

# 概要と開発状況

火星衛星探査計画

# MMX

Martian Moons eXploration

川勝康弘 

倉本圭、大嶽久志、馬場肇、今田高峰



ポスターセッションにもお越しください！！

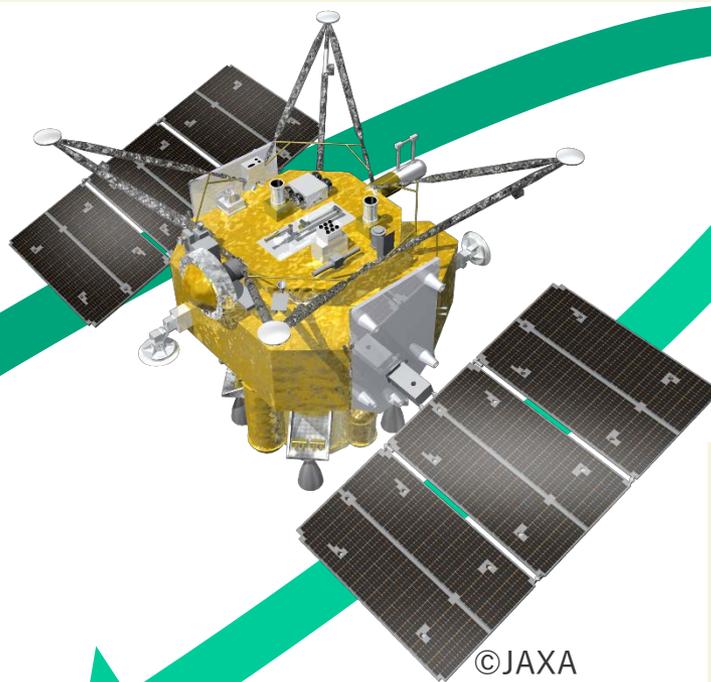
## g10 火星衛星探査計画MMX

全般	1	MMXによる <b>サイエンス</b>
	2	MMX国際サイエンスボードによる <b>成果創出</b> プラン
	3	MMX <b>探査機システム</b> の基本設計
降下・着陸	4	MMX <b>航法誘導制御系</b> の設計と検証
	5	MMX <b>運用設計</b> と降下着陸運用検討
	6	MMXの <b>着陸装置</b> 設計検討報告
	7	MMX <b>サンプリング装置 (C-SMP)</b> の開発状況報告
ミッション機器	8	MMX <b>TENGOO/OROCHI</b> 開発状況報告
	9	MMX搭載用火星周回 <b>ダストモニター</b> の開発
	10	MMX <b>MSA</b> 開発状況報告
	11	MMX <b>LIDAR</b> 開発状況報告
	12	MMX <b>SRC</b> 開発状況報告
	13	MMX搭載用惑星間空間放射線環境モニタ ( <b>IREM</b> ) の開発
	14	(欠番)
国際協力	15	MMXの <b>国際協力</b> の概要
	16	MMX <b>MEGANE</b> 開発状況報告
	17	MMX 赤外線分光計 <b>MIRS</b> の科学目標と開発状況

# ミッションコンセプト

原始太陽系における「**有機物・水の移動、天体への供給**」過程の解明に貢献するため、火星衛星に含まれる含水鉱物・水・有機物などを解析することにより、水や有機物の存在を明らかにするとともに、**火星衛星の由来**を解明する、世界初の火星衛星サンプルリターンミッションである。

**目標打上年度：  
2024年度**



火星と衛星フォボス・ダイモス



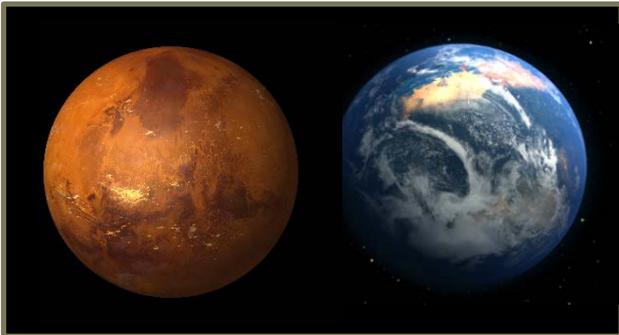
©NASA's Earth Observatory

- 質量：約4000kg
- ミッション期間：約5年
- 打上げロケット：H3
- ミッション機器：
  - サンプリング装置
  - ガンマ線・中性子分光計
  - 広角分光カメラ
  - 近赤外分光計
  - 望遠カメラ など

