

特集：MELOS火星複合探査の科学検討

MELOSが挑む「火星大気散逸・大気進化科学」

寺田 直樹¹，松岡 彩子²，関 華奈子³，山崎 敦²，二穴 喜文⁴，
横田 勝一郎²，斎藤 義文²，中川 広務¹，笠羽 康正¹，橘 省吾⁵，
尾川 順子²，佐藤 毅彦²，MELOSワーキンググループ

2009年4月20日受領，2009年5月8日受理。

(要旨) 火星の大気と表層環境の劇的な変遷に深く関与した可能性が高いと考えられる「宇宙空間への大気散逸」。そのプロセスの全貌に迫り，環境変遷に果たしてきた役割の理解を飛躍的に向上させる，MELOS複合探査による火星大気散逸観測，および，大気進化研究の科学要求を概観する。

1. はじめに

現在では寒冷乾燥した火星の希薄な大気。これには宇宙空間への大気の散逸が深く関与した可能性が高いと考えられている。しかし，火星大気の散逸と大気・環境進化には，数々の疑問が残っている。例えば，(1) 太古の火星には温暖湿潤な時代があったのか？あったとすれば，火星の温暖な環境を保持していたであろう「温室効果ガス」はどこに，どのようにして，どれだけ失われたのか？(2) 宇宙空間への大気散逸は，火星表層環境の「酸化」にどの程度寄与したのか？水が解離して生じる水素と酸素の宇宙空間への散逸率(散逸量)は，過去の断片的な衛星観測によると，観測によって推定される値に最大で二桁にも及ぶ大きな違いが見られる[1, 2]。しかし一方で，水素散逸率の過大評価や酸素散逸率の評価誤差の為に，実際の散逸率の不一致は極めて小さいのではという指摘もある。

MELOS複合探査は，「火星はなぜ赤いか？」を共通の科学目標として掲げる[3]。火星が赤いのは，一般的にはヘマタイトのせいだと考えられているが，ではなぜ表層を酸化させるほどに火星大気が攻撃的な酸素を持ったのかという要因を理解するためには，大気組成と大気圧が火星史を通じてどのように変化し，気候

がどのように変化してきたかを知る必要がある。本稿では，大気の宇宙空間への散逸に関する上述の疑問に決着をつけ，「火星はなぜ赤いか？」という謎の解明に大気散逸・大気進化科学の観点から迫るために必要とされる，

次の四つの要求について説明する。

要求1：大気散逸の全体像と詳細特性を同時に捉えたい

要求2：太陽風と太陽放射(外因)に対する応答を理解したい

要求3：散逸する大気の組成を分離定量したい

要求4：現在の大気の希ガス同位体比と微量気体成分を知りたい

2. 大気散逸・大気進化研究の科学要求

温室効果ガスの喪失や，表層環境の酸化問題の解明に迫るためには，火星大気からの酸素(O)，炭素(C)，水素(H)のそれぞれの「散逸」の長期的変遷を把握する必要がある。また，温室効果ガスのCO₂や微量気体成分のメタン等を大気へと「供給」する要因を知る事も重要である(なお，HとOの大気への供給・輸送は，MELOS気象オービターの主要な科学目標である[4])。上に挙げた四つの要求は，これらの目的を実現する上で鍵となる要求である。

