

もう一つの月世界へ: 火星衛星探査計画MMX その12 ～MSAはフォボスと火星大気の質量分析を行 う～

横田 勝一郎¹, MMX MSAチーム

(要旨) MMX探査機に搭載されるMSAの開発は、太陽系惑星間空間でのプラズマ諸現象の「その場(in-situ)」観測を目的に、発展を続けてきたプラズマ計測技術を元にしている。フォボス表面や火星大気を由来とするイオンを質量分析するため、MSAの質量分解能は大きく向上されている。本稿では、フォボスの起源や火星大気の進化の解明を目指すMSAについて紹介する。

1. はじめに

MMX探査機搭載のMSAは、イオン質量分析器と磁力計で構成され、火星衛星の起源や火星圏の変遷の解明を観測目的としている[1]。火星とその衛星は、他の太陽系天体と同様に太陽から吹きつける超音速プラズマ(太陽風)に晒され、様々な影響を受けている。火星では、大気が太陽風を直接受けて一部は宇宙空間に散逸し、電離層には誘導電流が発生して、周囲には磁気圏が形成される。フォボスやダイモスの表面にも太陽風は直撃し、二次粒子が叩き出され、周囲には非常に希薄な外気圏が形成される。MSAの出自はこのようなプラズマ環境の「その場(in-situ)」観測を行う計測装置であり、類似の機器は月周回衛星「かぐや」、水星探査機「ベピコロンボ」などに搭載されてきた[2]。

今回のMMX計画では、MSAが観測する対象は依然としてプラズマ環境(イオンと磁場)であるが、その目的は火星-衛星系の起源や進化の解明である[3]。このような研究テーマの発展的転換は、主に「かぐや」による月周辺のイオンと磁場観測成果を元に構築され、鍵となったのは質量分解能をM/ΔM~100まで向上させることであった。本稿では、MSAの原理や性能、科学目標及び対応する観測計画を報告する

文献[3-5]を参照し、MSAの概要や予定する観測について概説する。

2. MSAの概要

MSAの構成要素として、その場のイオンを取り込んでエネルギーと質量を計測するイオン分析器と、磁場3成分を計測する2つの磁力計がある(図1)。自然界の磁場と探査機由来の磁場を区別するため、磁力計は2台構成である。この他に、コマンドやデータを処理する電子基板を収めた制御部がある。

イオン分析器にはその断面図(図1右)が示すように、上半部にトップハット型静電分析器があり、下半部にTime-Of-Flight型質量分析器がある[4]。最上部にはドーム型グリッドの開口部があり、交互に0~+5 kV電圧が掃引される。一对の視野選別電極によって半球(2π sr)以上の視野が確保される。その下に位置する内側の球殻電極には0~-5 kV電圧が掃引され、入射イオンはエネルギー選別を受ける。その後入射イオンは下半部の質量分析器に進み、-12 kVに印加された超薄膜炭素に向かって加速する。入射イオン透過の衝撃で発生した二次電子は、最下部の検出器MCPでスタート信号として処理される。透過によって中性化した入射イオンは、そのままMCPに到達してストップ信号となる。イオンのまま透過した場合、入射イオンは分析器内の電場による反射を

