

火星本星探査構想の検討について

令和5年（2023年）10月3日

宇宙科学研究所

1. 概要



- 内閣府宇宙政策委員会宇宙科学・探査小委員会において昨年度、新たな宇宙基本計画に盛り込むべき事項として、政府が国際協力を進めるアルテミス計画への寄与を念頭に、火星本星探査の必要性についてWGが設置され、議論が行われた。
- この議論を踏まえ、2040年代のアルテミス計画を見据え、宇宙基本計画（本年6月閣議決定）において火星本星探査に関する検討を行うこととされた。
- 本方針に基づき、宇宙研内外の理工研究者により構想の検討が実施されているところ。
- 本資料では、現状の火星本星探査の考え方や具体的な構想について、検討例として提示し、今後の在り方に関する議論に貢献する。

2. 宇宙基本計画の関係記載



■ 宇宙基本計画（R5.6.13閣議決定）

（関係箇所抜粋）

4. 宇宙政策に関する具体的アプローチ

（3）宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造に向けた具体的アプローチ

火星本星の探査については、米国と中国による大規模な計画が先行する中、将来の有人探査に向けて、2030年代には国際的な役割分担の議論が開始される可能性があるため、2040年代までの長期的視点を持って、我が国が有利なポジションを得るために、産学のリソースを最大限に活用して、米中を始め他国が有していない我が国の独創的・先鋭的な着陸技術・要素技術等の発展・実証を目指すとともに、火星本星の探査に関する検討を行う。

3. これまでの火星への取組



アルテミス計画では2040年代の火星有人探査を究極的な目標に掲げているが、我が国は現状、火星本星探査に関する知見・技術で大きく後れをとっている状況。

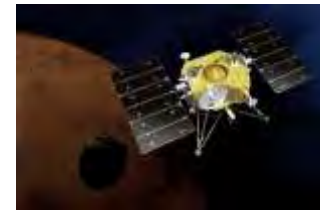
1. 火星探査機のぞみ【1998年打上げ】

火星の上層大気を太陽風との相互作用に重点をおいて研究することを目的とした日本初の火星探査機。火星への航行中、度重なるトラブルで火星周回軌道に乗せるために必要な装置を働かすことができず、2003年に火星周回軌道投入を断念した。



2. 火星衛星探査計画MMX【2024年打上げ予定】

世界初の火星衛星サンプルリターンミッション。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、2つの火星衛星の起源や火星圏（火星、フォボス、ダイモス）の進化の過程を明らかにする。



3. 国際火星探査計画（Mars Ice Mapper: MIM）【2030年代前半打上げ想定】

合成開口レーダ（SAR）を搭載した火星周回機により、火星の表面下の水氷分布の把握（マッピング）を行う。NASA-CSA-JAXA-ASIの4機関による初めての国際火星探査計画としてミッションコンセプトを検討中。



