もう一つの月世界へ:火星衛星探査計画MMX その5~ミッションを支える測地学~

松本 晃治, MMX測地学科学戦略チーム

(要旨) MMXのミッション目的を達成するためには、火星衛星の形状・重力場・回転に関する精密な情報が 必要となる.本稿ではこれら測地学的研究について、現状およびMMXにおける観測・解析戦略を概観する.

1. はじめに

2015年6月17日に北海道大学の倉本圭さんから 一通のメールが届いた.表題は「火星衛星サンプルリ ターン計画:初期科学メンバ参加のお願い」.これが きっかで筆者(松本)はMMXに関与することとなっ た.これまでに関わったSELENE,はやぶさ2はど ちらも途中参加であったが,MMXにはミッションの 立ち上げから関わることができ,楽しさ(と大変さ)を 経験できていることに感謝したい.立ち上げの初期 には,他のメンバの熱量に圧倒されつつも,主に測地 学的観測から火星衛星の大構造を探るという観点で ミッション要求[1]の策定に寄与することができた.

その後、ミッション目的を着実に達成するための チームを構築することとなった.現在の5つの科学戦 略チーム(Science Strategy Teams: SSTs)がそ れである.そのうちの4つは中目的に紐づけられてい るが、一つだけ例外的なSSTが存在する.それが測 地学科学戦略チーム(Geodesy Science Strategy Team: G-SST)である.G-SSTは、火星衛星の形 状・重力場・回転モデルや精密探査機軌道など、着 陸点選定や科学解析の基盤となる測地学プロダクト をサイエンスチームに提供することにより、ミッショ ン目的の達成をサポートするという重要な責を負う. 現在、25名の国際メンバで構成されている.本稿で は、主にフォボスに関する測地学的研究の現状を概 観した後, G-SSTがどのようにそれらをアップデート しようとしているかについて,準備状況も含めて紹介 する.また,測地学的観測から火星衛星の内部構造 を探るという観点で展望を述べる.

2. 測地学的研究の現状

形状モデルは、画像の測光補正、LIDARやラン ドマークデータを用いた探査機軌道決定、表面進化 の研究等、科学解析の様々な場面で利用されるだけ でなく、安全性の観点で着陸候補点を選定する際に 必要なプロダクトでもある.火星衛星の内部密度分 布の情報を持つ物理量である慣性モーメントは、経 度ひょう動振幅と2次の重力場係数を組み合わせて 得られる.内部密度が一定であると仮定して計算し た慣性モーメントと、観測から導かれる慣性モーメ ントとを比較することが内部構造推定の第一歩とな る.全球形状モデルは、前者の計算にも必要となる.

2.1 形状モデル

これまでに、複数の探査機が取得した画像から 形状を復元したモデルがいくつか公開されている。6 つの探査機のカメラによる画像を解析した最新の研 究[2]によると、フォボスについては約2400枚の画像 データから、空間分解能が18 m、面の数が約1200 万の全球形状モデルが、デイモスについては約300 枚の画像データから、空間分解能が20 m、面の数が 約300万のモデルが構築されている。このErnstら

^{1.}国立天文台 RISE月惑星探査プロジェクト koji.matsumoto@nao.ac.jp

によるフォボス形状モデルは、クレーターやグルーブ などの地形を100 mスケールで分解しており、MMX が火星圏に到着するまでの事前検討にとって有用で ある.ただし、主に異なる最接近距離を持つ複数の フライバイ観測に基づいているため、画像のピクセル 分解能に数mから200 mのばらつきがあり、その空 間分布も一様ではない、着陸安全性を評価するには 空間分解能が不足する.また、原点と形状中心の間 に約500 mのオフセットが存在することが分かって いる.

2.2 経度ひょう動

火星衛星の軌道はわずかながら離心率を持ち,火 星が火星衛星の力学的な形状に及ぼす重力トルク が時間変化する.このため、火星衛星の自転速度も 周期的に変動し、自転軸周りに表面が東西に振動す る経度ひょう動が引き起こされる、その振幅は、内 部密度分布を反映する. 画像の解析から経度ひょう 動によるフォボス表面の変位を検出した研究[3]によ ると、その振幅は-1.14° ±0.03°である。一方、フォ ボス軌道の近点がゆっくり移動する速さが経度ひょ う動の関数であることを利用して軌道力学的に解析 した研究[4]によると、経度ひょう動振幅は-1.09°± 0.01°と推定されている. これら二つの研究の誤差(1 σ)はそれぞれ約3%,1%であるが、二つの見積もり の間には4%を超える差があり、誤差を考慮しても重 ならない. なお,1°の経度ひょう動の振幅は,赤道上 の表面が東西に約200 m振動することに相当する.