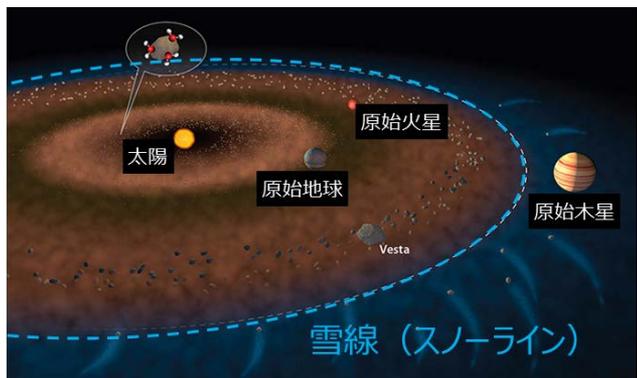
This document is provided by JAXA.

# なぜ火星衛星なのか？

初期の太陽系、地球型惑星は、カラカラに乾いた状態で形成された。どのように地球型惑星に水が運ばれ、生命居住可能な環境を作り上げたのかは、惑星科学の最重要課題である。



原始火星（左）と水に富む太古の火星（右）



形成初期の太陽系

スノーラインの外から運ばれた水、有機物等の揮発性物質が地球型惑星領域を生命居住可能な環境に変えた。これらの物質輸送には、**小惑星**、**彗星**、その破片、塵が重要な役割を果たした。

地球型惑星領域の入口にある火星、その周りには小惑星フォボスとダイモス。  
火星衛星は、太陽系内での水の輸送を担ったカプセルではないか？



火星の衛星：フォボスとダイモス

(衛星サイズ誇張)

# ISASの小天体探査戦略

## 定期的サンプルリターン

他国に依存しない自律的カプセル回収  
世界に対し日本がサンプル分与/分析を主宰



2010年帰還  
はやぶさ  
S型小惑星



2020年帰還  
はやぶさ2  
C型小惑星



2029年帰還  
MMX  
フォボス (D型?)



2030年代



2040年代

小天体サンプルリターンのプログラム化

一連のミッションで、これらの問題を探求する

# 国際宇宙探査におけるMMXの位置づけ

国際宇宙探査の文脈において、人類の活動領域を火星まで拡大していく流れの中で、MMXは、**日本における火星探査への取り組みの一番手に位置づけられている。**

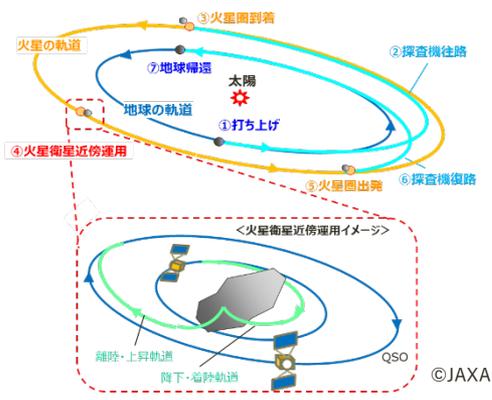


MMXでは、人類共通の価値である国際宇宙探査、その**主たる目標**である**火星圏**に、**日本独自・優位な小天体探査技術**を武器として、**大型国際共同ミッションを主導**して取り組む。我が国が培ってきた**探査技術を継承**し、その発展に寄与するとともに、この取り組みを**視覚的に世界と共有**する。

# 火星衛星探査：火星有人探査への布石

MMXは、**世界初の火星圏往還**（有人探査の必須技術）を果たすと共に、**有人探査の軌道上拠点**と目される火星衛星の詳細情報（地形・環境）を取得。放射線環境計測で有人滞在技術にも貢献(\*)。

“MMXは火星の衛星フォボスとダイモスへの素晴らしいミッションである。NASAがMMXに協力したいと強く望む理由は、その絶大な科学的価値のみにあらず、MMXが火星有人探査計画におけるフォボスの位置づけを決める助けとなるから。私の展望では、フォボスは火星の宇宙ステーションになる可能性があるが、MMXがなければ、その決定を下す機会を持たない” — NASAチーフサイエンティスト：ジム・グリーン

