

もう一つの月世界へ： 火星衛星探査計画MMX その14 ～MMXミッションのためのMEGANEによる フォボス調査～

David J. Lawrence¹, Patrick N. Peplowski¹, Morgan T. Burks², Nancy L. Chabot¹, Raymond C. Espiritu¹, Samuel Fix¹, John O. Goldsten¹, 小川 和律³, 草野 広樹⁴, 臼井 寛裕³, Jack T. Wilson¹

(要旨) MEGANEは、火星衛星探査ミッションMMXの一環として、火星の衛星フォボスの元素組成を計測するガンマ線・中性子分光計である。本稿では、MEGANEの機器構成と元素組成計測技術、科学目標、検出器性能、そして火星圏におけるMEGANEの観測運用について解説する。

1. はじめに

MEGANE(Mars-moon Exploration with Gamma rays and Neutrons)[1]は、JAXAが主導する火星衛星探査ミッションMMXの一環として、ガンマ線分光計(Gamma-Ray Spectrometer; GRS)と中性子分光計(Neutron Spectrometer; NS)を用いて火星衛星フォボスの元素組成を計測する機器である。アメリカのジョンズ・ホプキンス大学応用物理研究所(JHU/APL)が、ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)との密接な協力のもとで設計・製作を行っている。MEGANEの設計は、NASAの小惑星(16)Psyche探査ミッションPsycheで2023年10月に打ち上げられたガンマ線・中性子分光計(GRNS)[2]の設計に基づいている。さらに、MEGANEでは、質量や電力の制約、異なる探査機やミッション運用の要求、計測目的の違いに対応するために、PsycheのGRNSに対していくつかの変更が加えられている。

惑星のガンマ線・中性子分光は、通常は軌道ミッションで実施されており、月[3]、火星[4]、水星[5]など様々な天体の元素組成の計測のために用いられて

いる。ガンマ線分光法は、惑星の岩石を形成する主要元素(Fe, Si, Ti, Alなど)や放射性微量元素(K, Thなど)の定量的な組成を提供する[6]。一方、中性子分光法は、水素やその他の元素組成パラメータの高感度な計測を可能にする[e.g., 7, 8]。これらを組み合わせて、惑星の元素組成について包括的な理解を得ることが可能である。

惑星のガンマ線・中性子計測には、2つの重要な要求がある。第一に、軌道上からの計測は対象の惑星に比較的近い高度で行う必要があり、一般的には対象の惑星の半径以下の高度で観測を行う[9]。第二に、低い計数率の測定で十分な統計精度を確保するために、数日から数ヶ月にわたる「ターゲット上」での計測時間が必要となる。これらの条件は、MMXミッションにおけるMEGANEの機器設計と運用計画の策定に大きく影響している。

2. MEGANEの科学目標

MEGANEの主な科学目標は、1) フォボスが捕獲された小惑星なのか、それとも巨大衝突の結果なのかを解明すること、2) 火星軌道上の大気のない天体の表面過程を研究すること、3) MMXのサンプル回収をサポートし、着陸地点の選定のための情報や回収サンプルの背景情報を提供すること、の3つである。

