

I. 基本情報

1: 「学術の中長期研究戦略」の名称（日本語）:

国際宇宙探査と連携した戦略的火星探査

2: 「学術の中長期研究戦略」の名称（英語）:

Japanese strategic Mars exploration in the international space exploration

3: 提案分野: 理工・工学

4: 分野融合の内容: N/A

5: 提案のキーワード〈3～5個〉

キーワード1: 宇宙科学

キーワード2: ハビタブル環境

キーワード3: 宇宙天気・気候

キーワード4: 水環境進化

キーワード5: 国際協働宇宙探査

6: 提案者情報

氏名: 中村 昭子

所属機関・部局又は学協会名: 日本惑星科学会

役職: 会長

日本学術会議の所属: 所属していない

連絡先郵便番号: 140-0014

連絡先住所: 東京都品川区大井 1-6-3 アゴラ大井町 3 階 日本惑星科学会事務局

連絡先電話番号: 03-6410-7041

連絡先メールアドレス: staff@wakusei.jp

7: 連絡先情報（※提案者と同じ場合は、御記入不要です。）

氏名: 関 華奈子

所属機関・部局又は学協会名: 東京大学大学院理学系研究科

役職: 教授

日本学術会議の所属: 連携会員

連絡先郵便番号: 113-0033

連絡先住所: 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

連絡先電話番号: 03-5841-4577

連絡先メールアドレス: k.seki@eps.s.u-tokyo.ac.jp

II. 学術振興の「ビジョン」

1. ビジョンの概要(200字以内) :

本提案は、国際協働により人類のフロンティア拡大が格段に進む今後約 20 年を見据えて、MMX、MIM(学術研究構想提案)、本格着陸探査の3つの探査計画を戦略的に連続実施することにより、水の起源・分布・進化、そして生命環境に着目した独自の科学成果を挙げるとともに、火星有人探査の本格化に向けて強みとなる、高精度着陸や高斜面走破性ローバー技術を獲得する「火星戦略的探査」に関する中長期研究戦略である。

2. ビジョンの内容 : (1500字以内)

アルテミス計画に象徴されるように、これからの 20-30 年間は、国際協働により月から火星へ人類のフロンティア拡大が格段に進もうとしている。世界各国が火星探査を計画・実施しており、科学分野では、欧米は今後 15 年程度、太古の火星環境や生命を調べる火星サンプルリターンという超大型計画に集中する見込みである。こうした動きに対して、日本は火星周回への軌道投入、軌道間輸送、重力天体への着陸・踏査の実績に乏しく、十分に参画できていないのが現状である。こうした現状を打破し、段階を踏んで独自の科学および技術実証探査を実施することで、2040 年代の火星有人探査時代の科学探査や人類活動において、我が国が国際的に主要な役割を担うことは、科学外交や安全保障の観点からも重要であると考えられている。本ビジョンは、そのために重要となる今後約 15 年間の間に戦略的に火星探査を実施するための具体的な構想を示すものである。科学的には、火星サンプルリターン計画が生命生存可能（ハビタブルな）環境にあったと推測される太古の火星に注目しているのに対し、国際的に手薄になっている現在の火星での水に関する循環、環境、化学、そして現存生命の探査といった重要な課題に、国際宇宙探査の機会も活かした独自の科学探査の実現によって取り組む構想となっている。

具体的には、ここで提案する戦略的火星探査は、3つの探査計画を連続して実施する3ステップ構想となっている（補足説明資料図1参照）。第1ステップは、小天体サンプルリターンミッション「はやぶさ2」などの実績を活かした火星衛星からのサンプルリターンと火星圏観測などを行う予定のMMX(Martian Moons eXploration, <http://www.mmx.jaxa.jp>)計画であり、水の起源と供給過程を明らかにするとともに火星圏への往還技術などの獲得を目指している。第2ステップは、今回学術研究構想として提案する「国際宇宙探査と連動した火星宇宙天気・気候・水環境探査(MIM: Mars Ice Mapper)計画」である。第2ステップであるMIM計画は、将来の有人探査の事前探査を行う国際宇宙探査の枠組みで、NASA, CSA, JAXA, ASIなどの宇宙機関が協力して実施しようとしている科学と探査のシナジーにより最大限の成果を目指した火星探査計画(<https://www.isas.jaxa.jp/topics/002581.html>)である。この中で、日本は、衛星システム、科学搭載機器の一部と小型着陸実証機を担当する方向で検討が進んでおり、後述の学術研究構想の中で詳しく説明している。MIM計画では、科学的にはハビタブル環境の持続性の理解に向けた火星宇宙天気・気候・水環境の科学観測を実施し、水の分布・輸送・散逸に焦点をあてて明らかにするとともに、第3ステップである本格的着陸探査に向けた目標点への高精度着陸実現のための技術実証を行うことを目的としている。さらに第3ステップでは、月探査などで培われたローバー技術なども活かし、科学的には地下水圏と生命指標探査により現在の火星はハビタブルかどうかを明らかにす

