

資料53-4

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
(第53回R2.2.19)

火星衛星探査計画 (MMX) プロジェクト移行審査の結果について

MMX

Martian Moons eXploration



火星衛星探査計画MMX 想像図
©JAXA

令和2(2020)年2月19日
国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
理事 國中 均

火星衛星探査機プロジェクトチーム プロジェクトマネージャ 川勝康弘

プロジェクト事前評価と本資料の位置付け

宇宙開発利用部会におけるプロジェクト事前評価について

JAXA 自らが実施した研究開発プロジェクトの評価結果について、目的、目標、開発方針、開発計画、成果等についての調査審議を行う。

※JAXA は、プロジェクトの企画立案と実施に責任を有する立場から、JAXA 自らが評価実施主体となって評価を行うことを基本とする。

「宇宙開発利用部会における研究開発課題等の評価の進め方について」
(平成31年4月18日宇宙開発利用部会決定)

- 当報告は、宇宙開発利用部会が実施フェーズ移行に際して実施する「事前評価」に資するものである。
- JAXAが実施した、火星衛星探査計画（以下、「MMX」）に係るプロジェクト移行審査（令和元(2019)年12月17日）について、審査における主たる審査項目を以下に示す。
 - ① プロジェクト目標・成功基準の妥当性
 - ② 実施体制、資金計画、スケジュールの妥当性
 - ③ リスク識別とその対応策の妥当性
- 本資料では、これらの審査項目の内容について1～3章に、JAXAのプロジェクト移行審査の判定および外部専門家による評価について4章に示す。

目次

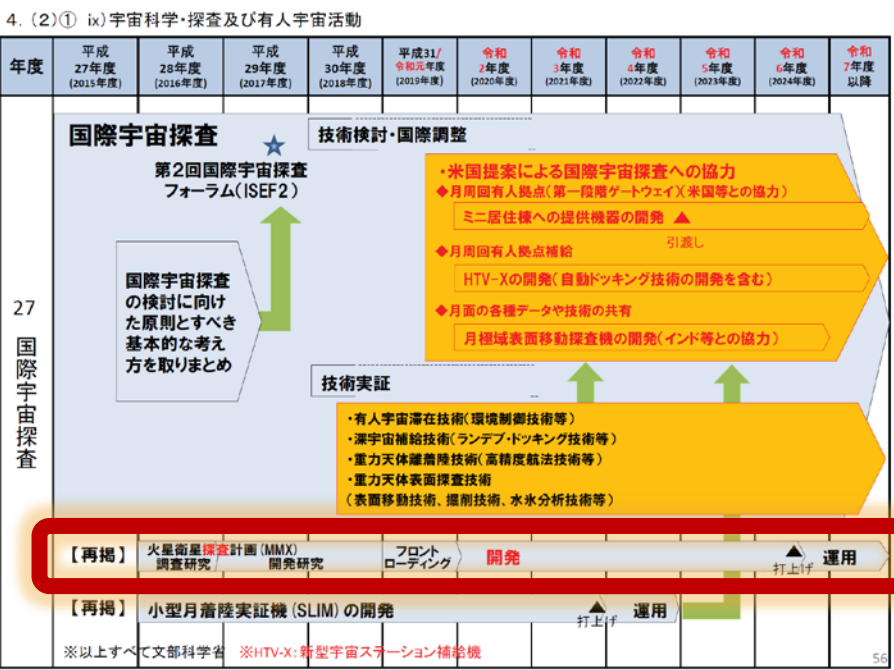
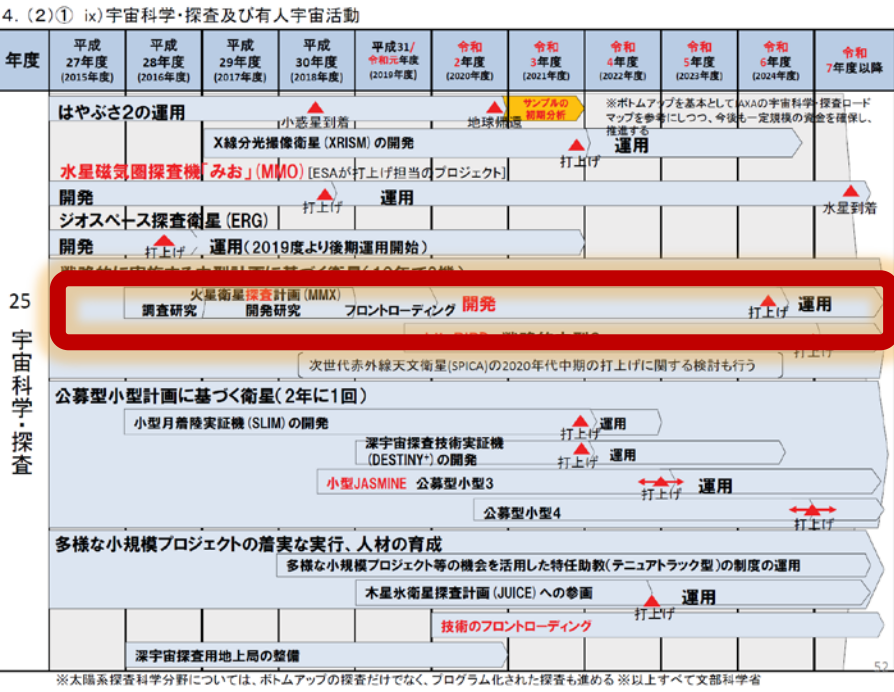
1. プロジェクト目標の設定
 1. MMXの位置付け
 2. プロジェクト目標
 3. ミッション要求
 4. ミッション成功基準及びアウトカム目標
2. MMXの概要
 1. ミッション・プロファイル
 2. 探査機システム
 3. 搭載されるミッション機器
 4. 国際協力
3. MMXの開発計画
 1. プロジェクトの実施体制
 2. 資金計画及びスケジュール
 3. リスクと対応策
4. プロジェクト移行審査のまとめ

参考資料

1.1 火星衛星探査計画（MMX）の位置付け

令和元（2019）年度に改訂された宇宙基本計画工程表において、火星衛星探査計画（MMX）は、宇宙科学・探査の工程表では、戦略的中型計画1号機として、2024年度の打上げを目指して開発を進めることとなった。

加えて、国際宇宙探査の工程表では、それと連携を取りながら進められるべき計画としても位置付けられている（小型月着陸実証機（SLIM）も同様）。



宇宙基本計画工程表（令和元年12月13日宇宙開発戦略本部決定）より抜粋

火星探査の目的と課題

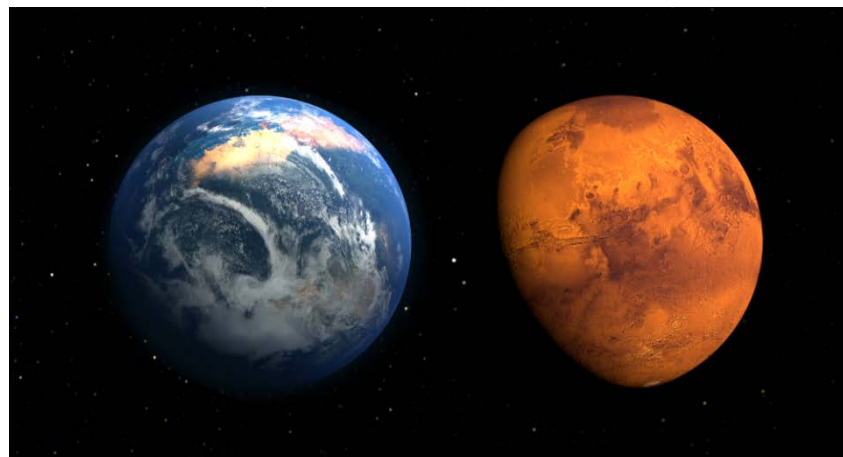
欧米を中心とする各国は、生命の痕跡を求め、火星本体の探査を進めている。主たる興味の対象は、過去の火星の表面環境であり、以下のようなミッション目的が設定されている。

- 火星の表面環境の歴史は？
- どのようにして火星大気は失われたのか？
- 何が気候変動を引き起こしたのか？



米国の火星探査ローバーCuriosity

Credit: NASA, JPL-Caltech, MSSS, MAHLI



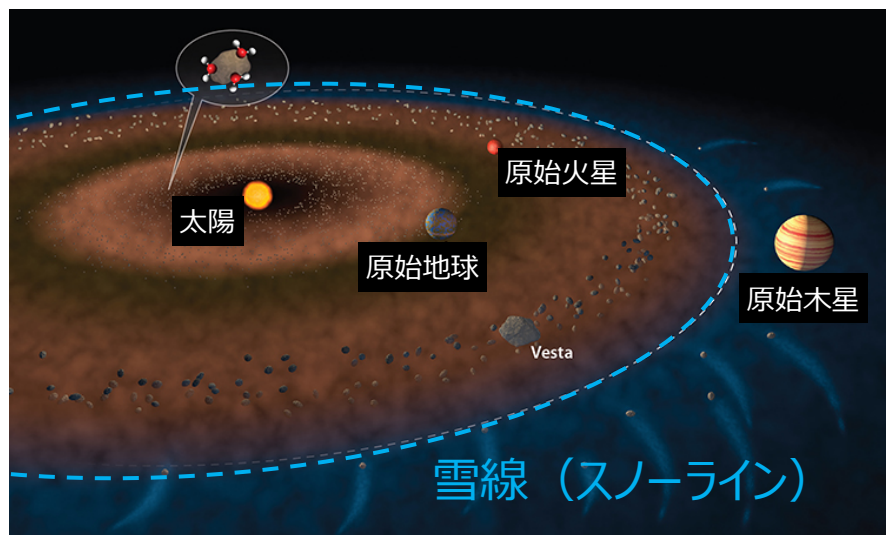
太古の火星（左）と現在の火星（右）

Credit: NASA's Goddard Space Flight Center

しかし、そもそも、なぜ火星に水・大気があったのか？

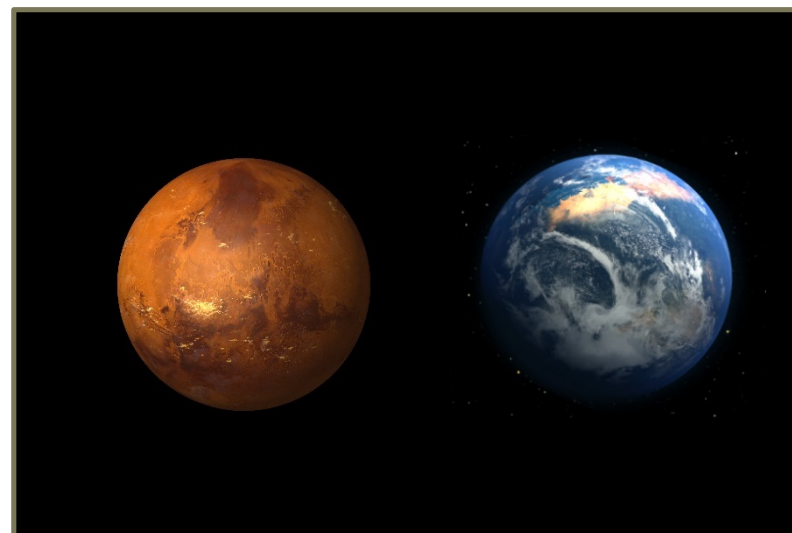
火星の水の起源？

しかし、そもそも、なぜ火星に水や大気があったのか？
太陽に近い高温領域で形成される地球型惑星では、水、有機物等の揮発性物質は失われ、カラカラに乾いた状態で形成されるはず。