第1の科学目標は、フォボス全球平均の元素組成を用いて、フォボスが捕獲された小惑星なのか、それ

1.ジョンズ・ホプキンス大学応用物理研究所

2.ローレンス・リバモア国立研究所

3.JAXA

4.理化学研究所

David J. Lawrence: David.J.Lawrence@jhuapl.edu

草野 広樹:hiroki.kusano@riken.jp

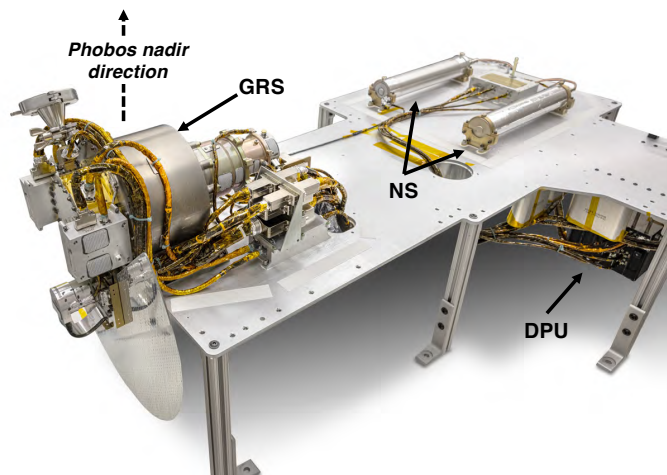


図1: MEGANE FMコンポーネント(GRS, NS, DPU)の写真. MMX探査機の探査モジュール観測機器搭載デッキのモックアップ上に設置されている. GRSとNSは、フォボス観測のため鉛直直下に視野を持つようにデッキに搭載される. DPUはデッキ裏側の探査機内部に位置する.

とも火星への大きな天体の衝突によって形成されたのかを判断することである。フォボスとデイモスのスペクトルの類似性や、始原始的な外部太陽系天体との類似性は、火星衛星が太陽系の他の場所から捕獲された天体である可能性を示唆している[10]。これが正しければ、フォボスとデイモスは炭素質コンドライトに類似した元素組成を持つと予測される。一方、衝突説は、火星の赤道面上に2つの円軌道の天体を捕獲することが困難であることから提唱されている[11]。このシナリオでは、フォボスとデイモスは火星の地殻やマントル物質と衝突体物質の混合物の元素組成を持ち、地球の月のように揮発性物質が少ない可能性がある。MEGANEは、数多くの元素(H, O, Na, Mg, Si, K, Cl, Ca, Fe, Th, U)と、中性子による元素組成パラメータ計測(中性子吸収, 原子量)を行い、フォボスがコンドライト的な組成を持つのか、それとも火星のようなエイコンドライト的な成分が多く含まれているのかを判別する。

第2の科学目標は、フォボス表面における組成の変動を利用して、火星軌道上の大気のない天体の表面過程を理解することである。フォボスの表面は、2つの異なるスペクトル領域があり、組成の多様性を示す証拠が見られる。スペクトルの「青い領域」は大きなスティックニークレータの噴出物に関連し、それ以外の表面が形成する「赤い領域」は、デイモスの全

表面も覆っている[12]。ガンマ線・中性子による元素組成の空間分布は、MMXの他の観測機器のデータとともに、フォボスのスペクトル多様性の原因となる過程をより深く理解するために活用される。

第3の科学目標は、フォボスからのサンプルリターンというMMXミッションの主要目標をサポートすることである。具体的には、サンプル採取地点の選定過程に情報を提供し、回収したサンプルの組成的背景を明らかにする。MEGANEによる元素組成分布は、様々な岩石学的物質を同定するために利用できる[e.g., 13]。これらは、より高い空間分解能を持つ反射スペクトル分布と組み合わせ、複数の観測機器間でサンプル採取地点の選定基準を策定するために用いられる。さらに、MEGANEのデータセットにより、MMXが持ち帰ったサンプルがフォボスの表面をどれだけ正確に代表しているかを理解することが可能である。

3. MEGANEの機器概要

MEGANEは、GRS, NS, データ処理ユニット(Data Processing Unit; DPU)の3つのハードウェアコンポーネントから構成される(図1)。GRSは、高純度ゲルマニウム(High-purity Ge; HPGe)ガンマ線検出器と、それを囲むホウ素入りプラスチック

シンチレータから構成されており、後者はアクティブなアンチコイシデンスシールド(ACS)、高速中性子検出器、銀河宇宙線モニタとして機能する。GRSは、MMXミッションに対応するためいくつかの改良が加えられているが、基本的にはPsycheのGRSと機能的に同一である。最も重要な点は、MEGANEのGRSがRicor製のK-508N回転式冷凍機を使用していることであり、Psyche GRSで使われているLockheed Martin製のパルスチューブ型冷凍機とは異なる[2]。Ricor製の冷凍機は、MESSENGER GRSに使用された冷凍機の改良版であり、主に低消費電力であることと運用の容易さからMEGANEに採用された。冷凍機使用時に発生する熱を効率的に除去するため、GRSの放熱板はPsycheとは異なる形状となっている。この設計変更は、PsycheのGRSがブームに取り付けられているのに対し、MMXではGRSが探査機のデッキに搭載されていることによるものである。

