

もう一つの月世界へ： 火星衛星探査計画MMX その11 ～火星圏の特性評価のためのMIRSスペクトロ メーター～

マリア アントネッラ バルーチ¹, パーネル ベルナルディ¹, クリストフ・ドニー²,
岩田 隆浩³, 中川 広務⁴, 中村 智樹^{4*} and MMX MIRS チーム

(要旨) MIRS(MMX InfraRed Spectrometer)は、JAXAの火星衛星サンプリングミッション(Martian Moon eXploration)のために開発されたプッシュブルーム方式の赤外分光計である。MIRSは0.9～3.6 μm の波長域で火星圏を観測するように設計されている。フォボスとダイモスの表面組成を測定し、火星大気の変動を調査する。

1. はじめに

MIRSは、JAXAの火星衛星探査機MMXに搭載される撮像分光器である[1-3]。パリ天文台-PSL所属のLESIA(現LIRA:Laboratory for Instrumentation and Research in Astrophysics)が、他の5つのフランス研究所と共同で開発し、CNESの協力と財政支援、ならびにJAXAおよびMELCOとの緊密な連携のもとで製造された。

MIRS撮像赤外分光計は、MMXのミッション目的を達成するために設計された。0.9～3.6 μm の波長域で動作し、分光波長分解能は約20 nmである。MIRSはフォボスを異なる軌道高度から観測し、これまでにない高い空間分解能でフォボスの表面特性を明らかにする。

QSO-M(中高度の擬周回軌道)では、フォボスの表面は20 mの分解能で観測され、より低い軌道ではより高い分解能で観測される。MIRSの高い信号対雑音比(S/N)は、フォボスの鉱物組成や物質分布

を特定することができる。ダイモスを複数回フライバイする間、MIRSは100 m以上の空間分解能で主要な領域を分光し、フォボスで観測されたのと同じ主要な吸収帯を検出し、2つの衛星を直接比較することができる。

MMXの高度約6000 kmの火星赤道軌道により、MIRSは火星大気のマップを作成し、他機器可視カメラと密接に協力して火星大気の短寿命気象現象を観測することができる。MIRSの火星観測は、ダストや雲だけでなく、大気分子分布の時間的進化を追跡する世界初の観測になる。

ミッションの目的を達成するために、MIRSは以下の科学目標に回答を与えるべく設計されている：1) フォボスが捕獲された小惑星として誕生したのか、それとも巨大衝突によって誕生したのかを明らかにする、2) ダイモスの起源について新たな制約を与える、3) 火星の気候の変遷に影響を与える火星大気中の物質循環のメカニズムを解明する。

2. MIRS 機器特性

MIRSはプッシュブルーム型のイメージング分光器である。1つの検出器(2Dマトリクス)により、一方方向のストライプの画像(空間方向)と、そのストリップの各ピクセルの第2方向のスペクトル(波長方向)を

1.LIRA-Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS

2.CNES

3.ISAS/JAXA

4.東北大学

tomoki.nakamura.a8@tohoku.ac.jp

取得する。縦長の空間視野を探索機の進行方向にスキャンすることにより、2次元の画像と画像内各ピクセルの分光データを取得することができる。

MIRSは、電子機器部分(EBOX)、光学部分(OBOX)、EBOXとOBOXを接続するハーネスの3つから構成される(図1,2)。

OBOXは、主構造体、分光器と検出器、および分光器を -20°C 以下に受動的に冷却するための2つのラジエーターで構成されている。設計は、光学部品のアライメント精度を満たし、動作温度範囲における安定性を満たすことに注力された。EBOXはMMXシステムパネルと熱的に結合されている。

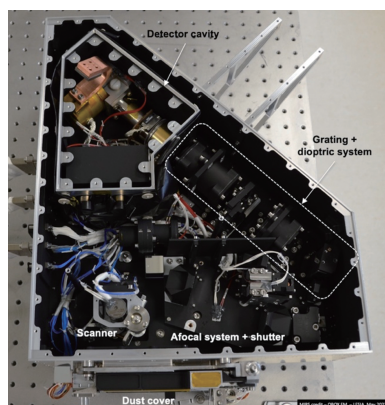


図1: OBOXの内部構造と外観。

EBOXには2つの電子基板が搭載されている:

- LVPS(低電圧電源) ボードは、MMXプラットフォームから供給される非レギュレーション $+50\text{V}$ からすべての電源電圧を生成する。
- ICU(Instrument Control Unit) ボードは、FPGA(Field Programmable Gate Array)を介してすべてのサブシステム(検出器アセンブリ、シャッター、スキャナー、ダストカバー、校正ランプ)を制御する。このボードは、2本のSpaceWireリンク(標準用および冗長用)を介してMMXMDP(ミッションデータプロセッサ)と通信する。

OBOXにはすべてのサブシステムが含まれている:

- 分光器のスリット上に結像させる望遠鏡。
- 光を分散させ、焦点面に結像させる分光器。スリットの後、入射光はコリメートされ、グレーティングに入射されることで波長方向に分散される。

- 画像を取得しデジタル化する検出器アセンブリとその近接エレクトロニクス(PE)。検出器は暗電流を低下させるため、冷凍機を使って 110 K まで冷却される。

- 軌道方向スキャナー
- 背景画像を取得するためのシャッター
- OBOXの入射窓を保護するダストカバー
- 飛行中に検出器の波長と感度を校正するランプ
- 装置を適正な温度範囲に保つための熱機器。OBOXを -40°C 以上に保つためのヒーターとメカニカルサーモスタットで構成されるサバイバルシステム、および分光器の熱放射を抑えるために受動的に冷却する2つのラジエーターで構成される。

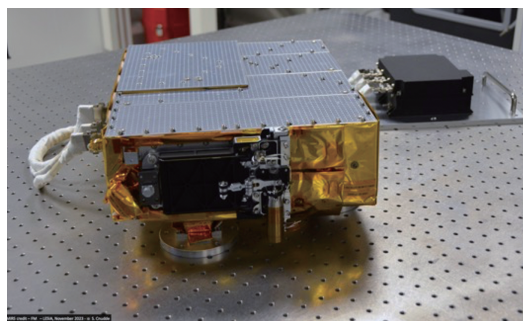


図2: MIRS分光器、フライトモデルの写真(左がObox, 右がEbox)。

光学系(図3)は次のように構成されている:

- 入射窓
- 走査ミラー
- 結像部: i) 分光器の入射スリットがある焦点面に、実像を作る結像望遠鏡, ii) 回折格子上に平行ビームを得るためのコリメータ。
- 光を分光する回折格子
- 光を実焦点面に集光する対物レンズ(対物レンズ1)
- 瞳を検出器のコールドストップ上に、分光像を検出器の感光領域上にそれぞれ結像させるリレー対物レンズ(対物レンズ2)

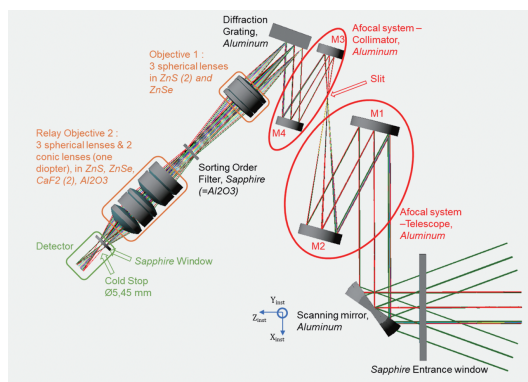


図3: MIRS 光学系.

表1: MIRS 性能表.

Parameters	Values
Spectral range	0.9 – 3.6 μm
Sampling	10.0 – 11.6 nm
Spectral resolution	21 nm in 0.9 – 3.2 μm and <32 nm in 3.2 – 3.6 μm
iFoV	0.325 – 0.350 mrad
FoV	$\pm 1.65^\circ$
S/N	106@3.2 μm in 2s for spectrometer temperature of 246K Conditions: 30° solar incidence, at 1.5AU, with typical Lambertian surface, and 30° phase angle.
Typical exposure time (raw image)	70 – 300 ms for Phobos observation. 40 – 150 ms for Mars observation. Raw images are co-added to reach the specified SNR

3. MIRS装置性能

最初のMIRSの性能検証プロセスは、低温 (-27°C), 大気圧でのOBOX搭載時の初期性能測定であった。最終的な性能は、数週間にわたる熱真空試験で評価された。専用の光学テストベンチが開発され、真空チャンバーの前に設置され、全波長範囲と全視野をスキャンできるようになった。