1. 大阪大学大学院理学研究科
yokota@ess.sci.osaka-u.ac.jp

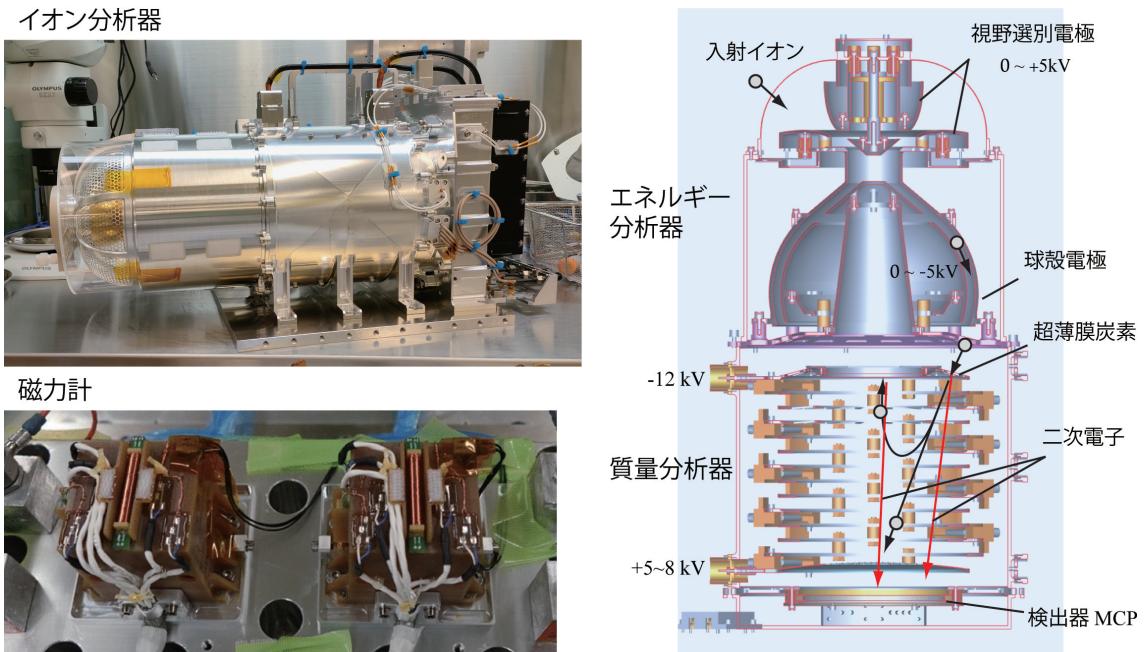


図1: MSA イオン分析器と磁力計の写真、およびイオン分析器断面図。

受けて天井部に衝突する。そこで発生した二次電子が、ストップ信号としてMCPにて検出される。スタート信号とストップ信号の時間差から、入射イオンの質量情報を獲得する。質量分解能を $M/\Delta M \sim 100$ に向上させるため、分析器内の電場は線型に増大する特殊な形態で設計されている。

MSAの磁力計は、基本波形直交フラックスゲート方式によってDCから~100 Hzまでの変動成分の磁場を計測する[5]。出力信号のオフセットを大幅に低減するため、センサの励磁方法として新たに開発したバイアス・スイッチング、センサ、回路設計を利用し、従来の宇宙機用磁力計として大幅な小型化・軽量化・省電力化が実現されている。

3. MSAの火星一衛星系プラズマ環境観測

3.1 地球-月系のプラズマ環境

MMX探査機搭載MSAによる観測に先んじて、地球の月周辺のプラズマ環境に関する観測成果が、「かぐや」、ARTEMIS, Lunar Prospectorなど複

数の探査機から既に得られている。MMX計画でも同様の観測が期待されるため、観測によって近年大きく更新された月周辺プラズマ環境の描像を紹介する。適宜、月をフォボスに、地球を火星に読み替えることが可能である。

宇宙空間を満たすプラズマには、多くの場合巨視的に電磁流体としての近似が用いられ、降着円盤など宇宙の諸現象や、太陽風、地球磁気圏などは遜色なく記述されている。しかしながら、構成要素であるイオンと電子の運動の違いや、それぞれの粒子的挙動も重要であり、近似を拡張する取り組みが理論と観測の両面から続けられている。月の大きさはイオンの慣性長に近くなるため、その周辺はプラズマが絶えずイオンスケールで乱される説え向きの状況となる。「かぐや」などによるプラズマ観測は、その事実を認識する契機となった[6]。

図2は太陽風や地球磁気圏の影響を受ける月周辺プラズマ環境の概念図である。太陽光に晒される月の昼側には太陽風も到来し、月面に吸収される。結果として夜側には何もない領域(Void)が形成され、太陽風のイオンと電子はそれぞれの熱速度で徐々に