4. 海外動向

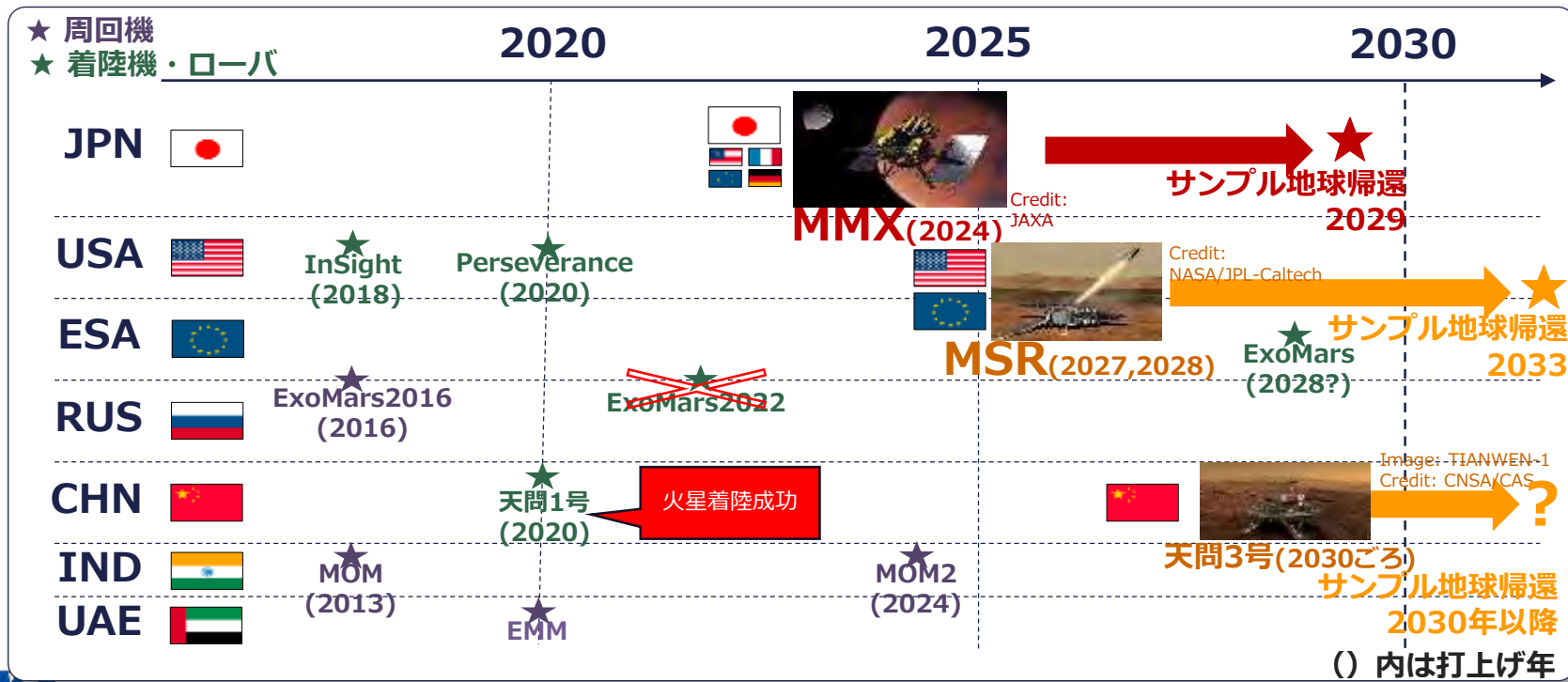


<運用中>

- **Perseverance(2020,米)**：生命の痕跡探査および火星表面のサンプル採取が目的。
- **天問1号(2020,中)**：周回機・着陸機・ローバからなるミッション。ローバ(祝融1号)による火星表面の観測を継続中。

<打上予定>

- **MMX(2024,日)**：火星圏の観測と火星衛星フォボスからのサンプルリターンを行う。
- **MOM2(2024,印)**：MOM1に続く火星周回機。詳細は未発表。
- **MSR(2027,米・欧)**：Perseveranceのサンプルを地球へと持ち帰る。周回機は2027年、ランダは2028年打上げ予定。
- **ExoMars(2028,欧)**：ESAがロシアと共同で2022年の打上げを目指し開発進めるも、ウクライナ侵攻を機に決別。ESA側は2028年の打上げを目指す。
- **天問3号(2030頃,中)**：火星表面からのサンプルリターンミッション。MSRと同様、サンプル回収用のローバと地球帰還用の周回機を別々に打ち上げる計画。



5. 構想にあたっての基本方針



1. プログラム化（3STEP）による段階的な実施

- 宇宙基本計画における2040年代までの長期的視点を持って検討するという方針に基づき、プログラム化を図り戦略的に取り組むことが必要。
- 具体的には、我が国の独創的・先鋭的な技術を生かし、例えば、STEP1（着陸実証）、STEP2（高精度着陸実証）、STEP3（本格探査）と段階的に技術蓄積、高い科学成果創出を図ることが重要。

2. アルテミス計画（月・火星）への寄与及び連携

- 「アルテミス計画」の最前線が2040年代には火星に移行すると見込まれることを踏まえると、2030年代には国際火星探査における役割分担の議論が開始される可能性があるため、日本が有利なポジションを獲得する上で、早期に火星着陸・探査技術を実証することが必要。
- また、月・火星探査の連携の観点から、月において火星への発展性のある技術として無人小型ローバ等を実証し、火星探査へ繋げることが重要。