近点歳差速度は経度ひょう動だけでなく2次の重 力場係数C₂₀, C₂₂の関数でもある. 経度ひょう動を解 くために, [4]では密度一定を仮定して形状モデルか ら計算した重力場係数が用いられている. この係数 の誤差により, 経度ひょう動振幅に系統誤差が生じ ている可能性がある. また, [3]は解析に用いるフォ ボスの暦の違いによって解析結果が変わることを示 しており, 画像解析の際に用いられた暦の誤差の影 響を受けている可能性もある.

2.3 重力場係数

長楕円軌道を持つMars Express(MEX)がフォ ボスをフライバイする際に取得した地上からの追跡 データの解析から, GM(万有引力定数と質量の積) および2次の重力場係数が推定されている.最接近 距離77 kmの2010年の単一フライバイデータを解析 した研究[5]では、GM、C₂₀、C₂₂の3つのパラメータ が十分な確度で分離できていないことが問題であっ た.[6]では最接近距離59 kmの2013年のフライバ イデータも加えることにより、観測ジオメトリが改善 され、パラメータ間の相関は減少していると考えられ る.しかし、C₂₀とC₂₂の推定精度(1σ)はそれぞれ約 8%、31%であり、重力場係数の誤差はまだ大きいと 言わざるを得ない.

[7]はフォボスの暦と同時にC₂₀, C₂₂を推定した. この場合, 経度ひょう動振幅を固定する必要があり, 密度一定を仮定して当時の形状モデルから計算した 振幅の値(-1.2°)が用いられている. C₂₀, C₂₂の推定 精度(1σ)はそれぞれ約6%, 3%と一見よく決まって いるように見えるが, 相関係数は0.96と大きく, 独立 な見積もりは実現していない(近点歳差から独立に 決まるのは経度ひょう動, C₂₀, C₂₂のうちどれか一つ である).

3. MMX観測計画

3.1 関連ミッション機器

測地学的研究に寄与するMMXのミッション機器 は、望遠カメラTENGOO, CAM-T, 広角カメラ OROCHI, およびレーザ高度計LIDARである.カ メラ画像は形状モデルを更新する際の重要なデー タ源泉となる.TENGOOとCAM-Tは同等の性能 を持ち,その対角線視野角は1.34°,瞬間視野角は 5.8 µrad/pixelである[8].高度100 kmから撮像 する際の空間分解能は2ピクセル当たり1.2 mであ り、これまでにない高い分解能の画像が期待され る.TENGOOはサイエンス,CAM-Tはバス運用と 基本的な用途が分かれているが,特に形状モデリン グ用の撮像の際に併用することで撮像領域を広げら れるように,双方の視野はお互いに対角線方向に少 しずらして設定する.

OROCHIは約85°の対角線視野角を持ち[8],高 度20 km程度までフォボス全体をその視野内に収め ることができる.TENGOO/CAM-T画像とほぼ同 時にOROCHI画像を取得することで、狭い視野を持 つ望遠カメラによるフォボス表面上の撮像位置を同



図1: QSO-H(緑)およびQSO-M(紫)からフォボス赤道付近を観測した場合のTENGOO視野. G-SSTメンバの菊地翔太さん作成. カラーの 電子版も参照されたい.

定することが可能となり,形状モデリングの際に画像 を登録する作業のスピードアップが期待される.

LIDARによって,探査機と火星衛星表面との間 の距離の情報が得られる.MMX LIDARの送光 ビーム幅は0.5 mradであり[9],高度100 kmから観 測する際のフットプリント径は50 mとなる.LIDAR による測距値は,探査機軌道決定精度,火星衛星の 暦・重力場・回転パラメータの推定精度の向上に貢 献する.また,画像から復元される形状にスケールを 与えるという重要な意味を持つばかりでなく,測線に 沿った連続的なフットプリント位置から得られる地形 の凹凸の情報は,形状モデルの検証にも有用である.

