

1H09 火星着陸探査技術実証機の検討

○藤田和央, 佐藤毅彦 (JAXA), 火星着陸探査技術実証 WG

Study on Mars Entry-Descent-Landing and Surface Exploration Technologies Demonstrator

Kazuhisa Fujita, Katsuhiko Satoh (JAXA)

and

Mars Entry-Descent-Landing and Surface Exploration Technologies Demonstration Working Group

Key Words: Mars Exploration, Entry-Descent-Landing, Surface Exploration, Technologies Demonstrator

Abstract

Study on Mars entry-descent-landing and surface exploration technologies demonstrators has been undertaken with due consideration of potential scientific measurement proposals. As a result, the most outstanding candidates for the next Martian exploration mission have been selected through a local screening panel among four high-level engineering scopes, four high-level scientific scopes, and eleven proposals of scientific measurement. In this article, an overview of comparative study on engineering as well as scientific scopes is presented.

1. はじめに

火星は特に関心の高い惑星の一つであり、欧米露では精力的に探査が行われてきた。宇宙航空研究開発機構においても2008年より国内の惑星科学研究者と連携し、火星複合探査 (MELOS) WG の下、火星着陸探査の検討が進めてきたが、諸々の理由からミッション立ち上げを実現できていない。そこで2014年度より、火星着陸探査技術実証を目的とする「火星着陸探査技術実証 WG」を JAXA 宇宙科学研究所の工学委員会に新たに立ち上げ、MELOS WG を含む複数の火星関連 WG の成果を継承し、2014 年度に予定されている中型ミッション AO に合わせたミッション立ち上げを目標とする活動を開始した。

新 WG は工学実証を主眼とするものの、理工連携となったスコープの実現を目指している。MELOS WG においては、ローバを用いた生命探査を中核とするミッションスコープを定義して概念検討を進めた。しかし本スコープの決定プロセスが曖昧であったため、ポテンシャルを有する科学観測提案を十分に取り込めないなどの課題が生じ、その結果ミッション提案が限定的なものとなった。この反省を踏まえ、新 WG では期限付きスタディを実施し、可能性を有する複数の探査機形態と複数の科学観測提案を再精査し、合理的な評価によってこれらに優先順位を設定し、選択と集中によって現在の内外情勢に最も適合したミッションスコープへと一本化し、探査計画を立案する作業を進めている。

2. 期限付きスタディ

これまで火星探査ミッション立ち上げに至っていないとはいえ、既に5年以上の検討期間を経ることによって、フロントローディング技術開発による技術の蓄積やシステム検討により得られた知識の蓄積は膨大であり、必要な作業はそれらを整理・統合して、説得力のあるミッション計画へと構築することである。そこで期限付きスタディでは、まずこれまでの成果を精査し、国内の火星科学研究者より提案されている火星観測提案を集積し、十分な実行性が期待され、過去に実施された／現在計画されている科学観測より優れた成果が期待できるものを選定した。表1はこれらのうち主要なものをまとめたものである。重要なのは、科学的意義や独自性に加えて、各観測を主導するコミュニティが成熟しているかという点である。いかに優れた提案であっても測器の開発を担うプレイヤーが不在では、実現が期待できないことは言うまでもない。

次に工学的な観点から探査機形態について概念検討を行い、表2に示す4つのスコープを選定した。この過程では

1. 現在の内外情勢に基づいて、日本が2020年代に獲得すべき重力天体探査技術の分析と選定
2. 1で選定した技術の実証が可能な探査機システム形態およびミッションシナリオの検討
3. 表1に示す科学観測が実現可能な探査機システム形態およびミッションシナリオの検討

表 1 火星探査技術実証機の科学観測提案一覧

呼び	名称	測器
P01	生命探査顕微鏡による生命探査	生命探査顕微鏡
P02	地中レーダーによる地下構造探査	地中レーダー
P03	電磁波・音波計測器による火星大気中における放電現象の観測	電磁波・音波計測器
P04	気象観測システム、粒子センサー、環境監視カメラによる気象観測	気象観測システム
		粒子センサー
		環境監視カメラ
P05	LIDAR によるダスト観測	短距離 LIDAR
P06	ナビゲーションカメラによるダストデビル観測	ナビゲーションカメラ(バス系)
P07	ナビゲーションカメラの高機能化による地質探査	地質カメラ(ナビゲーションカメラの高機能化)
P08	宇宙測地学的手法を用いた火星回転変動計測	通信システム(バス通信系の高機能化)
P09	地震波を用いた火星内部構造探査	地震探査システム
P10	LIBS-TOFMS 装置による火星表面年代のその場計測	LIBS-TOFMS 装置
P11	波長変調分光器によるメタン・水蒸気計測	ガス検出器