S/N予測は、開発当初に作成された数値シミュレーションによって行われた。このモデルは装置の測定特性(光透過率, 検出器暗電流, 量子効率, 読み出しノイズ, コールドストップ径)を考慮してさらに改良された。実機の検証は、熱真空試験中の測定データとモデルでの予測値を比較することによって行われた。このモデルは、特に熱バックグラウンドの

正しい評価を確認するのに役立った。モデルは、観測パラメータ(太陽照度, アルベド)と観測制約(最大許容積分時間)を入力として使用する。図4では、典型的な分光器温度(246-263 K)に対するS/N予測を示している。最高253 Kにおいて、2秒未満の測定で波長3.2 μm まで100以上のS/Nに達するという要求は、 30° より低い位相角で満たされている。より良いS/Nは、より低温の装置温度とより低い位相角で達成される。

専用ベンチ(CARA)を使用し、装置のOBOX温度(33°C , -20°C , -10°C), 黒体温度(300°C , 400°C , 500°C , 600°C , 800°C , 1000°C), 積分時間(0.2 msから最大25 msの範囲)を変化させ、相対および絶対放射量校正の精度を測定した。相対校正と絶対校正のために、火星に向かうMMXの巡航中に分光測光標準星の観測が予定されており、全スペクトル範囲におけるMIRSの校正が可能であり、ミッション中定期的に繰り返される。MIRSの装置性能は表1にまとめられている。

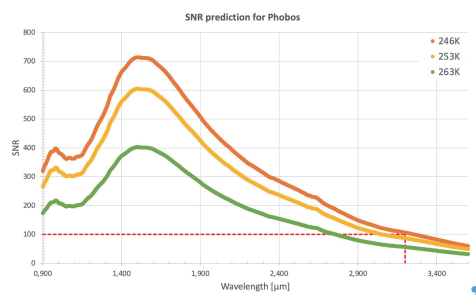
図4: 3つの分光器温度、位相角 30° におけるフォボス観測時のS/N評価。積分時間2秒未満。

図4に示すように、予想されるS/Nは波長が大きいほど低くなる。低位相角での観測はS/Nを向上させる。S/Nを最適化するためには、積分時間を長くすればよい。

4. 予想される成果

MIRSはフォボスの擬周回軌道(QSO)の高高度、中高度、低高度、およびダイモスの複数のフライバイで赤外スペクトルを取得し、異なる空間分解能でフォボス表面組成を調べる。MIRSによって達成される高いS/Nと前例のない空間分解能は、フォボスの赤

色と青色のユニットの物質組成と鉱物特性を把握することを可能にし、フォボス表面全体の地形多様性に関連する局所的な組成の不均一性を明らかにし、さらにダイモス表面の特徴も明らかにする。

MIRSは、測定波長範囲内にあるすべての吸収帯を分光学的に検出し、火星の2つの月の鉱物と有機物を含む物質組成を特定する。吸収帯の検出は深さ3%程度あれば可能である。火星の月以外の外来物質が存在する場合は、観測可能な空間分解能より物体が大きければ検出することができる。

MIRSは、高い空間分解能でフォボスの表面温度を測定し、表面の熱慣性を導き出すことができる。この熱慣性は、レゴリスの粒径や物質の空隙率に関する制約を与える。ダイモスの表面組成は、MIRSの観測によって、おそらく100 m以上の空間分解能で主要領域をマッピングし、フォボスで観測されたのと同じ主要な吸収帯を検出することによって二つの月の物質分布を比較できる。またこれらデータによって、潮汐変形のような火星まわりの位相に関連した地形変形などを検出することができるかもしれない。

MMXの軌道はフォボスと同じ軌道で、火星の観測に最適である。MIRSは数日で火星の全球マップを完成させ、1時間単位で特定のエリアの変動をカバーすることができる。MIRSの観測は、火星大気中のダストや水の輸送過程を制約する。塵の含有量や嵐、水氷の雲や水蒸気の分布をモニターすることによって、火星環境の歴史について新たな洞察を与

えるだろう。MIRSは搭載カメラと密接に協調観測することで、火星大気における短寿命の気象現象を観測することができる。特に、MIRSは2.0 μm バンドの分析で CO_2 を導出することができ、2.35 μm でCO、1.27 μm で O_2 、2.6 μm バンドで水蒸気を検出し、0.9~3.6 μm のスペクトル特徴で水氷雲を研究することができる。また、MIRSのスペクトルから、地表のレゴリスに吸着している水分量を推定することもできる。

