

火星複合探査MELOS着陸機による火星大気元素・同位体分析

橘 省吾¹, 三浦弥生², 長尾敬介³, 三河内岳¹, 下司信夫⁴,
宮本英昭⁵, 杉田精司⁶, 火星表層化学分析研究グループ

¹東大・地球惑星科学, ²東大・地震研, ³東大・地殻化学実験施設,
⁴産業総合研究所, ⁵東大・総合研究博物館, ⁶東大・新領域創成科学

1. はじめに

火星は過去に温暖で湿潤な気候があった惑星と考えられている。温暖湿潤気候を維持するための一つの要因として、現在より厚い大気の実在による温室効果が考えられる。火星は過去にそのような厚い大気を持っていたのであろうか、そもそも、火星大気はどのように形成され、進化してきたのだろうか。

2010年代後半の打ち上げを計画している火星複合探査MELOS着陸機では、火星大気の化学組成・同位体組成の分析、表層岩石や表層ダストの元素・同位体分析を通して、火星大気の形成と進化を明らかにすることをめざす。

2. 火星下層大気の希ガス同位体分析から明らかにする火星大気進化

地表付近での火星大気は全圧が 6 hPaであり、その約95%をCO₂が占め、次いでN₂, Arがそれぞれ2.7%, 1.6%を占める（下表）。

火星大気の化学組成 (Owen, 1992)

species	vol%
CO ₂	95.3
N ₂	2.7
Ar	1.6
O ₂	0.13
CO	0.07
H ₂ O	0.03
Ne	3 ppm
Kr	0.3 ppm
O ₃	0.04-0.2 ppm
Xe	0.08 ppm

このような火星の大気は、惑星形成初期に衝突天体からの脱ガスによって形成され（脱ガス大気形成）、その後、原始太陽からの強い紫外線や隕石重爆撃期の天体衝突によって、大規模散逸が起こったと考えられる（初期カタストロフィック脱ガス）。その後の火星史において、火星大気は火成活動により内部からの間欠的脱ガス、（磁場を失って以降の）太陽風照射による散逸を経験している。火星大気の形成、進化を理解するためには、これらの脱ガスによる大気への流入、散逸による大気からの流出のふたつの成分の火星史にわたる変化を知ることが重要であるといえる。

そのための鍵となるのが、大気中にわずかに含まれるに過ぎない希ガスの同位体である。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（e.g., Jakosky et al., 1994; Pepin, 1994, 1997; Tajika and Sasaki, 1996）。

⁴Heは火星内部で²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th の放射壊変（半減期45億年, 7億年, 140億年）によってつくられ、⁴⁰Arは⁴⁰Kの放射壊変（半減期12.5億年）によってつくられる同位体で、火成活動にともなって大気中に放出される。したがって、⁴He, ⁴⁰Arの存在量、他の同位体との存在比は脱ガスの規模とタイミングに関する情報を保有していると考えられる。¹²⁹Xeは太陽系初期にのみ存在した消滅核種¹²⁹Iの放射壊変（半減期1570万年）によってつくられるため、初期脱ガスについて重要な制約を与える。

また、Neのような軽い希ガスの同位体組成は大気散逸の指標となりうる。それは太陽風によるイオンピックアップなどによる大気散逸は質量依存型の同位体分別を示し、軽い同位体ほど散逸しやすいため、

大気に残る成分の同位体組成は時間とともに重い同位体に富むようになる。

MELOS着陸機では、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おこない、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の獲得をめざす。特にNe同位体は、大気散逸の指標として重要であるにも関わらず、これまでの火星探査機では決定されておらず、火星隕石の分析からも確定的な値が得られていない。また、今後計画されているNASAの着陸機探査（Mars Science Laboratory）でも測定が困難であると予想される。MELOS着陸機では、四重極型質量分析計での ^{20}Ne 、 ^{22}Ne 測定時の妨害となる ^{40}Ar 、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ の二価イオンを物理的に排除する方法の開発を進めており、これまでに妨害イオン量を1/100以下にまで減少することが可能であることを示した。MELOS大気散逸オービターでは、大気散逸のその場観測が予定されており、大気散逸時のNe同位体分別係数が太陽風強度の関数として決定されることが期待されており、その結果を組み合わせることで、火星大気形成・散逸の歴史の定量的解明が可能になると期待される。

3. 火成岩K-Ar年代測定による脱ガス史への制約

大気形成・進化史を知る上で、脱ガス（火成活動）がどのように起こったかを明らかにする必要がある。これまでの火星大気史研究では、探査機データから見積もられた火山体体積に対して、月のクレーター年代を適用し、火山噴出量を時間の関数として表してきた。しかし、月のクレーター年代学が火星に適用される保証はなく、火星でのクレーター年代学の確立が脱ガス史の定量的制約には非常に重要である。

MELOS着陸機では、火成岩のK-Ar年代測定（ $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ [半減期12.5億年]）をおこない、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めざしている。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。

4. 大気組成の季節変化から調べる火星の呼吸

MELOS気象オービターは火星気象学の確立を目標としており、MELOS着陸機でも火星大気下端の情報として、気象パッケージによる気温、気圧、湿度、風速、風向といった基礎データ取得をおこなうことが計画されている。火星大気の組成分析からの火星気象学への貢献として、大気中の CO_2 や H_2O の季節変化を調べ、大気成分の表層ダストなど地表物質への吸着など大気下端と地表の間でどの程度の相互作用が起きているのか、およびその素過程を調べることをめざしている。また、Mumma et al. (2009) によって報告された北半球の夏の時期に局所的に発生する CH_4 の分析などもターゲットのひとつである。

5. 地表ダスト軽元素同位体組成分析による大気-地表相互作用の解明

火星環境（大気）の変遷は地表に存在するダストに残されている可能性が高い。過酸化状態と言われる地表付近のダストには、大気中 CO_2 の光解離反応によって生じた酸素が含まれ、その証拠が質量非依存型の同位体分別として残されている可能性がある。また、表層硫酸塩鉱物には同様に大気中での火山性 SO_2 の光解離反応によって生じた硫黄の質量非依存型同位体分別が残されている可能性がある。表層ダストをオープンで加熱し、抽出した酸素や硫黄の同位体を四重極型質量分析計を用いて分析し、火星での大気-地表相互作用素過程、および火星史にわたる環境変動の解明をサイエンス目標のひとつとする。

参考文献

- Jakosky B. M. et al. (1994) Icarus **111**, 271-288.
- Mumma M. J. et al. (2009) Science **323**, 1041-1045.
- Pepin R. O. (1994) Icarus **111**, 289-304.
- Pepin R. O. (1997) Icarus **126**, 148-156.
- Tajika E. and Sasaki S. (1006) JGR **101**, 7543-7554.