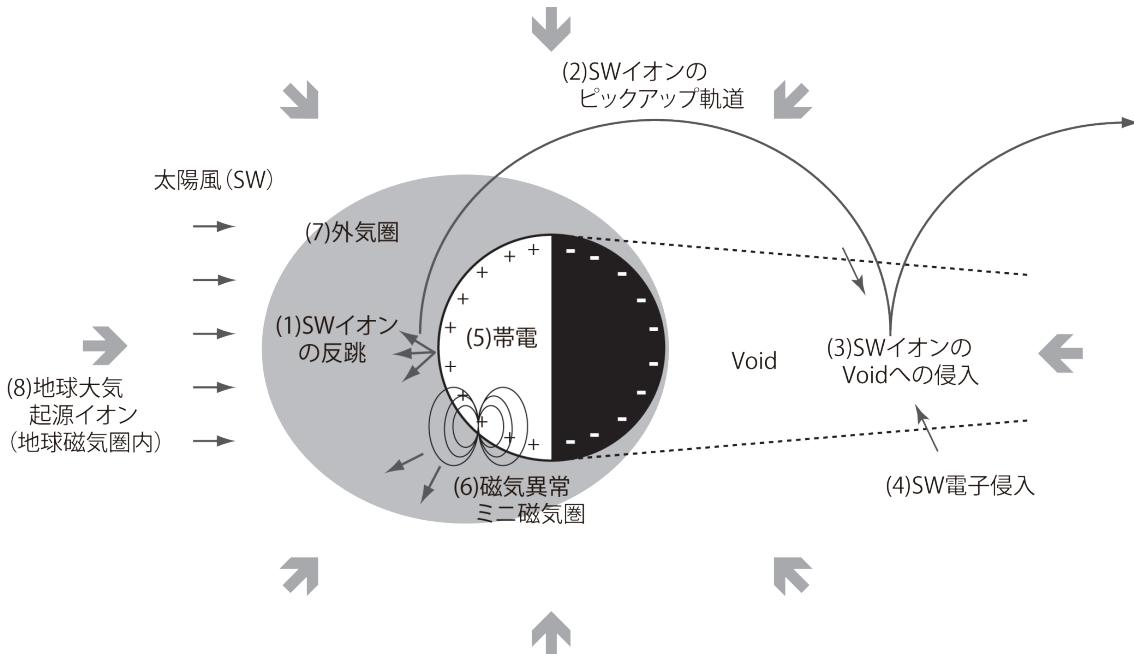


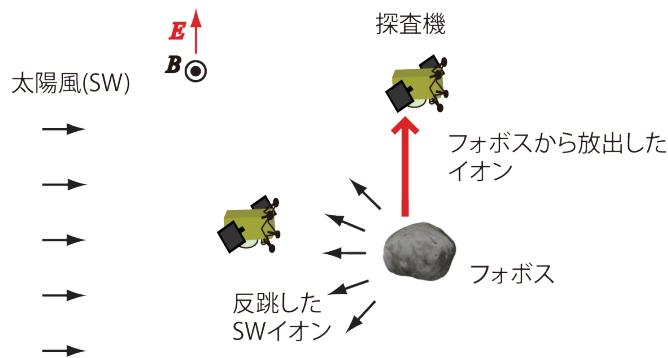
図2: 月周辺のプラズマ環境の概念図。

侵入する。ここまでは従来の流体近似の描像であるが、ここから近年の観測により追記された特徴を紹介する[7]。(1)太陽風イオンは半分未満が月面で反跳し、大部分は中性化するが、(2)一部はイオンのまで太陽風全体の運動と異なるピックアップ軌道を取る。(3)このようなイオンはVoid領域に効率よく侵入し、(4)さらに周辺の電子をVoidへと引き付ける。(5)昼側では日照により光電子が発生し、結果として地表面は正に帯電する。夜側は周囲のプラズマの状況に応じて、多くは負に帯電する。その結果、昼夜境界には電場が発生する。このような電場は、局所的な地形による日向・日陰の境界でも発生すると考えられる。(6)月は全球的な磁場を持たないが、大小様々な磁気異常を有する。イオン慣性長未満の絶妙な大きさのミニ磁気圏として太陽風と相互作用を行うため、周辺にはイオンスケール未満に抑制されたプラズマ諸現象が顕著になる。(7)太陽風や太陽光の照射により月面から様々な単原子・分子が放出され、月面を基底面とする外気圏が形成される[8]。月が地球磁気圏の中にある場合は、(8)地球大気起源のイオン(地球風)が吹き付けることになる。

3.2 MSAの観測対象

ここまでプラズマ環境自体を研究する視点から図2(1)-(8)の特徴を紹介したが、ここからは月の起源や進化に関する視点から特徴を紹介し、MMX計画への展開を提示する。最も重要な観測対象は、(7)探査機高度まで広がる月の外気圏である。その構成粒子は、太陽風やダストなど外的要因を疑う必要はあるが、月面物質を起源として組成比などの情報を含んでいる。地球から可視光で観測されるNaやKが外気圏粒子として最も知られているが、貴ガス元素もLADEE探査機の質量分析により検出されている。太陽風イオンを一次イオンビームとすると、近傍の探査機上で行う質量分析は、実験室で行う試料分析の一つである二次イオン質量分析(SIMS)と同一視できる[9]。実際に「かぐや」による月の金属イオンの質量分析は、文献[9]と比較すると月面物質は始原的ではなく進化を受けた傾向を持つことを示した。この結果は、遅まきながら月の起源に対して巨大衝突説を支持している。月の外気圏には水が含まれる報告もあり[10]、探査機での質量分析は水を検出する有効な手段となっている。このように、MMX探査

太陽風中



火星磁気圏中

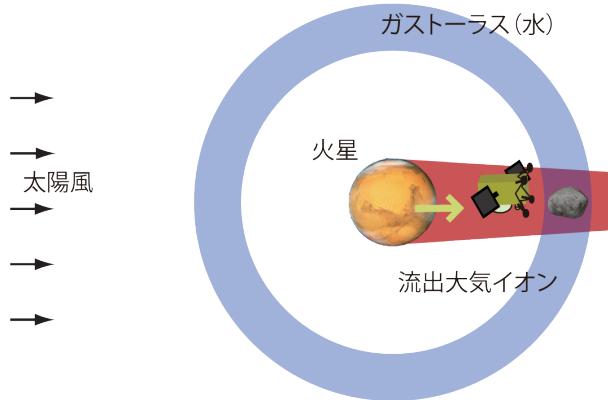


図3:MMX探査機搭載MSAによるイオン観測。

機上のMSAはフォボス表面に対して広域のSIMS分析を行い、内部氷(が作るガストーラス)がある場合は水分子イオンを検出し(図3)、フォボスの起源に迫ることが期待される。