ることを主目的にしており、現存生命の候補地をターゲットとした独自の科学探査を展開する計画である。

本提案は、これら3つの探査計画を戦略的に実施することにより、水の起源・分布・進化、そして生命環境に着目した独自の科学成果を挙げるとともに、火星有人探査の本格化に向けても強みとなる、高緯度地域へのピンポイント着陸技術や踏破性能の高いローバー技術を獲得する構想となっている。

III. 学術研究構想

1. 名称（日本語）：

戦略的火星探査：国際宇宙探査と連動した火星宇宙天気・気候・水環境探査(MIM)計画

2. 名称（英語）：

Strategic Mars exploration: International MIM (Mars Ice Mapper) project

3. 提案の種別：研究計画

4. 総経費：380億円(TBD)

5. 学術研究構想の概要(800字以内)：

本計画の目的は、生命生存可能(ハビタブル)惑星成立の条件は何なのか、という人類の根源的な問いに対し、国際協働による火星探査によって挑むことにある。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太陽系内天体として、今後の太陽系探査の中で国際的にも重要な探査対象である。かつてハビタブル環境を持っていた火星には、生命活動に重要な役割を果たした可能性のある過去の海洋水が、現在でも凍土や含水鉱物として地下に存在している可能性がある。すなわち、地下水圏、大気圏、宇宙環境の相互作用の帰結としての水環境進化を実証的に調べることができる惑星であり、本計画では、水の貯蔵と散逸過程に着目し「惑星大気進化に重要な大気上下結合、宇宙環境影響の理解」と「浅部地下を含めたH₂Oの動態と揮発性物質の起源を制約」を目指した探査を実施し、ハビタブル惑星環境の持続性の理解に貢献する。この目的実現のため、本計画では3つの達成目標と、対応する10の観測項目を設定し、国際 Mars Ice Mapper (MIM) 計画において、周回機に搭載する2つの科学機器パッケージと小型着陸実証機を担当することを計画している(補足説明資料図2参照)。

学術の中長期研究戦略「国際宇宙探査と連携した戦略的火星探査」の中で本計画は、工学的には次の本格着陸探査に向けた探査技術実証を達成するという目的も持つ。国際宇宙探査と連携した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。マスタープラン2020で採択されたMACO計画を発展させ、アルテミス計画の火星有人探査に向けた重要な事前探査である国際MIM計画との相乗効果を目指した提案となっており、宇宙放射線環境や表層・浅部地下水環境など、将来探査に不可欠な知見を提供することで、人類の活動域拡大にも貢献する。

6. 目的と実施内容(800字以内)：

本計画では、ハビタブル環境の持続性の理解に向けた火星宇宙天気・気候・水環境の科学観測を実施し、「惑星大気進化に重要な大気上下結合、宇宙環境影響の理解」と「浅部地下を含めたH₂Oの動

態と揮発性物質の起源を制約」を実現するとともに、中長期ビジョンの第3ステップに向けたピンポイント着陸実現のための探査技術実証を行うことを目的としている。

上記の目的実現のため、本計画では3つの達成目標(1. 大気境界層での水蒸気観測の実現による地表/地下の水リザーバーと大気との相互作用の解明と、広い高度範囲での速度場観測に基づく大気の上下結合による水の効率的な輸送機構の解明[観測項目: A, B, C, D]、2. 火星オーロラの高感度撮像の実現による地殻磁場が宇宙放射線環境と大気散逸に与える影響の解明[観測項目: C, D, E, F, G]、3. 将来の本格着陸探査の技術実証と小型着陸機による探査により H₂O の動態と揮発性物質の起源を制約する[観測項目: H, I, J])と、対応する10の観測項目(A: 表層付近の大気境界層の水蒸気観測, B: 大気速度場と水蒸気分布の3次元同時観測, C: 電離圏温度・速度場観測, D: 電離圏同位体計測, E: 火星オーロラ撮像, F: 磁場観測, G: 高エネルギー粒子観測, H: 着陸地点地質的特徴の撮像, I: 着陸地点気象観測, J: 着陸地点での化学分析)を設定している。これらの実現のために、国際宇宙探査の枠組みで実施されるMIM計画に、大気上下結合および火星宇宙天気の2つの科学機器パッケージと着陸技術実証のための小型着陸技術実証機(EDL demo lander)に地質カメラ、気象観測器群およびネオン同位体測定器を搭載する計画である。さらに、SAR観測により広域的な浅部地下帯水層・氷層の空間分布を明らかにし、将来の着陸探査に向けて候補地点選定に重要なデータ取得も目的としている。