3.2 QSO軌道からの撮像計画

MMXは擬周回軌道(Quasi Satellite Orbit: QSO)からフォボスを観測する[10].これは、フォ ボスの公転軌道に非常に近い軌道で火星を公転す ることで、擬似的にフォボスを周回するような相対 位置が実現し、フォボスの全経度を観測できる軌道 である.基本的に、軌道半径の大きいQSO-Hから QSO-M、QSO-LA、QSO-LCと順次軌道半径の 小さいQSOへと遷移しながら、より空間分解能の高 い画像を取得していく、着陸地点は地心緯度±30° 以内から選ぶことになっており、少なくともこの緯度 範囲をカバーする全球形状モデル(MMXによるカバ レッジの観点では「半」全球だが)をQSO-Hにおけ る観測から先に構築する. 続くQSO-M, LA, LCに おいて,全球観測に基づいて選定した300 m四方の 着陸候補領域を,数を絞り込みながら観測し,ロー カル形状モデルを構築する.ミッション初期の限られ た時間内に,効率的にこれらの形状を復元するため の撮像計画を検討している.

QSO滞在中のフォボス重心から探査機までの距離は一定ではなく,経度0°(火星側)および180°(反火星側)付近でその距離は小さく,経度90°および270°付近で大きくなる.遠点付近でのTENGOO/ CAM-Tの空間分解能は、2ピクセル当たり約2 m (QSO-H),1 m (QSO-M),50 cm (QSO-LA),20 cm (QSO-LC)である.図1にQSO-HおよびMの 近点・遠点辺りからTENGOOで赤道付近を撮像した場合の視野を示す.この視野を3296 × 2472ピ クセルで撮像することを想像すれば、TENGOO/ CAM-Tの優れた空間分解能を直感的に理解できるであろう.遠点・近点付近で空間分解能が約2倍異なるが、現状と比べるとより均一な分解能をもつデータ セットが得られると期待される.

形状モデリング用のソフトウエアとして、イトカ ワ、リュウグウ、ベヌーなど不規則形状をもつ天体の 形状復元に実績のあるstereophotoclinometry (SPC)の利用を想定している.SPCはstereo法に より三角測量的に得られる3次元位置の情報と、 photoclinometry法により輝度変化から推定され



図2:QSO-Hにおいてスキャン観測した場合のTENGOO(緑)およびCAM-T(紫)の視野カバレッジの例. G-SSTメンバの菊地翔太さん作成. カラーの電子版も参照されたい.

る表面傾斜の情報とを組み合わせて形状を復元す る.このためには,観測方向や日照条件に変化を持 たせた複数の画像の入力が必要となる.QSO-Hに おける最初の16日間の昼面の観測期間中に,同一地 点を異なる7つの地方太陽時(local time)と観測角 の組み合わせで観測する計画を立てている[1].地方 太陽時と観測角の値は,異なる地点の観測好機が時 間的に重複しないように調整する.観測好機には探 査機姿勢を南北方向に変化(スキャン)させて地心緯 度±45°の範囲を撮像する.図2は,このスキャン観 測の結果として実現するであろうTENGOOおよび CAM-Tのカバレッジの一例を示す.火星による日食 の影響で7枚の画像が揃わない経度帯が生じる可能 性があるが,その場合は時期をずらしたバックアップ 観測を検討する.

QSO-M以下の高度における着陸候補領域の観測 の際には、フォボス中心指向姿勢に対してオフセット させた探査機姿勢を維持しながら、軌道運動によっ て対象領域付近を「流し撮り」することを考えている。 軌道予測誤差も含めた指向誤差が存在するため、狙 い通りの場所が撮像できるとは限らない.この指向 誤差を考慮した上でより広い領域を撮像する.また、 低高度では天体表面上の視野が狭くなるため、南 北方向をカバーするために複数回の流し撮りが必要 となる.指向誤差と視野を勘案し、along-track方 向の撮像枚数, cross-track方向の姿勢オフセット 量,および流し撮りの回数を決め,着陸候補領域の 確実な撮像を目指す.