月面物質の変遷においては、(1)月面に対して太陽風イオンが吸収・反跳されることや、(7)その衝撃で月面物質が放出されることの影響は大きい。また、(5)親惑星である地球から飛来する大気起源イオンも月面に吸収される。月面には、太陽風や地球大気の積年の履歴が残されているかもしれない。地球風という名称は、月の表側のみに吹き付けることを想起させるが、実際には極域や裏側を含む月面全てに地球

起源イオンは到来することができる。地球磁気圏のダイナミクスによって、逆方向の風や大きな熱速度が発生するためである。MMX計画でのMSAの役割としては、図3のようにフォボス表面物質の変遷に関する全てのイオン出入力を定量的に観測することや、火星大気起源イオンから火星大気流出を観測することが挙げられる[11]。

以上のように、MSAイオン分析器はフォボス起源の金属イオンや水イオン、火星大気起源のイオン(同位体を含む)を観測対象とするため、質量分析には精度良く元素を同定することが求められる。そのため質量分解能は「かぐや」搭載イオン分析器ではM/

$\Delta M \sim 20$, 「ベピコロンボ」搭載イオン分析器では $M/\Delta M \sim 50$ であったが, MMX 搭載MSAイオン分析器では $M/\Delta M \sim 100$ に向上させた。その他については、これまでの標準的な性能で十分であると見積もった。

MSA磁力計は、イオンの運動を支配する太陽風の磁場を測定することを目的としている。「かぐや」などの磁場計測では、(6)月の磁気異常が網羅的に調べられ、月面分布マップまで作成されている[12]。しかしながら、その成因は今も複数のモデル検討があるものの未解決問題である。フォボスには磁気異常が無いというのが大方の予想であるが、MMX探査機の低高度運用や着陸運用は絶好の観測機会となる。万が一磁気異常を発見した場合はフォボスの起源に一石を投じることになるが、計測感度以下の結果となっても上限値を導出することは可能である。

4. おわりに

MSAはMMX計画の観測目的に合致するよう質量分解能を大幅に向上させているが、プラズマ環境の観測自体に変わりはない。観測目的毎に排他的な運用を必要とせず、データ解析する際に利用者が自由に研究テーマを選ぶことになる。「かぐや」によるプラズマ観測の場合も、初期はプラズマ環境に関する研究の成果報告が主であったが、最近はMMX計画も契機となり月の科学に関わる成果が出続けている。MSAはこのように様々な研究テーマに対して広く間口を持つため、将来の観測データに対して様々な利用があることを期待している。目の前にあるMMX計画への貢献を目指して開発されたMSAで

あるが、今後様々な太陽系探査への利用も考えられる。そのためにも、MSAチームはMMX計画に携わる全てのグループやメンバーと連携して、観測成果の最大化に努めていきたい。

References

- [1] Kuramoto, K. et al., 2022, Earth Planets Space 74, 12.
- [2] 横田勝一郎, 寺田健太郎, 2018, プラズマ・核融合学会誌 95(6), 277.
- [3] Yokota, S. et al., 2021, Earth Planets Space 73, 216.
- [4] Yokota, S. et al., 2025, Prog Earth Planet Sci 12:51.
- [5] Matsuoka, A. et al., 2025, Prog. Earth Planet. Sci. 12:67.
- [6] Halekas, J. S. et al., 2011, Planet Space Sci 59(14), 1681.
- [7] Farrell, W. M. et al., 2023, Rev. Mineral. Geochem. 89(1), 563.
- [8] Grava, C. et al., 2021, Space Sci. Rev. 217, 61.
- [9] Schaible, M. J. et al., 2017, J. Geophys. Res. Planets 122, 1968.
- [10] Bennet, M. et al., 2019, Nat. Geosci. 12, 333.
- [11] 益永圭ほか, 2024, 遊星人 33, 1.
- [12] Tsunakawa, H. et al., 2015, J. Geophys. Res. Planets 120, 1160.

著者紹介

横田 勝一郎

大阪大学大学院理学研究科准教授。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)。情報通信研究機構専攻研究員、JAXA宇宙科学研究所助教を経て2017年10月から現職。専門は惑星科学、宇宙プラズマ物理学、飛

翔体・宇宙機による粒子計測。「かぐや」、「ベピコロンボ」、MMS、「あらせ」、MMX探査機計画やICI-2、SS520-3ロケット実験にて粒子計測器の開発に従事。MMXではMSAのPIを務める。