形成初期の太陽系

Illustration by Jack Cook, Woods Hole Oceanographic Institution



原始火星（左）と水に富む太古の火星（右）

（右図） Credit: NASA's Goddard Space Flight Center

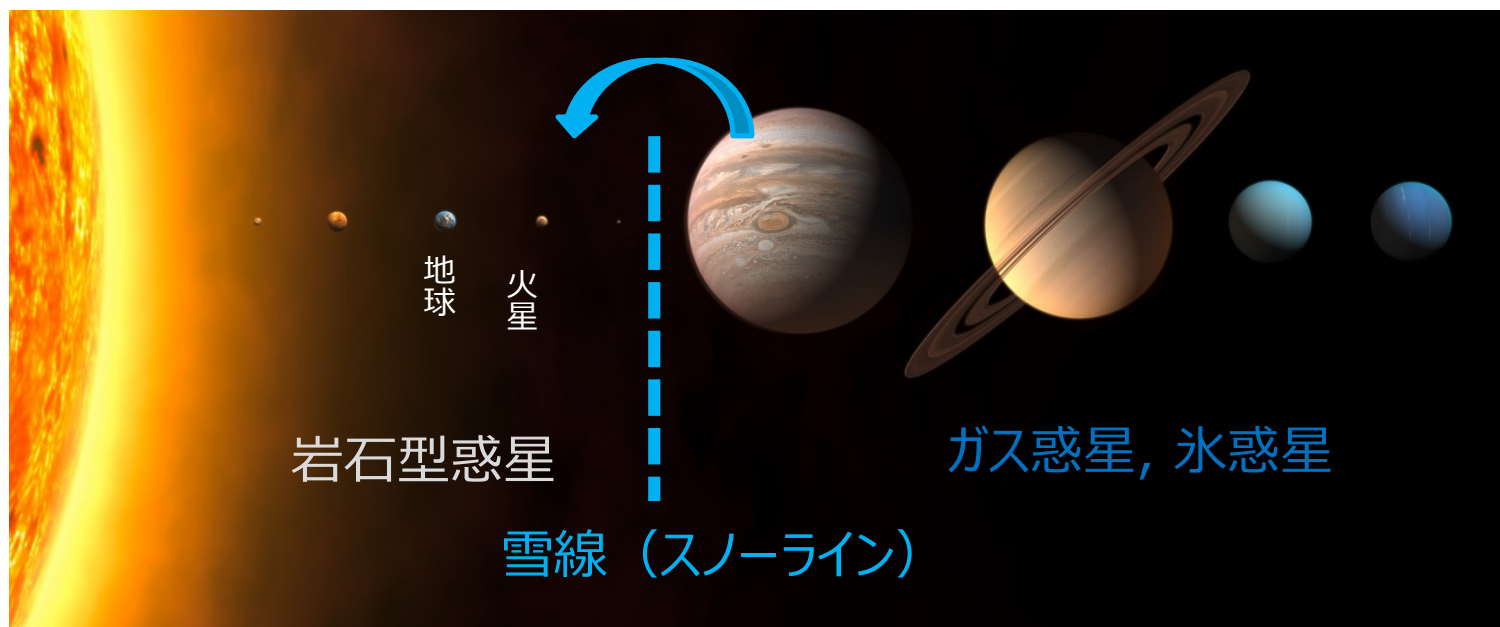
どのようにして火星に水が運ばれたのか？

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？

太陽系内での水の輸送

雪線（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と推測される。

初期太陽系の雪線周辺において小天体はどのように振舞ったのか？



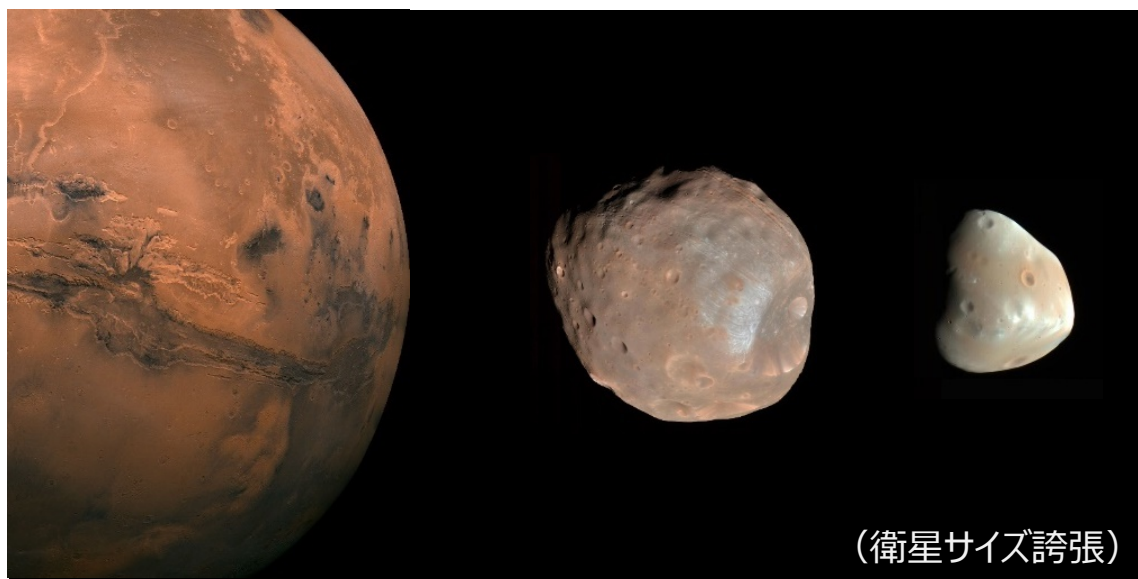
Credit: The International Astronomical Union/Martin Kornmesser

このプロセスを確認するためには、我々は、どこへ行くべきか？

火星衛星：火星を周回する小天体

火星は地球型惑星領域の入り口。その過程を目撃してきたはず。

火星の衛星はフォボス（直径23km）とダイモス（直径12km）。
火星の周りに存在していなければ、ただの小惑星と認識されたであろう。



(衛星サイズ誇張)

Credit:
NASA/JPL-Caltech
University of Arizona

火星の衛星：フォボス（中）とダイモス（右）

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？

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?)



20xx年帰還
CAESAR
彗星67P (氷)



20xx年帰還
OKEANOS
トロヤ群

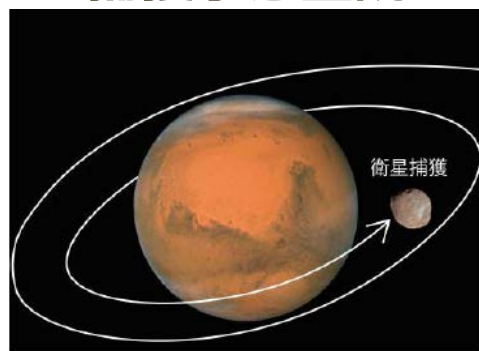
小天体サンプルリターンのプログラム化

一連のミッションで、これらの問題を探求する

火星衛星の起源：太陽系内の水輸送カプセル？

火星衛星の起源はわかっていない。「捕獲小惑星説」と「巨大衝突説」の2つの説があるが、理論的には、どちらが優位とは言えない。

捕獲小惑星説

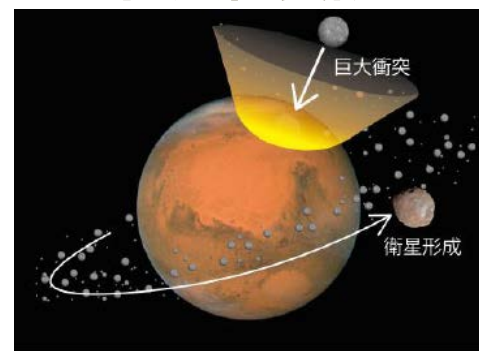


もともと遠方に存在していた小惑星が、他天体との衝突などにより軌道が変わって火星周辺に飛来し、火星重力に捕まった、とする説。

MMXでは、火星衛星の起源論をサンプルリターンにより決着させる。

衝突前の水輸送カプセルの
サンプルを入手

巨大衝突説



火星に大規模な天体衝突が生じ、その破片が火星軌道に散らばった後で、これらが再集積して形成した、とする説。

水輸送カプセルの破片と、形成
期の火星の混合サンプルを入手。

1.2 プロジェクトの目標

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。



国際宇宙探査におけるMMXの役割

2018年3月、東京で開催されたISEF2^(*)において、「国際宇宙探査に関する東京原則」が確認された。

共通原則

- 宇宙探査は新たなフロンティアを探索する究極の挑戦であり、宇宙における人類の活動領域についての感覚を広げるもの。
- 最先端の科学技術と工学を発展させるとともに、将来の宇宙探査の道筋を整え、地球上の人類に利益をもたらす革新的な機会となりうるもの。
- これらの利益の中には、将来の科学的発見の促進、グローバルな挑戦への対応、グローバルパートナーシップの創造、若い世代を中心とした社会啓発、経済発展と新たなビジネス機会といったものがある。
- 過去半世紀もの宇宙探査の進展の大部分は国際協力無くては成し得なかった。宇宙探査は、大小多数の、行き先も目的も異なるプログラム・プロジェクト等の集まりであり、様々な技術により実現されうるもの。協働は個々のプロジェクトも全体としての取組も強化する。

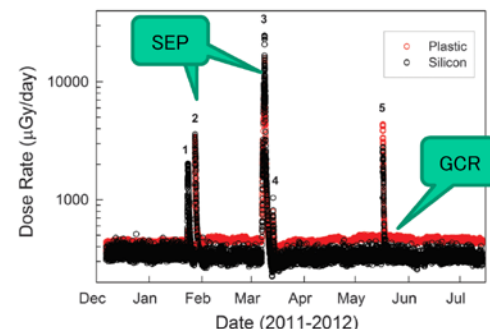
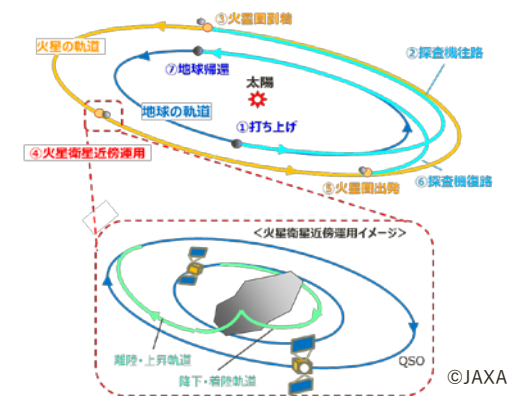
MMXでは、人類共通の価値である国際宇宙探査、その**主たる目標である火星圏に、日本独自・優位な小天体探査技術**を武器として、**大型国際共同ミッションを主導**して取り組む。我が国が培ってきた**探査技術を継承**し、その発展に寄与するとともに、この取り組みを視覚的に世界と共有する。

(*)国際宇宙探査フォーラム（ISEF）：宇宙探査における国際協力の促進を目的とした閣僚級を含む政府レベルでの対話・意見交換の会合。

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



※ C.Zeitlin, et.al (2013) Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory

MSLでの放射線計測結果

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。

惑星間放射線環境モニタ (IREM)

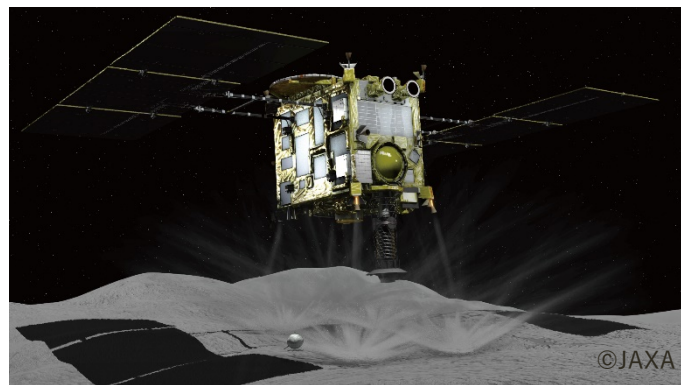
有人火星探査にとってクリティカルな太陽フレア。IREMIは、深宇宙での太陽高エネルギー粒子（SEP）のエネルギースペクトルを計測する(*)。

(*)探査技術獲得目的の搭載機器による貢献

1.2 プロジェクトの目標

小天体探査・サンプルリターン技術の拡張・発展

はやぶさ、はやぶさ2により、世界を先導する我が国の小天体探査・サンプルリターン技術を活かし、「太陽系で最も重要な未踏峰」である火星衛星からのサンプルリターン探査に挑戦。