1. 東北大学

2. 宇宙航空研究開発機構

3. 名古屋大学

4. スウェーデン国立スペース物理研究所

5. 東京大学

teradan@stpp.gp.tohoku.ac.jp

2.1 要求1：大気散逸の全体像と詳細特性を同時に捉えたい

火星からいつどのくらいの量の大气が散逸したのか、その長期的変遷を推定するためには、現在の火星からどれだけ大气が流出しているかという現状(散逸率)を知るだけでは不十分で、その散逸の過程(プロセス)の理解が不可欠である。散逸過程としては、電離大气の散逸と中性大气の散逸の両者が重要であると予想され、多くの散逸過程が提案されているが、共に理論研究が先行しており、観測的実証はほとんど得られていない。こうした散逸過程の中でも、電離大气の太陽風誘導散逸過程(これは「のぞみ」の主要科学目標の一つであった)については特に不明な点が多く、不確実性が大きいのが現状である。欧州の火星探査機 Mars Express (MEX) 搭載のMARSISによる最近の観測結果からは、太陽風プラズマと火星電離圏プラズマの相互作用領域には、実態が良くわかっていない数 eV 以下の「冷たい」プラズマが大量に存在することが示唆されている。この、惑星重力場からの脱出エネルギー(電離圏高度の酸素原子で約 1.9 eV)と同程度のエネルギーを持つ「冷たい」プラズマの太陽風誘導散逸は、量的にも火星大気散逸全体の中で重要な役割を果たす可能性がある。太陽風誘導散逸過程が内包する時間空間スケールは幅広く、例えば空間スケールは、数十 km (イオンの旋回半径) から数千 km (惑星スケールの空間発達構造) に及ぶ。その全貌を抑えるためには、散逸の現場でのプラズマ詳細観測による散逸過程の検証と、撮像による流出の全体像の把握を同時に行う必要がある。従来の単一探査機による観測では達成できていない重要課題の一つである。また一方で、中性大气の惑星スケールの熱的・非熱的散逸においても、理論的研究により一桁近くの散逸率の不確実性が指摘されている[5, 6, 7]。MELOS 複合探査では、「のぞみ」、「かぐや」、BepiColombo 等で培ったヘリテージに基づき、C, C⁺, CO, CO⁺, CO₂⁺, O⁺, N⁺, He⁺, D/H などの撮像による大気散逸のグローバルな描像の観測と、プラズマ「その場」観測による散逸過程の詳細特性を捉える観測を同時に行い、火星からの大気散逸過程の解明に挑みたい。

2.2 要求2：太陽風と太陽放射(外因)に対する応答を理解したい

火星大気の散逸率や発動する散逸過程は、太陽風や

太陽放射の変動にともない、大きく変化すると考えられている。したがって、大気散逸が火星の大気と表層環境の進化に及ぼしてきた影響を理解するためには、太陽活動モニターが存在下で太陽活動極大期を含む時期に観測を行い、太陽風と太陽放射の変動に対する応答を理解することが本質的に重要となる。太陽放射は様々なタイムスケール(秒~億年)で変動するが、MELOS ミッション期間中で抑えられる数年以下のタイムスケールの変動に対する応答がわかれば、長期変動に対するより大規模な応答についても理解が増す。火星が劇的な環境変遷を経た時代(およそ 35 ~ 38 億年前)の太陽極端紫外線(EUV)放射強度は、現在の 6 ~ 10 倍程度強かったと推測されている。このような強い放射の下での大気散逸率を推測するためには、現在の太陽活動極大期における観測が重要な役割を果たす。太陽EUV放射強度は、極小期から極大期にかけて約 3 倍変化するが、MEX や、今後予定されている米国の MAVEN の観測は、極小期に限られている。MELOS では、遠火点が約 8 火星半径(計画値)の「気象オービター」で太陽活動のモニター観測と大気散逸撮像観測を行いながら、もう 1 機の低高度極軌道を周る「大気散逸オービター」で大気散逸の詳細なその場観測を同時に実現する。この二機同時観測により、外因の変化に対して大気散逸過程および散逸率がどう応答するかを調べることが可能となる。特に外因変動の大きい太陽活動極大期を含む時期に観測を行うことにより、火星の大気・表層環境の進化の理解に迫りたい。

2.3 要求3：散逸する大気の組成を分離定量したい

温室効果ガスの喪失や、表層環境の酸化問題を調査するためには、酸素(O)、炭素(C)、水素(H)といった水や二酸化炭素に関わる粒子種々々々について、火星大気からの散逸率を求める必要がある。特に、酸素と炭素と窒素を含む原子や分子(C, N, O, N₂, CO, NO, O₂, CO₂)及びそのイオンは、質量数が接近するため、高い質量分解能をもつ粒子観測装置による観測が必要となる。また、オプション項目ではあるが、ミッション期間にわたる長期的な積分によって、流出イオンの同位体比測定(流出イオンの fractionation factor の測定)も目指したい。特に重要な観測ターゲットとして ²⁰Ne, ²²Ne 測定の達成を目指しており、こうした同位体比測定結果は、2.4 で述べるランダーが取得する火星大気中の同位体比情報とあわせて、太古の時代から