NSは、熱中性子(中性子エネルギー $E_n < 0.4$ eV)と熱外中性子($E_n > 0.4$ eV)をそれぞれ計測する2つの ^3He ガス比例計数管で構成される。1つの検出器は0.5 mmのCd層で覆われており、Cdのカットオフエネルギーである0.4 eVを超える熱外中性子の計数率を計測する。もう1つの検出器は何も覆われておらず、熱中性子と熱外中性子の両方のエネルギー範囲の中性子を計測する。両検出器の計数率の差から、熱中性子の計数率を求められる。これらの検出器とフロントエンド回路はPsyche NSと同一であるが、MMX探査機のデッキ搭載位置に合わせて再設計されている。

最後に、MEGANEは単一のDPUを用いて、GRSとNSの両方を制御している。DPUは、低電圧電源、高電圧電源、冷凍機電源、信号パルス処理、そして探査機とのデータおよびコマンドインタフェースを提供する個別の基板を備えている。

4. ハードウェアの性能、探査機への引き渡し、および打ち上げに向けた最終準備

MEGANEフライトモデル(FM)のGRS、NSの性能に関しては、文献[14]で包括的に報告されてい

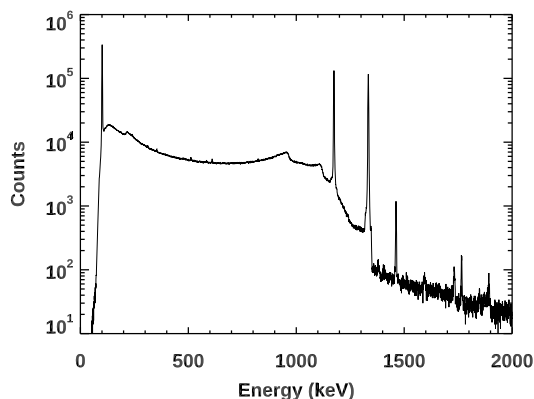


図2: GRSのHPGe検出器で計測した ^{60}Co 線源のガンマ線エネルギースペクトル。MMX探査機への引き渡し前に計測したものである。1333 keVでのエネルギー分解能は約2.5 keVであった。

る。GRSとNSの性能の例を、それぞれ図2と図3に示す。図2は、 ^{60}Co 線源を用いて実験室で測定したガンマ線スペクトルである。1333 keVのガンマ線に対するエネルギー分解能は約2.5 keVであり、これはGRS FMの試験で得られた2.2~2.6 keVと一致している[14]。図3は、実験室の中性子線源で測定した2つの ^3He 中性子検出器のスペクトルである。特徴的な中性子捕獲ピークが150チャンネル付近ではっきりと観測されており、各検出器で明確な中性子測定値が得られることを示している。

MEGANE FMのハードウェアは、2023年12月にJHU/APLから日本へ輸送され、2024年春にJAXAへ引き渡され、同じく2024年春に探査機製造業者である三菱電機株式会社でMMX探査機に搭載された。図4は、MMX探査機の観測機器搭載デッキの図であり、GRSとNSの位置が示されている。

MMX探査モジュールへのMEGANEの搭載後、MMX(およびMEGANE)の各部を検証するため、段階的に複雑になる一連の試験が実施された。これらの試験の最後に、MMX探査機に搭載されたMEGANEの全機能を、他のMMX搭載機器が動作している状態で検証する初期電気試験が実施された。この試験により、MEGANEのすべての機能が性能要求を満たすことを実証した。この試験には、すべてのコマンド機能の実証、全検出器の動作、および探査機からJAXAを経てジョンズ・ホプキンス大学応用物理学研究所にあるMEGANE科学運用

