

## 戦略的火星探査：周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査(MACO)計画

### ① 計画の概要

今後の太陽系探査において、生命生存可能(ハビタブル)環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となっている。その中で火星は、過去にハビタブルな環境を保持し、進化の過程でそれを失った地球外太陽系天体として、国際的にも重要な探査対象である。2030年代には国際協働による火星サンプルリターンが計画されており、そこで日本が主導的な役割を果たすためにも、我が国独自の火星探査の実施が喫緊の要請である。本計画は、国際協働宇宙探査に向けた我が国の戦略的火星探査の重要なステップとして位置づけられており、我が国の宇宙基本計画の太陽系探査のプログラム化の方針とも合致している(図1)。近年の先行火星探査における新発見も踏まえ、本計画の目的は、ハビタブル環境の持続性の理解に向けて、火星における宇宙天気・気候・水環境の探究と、着陸探査に向けた探査技術実証である。特に、極端な太陽変動への瞬時応答を調べることで、過去40億年にわたり宇宙への大気散逸が火星の気候変動にどのような影響を及ぼしてきたのかを理解するとともに、火星をとりまく宇宙環境の把握と、将来の着陸探査に必要な技術獲得、表層・浅部地下水環境の調査を行う。



図1 我が国の火星探査プログラム化(©JAXA)におけるMACO計画の位置づけ。

上記の目的実現のため、本計画では3つの達成目標と、対応する8つの観測項目を設定し、11の科学機器を搭載した火星探査を実施する(図2)。本計画は、過去の太陽で頻発した極端現象への瞬時応答の理解を通して、従来の統計的描像から脱却した火星気候変動機構の推定を可能とし、火星宇宙天気・気候研究にブレークスルーをもたらすと期待されている。また、宇宙放射線環境や表層・浅部地下水環境など、将来の火星有人探査に不可欠な知見を提供することで、人類の活動領域の拡大に貢献する。さらに工学的には、重力天体突入・降下・着陸に関する探査技術実証により、航空宇宙工学、ロボット工学等の幅広い発展が促され、総合的な技術の体系的な獲得が可能となる。

### ② 学術的な意義

生命生存可能(ハビタブル)惑星成立の条件は何なのか。この人類の根源的な問いに対し、今後の太陽系探査において、太陽系におけるハビタブル環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となっている。約40億年前の火星は海を持ち湿潤な気候であったと推定される一方で、現在の火星は寒冷乾燥な気候をもつ。従って火星は、過去にハビタブルな環境を保持し、進化の過程でそれを失った地球外太陽系天体として、ハビタブル環境の持続性を調べるために国際的にも重要な探査対象となっている。火星がハビタブル環境を失った際の大規模な気候変動を引き起こすには、多量の水とCO<sub>2</sub>大気が地下に貯蔵もしくは宇宙空間に流出して表層環境から取り除かれる必要がある。その中で、過去の激しく変動する太陽条件下での宇宙空間へのCO<sub>2</sub>大気の散逸機構の解明が、喫緊の要請となっている。すなわち、本計画で提案している、ICMEなどの極端な太陽変動への大気散逸現象の応答の観測は、過去の太陽で頻発した極端現象への瞬時応答の理解を通して、従来の統計的描像から脱却した過去への演繹を可能とし、火星宇宙天気・気候研究にブレークスルーをもたらすと期待されている。

多数の系外惑星が発見される中、主星の活動と惑星圏環境の関係を理解しようという宇宙気候探求の機運が高まっており、本計画で得られる知見は、系外惑星がどのような大気と表層環境を持ちうるか(ハビタブル環境を持つか否か)を推定する知的基盤を提供する。また、本計画で実現する宇宙放射線環境や表層・浅部地下水環境の把握は、将来の着陸探査や火星有人探査に不可欠な知見を提供する。本計画は、学術的な価値に加えて、人類の活動領域を火星へと拡大するために重要な探査である。さらに工学的には、重力天体突入・降下・着陸に関する着陸探査に向けた航空宇宙工学、ロボット工学等の幅広い発展が促され、総合的な技術の体系的な獲得が可能となる。