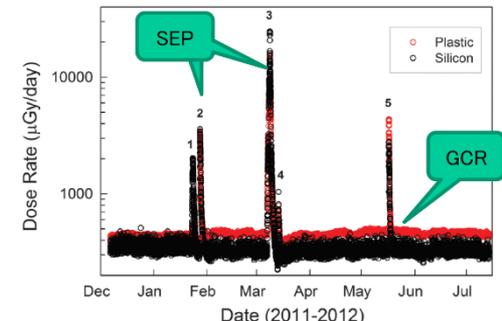


**世界初の火星圏往還**  
MMXは世界初の火星圏往還ミッションである。このことは、将来の国際協力による有人火星探査において有力な実績となる。



**フォボスの詳細観測**  
MMXでは、搭載観測機器、着陸時情報、MMXローバ等を用いて、フォボスの表面地形、地盤情報、表面・周辺環境を詳細に観測する。

Credit: NASA/JPL-Caltech University of Arizona



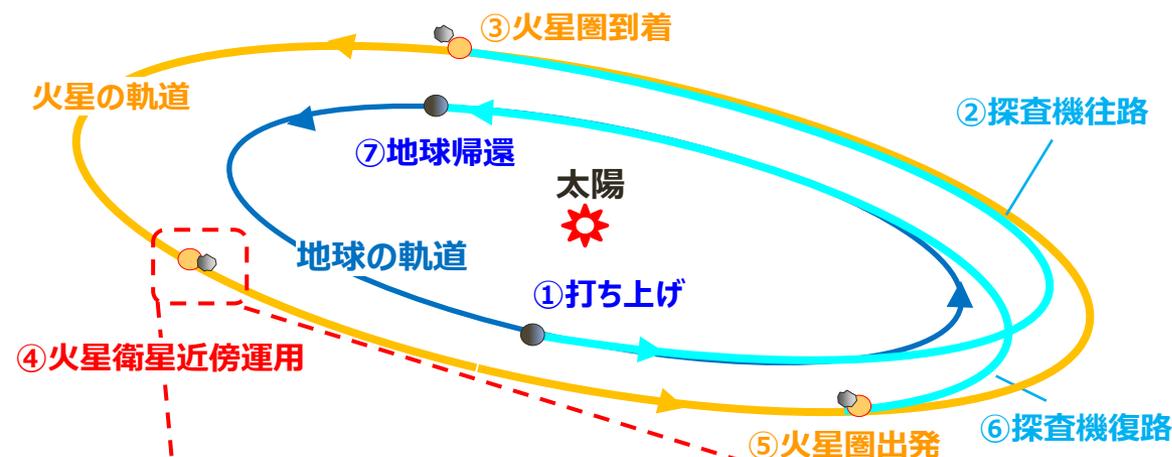
MSLでの放射線計測結果  
※ C. Zeitlin, et al (2013) Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory

**惑星間放射線環境モニタ (IREM)**  
有人火星探査にとってクリティカルな太陽フレア。IREMは、深宇宙での太陽高エネルギー粒子 (SEP) のエネルギースペクトルを計測する(\*)。

(\*)探査技術獲得目的の搭載機器による貢献

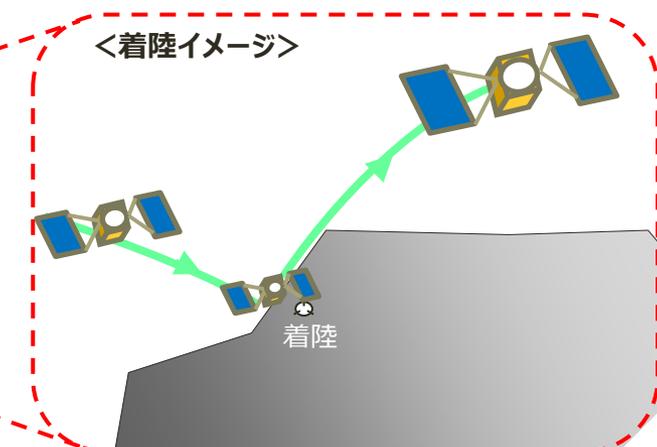
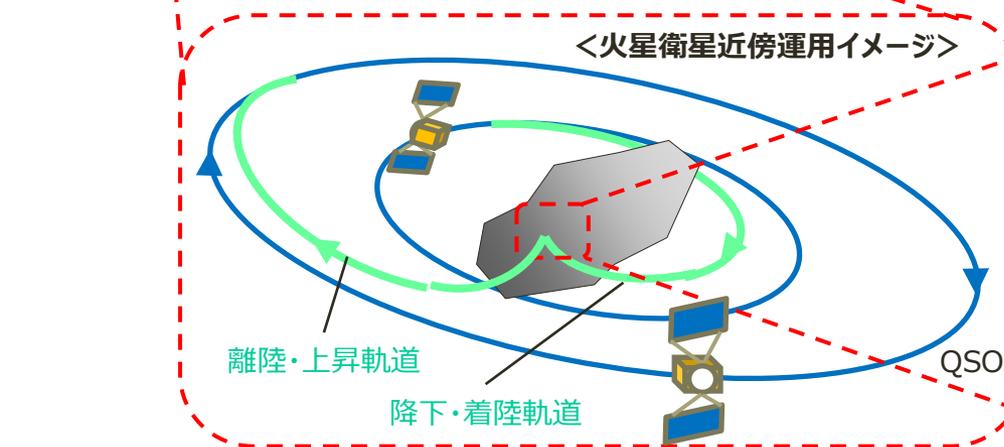
# ミッション・プロフィール

惑星間の飛行期間（片道）は往路・復路とも1年弱。全ミッション期間は、火星衛星近傍での観測・運用期間を考慮し、約5年と想定している。2024年度の打上げに向けて開発を進める。



## ミッション・プロフィール

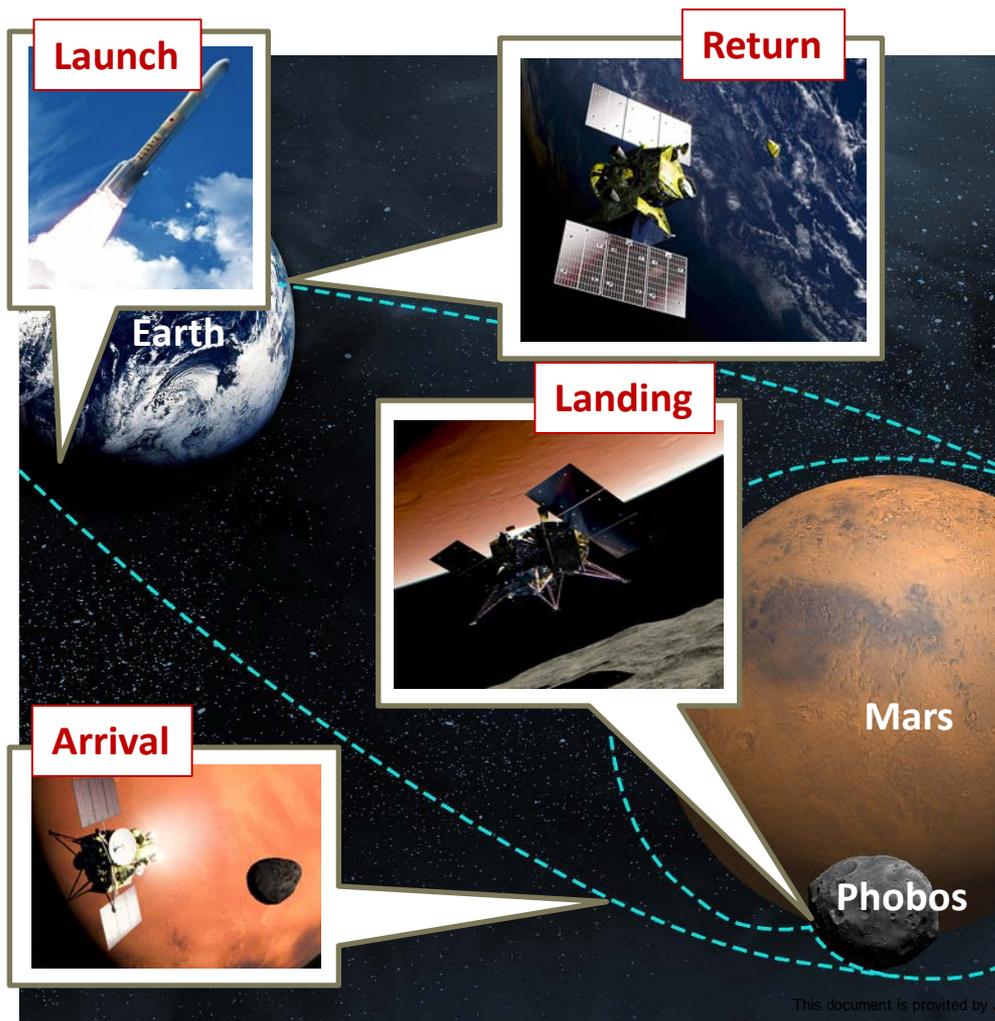
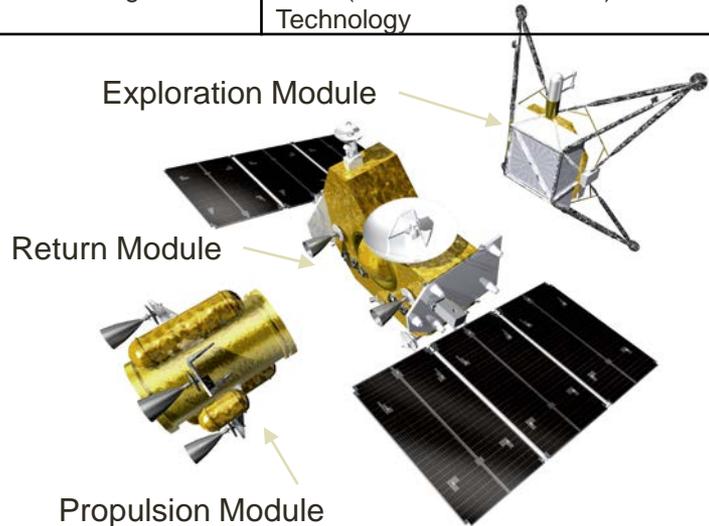
打ち上げ	2024年9月
火星圏到着	2025年8月
火星圏離脱	2028年8月
地球帰還	2029年9月