「はやぶさ2」小惑星タッチダウン（想像図）



小惑星リュウグウ



小型着陸機MINERVAによる
リュウグウ表面画像

世界初の小惑星からのサンプルリターンに成功した「はやぶさ」、現在運用中の「はやぶさ2」で、日本は世界の小天体探査をリードする。地球圏外の天体からサンプルの採取・回収に成功したのは日米のみ。

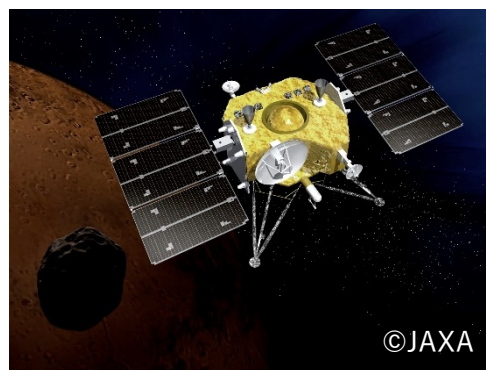
これまでの火星衛星探査及び火星をめぐる各国動向について、参考1に示す。



火星の衛星：フォボスとダイモス

Credit:
NASA/JPL-Caltech
University of Arizona

火星の衛星フォボス、ダイモスは直径約10～20kmの小天体。19世紀から知られるものの、未だ直接探査されたことがない「**太陽系で最も重要な未踏峰**」。



フォボスに接近するMMX（想像図）

火星の深い重力の井戸の中にある火星衛星への往還（サンプルリターン）は、太陽系に浮かぶ小惑星への往還より数段難しく、大型のロケット、探査機を必要とする。

MMXでは火星衛星表面に着陸し、数時間滞在。マニピュレータ、コアラを用いた**高度なサンプリング**装置で、2cm以上の深さから10g以上のサンプルを採取する（はやぶさ2では、0.1g）。

MMXを介した探査技術の継承と発展

MMXは、先行する探査機にて獲得されてきた技術を礎に実現され、MMXで獲得する探査技術は、将来の国際宇宙探査で必要とされる技術に継承される（宇宙開発利用部会報告「国際宇宙探査の在り方」より）。

過去の探査機



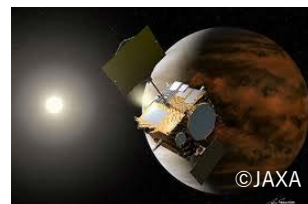
月探査衛星「かぐや」



小惑星探査機「はやぶさ2」



小型月着陸実証機「SLIM」



金星探査機「あかつき」

MMXで獲得する探査技術

高度な深宇宙航行能力

- (1) 深宇宙往復航行技術
- (2) 惑星衛星アクセス航行技術
- (3) 小重力天体表面アクセス航行技術

高度な天体表面活動・サンプルリターン

- (1) 着陸誘導技術
- (2) サンプルリターン技術
- (3) 表面探査システム技術

先進的深宇宙通信能力

- (1) 深宇宙通信能力

運用性向上・アウトリーチ技術

- (1) 高精細撮影・ミッション可視化技術(*)

放射線環境評価能力

- (1) 太陽高エネルギー粒子による被曝線量評価技術(*)

国際宇宙探査で必要な技術

深宇宙補給技術

他惑星系での遠距離かつ強振動環境での非協力物体へのランデブ・高精度接近・離脱技術と位置付けられる。

重力天体表面探査

天体表面滞在を可能とするシステム設計（特に熱・電源）、天体表面での高度運用技術（マニピュレーション、サンプルリターン）と位置付けられる。

重力天体着陸技術

イトカワのような微小重力天体、月のような重力天体への離着陸の間を補完する技術と位置付けられる。

有人宇宙滞在技術

火星有人探査に向けたナレッジギャップ解消。

(*)探査技術獲得目的の搭載機器による貢献

探査対象天体の選定：フォボス

ミッション定義段階にて、惑星科学の観点からはフォボスの方が望ましいと評価していた。システム定義段階の諸検討を経て、その技術的実現性が確認できたことから、**探査対象天体をフォボスに確定**した。

惑星科学の観点からフォボスの方が望ましいとする根拠

1. フォボスの既存の観測データ量がダイモスに比べて圧倒的に多く、試料採取地点の事前制約に必要な情報が豊富なこと。
2. 既存の観測結果から、フォボス表面には赤と青の領域が存在するのに対し、ダイモスの表面には赤い領域のみが広がっているため、ダイモス試料だけでは青い領域の対応物質が同定できず、フォボスの起源判定が困難であること。
3. 衛星形成後に火星から飛来した物質（火星飛来物質）の濃度は、内側軌道のフォボスの方が外側のダイモスに比べて2桁以上豊富であると推定される(*1)こと。

(*1)一例として、兵頭 et al (2019) で、火星衛星の表土に含まれる火星由来の物質の量と質に関する理論研究がされている。

技術的実現性確認における主たる論点

1. より火星に近い軌道を公転するフォボスへの往復の方が、より多くの推進薬を必要とするが、それを考慮した場合でも探査機設計（質量）の成立性が確認できたこと。
2. 火星衛星（フォボス・ダイモス）からのサンプルリターンミッションを、はやぶさ2と同じレベルの惑星保護方針で実施することについて、国際的に合意(*2)されたこと。

(*2)2019年3月に、国際宇宙空間研究委員会（COSPAR）からJAXAの火星衛星探査計画に対し勧告。詳細は参考2参照。

1.3 ミッション要求（惑星科学）

惑星科学としては、火星衛星の起源の解明、惑星形成過程と物質輸送への制約、火星圏進化史への新たな知見の獲得を目標とし、サンプルを取得する主たる探査対象をフォボスとすることとした。

表：惑星科学としての目標

大目的1 火星衛星の起源を明らかにし、内外太陽系接続領域における惑星形成過程と物質輸送に制約を与える。	
中目的1.1	Phobosの起源が小惑星捕獲なのか巨大衝突なのかを明らかにする。
中目的1.2a	【Phobosが小惑星捕獲起源の場合】地球型惑星領域へ供給される始原物質の組成とその移動過程を解明し、火星表層進化の初期条件を制約する。
中目的1.2b	【Phobosが巨大衝突起源の場合】地球型惑星領域における巨大衝突と衛星形成過程を理解し、火星の初期進化過程に及ぼす影響を評価する。
中目的1.3	Deimosの起源に新たな制約を加える。
大目的2 火星衛星からの視点で、火星圏変遷の駆動メカニズムを明らかにし、火星圏進化史に新たな知見を加える。	
中目的2.1	火星圏における衛星の表層進化の素過程に関する基本的描像を得る。
中目的2.2	火星表層変遷史に新たな知見と制限を加える。
中目的2.3	火星気候の変遷に関わる火星大気物質循環のメカニズムに制約を与える。

ミッション要求の全体（中目的レベルまでブレイクダウンしたもの）は、参考3に示す。

1.3 ミッション要求（探査技術獲得）

発展的段階にある太陽系探査においては、各ミッションでの技術獲得と、次のミッションへの技術継承を戦略的に進めていくことが重要である。

表：探査技術獲得としての目標

大目的3 宇宙探査を先導する技術を獲得する。

中目的3.1 火星圏への往還技術および惑星衛星圏への到達技術を獲得する。

中目的3.2 火星衛星表面への到達技術・滞在技術、および天体表面上での高度なサンプリング技術を獲得する。

中目的3.3 新探査地上局と組合せた最適な通信技術を獲得する。

ミッション要求の全体（中目的レベルまでブレイクダウンしたもの）は、参考3に示す。

1.4 成功基準及びアウトカム目標

ミッション要求に対応する、成功基準（大目的レベル抜粋版、ミニマム・フルサクセスレベル）及びアウトカム目標を示す。

大目的	アウトカム目標	アウトプット目標	
		ミニマムサクセス	フルサクセス
理学目的 1： 火星の衛星が、小惑星が捕獲されたものか、火星への巨大衝突で生じた破片が集合し形成されたものかを明らかにし、火星そして地球型惑星の形成過程に対する新たな描像を得る。	分野：惑星科学 目標：火星衛星起源を特定するデータに基づいた地球型惑星形成モデルの構築による、惑星科学の発展。	近接観測により、衛星表層の物質分布を明らかにし、衛星の起源を推定する。	近接観測に加え、Phobos表面から回収した試料を分析することで、衛星の起源を特定する。また、起源に応じて火星の材料物質と衛星形成過程に新たな知見を得る。
理学目的 2： 火星衛星および火星の変遷をもたらすメカニズムを明らかにし、火星衛星を含めた「火星圏」の進化史に新たな知見を加える。	分野：惑星科学・アストロバイオロジー 目標：「火星圏」の変遷進化過程の新たな描像を得るとともに地球型惑星表層に液体の水が保持されるための条件を解明することによる、惑星科学とアストロバイオロジーの発展	近接観測により、衛星表層の風化変成度・不均質性を明らかにし、衛星特有の表層変遷過程に対する新たな知見を得る。	衛星近接および着陸観測に加え、Phobos表面から回収した試料を分析することで、衛星表層の宇宙風化等の状態とそのメカニズムに対する新たな知見を得る。また、回収試料中に火星飛来物質を探すと同時に、火星の散逸大気と気象の観測を行うことで、「火星圏」内の物質輸送過程と進化史に対する新たな知見を得る。
探査技術の獲得目的： 宇宙探査を先導する技術を獲得する。	分野：深宇宙探査工学 目標：より高い段階の深宇宙航行・探査技術を獲得することによる高度かつ自在なミッションの創出。	火星衛星近傍に到達して、火星衛星表面に着地する。また、探査機の深宇宙通信能力を引き上げる。	火星衛星のサンプルを採取し、地上で回収する。また、探査機の深宇宙通信能力を従来の2倍以上に引き上げる。

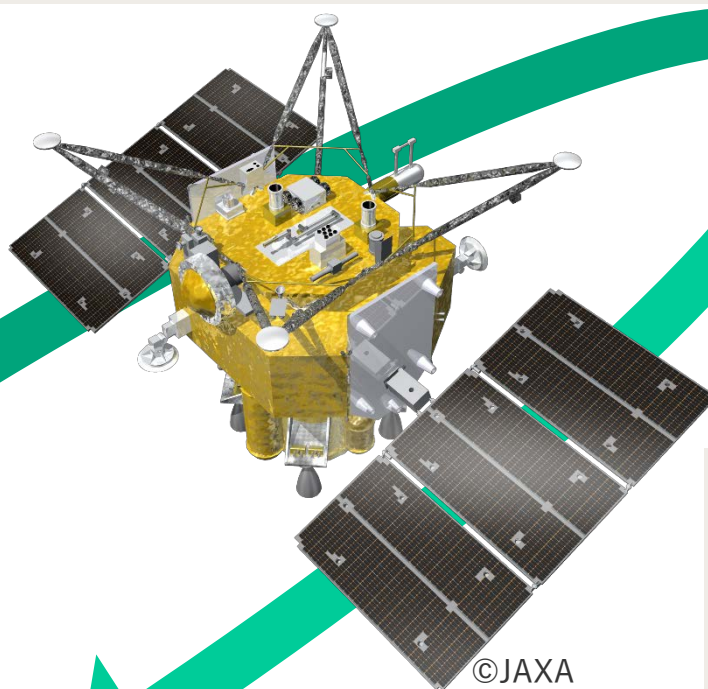
※「アウトカム」とは、プロジェクトが目指す最終的な目的であり、プロジェクトの活動自身及び成果物が、JAXA内外のパートナーとの協力体制の下で、製品・サービスなどにより、対象とする分野に対し最終的にもたらされる効果・効用を指す。