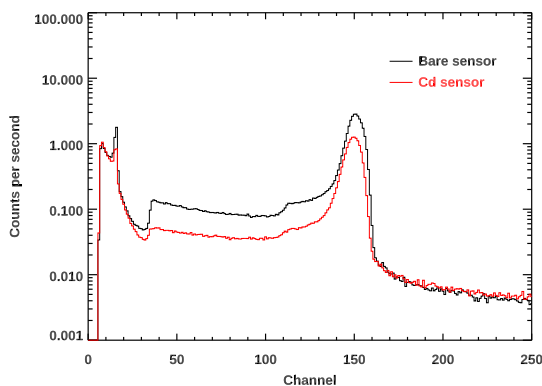


図3: NSの ^3He 検出器で中性子線源を用いて測定したエネルギースペクトル。特徴的な中性子捕獲ピーク(764 keV)が150チャンネル付近に見られる。

センターに至る完全なデータパイプラインの流れの検証が含まれる。この試験中、GRSのHPGe検出器において想定以上のリーク電流が観測されたため、2026年2月に、GRSに対して段階的な高温ベークアウト(最高105℃)を実施した。このベークアウトにより、上昇していたリーク電流が低減することが確認され、GRSのエネルギー分解能は2.5 keV(@ 1333 keV)となった。MEGANEの最終試験は、2026年秋の打ち上げに先立ち、種子島宇宙センターで実施される予定である。

5. MEGANEの予想される成果

MEGANEが主要な目的を達成するためには、フォボス半径以下の高度で、かつ探査機の鉛直直下方向がフォボス中心に対して $\pm 10^\circ$ 以内で計測を行う必要がある。現在のミッション運用計画では、MEGANEには主要な計測を行う機会が2回あり[15]、1回目は2028年のサンプリング運用前、2回目は2030年のサンプリング運用後である。最初の機会での低高度計測に利用できる時間は、2028年に発生するソーラーコンジャンクションのため約3週間に制限される。この期間では、上記のすべての元素について計測要求を満たすことはできず、2028年と2030年の両方の機会の観測が必要となる。ただし、一部の元素(具体的には、Fe, Si, O)の存在量については、2028年の観測期間中に十分な精度で計測が可能である。これらの3つの元素は、フォボスの形



Photo courtesy JAXA/MELCO

図4: MMX探査機の観測機器搭載デッキの写真。MEGANE GRSおよびNSの搭載位置を矢印で示す。これらの検出器は、宇宙空間での探査機の熱管理のためMLIで覆われている。

成過程を解明するための重要な情報である。

図5は、フォボス形成シナリオに関連する類似物質である、様々なエイコンドライトやコンドライトのFe/Si比とFe/O比の測定結果をまとめたものである。エイコンドライトは、巨大衝突による形成過程で取り込まれる火星地殻やマントル由来の物質と一致しており、コンドライトは、捕獲による形成シナリオと一致する。図に示されている楕円は、巨大衝突シナリオと捕獲シナリオの代表的な組成に対して、予想されるMEGANEの計測誤差である。これらの誤差楕円は、低高度かつ鉛直直下指向での観測時間が10日、5日、および2.5日である場合の統計的不確かさ(3σ)を表す。図に示すように、観測時間が2.5日であっても、2つの形成シナリオは 3σ の信頼水準で区別できる。2028年の観測機会の少なくとも10%から15%を低高度、鉛直直下指向の観測に充てることができれば、MEGANEの観測によってフォボスの形成過程を明らかにできるはずである。

6. まとめ

MEGANEのフライトモデルハードウェアは、MMX探査機に引き渡し・搭載され、試験で正常な動作が確認された。今後のインテグレーションおよび試験作業は、三菱電機および種子島宇宙センターの施設で実施される予定である。MEGANEの科学目標を完全に達成するためには、2028年と2030年の両方の低高度運用機会での計測が必要となるが、まず