# 探査機システム

探査機システムの開発は三菱電機株式会社が担当する。化学推進系を主推進とする打上時質量4000kgの大型探査機で、大きな軌道速度を効率よく得るために、三段式の構成をとる。

Item	Spec.
Configuration	3 modules (Propulsion/EXploration/Return)
Launcher	H3-24L Launch Vehicle
Launch Year	FY 2024
Duration	Nominal 5 years (max. 6 years)
Weight	4,000 kg
Propellant	Prop. module : about 1,600kg Return module : about 1,050kg
Delta-V	about 5 km/s (total)
RF Link (at 2.7AU)	X-band : more than 32kbps Ka-band : more than 128kbps
Power	Super high efficiency thin-film solar cells
Landing Nav.	Image-based Navigation SLIM (JAXA's Lunar Lander) -derived Technology



# 搭載ミッション機器

ミッション目的を達成するため、11の科学ミッション機器が搭載される。MMXを世界最高のミッションとするため、そのうちの4つは海外機関から提供される。加えて、探査技術獲得を目的とする2つの機器を搭載する。

## リモセン観測・その場観測

TENGOO（望遠カメラ）

OROCHI（広角分光カメラ）

**MIRS**（近赤外分光装置）

**MEGANE**（ガンマ線・中性子線分光計）

LIDAR（レーザ高度計）

CMDM（ダストモニタ）

MSA（イオンエネルギー質量分析器）

**Rover**（ローバ）

## サンプル採取・回収

SMP（サンプリング装置）

**P-SMP**（ニューマティック採取機構）

SRC（サンプルリターンカプセル）

## 探査技術獲得

IREM（惑星空間放射線環境モニタ）

**SHV**（高詳細カメラ）

**強調項目**は海外機関/国内他機関からの提供機器。

# 国際協力

MMXを世界最高のミッションとするため、欧米の主要宇宙機関と、搭載機器の提供を含む幅広い協力体制を構築。日本が主導する月・惑星探査ミッションとして、最大の国際共同ミッションとなる。