7. 学術的な意義(1500字以内) :

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CO₂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水や大気の散逸機構の解明が、喫緊の要請となっている。また、月から火星への有人探査を目指すアルテミス計画など国際宇宙探査が活発化する中、火星の放射線環境や気象の理解が人類のフロンティア拡大の関連から重要課題となっている。火星においては、もしかしたら生命活動に重要な役割を果たした可能性のある過去の海洋水が、現在でも凍土や含水鉱物として地下に存在している可能性があり、地下水圏、大気圏、宇宙環境の相互作用の帰結としての水環境進化を実証的に調べることができる。一方で、将来の有人探査に向けた事前探査としてのMIM計画の達成目標は、基地の候補地となりうる中低緯度域の表層から深さ10m以内に存在する氷床のマッピングであり、そのための主要搭載機器は合成開口レーダー(SAR)、衛星軌道は高度約300kmの太陽同期低軌道で高軌道傾斜角に設定されている。こうした軌道とSARの特性を活かして、科学と探査の相乗効果を高めるため、本計画では、水の貯蔵と散逸過程に着目し「惑星大気進化に重要な大気上下結合、宇宙環境影響の理解」と「浅部地下を含めたH₂Oの動態と揮発性物質の起源を制約」に着目した科学観測を実施し、ハビタブル惑星環境の持続性の理解に貢献することを目指している。

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、将来の着陸探査や国際協働による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。

8. 分野融合の意義・効果(400字以内) :

惑星科学探査の実施には、理学と工学の密接な連携が不可欠であり、分野横断的な共同研究を誘発し、分野融合の中から新しいブレークスルーがもたらされてきた。本計画は、地球電磁気・地球惑

星圏学会と日本惑星科学会を中心に太陽惑星系科学、惑星科学、宇宙空間物理学、航空宇宙工学、地質学、地球化学、天文学、アストロバイオロジーなど幅広い専門分野を持つ研究者チームによって検討されており、本提案にあたっては、地球電磁気・地球惑星圏学会エंडーズを得るとともに、日本惑星科学会の学会長名で提案することが承認されている。なお、本計画の工学面での学術的意義については、日本航空宇宙学会から提案され重点計画に選定されたマスタープラン 2020 計画番号 25 学術領域番号 27-8「宇宙探査ミッションを支える宇宙技術実証プログラム」の一部である火星探査技術実証ミッションに対応しており、本計画の実現に分野融合は重要な要素である。

9. 国内外の研究動向と当該構想の位置付け(500 字以内) :

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。その中で火星は、国際的にも重要な探査対象になっている。国際協働による火星サンプルリターンや有人探査が計画され、人類の活動域が火星圏に広がろうとしている現在、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環境の共進化過程に着目した我が国独自の火星戦略探査の実施が喫緊の要請である。本計画は、JAXA の火星タスクフォース報告書にて、MMX 計画に続く重要なステップとして位置づけられていたマスタープラン 2020 の MACO 計画(計画番号 96 学術領域番号 24-2)を、国際宇宙探査の中で親和性の高い MIM 計画と連携する形で発展させた計画である。また、太陽地球惑星圏研究領域の工程表(SGEPSS)と惑星科学/太陽系科学研究領域の工程表(日本惑星科学会)に記載されている。また、日本学術会議の地球惑星科学分野における科学・夢ロードマップ2020の重点課題のうち、「生命をはぐくむ環境の普遍的理解」と「太陽地球・惑星系の理解と普遍化」の両方にまたがる分野横断的探査計画となっている。

10. 国際協力・国際共同(500 字以内) :