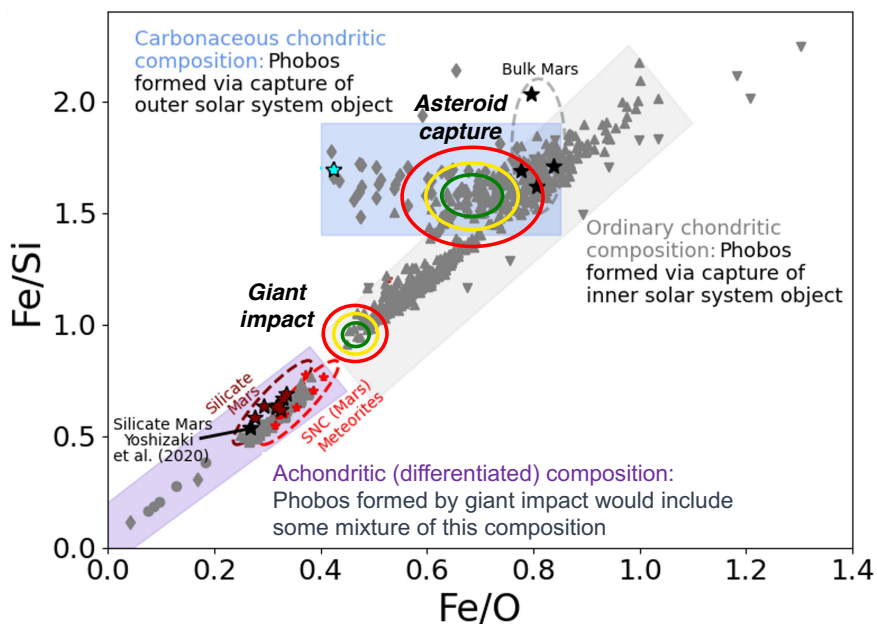


図5:様々なエイコンドライトおよびコンドライトに対するFe/Si比とFe/O比の関係(文献[1]の図3に追記). 2組の楕円は、炭素質コンドライトと火星のケイ酸塩組成を50対50で混合した場合(Giant impact)、炭素質コンドライト組成の場合(Asteroid capture)、のそれぞれに対して、MEGANE GRS観測による統計的不確かさ(3 σ)を示す. 各組成の3つの楕円は、探査機高度がフォボス半径以下のとき、鉛直下指向による観測時間がそれぞれ2.5日(赤)、5日(黄)、10日(緑)の場合の統計的不確かさである.

は2028年の観測機会を利用してフォボスの形成過程を解明するための重要な手がかりが得られるであろう.

References

- [1] Lawrence, D. J. et al., 2019, Earth Space Sci. 6, 2605.
- [2] Lawrence, D. J. et al., 2025, Space Sci. Rev. 221, 78.
- [3] Feldman, W. C. et al., 2004, J. Geophys. Res. 109, E07S06.
- [4] Boynton, W. V. et al., 2004, Space Sci. Rev. 110, 37.
- [5] Goldsten, J. O. et al., 2007, Space Sci. Rev. 131, 339.
- [6] Prettyman, T. H. et al., 2006, J. Geophys. Res. 111, E12007.
- [7] Feldman, W. C. et al., 1998, Science 281, 1496.
- [8] Feldman, W. C. et al., 2000, J. Geophys. Res. 105, 20347.
- [9] Peplowski, P. N., 2016, Planet. Space Sci. 134, 36.
- [10] Higuchi, A. and Ida, S., 2017, Astrophys. J. 153, 155.
- [11] Rosenblatt, P. et al., 2016, Nat. Geosci. 9, 581.
- [12] Murchie, S. and Erard, S., 1996, Icarus 123, 63.
- [13] Beck, A. W. et al., 2015, Met. Planet. Sci. 50, 1311.
- [14] Peplowski, P. N. et al., 2025, Prog. Earth Planet. Sci. 12, 92.
- [15] Nakamura, T. et al., 2025, EPSC-DPS Joint Meeting 2025, Helsinki, Finland, <https://doi.org/10.5194/epsc-dps2025-22>