表 2 火星探査技術実証機の工学スコープ一覧

工学スコープ	Scope A		Scope B		Scope C		Scope D	
スコープ概要	飛行機とランダをプラットフォームとする。世界初の火星飛行機による動力飛行により 100 km クラスの広域探査と、ランダによる中～長期定点観測を実現する。		多機能ローバをプラットフォームとする。ローバにより 10 km クラスの広域探査を実現し、生命探査や LIBS-TOFMS を用いた年代測定など多様な観測が可能である。		ロバストで走破性に特化したローバをプラットフォームとする。従来のローバを超える 100 km クラスの広域探査を実現し、地質探査や気象観測を行う。		長距離隔絶された 2 機のランダをプラットフォームとする。2 機のランダのネットワークにより測地学的観測や地震波を用いた惑星内部構造探査が可能である。	
観測機器総重量 (単位: kg)	飛行機	ランダ	ローバ	Sky crane	ローバ	ランダ	大ランダ	小ランダ
	< 3	< 43	< 34	< 3	< 3	< 43	< 43	< 2
観測機器総容積 (単位: mm)	飛行機	ランダ	ローバ	Sky crane	ローバ	ランダ	大ランダ	小ランダ
	D < 100 W < 100 H < 100	D < 1200 W < 600 H < 300	D < 1050 W < 380 H < 250	D < 300 W < 300 H < 300	D < 300 W < 300 H < 300	D < 1200 W < 600 H < 300	D < 1200 W < 600 H < 300	D < 300 W < 300 H < 300
最大電力量 (単位: Wh/day)	飛行機	ランダ	ローバ	Sky crane	ローバ	ランダ	大ランダ	小ランダ
	< 15	< 330	< 290	< 30	< 30	< 330	< 330	< 130
温度条件 (単位:℃)	暴露機器 非動作時 -105～125 動作時 -55～60							
	内部搭載機器 非動作時 -40～60 動作時 -40～60							
	緩和条項：ヒータ利用により温度条件の緩和が可能。上記制約条件を満足しない場合、個別に調整し、電力要求や熱計装要求（表面 $\alpha \cdot \varepsilon$ 等）へ転嫁する							
特記条件	飛行機の最大飛行時間は 0.77 時間、最大航続距離は 201 km.		Sky crane の飛行時間は 300 秒、ローバ着床後は投棄される。		走行性能確保のためローバリソースは駆動系へ集中される。		空力誘導実証を行わない場合は大ランダ 2 機の構成が可能。	
工学的優先度	Medium (ローバの技術実証が不可)		High (飛行機を除き全ての技術実証が可能)		Medium (飛行機、空力誘導の技術実証が不可)		Low (飛行機、ローバの技術実証が不可)	

を行った。特に 1 の選定では、将来にわたって日本がどのような独自の火星探査を行うのか、国際宇宙探査協働グループ（ISECG：International Space Exploration Coordination Group）によって議論されている将来の国際協働探査ミッションにおいて日本がどのような立ち位置で参加すべきであるか、どのよ

うな火星探査を実施すれば国民の付託に応えられるのか、など様々な観点から検討が行われた。その結果として、深宇宙探査を行うために必要な共通技術（深宇宙通信、小型・省電力バス、高精度軌道決定・軌道修正など）に加えて、惑星大気突入技術、揚力飛行による空力誘導技術、超音速パラシュート技術、