### ③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

今後の太陽系探査において、太陽系における生命生存可能(ハビタブル)環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となっている。その中で火星は、上述のように国際的にも重要な探査対象になっている。2030年代には国際協働による火星サンプルリターンが計画されており、そこで日本が主導的な役割を果たすためにも、太陽の影響を受ける大気と浅部地下水環境の共進化過程に着目した我が国独自の火星探査の実施が喫緊の要請である。本計画は、この要請に応えるため先行探査の成果を精査し検討されたJAXA宇宙科学研究所(ISAS)の火星タスクフォース報告書にて、国際協働宇宙探査に向けた我が国の戦略的火星探査の

MMXに続く次の重要なステップとして位置づけられている。また、周回機部分は、JAXA/ISASの火星大気散逸探査（のぞみ後継機）検討WG等を中心に検討してきた探査計画が母体となっており、日本学術会議のマスタープラン2017大型研究計画にも選定された。また、ISASに各学界から提出された工程表のうち、太陽地球惑星圏研究領域の工程表(SGEPSS)と太陽系・系外探査プログラムの工程表(日本惑星科学会)に記載されている。

#### ④ 実施機関と実施体制

上述したように、本研究計画は、JAXA(宇宙航空研究開発機構)の科学衛星計画として実現すべく、宇宙科学研究所のリサーチグループおよび国際宇宙探査専門委員会の火星探査計画の科学探査タスクフォース(火星TF)を中心に検討中の火星探査計画である。従って、今後、同研究所内でのミッション審査プロセスを経て選定された場合には、JAXAが主要実施機関となる。なお、計画の科学検討や科学観測用の搭載機器の検討開発については、以下の研究機関から約90名(学生を除く)の研究者が参画している。

JAXA 宇宙科学研究所、東北大学、東京大学、東京工業大学、大阪大学、大阪府立大学、福岡大学、京都大学、京都産業大学、北海道情報大学、情報通信研究機構、東京薬科大学、立教大学、千葉大学、千葉工業大学、日本大学、名古屋大学、金沢大学、滋賀県立大学、大阪電気通信大学、広島大学、神戸大学、岡山大学、高知大学、九州大学、九州工業大学、コロラド大学LASP、カリフォルニア大学バークレー校SSL、ダヌンツィオ大、韓国地質資源研究院、Royal Belgian Institute for Space Aeronomy、Swedish Institute of Space Physics.

#### ⑤ 所要経費

総経費：360億円。

所用経費の大きな内訳は、衛星システム的设计・製造・試験に約190億円、ミッション機器的设计・製造・試験に約45億円、地上系およびJAXAからの支給が必要なシステム機器に約20億円、打ち上げ費用約105億円を想定している。上記のうち最初の2項目はマージンを含む。また、衛星設計・製造・試験経費の詳細については、一部メーカーによる見積りもあるが、非開示情報のため、内訳の記載は控えさせていただく。

#### ⑥ 年次計画

太陽変動への応答を調べるには、大きな太陽変動の極端現象(CME等)が起こる太陽活動極大期(2023-25年頃)からの減衰期(極大後2-3年間)をミッション期間に含むことが望ましいこと、戦略的に火星探査を進めるために先行のMMX(火星衛星サンプルリターン)計画(2020年代前半打ち上げ)に連続して遂行する必要があることを踏まえ、本計画では、2026年の衛星打ち上げ(バックアッププランは2028年打ち上げ)を目指して検討を進めている。今後の主な想定スケジュールは以下の通りとなっている。

～2019年度 システム検討

2020年3月頃 ミッション定義審査(MDR)

2021年3月頃 プロジェクト定義審査(PDR),

2023年3月頃 詳細設計審査(CDR)