国際 MIM 計画は、米国 NASA、カナダ CSA、イタリア ASI と JAXA の 4 宇宙機関が共同で検討している将来の有人探査に向けた事前探査を行う火星周回探査計画であり、2021 年 1 月に意向表明書 Statement of Intent(SOI)が上記 4 機関により署名された。この SOI の中で、MIM 周回機の衛星システム、科学搭載機器の一部と小型着陸実証機を含む sub-payloads を日本が担当する意向が示された。その後、MIM 計画のための国際 Measurement Definition Team (MDT)が世界公募により選定され、日本からも 9 名の科学者が選ばれている。MIM 計画で行うべき事前探査や科学探査戦略の MDT による検討結果は、最終報告書として公開されている(<https://www.exploration.jaxa.jp/news/20220909.html>)。この報告書の中で、本構想で提案している大気上下結合や宇宙天気に関する科学観測項目や関連科学機器群、小型着陸機についても搭載機器候補等として記載されており、今後、国際チームで最終的な役割分担の調整が行われる予定である。

11. 実施機関と実施体制(1000 字以内) :

本研究計画は、国際宇宙探査の枠組みの中で JAXA(宇宙航空研究開発機構)が実施主体の一つとなって実現すべく検討されている国際火星探査計画であり、日本における主要実施機関は JAXA となることを想定している。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、大阪公立大学、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。

12. 所要経費(500 字以内) :

総経費 : 380 億円(TBD)

所用経費の大まかな内訳は、周回機衛星システムの設計・製造・試験に約 170 億円、ミッション機器の設計・製造・試験に約 40 億円、EDL 着陸機と搭載ミッション機器の設計・製造・試験に約 120 億円、地上系システム機器に約 30 億円、火星への遷移期間・火星での観測期間を含めた運用経費負担分約 20 億円を想定している。

※ただし、予算規模は一例であり、日本の貢献規模については複数の解を検討中である。

13. 実施計画・スケジュール(800 字以内) :

本計画は、複数の宇宙機関が国際協働により行う火星探査計画となっており、スケジュールの詳細については各局の開発フェーズの違いなども考慮して国際調整中であり、下記は暫定スケジュールであり今後変更になる可能性がある。本計画では、2030 年度(2031 年初頭)の探査機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。

～2023 年度 システム検討

2024 年度 ミッション定義審査(MDR)

2026 年 8 月頃 プロジェクト定義審査(PDR),

2027 年 12 月頃 詳細設計審査(CDR)

2027 年度～2028 年度 フライトモデル製造

2028 年度 日本側の機器の事前総合試験等

2029 年度～2030 年冬 フライトモデル総合試験、射場作業等

2030 年冬 打ち上げ

2031 年秋 火星到着

2031 年冬 科学観測開始

2034 年末 ノミナル科学観測終了

14. これまでの準備状況(1000 字以内) :

3) 一定の準備資金を得ての技術開発等の開発・準備段階

上述のように MIM 計画については、NASA (米国), CSA (カナダ), JAXA (日本), ASI (イタリア) の 4 宇宙機関が共同で検討している火星周回探査計画であり、2021 年 1 月に意向表明書 Statement of Intent (SOI) が上記 4 機関により署名されている (<https://www.isas.jaxa.jp/topics/002581.html>)。この SOI の中で、MIM 周回機の衛星システム、科学搭載機器の一部と小型着陸実証機を含む sub-payloads を日本が担当する意向が示され、国際チームでの具体的な検討が始まった。異なるミッション構成案のトレードオフスタディなどが行われ、JAXA 主導で衛星システム検討も行われ、本計画で提案している sub-payloads の大まかな搭載可能性などが確認された。将来の有人探査基地の候補地となりうる中低緯度域の表層から深さ 10m 以内に存在する水・氷のマッピングであり、そのための主要搭載機器は合成開口レーダー (SAR)、衛星軌道は高度約 300km の太陽同期低軌道で高軌道傾斜角に設定されている。2021 年 8 月には MIM 計画のための国際 Measurement Definition Team (MDT) が世界公募により選定され、MIM の火星有人探査に向けた事前探査や科学探査に関する観測戦略の詳細な検討を行い、2022 年 8 月に MDT 最終報告書としてまとめられた (<https://science.nasa.gov/researchers/ice-mapper-measurement-definition-team>)。本計画で日本から MIM 周回機に搭載を検討している 2 つの科学機器パッケージについては、主に JAXA 宇宙科学研究所の周回・探査技術実証による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画検討 WG (MACO WG) にて、戦略的開発研究費を獲得してキー技術の開発を行ってきた。先行ミッションへの搭載実績のあるものが多く、概ね順調に開発が進んでいる。また、2022 年 2 月には JAXA 国際宇宙探査センターに MIM 計画のミッション定義チームが設置され、小型着陸機と搭載機器候補についての検討に着手している。