現在までの火星の大気進化の間接的な情報を与える。

2.4 要求4：現在の火星の大気希ガス同位体比と微量気体成分を知りたい

大気進化を調べる鍵のひとつとなるのが、大気中の希ガス同位体である。希ガスは化学反応に関与しない特性のため、地表物質との相互作用もほとんどなく、また、上層大気での光化学反応やそれに伴う他のガス種との反応なども起こさない。そのため、脱ガス量や大気からの散逸量の見積もりやすい元素である。このような地表大気の大気希ガス同位体の精密決定にはランダーによる探査が必要となるが、これまでのランダーでは火星大気の大気希ガス同位体の精密決定はおこなわれていない。特にNe同位体に関しては、大気散逸の指標として重要であるにも関わらず、質量分析の際に ^{20}Ne 、 ^{22}Ne 測定時に ^{40}Ar 、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ の二価イオンが妨害となることが問題である。MELOSではこの問題の解決に取り組んでおり、地表大気の大気希ガス同位体分析から、大気「進化」に関する制約を与えることを目指している。大気進化を調べる上で重要となるもう一つの鍵は、火星大気中の微量気体成分測定である。微量気体成分の時空間変動観測を高分散分光器により可能にすることで、特に、近年初期的な報告が相次いだ火星大気中のメタンの起源の解明を目指す[8, 9]。火星大気中のメタンの起源は、生命活動もしくは非生命活動(火山・熱水活動等)にあると考えられている。地球の例に見られるように、生命の発生は大気成分を大きく変更する。一方で、火成活動による脱ガスは、 CO_2 等の大気供給の主要因の一つである。高分散分光観測によってメタンの起源を明らかにし、火星の生命活動と火成活動モデルに観測的制約を与えることは、火星大気の大気供給過程を理解する上で重要である。MELOSは火星散逸大気の高質量分解観測と、火星大気の大気同位体分析、火星大気中の微量気体成分の高分散分光観測によって、「散逸」と「供給」の両面から、火星大気進化に関する理解を深めることを目指している。

3. おわりに

火星の大気と表層環境の劇的な変遷に深く関与した可能性が高い大気散逸は、これまで欧米の探査計画によって断片的な観測が行われてきた。昨年度に選定が行われた米国Mars Scoutミッションの最終候補二つ

(MAVENとTGE、前者が残った)が、共に大気散逸科学を主目標としていたことにも、その科学課題の重要性が示されている。MELOS複合探査による挑戦は、複数探査機であることの利点を最大限に活かし、計画中のMAVENも含めた従来の単一探査機による観測ではできなかった観測戦略により、この重要課題の解明にブレークスルーをもたらそうとするものである。低高度極軌道を周る「大気散逸オービター」が大気散逸の素過程を高質量分解能でその場観測しつつ、長楕円軌道を周る「気象オービター」が大気散逸撮像観測を行い、全球をグローバルに撮像することで、現象を複合的にとらえる。また「気象オービター」が太陽風と太陽放射(外因)をモニター観測することによって、外因に対する散逸現象の応答を捉え、太古の火星における大気散逸率の推定精度向上を図る。「ランダー」の大気同位体比観測は、大気進化モデルに制約を与える。このように、MELOS複合探査は、惑星科学という総合的学問に対して、又とない総合的な観測的実証の機会を与えるものである。

参考文献

- [1] Lammer, H. et al., 2003, *Icarus* 165, 9
- [2] Barabash, S. et al., 2007, *Science* 315, 501
- [3] 佐藤ほか, 本号
- [4] 今村ほか, 本号
- [5] Bougher, S. et al., 2008, *Space Sci. Rev.* 139, 107
- [6] Galli, A. et al., 2006, *Space Sci. Rev.* 126, 447
- [7] Lichtenegger, H. I. M. et al., 2006, *Space Sci. Rev.* 126, 469
- [8] Formisano, V. et al., 2004, *Science* 306, 1758
- [9] Krasnopolsky, V. A. et al., 2004, *Icarus* 172, 537