3. 宇宙研・コミュニティ・企業による連携

- 人類の活動領域の拡大に伴い、新たな市場の構築が見込まれるため、産学のリソースを最大限に活用して進めていくことが必要。
- 具体的には、キーとなる技術開発について、JAXAの主体的な研究開発のみならず、大学・民間の意向に基づく研究開発を活用することや、火星探査の機会を開放し、民間サービス（通信、画像ビジネス実証）や大学の挑戦的なCube-Satを放出する等、オールジャパンでの取り組みとしてプログラムを発展させていくことが重要。

STEP3での獲得目標

- 「火星表面の任意の場所（極域・高山を含む）」への着陸（輸送）を、日本ならではの「コンパクト」な規模感（高頻度輸送が可能なリーズナブルなサイズ）で実現する。

STEP1～STEP3のプロセスの中で

- ◆ 火星など大気のある惑星への大気圏突入技術を革新させる次世代のEDL（Entry, Descent, Landing）技術である展開型エアロシエル技術を獲得する。火星着陸機のみならず、地球低軌道からの帰還システムへの応用も視野にいれる。
- ◆ 月探査で獲得した軟着陸技術、ローバ技術、越夜（電源確保技術・低温対策技術）などを、火星探査へ応用し、火星表面での長期間の自在な活動を実現する。
- ◆ 将来にわたり、多くの惑星探査に共通的に利用可能な深宇宙輸送機（共通深宇宙OTV）を開発する。この輸送機は、深宇宙惑星探査のみならず、月・地球圏での自在の輸送にも活用することを目指す。また、ラグランジュ点ミッション等への波及効果も検討。

- 「生命を育む惑星」とはいかなる惑星かという疑問は、根源的な科学の問いである。地球生命は表層の水・物質の循環から、物質とエネルギーを得て生命活動を行う。異なる天体、原始地球でも、生命は水・物質の循環に濃厚に影響を受け、これを駆動力として誕生・進化したに相違ない。そうであれば「生命を育む惑星」の本質とは「水・物質の循環」の理解に他ならない。
- 惑星で生じる「水・物質の循環」とは、単なる大気や海洋の動態に留まらない。大気・海洋はマントル・地殻とも物質とエネルギーをやり取りし、電離圏を介し宇宙にこれを捨てる動的なシステムである。地球においてこのような全球的な「水・物質の循環」を理解する体系は「地球システム学」と呼ばれるが、これが地球外で議論された例はなく、過去の探査も単なる個別事象の解明に留まる。システムとして惑星と生命を理解するためには、内部から表層・大気までを知る一貫したプログラムが必須となるが、そういった試みは皆無である。
- **本プログラムでの獲得目標は「火星システム学」を構築し、これに基づき火星の水・物質循環を理解し、現存生命の存否に迫ることである。** システム論を展開しようとするれば、太陽系で地球以外の唯一の水惑星であった火星において他に最適天体はない。
 - STEP 1 : 火星の内部の水と内部表層間の物質のやり取りを明らかにする。
 - STEP 2 : 大気表層の水分布と循環、宇宙への散逸を調べる。
 - STEP 3 : 生命利用可能な物質を循環の理解から予測し、それが得られる場に着陸、現存生命の発見に迫る。

6. 3 全体スケジュール（3ステップ）（例）



【Step1：～2030年頃までに】

- 自律的な火星着陸・運用技術（インフレータブルエアロシエル、セミハードランディング、省電力通信・低温電源技術）を小型で早期に獲得。
- 高機能輸送機（共通深宇宙OTV）で、火星圏を自在に飛行し、火星表面の好きな場所へ超小型着陸機を「複数」送り、火星表面への輸送手段を確立
- 大型の探査機ではいけないような未踏の場所からの情報（画像など）を獲得することでその成果をアピール。複数機でのネットワーク探査のデモンストレーションも行う。
- 民間・大学に火星探査サービスを提供して、それらと連携したミッションを立て、将来の本格的な火星活動にむけたコミュニティを醸成