表 3 火星探査技術実証機の上位サイエンススコープ提案一覧

呼び	名称	上位サイエンススコープ	利用する 測器	工学 scope
S1	火星年代学探査	太陽系形成・生命進化過程の解明に向け「火星の温暖湿潤環境は、どのように終焉を迎えたのか？」という問いに答えることを第一目標とする。過去に火星には海が存在し、地球で生命が誕生・進化した環境に近い状況であったことが示唆されている。地球では維持されているこのような環境が火星で失われた理由を明らかにすることは、惑星科学の最重要課題である。本提案では、火星表面において年代測定を実施し、その場の地質情報を得ることにより、火星の表層環境が大きく変貌した時期を特定し、その原因の解明を図る。	P2, P3, P4, P5, P6, P7, P10, P11	B, C
S2	火星生命探査	地球外生命の発見は、現時点での宇宙科学の究極的な目的の一つである。我々はいまのところ、太陽活動と地球の地質・海洋・大気活動に依存して成立している地球生命しか知らない。このすべての活動度を包含する地球外生命は見つかっていないが、同時にすべてが生命維持に必須な要素かどうかともわかっていない。近年になって、火星がいまだに熱的に活動的であることが指摘されはじめた。これが本当だとすると、上のすべてが火星表面で揃うこととなり、地球外生命を探す上で最も素直で有望な天体は火星といえることができる。その火星において、地球外生命の検出という目的に正面から取り組むことが、本提案の目的である。生命存在の有無とあわせて、天体としての活動度（規模・頻度）を調査することで、宇宙空間における生命体のありかたに迫る。	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P11	B, C
S3	火星の内部構造探査	太陽系天体の歴史（形成過程からその進化、現在の状態）を知ることは太陽系科学の究極の目標の一つであろう。惑星の分化・システム進化過程は、限られた惑星観測データおよび地球・月の内部構造から得られた知見に基づいて構築されている。従来のモデルや前提となっている仮定が地球以外の固体惑星に本当に適用できるのか、火星の本格的な内部構造探査は明確な答えを提供する。本提案は、地震・回転観測を中心とした地球物理観測により、コア径を含む火星の標準内部構造モデルを構築する。さらに、構築した火星標準内部構造モデルと既存の探査データとの統合により、現在の表面状態、過去の熱史、テクトニクス、磁場生成、大気生成・散逸を理解する。	P3, P4, P5, P6, P8, P9	A, D
S4	火星の大気境界層を支配する物理過程の解明	数多ある惑星の多様な表層環境を統一的に説明するためには、地球以外の様々な物理・化学状態にある表層環境の有り様を観測し、それらと整合する理論を構築する必要がある。惑星表層環境の一部を構成する大気境界層は、地表面－大気間のエネルギー・物質交換の場として重要であるが、あまり理解されていない領域のひとつである。本提案は、火星の大気境界層を高い時間・空間分解能で観測することによって、大気境界層の一般理論を構築するための基礎データを生成することを目指すものである。	P3, P4, P5, P6, ほか各プラットフォーム搭載の測器	A, B, C, D

軟着陸技術（推進、自律的誘導制御、危険回避など）、移動探査技術（ローバ、飛行機など）、地表環境予測技術、熱設計技術など主要な技術が選定され、それぞれの工学スコープによって出来るだけ多くの技術体系が実証できるよう考慮した。

次に、これらの探査機システム形態において、表 1 に示す複数の科学観測の構成によって実現される大きな科学観測テーマ（上位サイエンススコープ）を提案し、外部有識者を加えて比較評価を行った。その結果、それぞれの上位サイエンススコープは、過去の／現在計画中の火星探査よりも優れた成果を達成することが期待できると評価された。しかし、科学観測のテーマや利用する探査機形態（工学スコープ）が異なることから、同時に一つのミッションで実現することは困難である。このことは、日本の火星科学コミュニティが将来に渡って独自性の高い複数の火星探査ミッションを継続的に提案するポテンシャルを有していることを示している。これらの上

位サイエンススコープは、現在策定を進めている探査ロードマップ中に、将来の火星探査候補として記載されることになるであろう。

3. スコープの絞り込み

外部有識者を加えた上位サイエンススコープの比較検討において、科学的意義、現在の測器開発状況、開発計画、コスト、リスクなど様々な観点から評価が行われた結果、最も優れた提案が火星年代学探査、2 位が火星生命探査、3 位が火星の内部構造探査、4 位が火星の大気境界層を支配する物理過程の解明大気構造探査、と評価された。但し 1 位の火星年代学探査と 2 位の火星生命探査は、ともに 7 名の評価委員中 4 名が 1 位と評価し（同点を含む）、評価点の総和も僅差であるなど、非常に拮抗するものとなった。