15. 共同実施体制(500 字以内) :

本計画が JAXA (宇宙航空研究開発機構) 内の選定プロセスを経て実施される場合、上述のように、JAXA が実施機関になり、先行する科学探査計画と同様に、JAXA 宇宙科学研究所の大学共同利用システムを活用して学術研究を実施することができる。具体的には、JAXA が保有する施設・設備 (種

子島宇宙センター、臼田宇宙空間観測所、内之浦宇宙空間観測所等も含む)を利用して機器開発・衛星試験・運用を実施することが可能であり、搭載科学機器や探査機の開発、運用等に全国の共同研究者が参加できる体制が構築されている。また、得られた科学データについては、機器チームへの一定の優先期間が与えられ科学成果の創出をリードする機会が提供されるとともに、優先期間の後には、JAXA の宇宙科学探査計画による観測データの high 次プロダクトをアーカイブしている DARTS(Data Archives and Transmission System)から全世界に公開され、世界の関連研究者に利用する機会が提供されることを想定している。

16. 当該構想の国際的な我が国の優位性(500字以内) :

太古の火星のハビタブル環境や生命の痕跡を調査しようとする火星サンプルリターン計画に代表される、欧米の大型火星探査の取り組みとは一線を画し、国際的に手薄になっている水の循環・輸送・進化や宇宙天気・気候といった重要な課題に、これまでの地球周回や惑星探査で実績があり、かつ最先端の科学観測技術を活かして、独自の科学探査の実現によって取り組む点が、本計画の国際的な優位性であると言える。また、想定する小型着陸機(EDL)は、従来米国で採用されている大型の着陸システムを小型かつ低コストで実現し、地形照合航法の採用により着地点精度を向上させるものであり、はやぶさ2ミッションなどで培われた我が国の強みである大気突入技術を活かして重力天体着陸技術においても世界一の水準を狙うものとなっている。

17. 当該構想に我が国が取り組む必要性(500字以内) :

中長期ビジョンにも記載したように、アルテミス計画等により現在、月から火星へ人類のフロンティア拡大が格段に進もうとしている。世界各国が火星探査を計画・実施しており、科学分野では、欧米は今後15年程度、太古の火星環境や生命を調べる火星サンプルリターンという超大型計画に集中する見込みである。こうした動きに対して、日本は火星周回への軌道投入、軌道間輸送、重力天体への着陸・踏査の実績に乏しく、十分に参画できていないのが現状である。こうした現状を打破するための解決策が本計画を含む戦略的火星探査の実施であり、段階を踏んで独自の科学探査および火星表面の目標点への高精度着陸技術を含む技術実証探査を達成することで、2040年代の火星有人探査時代の科学探査や人類活動において、我が国が国際的に主要な活動を担うことが可能となる。このことは、国際社会において名誉ある地位を得るための科学外交や将来の経済活動、安全保障の観点からも重要であり、閣議決定された宇宙基本計画における、「国際協働を主導するなどの取組強化」や「月や火星の探査・開発に自立的に取り組む能力の強化」の方針とも合致しており、着実な実施が要請されている。

18. 社会的価値 :

宇宙科学・探査は、知的資産を創出し人類の活動領域を宇宙に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、国民の期待と理解が高まっている。その中で、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、STEM教育に有用な題材を提供できる。また、科学成果創出、技術実証を通じ、理工学の幅広い分野で人材育成が見込まれる。本計画で得られる宇宙放射線環境や地表からアクセス可能な浅部地下帯水層の分布は、将来の有人探査にも重要な知見である。2040年代の火星有人探査時代の科学探査や人類活動において我が国が国際的に主要な役割を担うことは、科学外交や安全保障の観点からも重要であり、本計画はそのための火星戦略探査ビジョンの第2ステップである。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にも貢献可能である。経済的・産業的な観点からは、小型・低コストシステムによる火星へ高精度着陸技術を獲得することにより、将来の月惑星探査における民間企業参加の促進が期待される。

19. 補足説明資料(図表、ポンチ絵など) :

ファイル名 : MIM_補足説明資料_final.pdf