【Step2：～2035年頃までに】

- 国際火星探査計画への参画やピギーバックの機会を活用し、STEP1のEDL技術を高性能化する（展開エアロシエルの大型化、高耐熱化）。
- SLIM・月探査促進ミッション（LEAD）の技術を利用し、50kg級のランダーを搭載できる100kg級の大気圏突入機で、軟着陸技術（ソフトランディング）を実証・獲得。

【Step3：～2040年頃までに】

- STEP2までのヘリテージを活用し、100kg～200kg級ローバーを搭載できる300kg～500kg級の大気圏突入機を実現
- 火星表面でローバを運用し、本格的な科学探査を行う。

7. 実施にあたっての課題 (1/2)



1. 技術成熟度

- ① **EDL技術 (例: エアロシェル大気圏突入技術)** : EDL技術について、大学及び国内メーカーとともに観測ロケット実験等により技術成熟度を高めてきたところ。EDL技術での重力天体着陸を確実に実現するため、SLIM等の月探査関係の技術を活用しつつ、観測ロケットや軌道上から等による再突入実験を積み重ね、着実なTRLの向上が重要。
- ② **惑星保護技術** : 火星表面探査においては、国際基準での厳しい惑星保護対応が求められるため、減菌やバイオバーデン管理を確実に行うための技術・設備が必要。ミッションが実現可能となるかクリティカルな要素となるため、理学テーマとしても大きな課題としてコミュニティをあげて取り組むことが必要であるとともに、段階的に技術獲得を図る構想を検討することが重要。
- ③ **観測機器技術** : 火星探査構想とあわせて、必要な観測機器について検討を行い、段階的にTRLを上げていくことが重要。例えば、月探査用として開発を行なった地震・熱流量観測用ペネトレータの活用や、構造的に耐衝撃性構造が期待される搭載機器でサイエンス価値が高いと考えられる候補について、コミュニティを幅広く巻き込めるよう検討を進める (候補例: 気象観測、大気ガス組成、着陸地点地形観測、磁力観測等)
- ④ **着陸機技術** : 耐着陸衝撃技術、エアロシェル背面に搭載された柔軟太陽電池、低温環境で作動可能な2次電池、低消費電力・小型の通信機、低温対応熱制御技術等の火星環境を生き延びるための技術を確立することが重要。
- ⑤ **ローバ技術** : 理学的に価値のある場所に到達する上で、AI等を活用し自律運用が可能な無人小型ローバの技術を確立することが必要であり、月において事前実証を行う等、戦略的に取り組むことが重要。



7. 実施にあたっての課題 (2/2)



2. 位置付け・枠組み

- 宇宙基本計画において示された検討であるため、宇宙科学・探査におけるボトムアップでのプロジェクト創出という基本原理を踏まえつつ、アルテミス計画への貢献という観点も念頭に、JAXAにおいてどのような位置づけ・枠組みとして取り組むべきか要検討。

3. コミュニティ・産業基盤の全体の拡充・強化

- これまで他国から出遅れてきた火星本星探査に取り組むに当たり、リソースの確保が課題。
- JAXAのみならず、大学をはじめとするコミュニティ、産業界の主体的な参画を得つつ、我が国の学術・産業基盤全体を拡充・強化することが不可欠であり、オールジャパンの力を結集することが重要。

8. 今後について



1. ミッション構想の検討を深める

- 政府の検討に資するよう、コミュニティとの議論を進めながら、有志の理工研究者によるミッション構想の検討を継続し、今年度の探査小委で報告する。
- 到達したいところに到達するために必要な技術（EDL技術、着陸機・ローバ技術等）と、その中で第一級の科学成果を創出するという観点で、実現性の高い構想とすべく、引き続き理工一体&産業界による検討を深める。

2. 要素技術のTRL向上

- 要素技術のTRL向上の観点から、JAXAのみならず、コミュニティ・産業界を巻き込んだ研究開発を行うべく検討を進める。

3. JAXAにおける火星探査プログラムの在り方の検討（コミュニティ、産業界との連携含む）

- 産学官のオールジャパンの力を結集する観点も含め、JAXAにおける火星探査プログラムの在り方について検討を進める。
- Moon to Marsといった月・火星でのアルテミス計画の流れを踏まえた政府の検討機会をコミュニティとしていかに有効活用できるか検討を進める。