海外機関	協力案件
NASA (米国)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガンマ線・中性子線分光計 (MEGANE)</li> <li>ニューマティック採取機構 (P-Sampler)</li> <li>地上局支援 (管制、ミッションデータ受信)、他</li> </ul>
ESA (欧州)	<ul style="list-style-type: none"> <li>深宇宙用通信機 (Ka帯)</li> <li>地上局支援 (管制、ミッションデータ受信)</li> </ul>
CNES (フランス)	<ul style="list-style-type: none"> <li>近赤外線分光装置 (MIRS)</li> <li>MMXローバ (MMX Rover) (DLRと共同)</li> <li>近接運用支援</li> </ul>
DLR (ドイツ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>MMXローバ (MMX Rover) (CNESと共同)</li> <li>試験設備提供 (落下塔、微小重力模擬)</li> </ul>

- 強調項目は搭載機器。
- 各機関とも、この他に、参加科学者の活動を支援。

宇宙科学ミッションでは、従来から、相互に、他国主導のミッションに搭載機器を提供する形で、国際協力による機会活用と効率化を図ってきた。MMXは、探査分野で日本が主導する最大級の国際共同ミッションである。

# プロジェクトの実施体制

我が国最大の探査計画となるMMXでは、計画の遂行、探査機システム、ミッション機器等の開発、サイエンス推進のため、海外宇宙機関、企業、サイエンスコミュニティ、他との幅広い協力・推進体制を構築している。

## 宇宙機関



## 企業



(何らかの役割を請け負う形で参加する企業。2021年1月時点。)

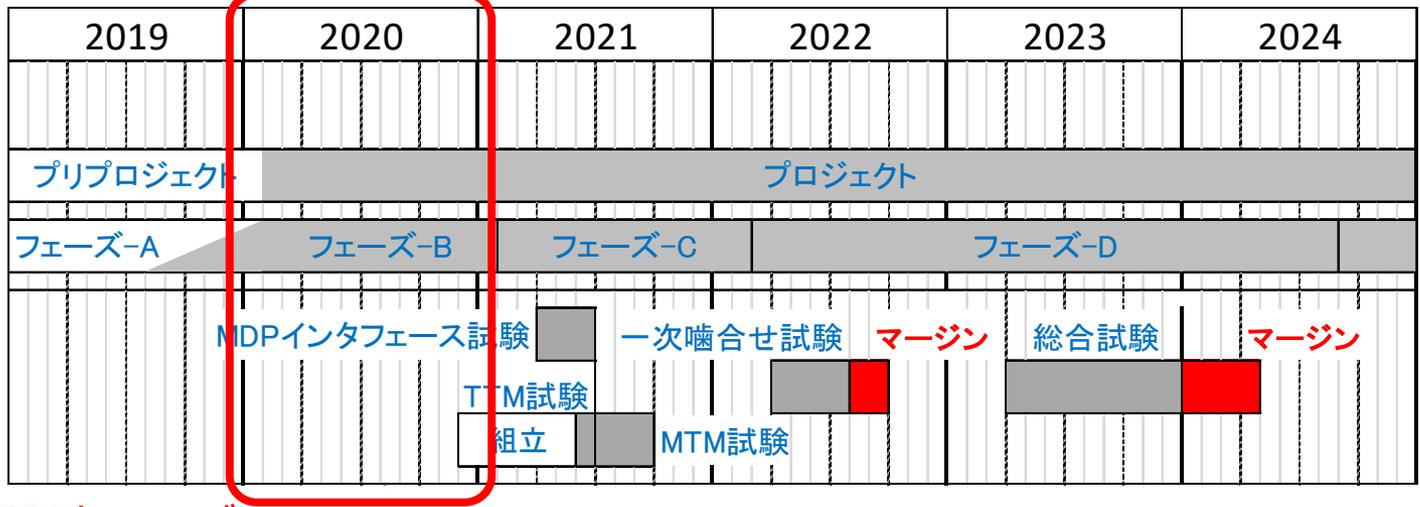
## サイエンス・コミュニティ (サイエンスボードメンバーの所属機関)



# MMXの最新状況

文部科学省宇宙開発利用部会（2月）にて、**MMXの開発が正式に決定**された。その後、探査機システム、ミッション機器等の**基本設計を実施・完了**し、エンジニアリングモデル：**EMの開発を開始**している。