成功基準の全体（中目的レベルまでブレイクダウンしたもの）は、参考4に示す。

2. MMXの概要

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**



©JAXA



©NASA's Earth
Observatory



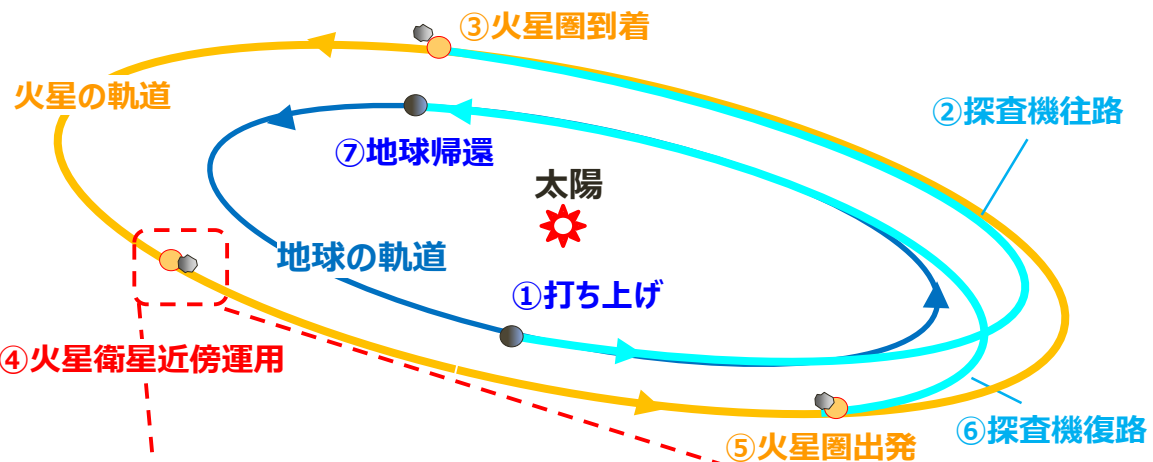
火星と衛星フォボス・ダイモス

Credit:
NASA/JPL-Caltech/MSSS
University of Arizona

- 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

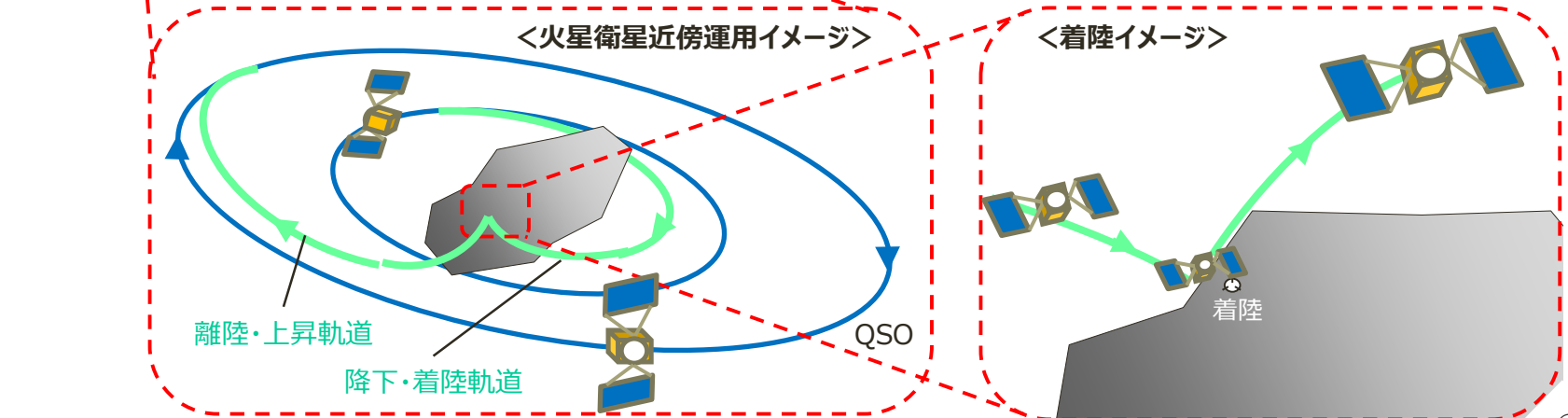
2.1 ミッション・プロフィール

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年度の打上げを目指して開発を進める。



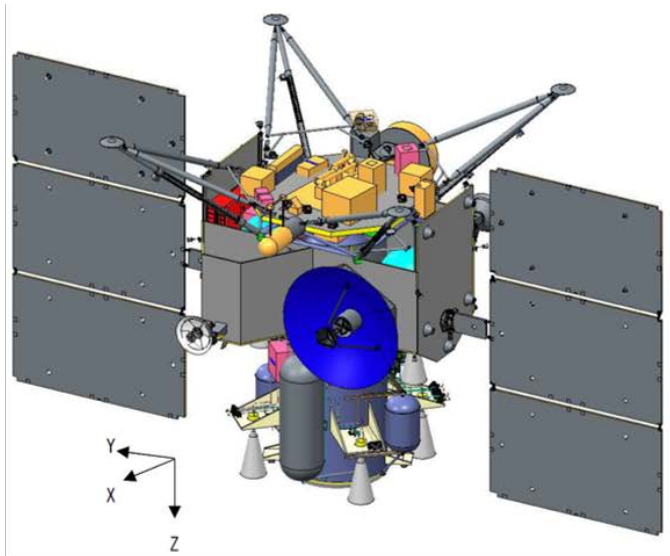
ミッション・プロフィール

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

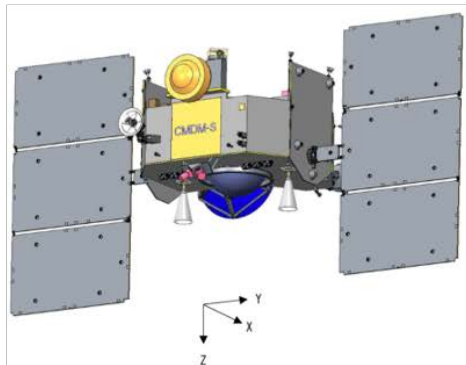


2.2 探査機システム

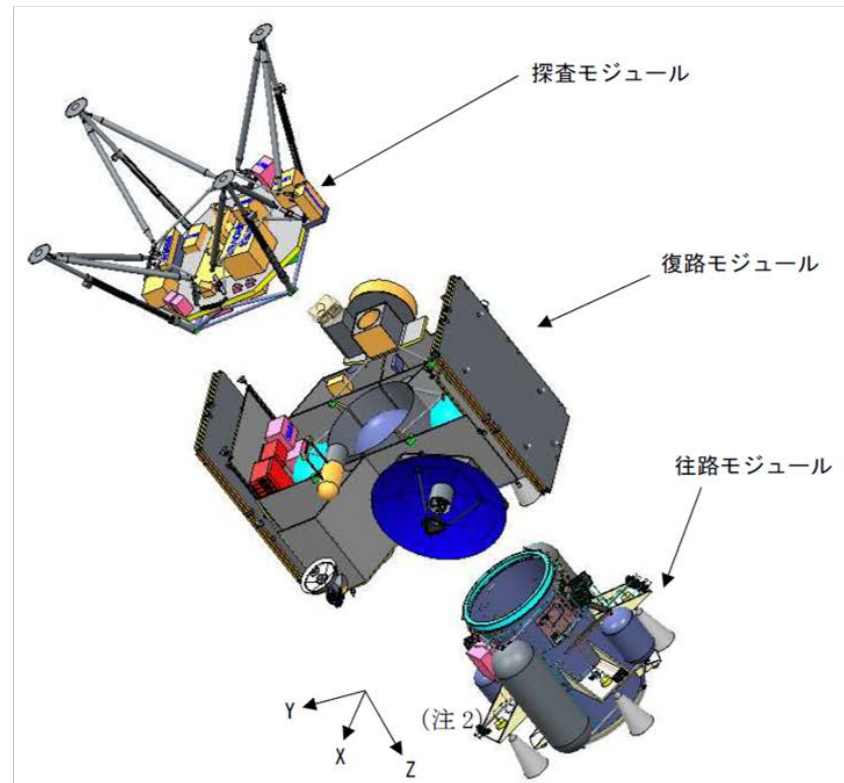
探査機の主推進系としては、往路・復路とも化学推進系を採用する。大きな軌道速度を効率よく得るために、多段式の構成とする。



探査機コンフィギュレーション（火星軌道投入時）



探査機コンフィギュレーション（地球帰還時）



各モジュールの形態（3モジュール構成）

2.3 搭載ミッション機器（1）

MMXには、ミッション目的を達成するため、11の科学観測機器が搭載される。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、経費の縮減にも寄与している。

名称	目的
望遠カメラ (TENGOO)	火星衛星全球の詳細・表面構造および採取地点周辺の地形の観測を行い物質分布、サンプル採取に必要な情報を取得する。
広角分光カメラ (OROCHI)	火星衛星全球表層の含水鉱物の観測およびサンプル採取地点周辺の物質を推定する。
レーザ高度計 (LIDAR)	火星衛星の全球地形情報を取得し、火星衛星の詳細な形状モデルを作成する。
火星周回ダストモニター (CMDM)	火星ダストリングを検出、あるいはダスト存在量の上限值を決定し、火星衛星軌道上でのダスト再集積現象を制約する。
イオンエネルギー質量分析器 (MSA)	火星および火星衛星起源イオン、太陽風イオンを観測し、それぞれの起源を選別し計測する。
ガンマ線・中性子線分光計 (MEGANE)	火星衛星表層から放出される中性子・ガンマ線を計測し、衛星表層の元素組成を決定する。
近赤外線分光装置 (MacrOmega)	火星衛星全球表層の近赤外分光観測を行い、鉱物・分子種（特に含水鉱物や有機物）の分布図を作成する。

強調項目は海外機関/国内他機関からの提供機器。

2.3 搭載ミッション機器（2）

MMXには、ミッション目的を達成するため、11の科学観測機器が搭載される。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、経費の縮減にも寄与している。

名称	目的
サンプリング装置 (SMP)	火星衛星表面から深さ2cmに渡るまでのレゴリスを採取し、リターンカプセルに移送する。
ニューマチック採取機構 (P-Sampler)	空気圧による採取機構により、表層のレゴリスを素早く少量採取し、保持する。
サンプルリターンカプセル (SRC)	サンプリング装置によって得られた火星衛星表層サンプルを地球へ持ち帰る。
MMXローバ (MMX Rover)	火星衛星探査機本体より先に着地し、母船着陸・サンプル採取運用リスク低減のための表層レゴリスの各種物性取得、およびサイエンス観測の校正データ取得等を目的とするフォボス表面探査を行う。

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。

名称	目的
惑星空間放射線環境モニタ (IREM)	太陽高エネルギー粒子のエネルギースペクトルを取得し、被ばく線量評価手法を確立する。
高精細カメラ	高精細な火星衛星の撮影およびミッション可視化を行い、宇宙探査の運用性向上およびアウトリーチに貢献する技術を獲得する。

強調項目は海外機関/国内他機関からの提供機器。

2.4 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)	・ ガンマ線・中性子線分光計 (MEGANE) ・ ニューマティック採取機構 (P-Sampler) ・ 地上局支援 (管制、ミッションデータ受信)、他
ESA (欧州)	・ 深宇宙用通信機 (Ka帯) ・ 地上局支援 (管制、ミッションデータ受信)
CNES (フランス)	・ 近赤外線分光装置 (MacrOmega) ・ MMXローバ (MMX Rover) (DLRと共同) ・ 近接運用支援
DLR (ドイツ)	・ MMXローバ (MMX Rover) (CNESと共同) ・ 試験設備提供 (落下塔、微小重力模擬)

- ・ 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。

大型国際共同ミッションの主導について、詳細を参考5に示す。

3.1 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。2020年2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の所属機関)



3.2 資金計画およびスケジュール

JAXA内の審査会を経て、資金計画及びスケジュールの妥当性を確認した。特に、開発移行に先立ち実施した**フロントローディング活動**によって、技術リスク低減と今後のコスト増加リスクを低減させた開発計画を作成した。

- 資金計画：MMXに関する総開発費は、464億円である。
(2019年度フロントローディング分の16億円を含む。)

- スケジュール（打上げまで）

会計年度	2016-18	2019	2020	2021	2022	2023	2024
フェーズ	調査研究 開発研究	フロントローディング	開発				
マイルストーン ※ 1	PPR△ △MDR SRR△	PAR△ SDR△	PDR△	CDR△		PQR△	△打上
探査機システム	概念検討 概念設計	予備設計	基本設計	詳細設計	維持設計		射場作業 初期運用・ 定常運用
	クリティカル技術 検討	フロントローディング活動※ 2	EM製作試験		PFM製作試験		
ミッション機器	概念検討 概念設計	予備設計	基本設計	詳細設計	維持設計	総合試験 作業支援	
	BBM試作試験		EM製作試験		PFM製作試験		
地上システム 運用準備	概念検討・概念設計		システム設計	システム構築			訓練
			運用設計	運用準備			