MIRSは、i) フォボスの組成が、捕獲起源を示唆するフィロケイ酸塩、有機物および氷を含む炭素質コンドライトに似た、原始的な暗い小惑星に近いものか、ii) フォボスの組成が、たとえ少量であっても、巨大衝突による起源を示唆する火星のケイ酸鉱物や衝突時の高温相物質を含むものかを判別するのに役立つ。

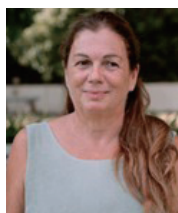
MIRSはMMXの他の搭載機器による観測とリターンサンプルの分析とともに、火星の月の起源と火星環境の進化過程を明らかにすることができる。

参考文献

- [1] Barucci, M. A. et al., 2021, Earth, Plan. and Space 73, 211.
- [2] Kuramoto, K. et al., 2022, Earth, Plan. and Space 74, 12.
- [3] Barucci et al. 2025, PEPS (2025) 12, 69.

著者紹介

マリア アントネッラ バルーチ



ラ・サピエンツァ・ローマ大学(イタリア)で数学博士号を取得後、JPL-カリフォルニア工科大学(米国)でポストドクを務め、1993年にパリ第7大学(フランス)で「天文学研究指導のためのハビリテーション」を取得。パリ天文台のLIRA(Laboratory

for Instrumentation and Research in Astrophysics)の上級研究員(特級)。ESA, JAXA, NASAの多くの惑星ミッションに共同研究者として参加。ESAのロゼッタ・ミッションを定義し、推進したチームの一員。OSIRIS-RExミッションへの卓越した貢献により、NASAシルバー・アチーブメント・メダルを受賞。JAXA MMXミッションのMIRS分光計の主任研究員。

パネル ベルナルディ



2002年以来、パリ天文台の一部門である国立科学研究センター(CNRS)の研究所, LIRA(旧LESIA)で研究エンジニアを務める。そのキャリアの中で、太陽系外惑星検出や星震学のためのCoRoT衛星を含む宇宙飛行装置の設計、組み立て、校正を行った。火星探査車パーシビアランス搭載スーパーカムマストユニットの技術開発を主導。MMXミッションに搭載されたMIRS観測装置のシステムエンジニア兼プロジェクトマネージャー。2001年にフランスのInstitut d'Optique Graduate Schoolを卒業。

クリストフ・ドニー



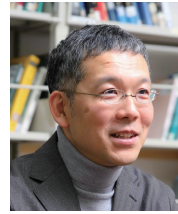
1997年にフランス国立電気通信工学研究所を卒業後、1999年にCNES(フランス国立宇宙センター)に入り、電気通信の研究に携わる。2007年、宇宙運用副本部長に就任し、さまざまなミッションの運用リーダーを務める：星震学と太陽系外惑星探査のためのCoRoT衛星、火星探査車キュリオシティのケムカム分析カメラ、MICROSCOPE衛星(等価原理研究のための基礎物理学)など。2018年、火星探査車パーシビアランス搭載スーパーカム運用センターの定義と開発を担当し、運用チームを率いる。2024年からは、JAXA MMXミッションのMIRS観測装置のCNESプロジェクトマネージャーを務める。

岩田 隆浩



宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授。名古屋大学大学院理学研究科修了。理学博士。郵政省通信総合研究所主任研究員、宇宙開発事業団副主任開発部員を経て、2003年より現職。かぐや、はやぶさ2、MMX各プロジェクトに参画。専門は固体惑星科学、宇宙測地学、電波天文学。日本惑星科学会、日本天文学会、日本地球惑星科学連合等に所属。

中川 広務



東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻准教授。同専攻博士課程修了。博士(理学)。専門は超高層大気・惑星大気物理学。地球電磁気・地球惑星圏学会、日本惑星科学会、日本地球惑星科学連合等に所属。JAXA MMXミッションのMIRS分光器の共同主任研究員。



中村 智樹

東北大学大学院理学研究科地学専攻教授。東京大学大学院理学系研究科修了。博士(理学)。九州大学理学部助手、NASA/JSC太陽系探査部門、独マックスプランク研究所・宇宙化学部門に留学。九州大助教授を経て2012年から現職。初期太陽系進化学研究室を主宰。はやぶさ、はやぶさ2では初期分析を担当。MMXでは科学戦略チーム「Origin of Phobos and Deimos」のPI、およびミッションオペレーションワーキングチーム主査。MIRS分光器の共同科学主任。