MMX開発スケジュール



基本設計フェーズ

2020年の活動における最新状況として、以降のスライドで右の4項目を紹介する。

- プロジェクト移行
- 基本設計の遂行・完了
- 機器の試作・試験等
- 次フェーズの準備

# MMXのプロジェクト移行

文部科学省宇宙開発利用部会（2月）にて、MMXの開発が決定するとともに、JAXA国際宇宙探査センターに火星衛星探査機プロジェクトチームが設置され、2024年度の打ち上げに向けた活動がスタートした。

- 2020年2月19日に開催された第53回宇宙開発利用部会において、JAXAで実施したプロジェクト移行審査の報告に基づき、計画の目的、目標、開発方針、開発計画、成果等についての調査審議が為され、計画の実施が認められた。
  - 宇宙基本計画工程表での記載も踏まえ、惑星科学における意義・価値と並べて、国際宇宙探査における意義・価値を説明した。
  - JAXAにおける「（通称）プロジェクト業務改革」施行後、最初の「新規性が高く、挑戦的なミッション」であり、新しく「フロントローディング」の枠組みが導入されたので、その成果・効果についても紹介した。
  - サンプル採取を目指す主たる探査対象をフォボスにすることとした。惑星科学の観点からは、当初から、フォボスの方が望ましいと評価していたが、システム定義段階の検討を経て、技術的実現性が確認できたため。
- 2020年2月、国際宇宙探査センターに、火星衛星探査機プロジェクトチームが設置され、2024年度の打ち上げに向けた活動がスタートした。

# 基本設計の遂行・完了

開発段階の最初のフェーズである基本設計を進め、一連の基本設計審査（PDR）を実施してきた。現在、探査機システム、地上システムのPDRを実施中であり、仕上げとなる**総括PDRを1月末から実施**する予定である。

## 基本設計フェーズの活動

計画を構成するシステム（探査機、地上系）、サブシステム・機器（バス、ミッション）について、**各種整合(\*)を図りつつ**、設計仕様（構成、機能、性能、I/F、他）を固めていく。各レベルの基本設計審査（PDR）でその妥当性を確認する。

(\*)要求との整合、要素間の整合、運用計画との整合、開発スケジュールとの整合、etc.

## 基本設計審査（PDR）一覧

### MMX基本設計での**挑戦**

- 複雑なシステム、運用
- 13のミッション機器
- リソース（質量）制約
- タイトなスケジュール
- 新型コロナ感染拡大によるコミュニケーション上の課題

探査機（バス）	ミッション機器																								
<ul style="list-style-type: none"> <li>• システム（I/F編、本編）（熱制御、構造、計装含む）</li> <li>• 統合化制御系（DH、GNC）</li> <li>• 通信系</li> <li>• 電源系</li> <li>• 太陽電池パドル系</li> <li>• 着陸系</li> <li>• 推進系</li> </ul>	<table border="0"> <tr> <td><b>サンプラ</b></td> <td>• TEN/ORO</td> </tr> <tr> <td>• 総括</td> <td>• LIDAR</td> </tr> <tr> <td>• システム1、2</td> <td>• CMDM</td> </tr> <tr> <td>• コアラ</td> <td>• MSA</td> </tr> <tr> <td>• 搬送部</td> <td>• MEGANE</td> </tr> <tr> <td><b>カプセル</b></td> <td>• MIRS</td> </tr> <tr> <td>• 総括</td> <td>• P-SMP</td> </tr> <tr> <td>• システム</td> <td>• Rover</td> </tr> <tr> <td>• 前面HS</td> <td>• SHV</td> </tr> <tr> <td>• エレキ、他2件</td> <td>• IREM</td> </tr> <tr> <td>• 分離スプリング</td> <td>• RAX/AFS</td> </tr> <tr> <td>• パラシュート</td> <td>• RDR</td> </tr> </table>	<b>サンプラ</b>	• TEN/ORO	• 総括	• LIDAR	• システム1、2	• CMDM	• コアラ	• MSA	• 搬送部	• MEGANE	<b>カプセル</b>	• MIRS	• 総括	• P-SMP	• システム	• Rover	• 前面HS	• SHV	• エレキ、他2件	• IREM	• 分離スプリング	• RAX/AFS	• パラシュート	• RDR
<b>サンプラ</b>	• TEN/ORO																								
• 総括	• LIDAR																								
• システム1、2	• CMDM																								
• コアラ	• MSA																								
• 搬送部	• MEGANE																								
<b>カプセル</b>	• MIRS																								
• 総括	• P-SMP																								
• システム	• Rover																								
• 前面HS	• SHV																								
• エレキ、他2件	• IREM																								
• 分離スプリング	• RAX/AFS																								
• パラシュート	• RDR																								
<p><b>地上系・運用</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 総括（データ解析含む）</li> <li>• 地上系（Melco分）</li> <li>• 軌道計画系</li> <li>• 軌道決定系</li> <li>• 運用設計</li> <li>• 軌道設計</li> </ul>																									