3.3重力場観測

数回のフライバイ観測に基づいて重力場係数を推 定している現状と比較して、MMXではその長期に わたるQSO観測から、重力場の知識が向上するこ とが期待される. 空間的に細かい重力分布に対する 感度を上げるには、探査機高度を低くする必要があ る. MMXでは低高度QSOも予定されているので、 高度に応じた重力場の短波長成分の推定が期待さ れる.一方.重力場の不確定性が大きい状況で高度 を下げると、誤差への感度も上がるので、探査機の 安全性確保の観点で問題が生じ得る. 徐々に高度 を下げながら重力場モデルの精度と空間分解能を上 げる戦略をとることになろう. ただし、Phobos赤道 面付近にとどまる通常のQSOにおける観測から決 まるのは、主に重力場係数のSectorial項(スイカの 縦縞模様のようなイメージ)に限られる. Zonal項(木 星の横縞模様のようなイメージ)やTesseral項(市 松模様のようなイメージ)を推定するには、赤道面か ら離脱して面外方向に変位させる3次元(3D)QSOに おける観測が有効である.

軌道・重力場を推定する際に用いる観測量は、地 球上の追跡局からの電波観測、LIDAR観測、ラン ドマーク観測である.ランドマーク観測とは、天体 表面上の特徴点の天体固定座標系における位置お よびカメラセンサー座標系における撮像位置を指す. これらの情報はSPCで画像を解析した結果として 得られる. LIDAR観測を解析ソフトウエア上でモデ ル化するためには探査機位置・姿勢の情報に加えて 形状モデルが必要となる.国立天文台の山本圭香さ んらがこれらの観測量を用いてシミュレーションした 結果[11]によると、QSO-Hの観測から2次の重力場 係数C20.C22をミッション要求(2~3%)より良い精度 で推定でき、QSO-LAの観測からsectorial項の5 次までを10%より良い精度で推定できることが期待 される. また, Stickney直下に圧縮による密度異常 が存在する可能性が指摘されているが、3D-QSO-LAにおける観測が実現した場合。推定される重力 異常の空間分解能と精度の観点から、この密度異常 が検出できる可能性がある. さらに. 着陸・サンプル 採取後にフォボス表面から離陸しQSOに戻る上昇 軌道も表面付近の密度異常を探る良い機会となる.

4. 解析ソフトウエア準備状況

形状モデリングのために実績のあるSPCを利用す ることは既に述べたが,軌道・重力場推定ソフトウエ アとして,CNESで開発され惑星探査で実績のある GINSを利用する.2024年度後半から本格化する予 定の着陸点選定(Landing Site Selection:LSS) 訓練に向けて,準備を進めている(参考として,はや ぶさ2のLSS訓練の様子は[12]を参照されたい).

2023年3月6~8日にPSIのEric Palmerさんを講 師として招き, SPCの講習会を実施した.表面環境・ 地質学科学戦略チーム(SSG-SST)およびJAXA軌 道力学チームからの参加者も含め14人がSPCの基 本操作を学んだ.本稿執筆時において、ミッション 固有の画像前処理ソフトウエアの整備を終え、LSS 訓練のテスト用模擬画像の処理を進めている段階で ある.

G-SSTは、2021年10月からGINSの開発チーム と協力し、GINSをMMX用にカスタマイズする作業 を続けている.これまでに、LIDAR観測モデル、ラ ンドマークデータの取り込み機能、経度ひょう動振 幅の推定機能、フォボス暦の推定機能の追加が既に 実現している.LSS訓練は出題側と解析側で使用す るソフトウエアが異なるため、事前に双方の物理モデ ルに齟齬が無いかを確認する事が重要である.既に ドップラーデータの処理について、出題側のJAXA 軌道力学チームの協力を得て調和的な結果を得 ている.2023年11月15~17日にはCNESのJean-Charles MartyさんとJulien Laurent-Varinさ んを講師として招き、GINSの講習会を実施した. G-SSTメンバ6人が参加した.

5. 内部構造推定

フォボスの内部構造として、ラブルパイルのように 構成要素が一様に分布したモデル、一枚岩に亀裂が 入ったモデル、空隙を持つ天体の一部が圧縮された モデル、層構造を持つモデル、氷を含むモデルなど が提案されている[たとえば13].しかし、第2節で述 べたように、特に重力場係数の誤差が大きいために 慣性モーメントの誤差も大きく、現状では内部の質 量分布の偏りの有無をはっきり判別するのさえ容易 ではない.2.1節のErnstらの最新フォボス形状モデ ルを用いて一定密度を仮定して計算すると、経度ひょ う動振幅は-0.97°となり2.2節の観測値と合わない. これは内部の密度分布に偏りがあることを意味して いるかもしれないし、形状モデルや推定された経度 ひょう動振幅に内在する誤差の現れかもしれない.