2023年度 フライトモデル製造

2024年度 一次噛み合わせ試験等

2025年度～2026年秋 フライトモデル総合試験、射場作業等

2026年秋 打ち上げ

2027年夏 火星到着

2027年秋 科学観測開始

2029年末 ノミナル科学観測終了

#### ⑦ 社会的価値

宇宙科学・探査は、人類の英知を結集して、知的資産を創出し、宇宙空間における活動領域を拡大するものであり、はやぶさ2などの我が国独自の探査の実施により、太陽系探査への国民の期待と理解が高まっている。その中で、地球型生命の生存可能なハビタブル環境の持続性を探る我が国独自の火星探査の実施は、学術的な意義だけでなく、科学教育や科学啓蒙に有用な題材を提供できる。また、世界最先端の科学成果、技術実証を通じ、科学、工学、数学など、幅広い分野での人材育成が見込まれる。

また、本計画により明らかになる、現在の火星周辺の放射線環境、火星表層での液体の水の有無、および地表からアクセス可能な浅部地下帯水層の空間分布は、将来の有人探査にも重要な知見である。国際協働での月周辺宇宙ステーション(ゲートウェイ)の建設が合意され、月から火星へと広がる探査への民間参入の機運も高まっており、本計画は人類の活動領域の火星への拡大に貢献する。なお、重力天体への探査技術実証には、高度な総合工学技術が要求されるため、宇宙用ロボットの防災・減災への応用など、多様な産業シーズを包含しており、SDGsにも貢献することが可能である。

また、本計画により明らかになる、現在の火星周辺の放射線環境、火星表層での液体の水の有無、および地表からアクセス可能な浅部地下帯水層の空間分布は、将来の有人探査にも重要な知見である。国際協働での月周辺宇宙ステーション(ゲートウェイ)の建設が合意され、月から火星へと広がる探査への民間参入の機運も高まっており、本計画は人類の活動領域の火星への拡大に貢献する。なお、重力天体への探査技術実証には、高度な総合工学技術が要求されるため、宇宙用ロボットの防災・減災への応用など、多様な産業シーズを包含しており、SDGsにも貢献することが可能である。

#### ⑧ 本計画に関する連絡先

関 華奈子(東京大学・大学院理学系研究科 (地球電磁気・地球惑星圏学会、日本惑星科学会))

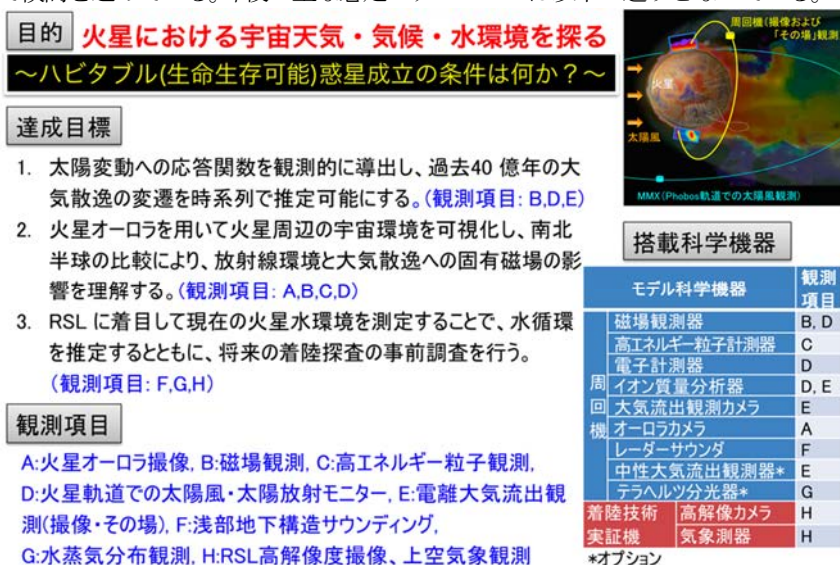


図2 本計画の科学目的、達成目標、観測項目、およびモデル科学機器。