上位 2 つの提案が拮抗していること、また両提案がともにローバをプラットフォームとする探査形態を利用しているなど共通部分が多く、工学的な検討

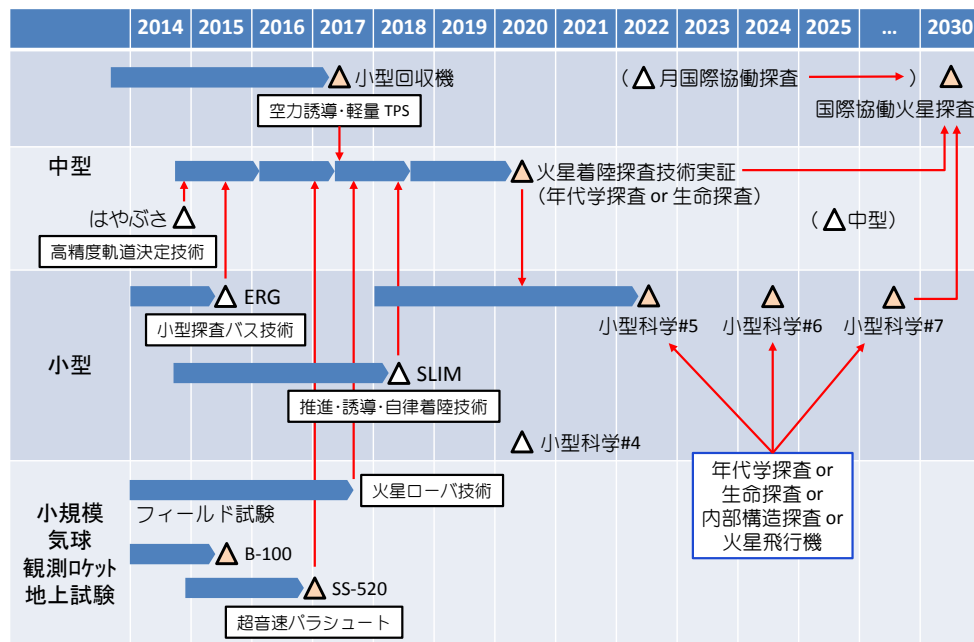


図1 火星探査技術実証機の開発ロードマップ（案）

の作業量が増大する恐れも少ないことから、今後は上位2案にリソースを集中した検討を行う。2014年12月を目途に検討の精度を向上させ、最終的に一つの案への絞り込みを行い、2014年度内に一つの中型または小型ミッション提案へとまとめる計画である。

4. 開発ロードマップ

深宇宙探査を実施する時期はミッションの意義と達成される成果に重要なインパクトを有するが、特に火星着陸探査に関しては実施する時期が重要である。その第一の理由は軌道計画上の問題であり、火星探査の打ち上げウインドウは2年毎にしか訪れない。最近で条件が良好なのは2018年や2020年であり、これ以降は2026年が良好となっている。

もう一つ重要な要素は、惑星探査が有する戦略的な意義である。月においては中国が2013年にアジアで初めての着陸を実現しており、日本はアジアにおいてすら月着陸で先陣を切ることができていない。火星においては、インドが2014年に火星オービタの投入を予定しているのに加え、中国が2020年の火星着陸探査計画を公表しており、インドは2020年代初頭の着陸探査を計画中であり、アラブ首長国連合が2021年迄に火星探査を実現するという計画を公表するなど、アジア諸国の活動が極めて活発化している。火星着陸探査においてもアジア諸国の後塵を拝することになれば、科学技術立国を公言する日本の国際的な地位低下は計り知れないだろう。

以上の理由から、我々は2020年の火星着陸探査技術実証を目標としており、図1に示す開発ロードマップを描いている。火星着陸探査実現のためには克服すべき技術課題は少なくない。しかし、その主要なものについては、現在計画・検討中の技術実証機や小型科学ミッションのヘリテージを利用することで解決することが可能である。残された課題についても、フィールド試験や気球・観測ロケットを用いた技術実証によって解決するための計画が既に進行している。重要なのは、これらの複数の独立したミッションのマトリクスを最大限に活用して火星着陸探査技術実証というゴールへ向かう開発マネジメントのスキルである。我々は現時点において2020年に火星着陸探査技術実証を実現することは十二分に可能と判断しており、現在、全体計画の策定とエビデンスの収集を行っている。

5. まとめ

火星着陸探査技術実証機の検討の現状を紹介した。工学実証を主眼とするもののトップサイエンスを実現する火星探査ミッションとして、これまでにミッションスコープの絞り込みを完了し、精度を上げた概念設計に着手したところである。実現に向けた課題は少なくないが、他の独立した複数のミッションのマトリクスを最大限活用する開発マネジメントによって、2020年に火星着陸探査技術実証機を打ち上げることは十二分に可能であると判断している。