文部科学省宇宙開発利用

※ 1：PPR:プロジェクト準備審査、PAR:プロジェクト移行審査
MDR:ミッション定義審査、SRR:システム要求審査、SDR:システム定義審査、PDR:基本設計審査、CDR:詳細設計審査、PQR:開発完了審査
※ 2：重力天体表面探査技術（往路モジュール、着陸誘導機器、サンプリング装置）や探査機システム成立性検討等

フロントローディング

開発全体のリスク低減を目指し、新規性の高い重要技術について先行的に研究開発・実証を行うためMMXで初めて導入。**開発移行後の技術/コスト/スケジュールリスクを抑制**した、実現性の高い確実な計画として結実。

MMXフロントローディング

1. 重力天体着陸・表面探査技術の開発

往路モジュール開発: 火星衛星周回軌道投入/脱出時の大きな軌道速度を効率よく得るための化学推進系などを検討する。

着陸誘導機器の開発: 火星衛星近傍での安全かつ確実な運用に必要な要素技術開発を行う。(例: 表面環境の不確定性が大きな微小重力天体への安全な着陸、平坦な表面を期待できる狭い範囲への誘導、探査機の位置特定のために必要な画像照合航法など)

サンプリング装置の開発: 砂貫入機構、ロボットアーム、試料搬送機構について設計・試作を行うとともに、試験評価を継続して実施する。



フォボス表面シミュレーション画像



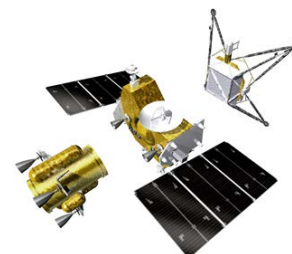
コアラー試作・試験

2. ミッション部成立性確認

再突入カプセル及び搭載観測機器(各種カメラ・分光計他)について、設計・試作・試験及び成立性確認を行う。FY2018までの検討で抽出された課題を解決するとともに、検討結果を探査機システム構成に反映する。

3. 探査機システム成立性確認

FY2018までの検討で抽出された課題の解決と、ミッション部成立性検討の結果をシステム構成に反映した成立性確認を行い、システム・ベースラインに反映する。



探査機システム検討

MMXフロントローディングについて、詳細を参考6に示す。

文部科学省宇宙開発利用部会 2020/2/19

29

	発生の可能性 大	発生の可能性 中	発生の可能性 小
発生の影響度 大	大	大	中
発生の影響度 中	大	中	小
発生の影響度 小	中	小	小

レベル	定義
小	発生の可能性は低く、このリスクは避けられる
中	発生の可能性があり、リスクを避けるための処置が必要である
大	発生の可能性は高く、代替手段が無い可能性がある

	リスク項目	リスクの内容	発生 の 可能性	発生 の 影響度	リスク レベル	処置方針・処置状況
1	クリティカル技術の実現性	①新規性が高いシステム要求に対し設計解の確度が充分か、②未だ洗い出されていない暗黙の機能・性能要求は無いのか、の2点について、開発開始前にクリティカル技術の実現性を見通す必要がある。	大 →小	大	大 →中	新規性が高く挑戦的なMMXにおいて、開発当初（基本設計開始時）からメーカが開発を請け負うため、それに先立つ活動として 基本設計に準ずるレベルのシステム、サブシステム検討（フロントローディング） を実施して、メーカにとってのリスクを十分に低減した。
2	火星衛星レゴリスの影響	はやぶさ2の着陸時の画像により、これまでの想定を超えるレゴリスの飛散が観察されたこと、また実際に光学機器への影響がみられたことから、今後のMMXの開発プロセスにおいて実効性の高い対策が要求される。	大	中	大	レゴリス飛散の環境条件を調査・検討し、耐環境性設計基準書に反映する。搭載機器に対しては、機能・性能に影響を及ぼす部位の識別の上、基準書で規定する環境に対して耐性を持つ設計を要求。一方、探査機システム側にもレゴリスが入らない様な設計とする。

MMXフロントローディングについて、詳細を参考 6 に示す。

4.1 プロジェクト移行審査のまとめ

審査項目に沿って審査を実施した結果、MMXのプロジェクト実行段階の計画は適切に定められており、要処置事項を期限までに処置することを条件として、**プロジェクト移行は可能と判断**した。

火星衛星探査計画（MMX）（以下、「MMX」という。）について、国際宇宙探査センターにおけるシステム定義審査（SDR）の結果を受け、プロジェクトマネジメント規程・実施要領に従ってプロジェクト実行段階への移行可否を判断するため、プロジェクト移行審査を実施した。
審査項目及び審査結果を以下に示す。

1. 審査項目

- （1）プロジェクト目標・成功基準、範囲の妥当性
- （2）実施体制の妥当性
- （3）資金計画の妥当性
- （4）人員計画の妥当性
- （5）開発スケジュールの妥当性
- （6）調達計画の妥当性
- （7）プロジェクトのリスク識別・対処方策の妥当性
- （8）教訓・知見の妥当性

2. 審査結果

審査の結果、火星衛星探査計画（MMX）のプロジェクト実行段階の計画は適切に定められており、要処置事項を期限までに処置することを条件として、プロジェクト移行は可能であると判断した。

4.1 プロジェクト移行審査：結果概要

	審査項目	審査結果
1	プロジェクト目標・成功基準、範囲	プロジェクト準備審査で確認されたプロジェクト目標について、火星衛星探査に関する他国の動向を踏まえると、意義・価値は低下していない。
2	実施体制	JAXA 外部を含む実施体制及びWBS について、プロジェクト計画書にて明確化されている。海外機関との協力分担内容も調整が進められており、協力の内容や枠組みが具体化しつつある。
3	資金計画	プロジェクトの準備段階から一定の削減がなされた。引き続き縮減努力を行う。
4	人員計画	プライム方式を採用する一方で、大規模プロジェクトであり、海外宇宙機関を含むステークホルダーが多くミッション機器が多数搭載されること、また、回収カプセルやサンブラ等のクリティカル技術が多いことを鑑みると、本チームのプロジェクト人員数は概ね妥当である。
5	開発スケジュール	開発期間全体で7ヶ月のマージンが確保されており、クリティカルパスの識別と対処計画も整理されている。ミッション機器の開発スケジュール、海外提供機器の提供時期とも整合している。
6	調達計画	- ミッション機器開発はFMから請負化することとしており、できる限りJAXAの介在を最小限とすることで、契約関係の簡素化による開発リスク低減が図られた。 - 探査機システムを構成する要素に係る「開発・製造企業」との関係について、調達単位、相手方との役割・責任分担は明確である。 - 海外関係機関との国際協力について、必要なパートナーは明確化されている。
7	リスク識別・対処方策	- フロントローディング活動の実施により、新規性が高かった「着陸ダイナミクス」、「着陸航法誘導」、「画像照合航法」について、設計解の精度を高め企業が請け負えるレベルに技術リスクを低減した。この結果として、候補企業より探査機システムの開発等を請負契約で実施する前提の提案を得ることができている。 - リスク識別書に各リスクの識別、評価、対処方針・計画が整理されている。
8	教訓・知見	- フロントローディング活動の結果として、開発リスクの低減による請負契約化の実現（検討以前は、請負化は困難との企業からの回答）、価格競争による開発費の低減、各社の提案の類似性から設計解の妥当性を確認することができたという効果が確認されており、先行投資の意義が認められる。 「はやぶさ2」のタッチダウン運用で得られた教訓が識別され、「レゴリス飛散対策」、「運用体制（運用支援業者調達による職員負荷の低減）」の2点が取り込まれている。

4.2 外部評価結果

プロジェクト移行審査に先立ち、外部専門家から、宇宙政策全般の観点からの評価を得た。MMXの計画が現時点において適切に設定されていることが確認されるとともに、いくつかの留意事項が指摘された。

火星衛星探査機（MMX）プロジェクト移行審査 外部評価結果

2019年6月24日
外部評価委員 角南 篤

1. 概要

火星衛星探査機（MMX）のプロジェクト移行にあたって、提示された外部評価資料に基づき以下の観点から評価を行った。評価結果を次項に示す。

＜評価の観点＞

MMXの計画やアウトカム目標について、以下に例示する観点を含め宇宙政策全般の観点から評価する。

- MMXの計画やアウトカム目標が、科学のみならず、外交、国際協力などの観点からも、我が国が優位性、独自性、イニシアティブ等を発揮できるものとなっているか。
- MMXにおいて獲得を目指す技術・知見は、国際宇宙探査に向けた中長期的な技術戦略に基づいて設定されているか。また、その技術・知見が国際宇宙探査において将来的な発展性を有するか。

2. 評価結果

評価の観点を踏まえ、MMXの計画が現時点において適切に設定されていることを確認した。今後、以下の点にも留意して進めることを期待する。

- 政策決定の観点から、MMX計画で「なぜ火星を目指すのか」の本質的な理由を説明できるよう準備しておくことが必要である。その際、目指すゴールが、科学だけでなく、国際宇宙探査の目標である「人類の将来に対する貢献」であることも含め、MMX計画の意義について理解を得ることが重要である。また、火星衛星の探査が火星本体の探査にどのようにつながるものであるかの説明も準備しておくことが望ましい。宇宙探査は時間がかかるものなので、早く始める必要があるが、その際、上記の説明と関連づけた説明が必要である。
- 国際協力だけでなく国際競争の観点から、また、技術継承の観点から、MMX計画においては、これまでに培ってきた我が国が強みを有する技術を活用し貢献すること、また、その技術を発展させていくことが重要である。MMXは、「はやぶさ」や「はやぶさ2」での微小重力天体探査技術を最大限活用する計画であることを確認した。
- 「国際宇宙探査」に関しては、世間では月の探査と火星の探査は別個のものと受け止められている印象がある。国民の理解を得るためにも、JAXAとして、月から火星につながる目標を検討することも必要と考える。

以上

参考資料

これまでの火星衛星探査、及び火星探査をめぐる各国の動向
火星衛星探査に向けた国際的な惑星保護方針への貢献
ミッション要求（中目的レベル）
成功基準（詳細）
大型国際共同ミッションの主導
MMXフロントローディングについて

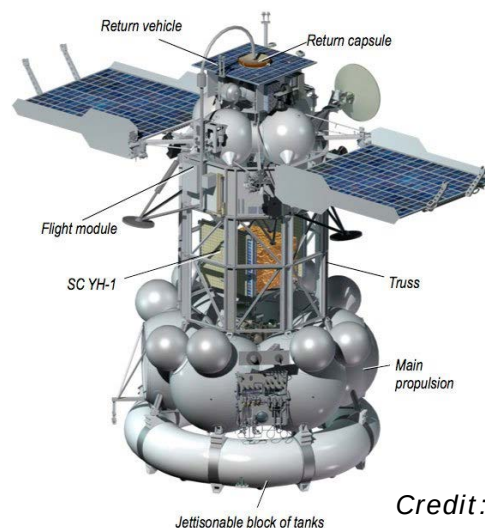
【参考1-1】これまでの火星衛星探査

火星衛星の調査は火星探査草創期から繰り返し行われているが、副次的なフライバイ観測にとどまる。フォボスを目指した探査はいずれも到達に失敗。現時点で、実現見込みのある他国の火星衛星探査計画はない。



