である。

このような目的を達成するために、表層探査に関し

ては以下のような測定と装置が提案され、検討が重ねられている。

a. 大気の希ガス同位体計測

希ガスおよびその同位体は化学反応に関与しない特性のため、内部からの脱ガス量や大気からの散逸量の制約に有効に用いられうる核種である。四重極型質量分析計を用いて、火星下層大気希ガスの全同位体組成の決定を行い、大気形成進化史に定量的制約を与えるための基礎データを取得することを検討している。

b. 気象計測

着陸地点における基礎的な気象観測量(気温, 気圧, 湿度, 風速, 風向)を計測する気象計測パッケージの搭載を検討している。これは、着陸地点の基礎的記載を行う上で不可欠の観測量でもあり同時に、オービターからの広域観測との連携により火星気象観測についての大きな相乗効果も期待される。

c. 着陸地点近傍の概観的観察とサンプル選定

先に述べたように、火星表層には、異なる時間の異なる表層環境を記録した岩石・鉱物が露出している様である。それゆえ、調査地点の地質学的文脈情報が重要である。これを得るために、可視・赤外域のカメラ群と高速度かつ高空間分解能で周囲の物質の元素組成を計測できるレーザー誘起元素分析器(laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)の搭載を検討している。これらの装置の連携運用により、以下で述べる詳細物質計測のためのサンプル選定も実施する。

d. 火星表層物質の元素組成計測

着陸地点での岩石試料の全岩化学組成分析のために蛍光X線分析(XRF)装置の搭載を検討している。着陸地点岩石の化学的記載だけでなく、後述する年代計測において必要な火成岩中のK濃度の定量分析にも使用することを検討している。

e. 火星表層物質の鉱物分析

岩石中の鉱物種の決定を目的としたX線回折(XRD)装置の搭載検討を行っている。火成岩や表層ダストの鉱物種分析、およびそれらにおける風化鉱物の存在の有無の確認に使用する。

f. 年代計測

火成岩のK-Ar年代測定($^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ [半減期125億年])を行い、火星でのクレーター年代学のための年代アンカーを決定することを目指している。火成岩から、風化の影響の少ない内部の部分を取り出し、X線蛍光

分析でK量を定量、その後、秤量した試料をオープンで加熱し、抽出した ^{40}Ar を四重極型質量分析計で定量し、K-Ar年代を決定することを計画している。

g. 地中レーダー

着陸地点の地質学的構造を理解するには、周辺の地下浅部の構造を知ることが近道である。また上述のように、表層環境の過去の変動に応じて表層の土砂が変性している可能性があり、高い解像度で深度方向の構造を知ることが重要である。こうした理由から100 MHz程度の電磁波を利用した地中レーダー法を用いて地下構造を探索することが検討している。

h. 電磁場計測

火星表層においては、ダストデビルなどに伴った放電現象が多く起こることが報告されているが、その詳細はほとんど未解明である。このような大気放電現象は、火星の大気化学に大きな影響がある可能性がある。また、電磁場計測は浅部の地下構造を調査に非常に有効な手法でもある。この2つの目的のためにダイポールアンテナによる電場観測、ループアンテナによる磁場観測などを検討している。

科学測定機器そのものではないが、表層探索の成否に非常に重要な鍵となる装置がある。それは、移動手段である。繰り返しになるが、火星表面は非常にバラエティーに富むため、1 km程度の距離であっても移動することによって観測される事象が大きく異なるというのが、これまでの火星探査の実績から得られた教訓である。例えば、昨年2008年に着陸したPhoenix探査機の例からも移動手段の必要性は痛感される。Phoenix探査機は水氷などを見つけたということでニュースにはなっているが、火星の極端に水氷があることは大方が予想していたことである。時間を掛けた詳細解析の結果を待たないと最終的な評価はできないが、現時点においてPhoenix探査機は大きな驚きをもたらしたとはいえない。これは、運用期間が短かったことと移動手段を持っていなかったことの2つが大きなハンディとなったと思われる。Spiritが調査場所を変えることによって大きな発見に辿り着いたことと好対照である。ローバーなどの移動装置は、火星表層探索を成功させるために欠くことのできない性能である。あるいは、例えば極端に機能を絞った軽量の観測装置を空中から散布するなどといった、新しい発想による探査手法についても並行して検討すべきかも

しれない。

4. おわりに

大気計測や固体内部計測が、着陸地点からは大きな影響は受けないのに対し、表層探査は着陸地点の選択が成果の多寡を決めてしまうと言っても過言ではない。これは、全く同じ計測装置が全く同じように作動しても当初の成果が大きく異なったOpportunityやSpiritの例に見られるとおりである。その一方で、着陸地点の選択如何によっては搭載測定装置の種類も変える必要が出てくることは容易に想像がつく。しかし、米欧の火星探査計画が進行または計画されつつ現状では近い将来に新たな発見や描像が提起される可能性も高く、あまり早い段階で着陸地点の選択をしてしまうと目指すべきサイエンスの議論が狭くなってしまいう危険性もある。そのため、これまでのワーキンググループのなかでの議論では着陸地点についての議論は拙速を避け、今後の議論の余地を大きく残してある。しかし、科学目標についての大きな方向性が見えてきた現段階においては、探査の科学目標に関連して着陸地点の選定作業も進めていく必要がある。この議論には、地球惑星科学の広い分野の研究者の参加が望まれ、また参加の余地が残されている。今後はさらに多くの研究者の参加を期待したい。

謝辞

査読者の栗田敬博士には、的確かつ非常に建設的なコメントをいただきました。また、本稿を書くにあたっては、阿部豊博士、倉本圭博士および火星探査ワーキンググループの多くのメンバーの方との議論が大変参考になりました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- [1] Carr, M. H., 2006, *The Surface of Mars*, Cambridge Univ. Press.
- [2] Klingelhöfer, G. et al., 2004, *Science* 306, 1740-1745.
- [3] Bibring, J. P. et al., 2006, *Science* 312, 400-404.
- [4] Mustard, J. F. et al., 2009, *LPSC* 40, #2115.
- [5] Kirschvink, J. L., 1992, *The Proterozoic Biosphere*, Cambridge Univ. Press, 51-52.
- [6] 田近英一, 2007, *地学雑誌* 116, 79-94.
- [7] Squyres, S. W. et al., 2008, *Science* 320, 1063-1667.
- [8] Squyres, S. W. et al., 2006, *Science* 313, 1403-1407.
- [9] Pollack, J. B. et al., 1987, *Icarus* 71, 203-224.
- [10] Kasting, J. F., 1991, *Icarus* 94, 1-13.
- [11] Wyatt, M. B. et al., 2004, *Geology* 32, 648-654.
- [12] Taylor, G. J. et al., 2006, *J. Geophys. Res.* 111, E03S10, doi:10.1029/2005JE002645.
- [13] Parker, T. J. et al., 1993, *Icarus* 98, 11,061-78.
- [14] Head, J. W. et al., 1999, *Science* 286, 2134-2137.
- [15] Salvatore, M. R. et al., 2009, *LPSC* 40, #2050.
- [16] Poulet, F. et al., 2005, *Nature* 438, 623-627.
- [17] Bibring, J. P. and Y. Langevin, 2008, in *The Martian Surface*, Cambridge Univ. Press, 153-168.
- [18] Bishop, J. L. et al., 2008, *Science* 321, 830-833.
- [19] 寺田直樹ほか, 2009, *遊星人* 本号.
- [20] 今村剛ほか, 2009, *遊星人* 本号.
- [21] 小林直樹ほか, 2009, *遊星人* 本号.