形状モデリングの際のカメラ位置(探査機軌道)の 誤差や回転パラメータの誤差は形状モデルの誤差 要因となる.一方,LIDARデータを利用して探査機 軌道や回転パラメータを推定する際には形状モデル が必要となる.MMXによる観測から,反復処理に よってフォボスの形状,重力場,回転,暦の精度が上 がり,互いに矛盾の無い解が得られれば,内部構造 に関する知識を一歩前進させることができるであろ う.3.3節で述べたように,3D-QSOや低高度弾道軌 道における観測は,内部構造解析の観点で興味深 いが,その実現性は燃料消費量や探査機運用の安 全性の観点から注意深く検討する必要がある.今後 も,工学側と連携しながら検討を続けたい.

一方,測地学的観測のみから引き出せる内部の情報には限りがあるのも事実である.たとえば,層構造が存在した場合,その境界面の位置とどちらかの層の密度は縮退する.また,低密度領域が存在し

た場合,その原因が水氷か空隙かを見分けることは 困難である.質量分析器MSA[14]の観測結果や水 氷の進化のシミュレーション[15]などの理論研究を 組み合わせた解釈が必要となろう.複数の機器チー ム,科学戦略チームと協力しながら解析を進めたい.

6. おわりに

QSOからの観測は複雑で、測地学的観測も例外 ではない、観測計画を立案するには、探査機の軌道 がどのように決定・予測され、探査機姿勢がどのよう に制御されるのかという情報が必要である. G-SST の性格上、立案結果をコマンド列に落とし込み、観 測データをダウンリンクし,解析し,プロダクトを提 供するというサイクルを途切れさせずに維持するこ とが求められる.これには経験がものを言う.火星 圏滞在期間は限られており、現地に着く前に十分に 経験値を上げておくことが重要である. そのために は事前の訓練が必要であり、理工学連携で進めてい る各種ワーキンググループ, 観測機器チーム, 科学戦 略チームと連携しながら, LSS訓練や運用訓練に参 加し、本番に備えたい. 計画の立ち上げから成果創 出までの道のりを完走できるよう。まずは火星圏到 着までの時間を有効に使って着実に準備を進めたい と考えている. もちろん興味を持つ若い研究者の新 規参入は大歓迎である.

次号へ続く.

参考文献

- [1] Matsumoto, K. et al., 2021, Earth, Planets and Space 73, 226.
- [2] Ernst, C.M. et al., 2023, Earth, Planets and Space 75, 103.
- [3] Burmeister, S. et al., 2018, J. Geod. 92, 963.
- [4] Lainey, V. et al., 2021, Astron. Astrophys. 650, A64.
- [5] Pätzold, M. et al., 2014, Icarus 229, 92.
- [6] Yang, X. et al., 2019, Mon. Not. R. Asron. Soc. 490, 2007.
- [7] Jacobson, R.A. and Lainey, V., 2014, Planet Space Sci. 102, 35.
- [8] Kameda, S. et al., 2021, Earth, Planets and Space 73, 218.
- [9] Senshu, H. et al., 2021, Earth, Planets and Space 73, 219.
- [10] 中村智樹ほか, 2023, 遊星人 32, 216.
- [11] Yamamoto, K. et al., Earth, Planets and Space, in press.
- [12] 石原吉明ほか, 2017, 遊星人 26, 139.
- [13] Le Maistre, S. et al., 2020, Icarus 321, 272.
- [14] Yokota, S. et al., 2021, Earth, Planets and Space 73, 216.
- [15] Kamada, A. et al., 2024, Icarus 410, 115916.



松本 晃治



国立天文台准教授.東京大学大 学院理学系研究科地球惑星物理 学専攻博士課程修了.博士(理 学).日本学術振興会特別研究員 PD,国立天文台助手を経て2010 年より現職.専門は惑星測地学. 日本測地学会,日本惑星科学会,日本海洋学会に所 属.MMXでは測地学科学戦略チームのリーダーを 務める.