©NASA

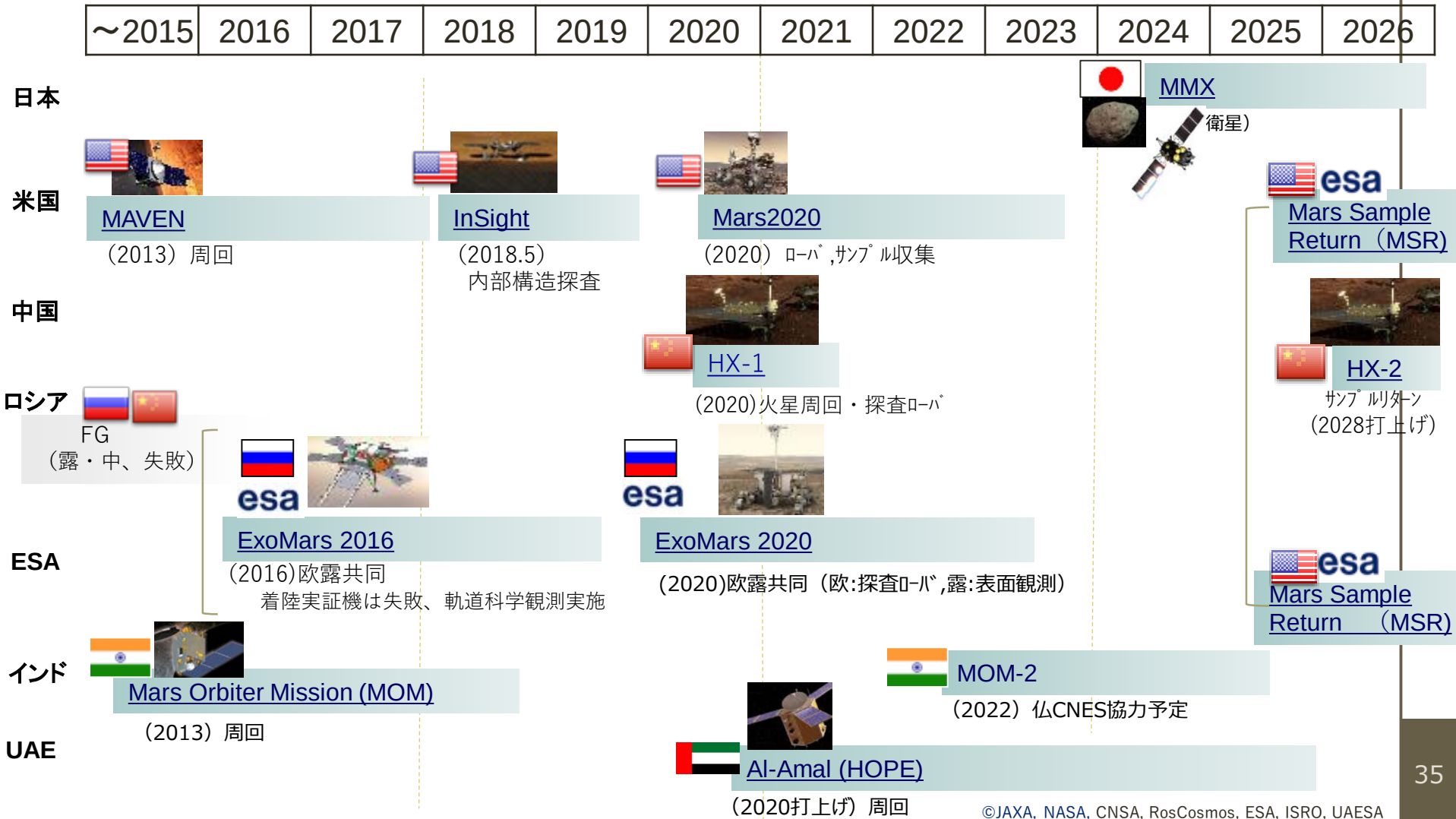
Viking 1号軌道船が1978年に撮像したフォボス
反射スペクトルから炭素質小惑星との近縁性が指摘された。またクレーター密度から、天体の年齢が太陽系年齢と同程度であることが示唆される。



Credit: NPO Lavochkin

2011年に打ち上げられたロシアのフォボス探査機Phobos-Gruntは打ち上げ直後の不具合により地球脱出に失敗。現時点で、再打ち上げの見込みはたっていない。

- 火星：2020年前後に各国の火星探査ミッションが集中している。引き続き、欧米、中国が2020年代中盤以降のミッションの準備を進めているところ。（米・ESAのMSRは米国で概念検討の予算が要求された段階、中国のHX-2はどこまで具体化しているか不明）。
- 火星近傍：火星衛星への探査は日本が推進するユニークな計画（2011年にロシアがフォボスからのサンプルリターンを目指す探査機「フォボス・グレント」の打ち上げに失敗）。



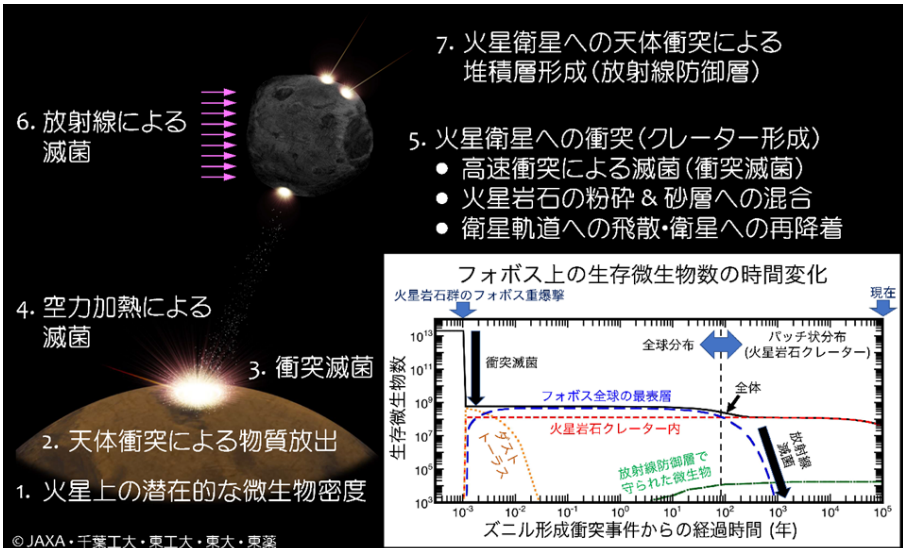
【参考2】火星衛星探査に向けた国際的な惑星保護方針への貢献

火星衛星の微生物汚染評価に関する科学研究を大学と共同実施。成果は、国際宇宙空間研究委員会（COSPAR）の惑星保護パネルに受理され、2019年3月開催のCOSPAR理事会でMMXに対する勧告として了承された。

【ポイント】

- 宇宙探査を行う上では、各国の関係者が従わなければならないルール（惑星保護方針）がある。
- そのルールには、今後の宇宙探査では重要になることが明らかであるにも関わらず、未確定だった対象天体がある。具体的には、火星衛星（フォボス・ダイモス）。
- そのルール設定に必要な科学的活動において、日本の研究チームが主導的な役割を果たした。具体的には、過去500万年以内に火星から火星衛星に運ばれた可能性のある微生物の火星衛星での分布を評価し、MMXで持ち帰る試料中に微生物が含まれる可能性が国際的に合意されている上限値を大きく下回り、「安全」であることを科学的・定量的に示した。
- この結果は、COSPARに受理され、MMXを「はやぶさ2」と同じレベルの惑星保護方針で行うことに対して、国際的な合意を得ることができた。

【図】本研究で検討した火星上のズニルクレーター形成衝突事件からの時系列と物理過程（フォボスにおける検討例）



詳細は2019年9月6日付 JAXAプレスリリースを参照のこと
http://www.jaxa.jp/press/2019/09/20190906b_j.html

【参考3】ミッション要求（中目的レベル）

ミッション目標をブレイクダウンし、それに対応する形でミッション要求を設定した。ここには、中目的 1.1に関するミッション要求を示す。

表：ミッション要求の抜粋

大目的1 火星衛星の起源を明らかにし、内外太陽系接続領域における惑星形成過程と物質輸送に制約を与える。

中目的1.1 Phobosの起源が小惑星捕獲なのか巨大衝突なのかを明らかにする。

MR1.1.1 Phobosの構成物質の分布を把握するために、地形と対応させて、含水鉱物吸収等の分光学的物質分布を、全球の主要部分（水平空間分解能20 m以下）および採取地点周辺半径50 m以上（同1 m以下）において明らかにする。また、衛星全球平均でのSi/Fe比等を20%以内の精度で決定する。

MR1.1.2 Phobosの起源を制約するために、Phobos表面の多様性と代表性に留意し、産状を記録して表面から2 cm以深まで含む10 g以上の粒子状試料（Phobos試料）を採取し、その主要成分を、形成時の構成物質である衛星固有物質として特定し、その組織、鉱物/元素/同位体組成（酸素やクロムなど）を衛星起源が特定できる精度で測定する。

MR1.1.3 Phobosの起源を内部構造から制約するため、(1) 内部氷からの分子放出率を 10^{22} 分子/s未満の検出限界で計測し、(2) Phobos質量の10%以上の氷の局在化による密度構造の不均質の有無を調べ、(3) 表層付近の密度コントラストの有無を調べる。

【参考3】ミッション要求（中目的レベル）

ミッション目標をブレークダウンし、それに対応する形でミッション要求を設定した。ここには、中目的1.2ab,1.3に関するミッション要求を示す。

表：ミッション要求の抜粋

大目的1 火星衛星の起源を明らかにし、内外太陽系接続領域における惑星形成過程と物質輸送に制約を与える。	
中目的1.2a	【Phobosが小惑星捕獲起源の場合】 地球型惑星領域へ供給される始原物質の組成とその移動過程を解明し、火星表層進化の初期条件を制約する。 【MR1.2a】 初期太陽系物質進化、揮発性元素供給量の制約のために、Phobos試料の衛星固有物質に対して、組織、元素/同位体組成、形成年代等を必要な精度で分析し、有機物や含水鉱物の情報も抽出する。また、衛星捕獲前後の衝突環境を、回収試料の衝突変成年代分布と衛星表面のクレータの分布の計測から明らかにする。
中目的1.2b	【Phobosが巨大衝突起源の場合】 地球型惑星領域における巨大衝突と衛星形成過程を理解し、火星の初期進化過程に及ぼす影響を評価する。 【MR1.2b】 巨大衝突過程の制約のため、Phobos試料の衛星固有物質に対し、組織、元素/同位体組成、変成年代等を必要な精度で分析し、到達温度、衝突時期および原始火星起源と衝突天体起源の両成分の構成物質と混合比を推定する。また、衛星全体での両成分の混合比を、全球でのSi/Fe比等の計測から制約する。
中目的1.3	Deimosの起源に新たな制約を加える。 【MR1.3】 Deimosの構成物質の分布を把握するために、含水鉱物吸収等の分光学的情報に基づき、地形と対応させた衛星構成物質の全球の特徴的部分での表層分布を水平空間分解能100 m以下で明らかにする。

【参考3】ミッション要求（中目的レベル）

ミッション目標をブレークダウンし、それに対応する形でミッション要求を設定した。ここには、中目的2.1-2.3に関するミッション要求を示す。

表：ミッション要求の抜粋

大目的2 火星衛星からの視点で、火星圏変遷の駆動メカニズムを明らかにし、火星圏進化史に新たな知見を加える。

中目的2.1 火星圏における衛星の表層進化の素過程に関する基本的描像を得る。

【MR2.1】 火星衛星の表層進化過程を知るために、(1) 周衛星環境を観測的に制約し、(2) Phobosの表層地質構造（クレータ、岩塊、レゴリス層の厚さや堆積状態）を水平空間分解能20 m以下で把握し、(3) Phobos試料の宇宙風化・変成の状態を解明する。

中目的2.2 火星表層変遷史に新たな知見と制限を加える。

【MR2.2.1】 火星表層の化学状態やその変遷に制約を与えるため、10 g以上のPhobos試料中に衛星形成後に火星から飛来した物質（火星飛来物質）を探し、適切な試料が存在する場合にはその元素/同位体組成や形成年代、残留磁化等を明らかにする。

【MR2.2.2】 火星史を通じた大気散逸量に制約を与えるために、現在の火星から散逸するイオンの主要成分（ O^+ 、 C^+ 、 N^+ 、 Ar^+ 等）の組成比と同位体比を50%以内の精度で測定する。

中目的2.3 火星気候の変遷に関わる火星大気物質循環のメカニズムに制約を与える。

【MR2.3】 火星表層のダストと水の輸送過程に制約を与えるため、異なる季節において、高高度の赤道周回軌道から火星大気中のダストストーム、氷雲、および水蒸気の中低緯度の分布を時間分解能1時間以内で連続観測する。