審査にはプロジェクト外の多数の方（JAXA内外）にも協力をいただいた。

# 実験、機器の試作・試験、シミュレーション

基本設計検討に加えて、設計条件導出・同定のための実験・試験、設計結果検証のためのシミュレーション解析、エンジニアリングモデル（EM）による検証試験、等を進めた。

## フォボス着陸時の反力・レゴリス飛散

落下塔試験により、微小重力下の着陸運動を模擬し、着陸時の反力、レゴリス飛散のデータを取得、数値シミュレーションに反映する。想定される範囲の特性を持つ、様々な模擬砂を用いる。

## サンプル採取・レゴリス飛散

落下塔試験により、微小重力下のコアラー射出・貫入を模擬し、様々な模擬砂に対するサンプル採取量、サンプル時のレゴリス飛散データを取得。

## スラスト噴射時のレゴリス飛散

フォボスから離陸する際のスラスト噴射によるレゴリス飛散実験。落下塔による微小重力実験により重力依存性を明らかにし、シミュレーションに反映。

## ローバ展開・移動

ローバ着陸後の転置・展開・移動のシミュレーション。

## 着陸時のスロッシング

落下塔試験により、微小重力下、着陸時のタンク内の推進薬挙動を模擬しデータを取得、数値シミュレーション用モデルの作成に用いる。

## ニューマティック採取機構

着陸脚への装着を模擬したコンフィギュレーション（サンプル採取部、収納部）でのサンプル採取試験（1G下の実験）。

## Hourglass実験（プロジェクト外）

国際宇宙ステーション（ISS）に設置されたセントリフュージ設備を用いて様々な重力加速度環境を精度よく模擬し、粒子挙動の重力加速度依存性を明らかにする。様々な模擬砂を用いる。

## SHV撮像

火星近傍でのSHVによる撮像模擬動画。フォボス周回軌道（QSO）からの「火星の出」など。

# 次フェーズの準備

基本設計審査が完了した機器・サブシステムからEMの製作・試験に着手している。システムレベルでは、MTM/TTM（熱・構造モデル）試験、MDPインタフェース試験を計画している。

## MTM構体・シリンダ部

システム機械環境試験モデルの主構体となる。

## SRCパラシュート EM開傘試験

パラシュートEM単体の開傘試験。2022年に豪州で実施するSRC大気球試験で使用する。

## MEGANE STM

システムMTMに装着される。

# まとめ

- 火星衛星探査計画（Martian Moons eXploration : MMX）は、火星の衛星フォボスからの世界初のサンプルリターンミッションである。2024年の打上げに向けて開発を進めている。
- 本発表ではMMXの概要、および開発の最新状況として、以下4点を報告した。
  - 文部科学省宇宙開発利用部会（2月）にて、MMXの開発が決定するとともに、JAXA国際宇宙探査センタに火星衛星探査機プロジェクトチームが設置され、2024年度の打ち上げに向けた活動がスタートした。
  - 開発段階の最初のフェーズである基本設計を進め、一連の基本設計審査（PDR）を実施してきた。現在、探査機システム、地上システムのPDRを実施中であり、仕上げとなる総括PDRを1月末から開始する予定である。
  - 基本設計検討に加えて、設計条件導出・同定のための実験・試験、設計結果検証のためのシミュレーション解析、エンジニアリングモデル（EM）による検証試験、等を進めた。
  - 基本設計審査が完了した機器・サブシステムからEMの製作・試験に着手している。システムレベルでは、MTM/TTM（熱・構造モデル）試験、MDPインタフェース試験を計画している。