【参考3】ミッション要求（中目的レベル）

ミッション目標をブレークダウンし、それに対応する形でミッション要求を設定した。ここには、中目的3.1-3.3に関するミッション要求を示す。

表：ミッション要求の抜粋

大目的3 宇宙探査を先導する技術を獲得する。	
中目的 3.1 火星圏への往還技術および惑星衛星圏への到達技術を獲得する。	
	【MR3.1.1】 火星圏に到達し、目標とする衛星の擬周回軌道に投入する
	【MR3.1.2】 火星圏を離脱して地球圏に到達し、地上でペイロードを回収すること
中目的3.2 火星衛星表面への到達技術・滞在技術および天体表面上での高度なサンプリング技術を獲得する。	
	【MR3.2.1】 火星衛星表面に対する対地誘導航法を行い、着地すること
	【MR3.2.2】 火星衛星表面に滞在し、着地点周辺にてサンプリング装置を駆動し、火星衛星表面上でサンプリング装置の動作を確認すること
	【MR3.2.3】 火星衛星近傍にてサンプル採取したことを確認すること
中目的3.3 新探査地上局との組合せに最適な通信技術を獲得する。	
	【MR3.3.1】 新探査地上局を用いて、「はやぶさ2」技術をベースとする内容を上回るミッションデータ伝送能力を実現すること
	【MR3.3.2】 新探査地上局を用いて、火星圏探査活動において、伝送距離が最大になる場合においても、あかつき、はやぶさ2の2倍以上のミッションデータ伝送能力を実現すること

【参考4】成功基準（理学：詳細）

大目的	アウトプット目標				アウトカム目標
		ミニマム	フル	エクストラ	
理学目的1： 火星の衛星が、小惑星が捕獲されたものか、火星への巨大衝突で生じた破片が集合し形成されたものかを明らかにし、火星そして地球型惑星の形成過程に対する新たな描像を得る。	中目的	近接観測により、衛星表層の物質分布を明らかにし、衛星の起源を推定する。	近接観測に加え、Phobos表面から回収した試料を分析することで、衛星の起源を特定する。また、起源に応じて火星の材料物質と衛星形成過程に新たな知見を得る。	Phobosの構造不均質性を明らかにする。衛星の起源に応じ、前段階も含む捕獲あるいは衝突の過程とその初期火星への影響を明らかにする。	分野： 惑星科学 目標： 火星衛星起源を特定するデータに基づいた地球型惑星形成モデルの構築による、惑星科学の発展。 Before/After： これまで不明確な情報のため火星衛星の起源が説明できず、惑星形成論の不備を端的に示すものであった。ミッションの成功により火星衛星起源を特定するに至れば、その形成モデル構築を促すのみならず、火星そして地球型惑星の形成過程モデルが刷新され、多様な系外惑星の形成論まで見据えた展開が期待される。
		MO1.1： Phobosの起源が小惑星捕獲なのか巨大衝突なのかを明らかにする。	以下のいずれかを達成すること※：(1) Phobosの主要領域について、地形と分光学的特性を基盤岩物質の新鮮な露出面が判別可能な分解能で明らかにする。(2) 起源推定指標となるPhobos表層の元素存在度比を明らかにする。※	以下の2項目のいずれかを達成すること：(1) Phobos表層の地質の異なる2地点以上からの回収試料を分析し、それらを両衛星表面の地形・分光マップと対応づけ、衛星表面の地質分布を示す。(2) Phobos内部の氷の存在もしくは内部密度構造の不均質性を示唆する証拠を示す。	
		MO1.2a 捕獲起源の場合：地球型惑星領域へ供給される始原物質の組成とその移動過程を解明し、火星表層進化の初期条件を制約する。 MO1.2b 巨大衝突起源の場合：地球型惑星領域における巨大衝突と衛星形成過程を理解し、火星の初期進化過程に及ぼす影響を評価する。	捕獲起源の場合：始原天体としての物質科学的特徴を特定する。また、回収粒子の形成年代と衝突変成年代を求める。 巨大衝突起源の場合：火星起源成分と衝突天体起源成分を特定する。また、回収試料粒子の衝突変成年代を求める。	捕獲起源の場合：Phobosが保持する始原物質の組成と年代から、天体移動過程と火星表層進化における役割を示す。 巨大衝突起源の場合：衝突イヴェントの規模を特定する。また、回収試料粒子の衝突変成年代値の分布と、表面クレータ密度の観測から、巨大衝突年代を特定する。	
		MO1.3： Deimosの起源に新たな制約を加える。	Deimosの特徴的領域について、地形・分光マップを作成し、Phobosと比較する。※	Phobosからの回収試料の知見も踏まえて、Deimosの起源を制約する証拠を提示する。	
理学目的2： 火星衛星および火星の変遷をもたらすメカニズムを明らかにし、火星衛星を含めた「火星圏(*1)」の進化史に新たな知見を加える。	中目的	近接観測により、衛星表層の風化変成度・不均質性を明らかにし、衛星特有の表層変遷過程に対する新たな知見を得る。	衛星近接および着陸観測に加え、Phobos表面から回収した試料を分析することで、衛星表層の宇宙風化等の状態とそのメカニズムに対する新たな知見を得る。また、回収試料中に火星飛来物質(*2)を探すとともに、火星の散逸大気と気象の観測を行うことで、「火星圏」内の物質輸送過程と進化史に対する新たな知見を得る。	試料分析と近接観測結果を融合し、火星圏における衛星表層進化過程の特徴を明らかにする。また、現在に至る火星表層環境の長期進化に、回収試料分析、大気観測から制約を加える。	分野： 惑星科学・アストロバイオロジー(*3) 目標：「火星圏」の変遷進化過程の新たな描像を得るとともに地球型惑星表層に液体の水が保持されるための条件を解明することによる、惑星科学とアストロバイオロジーの発展 Before/After：これまでの火星圏の進化モデルは専ら限られた地点・時代の火星表層データに基づくものであり、表層水の行方などその駆動メカニズムとともに理解が不十分であった。本ミッションにより火星衛星とその近傍における火星圏の総合的観測という新たな視点の導入の結果、駆動メカニズムとカプセルした火星圏変遷史のデータが得られ、火星圏のみならず地球型惑星の表層環境変遷モデルの構築という惑星科学の展開に加えて、「ハビタブルプラネット(*4)」の形成条件の解明というアストロバイオロジー的研究の発展が期待される。
		MO2.1：火星圏における衛星の表層進化の素過程に関する基本的描像を得る。	Phobos表面を高空間分解能で広域撮像し、特徴的領域について衛星表層の風化・変成度ならびに不均質性を明らかにする。※	周衛星環境、衛星レゴリス層、回収試料の情報を統合し、小惑星の表層データと比較することで、火星圏における衛星表層進化過程を明らかにする。	
		MO2.2：火星表層変遷史に新たな知見と制限を加える。	以下の2項目を達成すること：(1) 回収試料の分析から、衛星形成後に堆積した火星物質（火星飛来物質）を探し、1%レベルの存在があれば確認する。(2) 現在の火星から散逸するイオンの主要成分の組成比・同位体比を測定する。	以下の2項目のいずれかを達成すること：(1) 火星飛来物質が十分に存在する場合には、分析により、火星表層環境の進化過程を制約するデータを得る。(2) 火星からの大気の総散逸量を50%以内の精度で求める。	
		MO2.3：火星気候の変遷に関わる火星大気物質循環のメカニズムに制約を与える。	火星大気中のダストストーム、氷雲、および水蒸気の分布の時間変化を明らかにする。※	火星大気中のダストと水の分布の時間変化を1時間程度の時間分解能で明らかにし、その季節変化を調べる。	

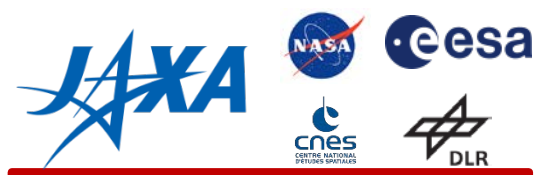
【参考 4】成功基準（探査技術獲得：詳細）

大目的	アウトプット目標			アウトカム目標
		ミニマム	フル	
探査技術獲得の目的 1： 宇宙探査を先導する 技術を獲得する。	中目的	火星衛星近傍に到達して、火星衛星表面に着地する。また、探査機の深宇宙通信能力を引き上げる。	火星衛星のサンプルを採取し、地上で回収する。また、探査機の深宇宙通信能力を従来 の2倍以上に引き上げる。	分野： 深宇宙探査工学 目標： より高い段階の深宇宙航行・探査技術を獲得することによる、高度かつ自在なミッションの創出。 Before/After： これまでの深宇宙探査においては、我が国は多くの場面で他国を追い駆ける立場にあった。本ミッションで、より高い段階の深宇宙航行・探査技術を獲得することで、より多面的かつ高度な科学観測や探査活動を実現できるようになり、宇宙開発利用全体の将来に向けた貢献や人類的課題の解決に向けた先駆けになることができる。
	MO3.1： 火星圏への往還技術および惑星衛星圏への到達技術を獲得する。	火星圏に到達し、目標とする衛星の擬周回軌道に投入する。	火星圏を離脱して地球圏に到達し、地上でペイロードを回収する。	
	MO3.2： 火星衛星表面への到達技術・滞在技術および天体表面上での高度なサンプリング技術を獲得する。	火星衛星表面に着地する。	火星衛星表面に静止した状態での探査機の正常動作を確認し、着地点周辺にてサンプリング装置を駆動し、火星衛星表面上でサンプリング装置の動作を確認するとともに、火星衛星近傍にてサンプル採取したことを確認する。	
	MO3.3： 新探査地上局との組合せに最適な通信技術を獲得する。	新探査地上局を用いて、「はやぶさ2」技術をベースとする内容を上回るミッションデータ伝送能力を実現する。	新探査地上局を用いて、火星圏探査活動において、伝送距離が最大になる場合においても、あかつき、はやぶさ2の2倍以上のミッションデータ伝送能力を実現する。	

【参考5】大型国際共同ミッションの主導

数々の宇宙科学ミッション、および国際宇宙ステーション（ISS）で培ってきた海外宇宙機関との協調関係の上に、我が国の探査技術への信頼を連ね、最大級の国際共同探査ミッションを主導。

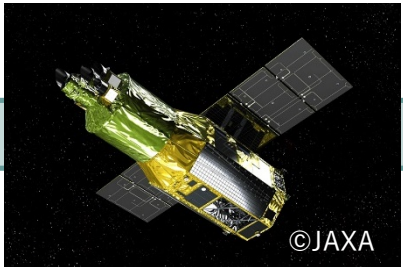
宇宙科学ミッションでは、従来から、相互に、他国主導のミッションに搭載機器を提供する形で、国際協力による 機会活用と効率化を図ってきた。MMXは、探査分野で日本が主導する最大級の国際共同ミッションである。



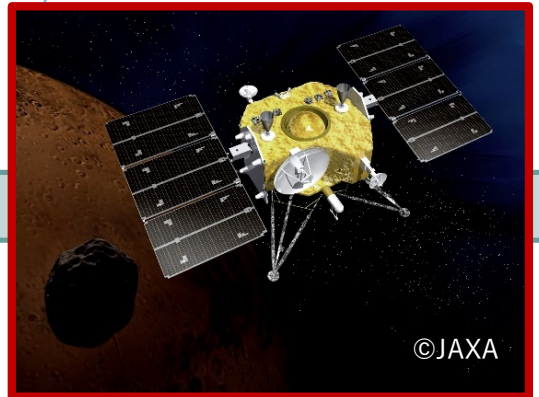
日本主導ミッションに
海外が参加



太陽観測衛星「ひので」

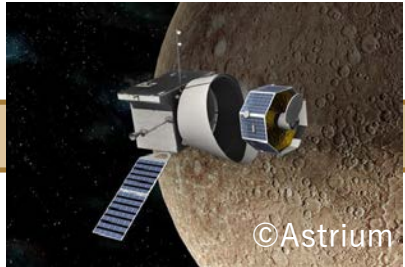


X線分光撮像衛星「XRISM」



火星衛星探査機「MMX」

海外主導ミッションに
日本が参加



水星探査機「Bepi Colombo」

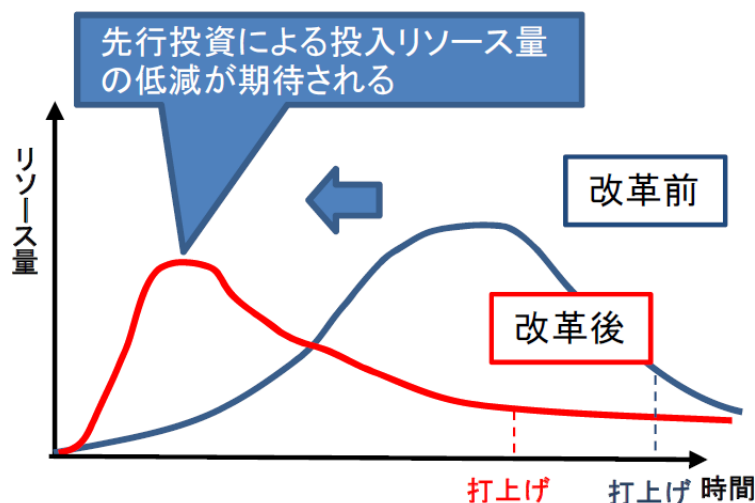


木星探査機「JUICE」

【参考6】MMXフロントローディングについて（1/6）

➤ フロントローディング実施計画

新規プロジェクトとして有力な候補である火星衛星探査計画について、初期段階での不確定性を低減し、またその後の開発全体のリスクを低減するため、新規性（リスク）の高いミッション系機器等キーとなる重要技術（クリティカル技術）について、先行的に研究開発および実証を行う。



宇宙科学・探査小委員会
(第19回)資料より抜粋・再掲

- 技術提案方式（RFP）により、探査機システム開発の請負企業を選定した。この企業とフロントローディングを実施していく。

【参考 6】MMXフロントローディングについて（2/6）

➤ フロントローディングの進捗

2019年4月に開始した今回のフロントローディング活動（約半年が経過）における深いレベルでの検討の成果として、1）重力天体着陸・表面探査技術、2）ミッション部成立性、3）探査機システム成立性について技術的成立性の見通しが立った。これにより、現時点で、技術的成立性と資金的成立性及び不具合による延期回避の見込みを立てることに成功した。

➤ フロントローディングの成果

プロジェクト実行段階において万が一、重要な開発課題について技術課題が顕在化した場合、その技術課題の対策・実証のみにとどまらず、周辺の装置や衛星システム全体にも波及するため設計変更/追加試験等、手戻りの作業コストの発生やスケジュールの大幅遅延等のリスクが想定される。しかし今回のフロントローディングの実施により、プロジェクト実行段階では技術リスクは低減され、手戻り作業等による想定外の追加コストは最小限に抑えることができ、全体として開発コストは十分に削減できると見込んでいる。
これは、“実現性の高いプロジェクト”を確実に立ち上げることを狙った今回のフロントローディングの取り組みの成果である。

➤ 2019年度後半は、当初計画通り、上記成立性の成果を開発計画へ反映して確定させ、開発移行に向けた活動を実施する予定

【参考6】MMXフロントローディングについて（3/6）

重力天体着陸・表面探査技術として、往路モジュール・着陸誘導機器・サンプリング装置の開発を行い、いずれも成立性の目途を得た。

MMXフロントローディング：重力天体着陸・表面探査技術の開発

実施内容	具体的な実施内容（例）
○往路モジュールの開発 火星衛星周回軌道投入/脱出時の大きな軌道速度を効率よく得るための化学推進系などを検討する	メインエンジンのオフモジュレーション制御による軌道姿勢制御方式の工夫（推力軸の重心オフセットによる外乱トルク発生を防止）により、推薬量が削減できる見込みを得た。質量制約の厳しいMMX探査機にとって、有効な対策となっている。
○着陸誘導機器の開発 火星衛星近傍での安全かつ確実な運用に必要な要素技術開発を行う。（例：表面環境の不確定性が大きな微小重力天体への安全な着陸、平坦な表面を期待できる狭い範囲への誘導、探査機の位置特定のために必要な画像照合航法など）	定量的な精度評価をするために、火星衛星周りのダイナミクスシミュレータを構築した上で、基本設計レベルの航法誘導精度解析を実施している。 (a) 高度 15km (b) 高度 3.5km (c) 高度 0.1km ©MELCO 図 4.3.6.2-1 Phobos 表面のシミュレーション画像例 画像照合航法アルゴリズム検証には、フォボス表面の密なクレータ分布を要する。そのため、解析・シミュレーションによって、カメラ画角内に収まるクレータ密度を見積もり、アルゴリズムに支障がないことを確認している。

【参考6】MMXフロントローディングについて（4/6）

重力天体着陸・表面探査技術として、往路モジュール・着陸誘導機器・サンプリング装置の開発を行い、いずれも成立性の目途を得た。

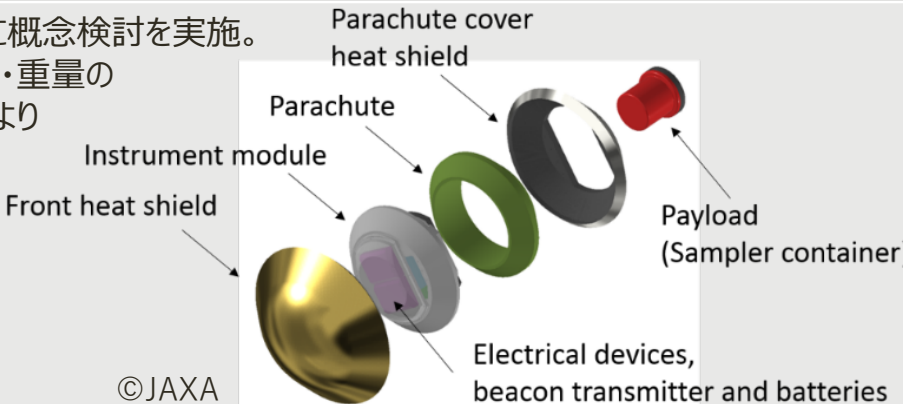
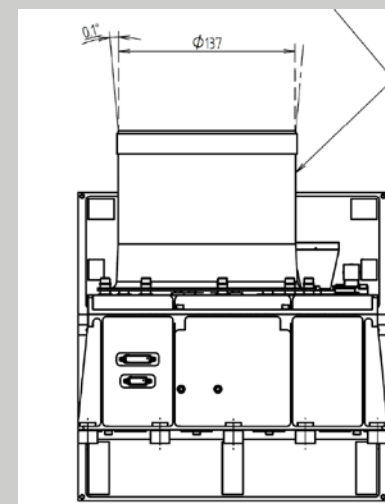
MMXフロントローディング：重力天体着陸・表面探査技術の開発（続）

実施内容	具体的な実施内容（例）
○サンプリング装置の開発 砂貫入機構、ロボットアーム、試料搬送機構について設計・試作を行うとともに、試験評価を継続して実施する。	火星衛星表面での運用シナリオを検討し（左上図）、「火星衛星表面から地下2cm以上の深さのサンプルを採取すること。」のミッション要求を満たせるロボットアーム（右上図）及びコアラ機構（砂貫入機構；左下図）について、「コアラを射出する」、「コアラの先端にフタをする」、「コアラを収納するために切り離す」という機能を試験した（右下図）。

【参考 6】MMXフロントローディングについて（5/6）

ミッション部成立性確認を行い、結果を探査機システム構成に反映した。

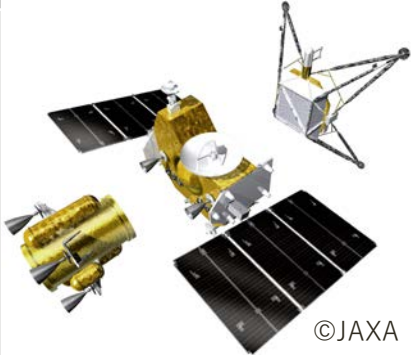
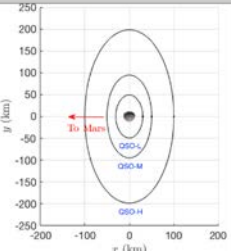
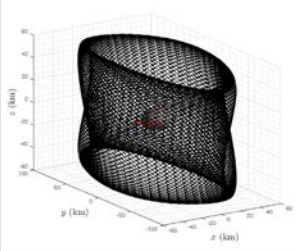
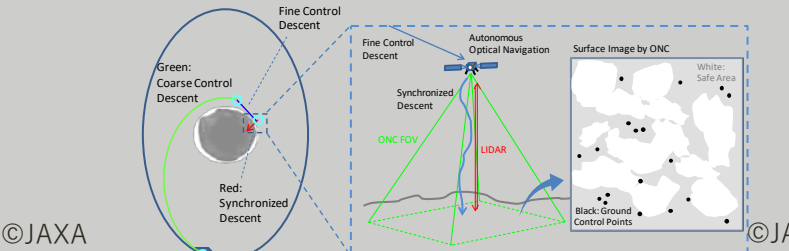
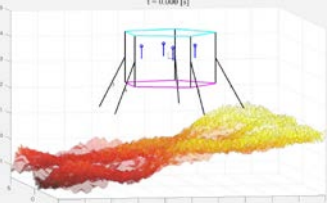
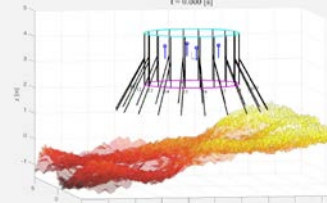
MMXフロントローディング：ミッション部成立性確認

実施内容	具体的な実施内容（例）
○再突入カプセル及び搭載観測機器（各種カメラ・分光計他）について、設計・試作・試験及び成立性確認を行う。FY2018までの検討で抽出された課題を解決するとともに、検討結果を探査機システム構成に反映する。	「はやぶさ」カプセルの実績をもとに概念検討を実施。その結果、搭載ペイロードの体積・重量の増加に伴い、「はやぶさ」カプセルよりサイズアップ（直径60cm）を設計ベースラインとした。  ©JAXA
	火星衛星の表面形状・密度分布を把握するためにレーザー高度計（LIDAR）を搭載する。これについて、反射光の受信エネルギーをもとに、回線計算を実施し、要求性能を設定・配分した。この要求性能が満たされれば、距離100km以下での測距が成立することを確認しているが、このためレーザ出力向上の必要があり、この設計・試験・試験を行っている。（右図はLIDAR構造図面）  ©NEC

【参考6】MMXフロントローディングについて（6/6）

探査機システム全体の成立性検討を行い、モジュール構成を始めとする探査機設計ベースラインを確定した。

MMXフロントローディング：探査機システム成立性確認

実施内容	具体的な実施内容（例）
○ FY2018までの検討で抽出された課題の解決と、ミッション部成立性検討の結果をシステム構成に反映した成立性確認を行い、システム・ベースラインに反映する。	システム成立性の確認 MMXでは「はやぶさ2」の約2.5km/s、SLIMの約3km/sと比べて、格段に大きな約5km/sの総ΔVが要求されている。また、小重力の天体への着陸に伴い、着陸脚や太陽電池パドルの構成などにMMX特有な設計が求められる。そのため、アンテナや観測機器の配置、ステージング、推進系構成等を幅広く検討し、効率の良いシステムとして、3モジュール構成を採用した。 （図：探査機モジュール構成案）  ©JAXA
	フォボス近傍での観測運用、表面への着陸運用、サンプリング運用等の検討を進め探査機システムへの要求を整理した。地球から遠方で、短時間の内に必要な運用を安全に完了するため、自律化が重要である。（左図）観測運用軌道（QSO）の例、（右図）着陸降下運用の概要    ©JAXA
	実際の運用を想定した着陸時の運動（剛体・弾性体）の動的な解析を実施した。低重力環境および複雑地形での簡易スロッシングモデルを含んだ多脚探査機の着陸ダイナミクスシミュレーション （右図：中央大学 前田助教による結果）  

了