宇宙理工学委員会 国際宇宙探査専門委員会
火星探査計画の科学探査タスクフォース
中間報告書

臼井寛裕（TF 長）[1], 石上玄也[2], 笠原 慧[3],
亀田真吾[4], 関 華奈子[3], 関根康人[5],
長 勇一郎[3] 寺田直樹[6],
野口里奈（事務局）[1], 藤田和央[1],
宮本英昭[3], 山岸明彦[7], 吉岡和夫[3]

所属 1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
2. 慶應義塾大学 3. 東京大学 4. 立教大学
5. 東京工業大学 地球生命研究所
6. 東北大学 7. 東京薬科大学

Composite image after NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona

目次

前書き 2

1 惑星科学における火星探査の意義・科学目標 3
1.1 将来の惑星探査計画の方向性–日本の戦略・狙うサイエンス 3
1.2 火星探査に関する海外の動向 4
1.3 日本の探査プログラムにおける戦略的火星探査プログラム位置づけ 4

2 戦略的火星探査プログラム提案 8
2.1 戦略的火星探査プログラムのロードマップ 8
2.2 戦略的火星探査シリーズ–1：Martian Moons eXploration（MMX） 10
2.3 戦略的火星探査シリーズ–2：小型周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画 12
2.4 戦略的火星探査シリーズ–3：着陸機による火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画 15

3 技術開発戦略 17
3.1 戦略的火星探査に必要な技術 17
3.2 戦略的火星探査におけるアーキテクチャと技術開発ロードマップ 18
3.3 表面着陸技術（Entry-Descent-Landing; EDL） 23
3.4 火星表面探査技術 24
3.5 戦略的なミッション実現の鍵となる搭載機器 27

4 戦略的火星探査プログラムの推進体制 28
4.1 着陸探査学連携ネットワーク 28
4.2 サンプルリターン探査（MSR・MMX）に向けた PP およびキュレーション体制 29

Appendix A 戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発（詳細） 32
A.1 内部構造 32
A.2 表層 33
A.3 表層・大気 35
A.4 大気 35

前書き

国際宇宙探査の枠組みで、火星有人探査に向けた火星探査計画の検討が各国で行われている。日本は、火星衛星探査計画（MMX）に続き火星無人探査を計画し、国際宇宙探査におけるメインプレーヤーとしての役割を果たすことが求められている。そのためには、国際的な競争と協力の環境下で日本が果たすべき役割を明確に認識し、その中でプログラム戦略をもってミッションを構築してゆくことが必要となる。そこで、将来の戦略的火星探査プログラムを構築するにあたり、2018 年 11 月、国際宇宙探査専門委員会の下に火星探査計画の科学探査タスクフォース（以下、火星 TF）が設置された。我々、火星 TF チームは、11 月より 90 日スタディーを行い、その過程においては、「戦略的火星探査計画に対する意見募集」という形で広くコミュニティからの提言を求めた。コミュニティから頂いた提言を踏まえ、我々火星 TF では、90 日スタディーの結果を（１）国際宇宙探査における日本の火星科学探査、および（２）火星探査に関わり先導する工学・確立すべき技術、の 2 つの観点に基づき提言にまとめた。

1　惑星科学における火星探査の意義・科学目標

1.1　将来の惑星探査計画の方向性–日本の戦略・狙うサイエンス

私たち生命はなぜ地球に生まれたのか、私たちは宇宙に孤独な存在であるのかを明らかにすることは自然科学における最も重要な課題と言えよう。世界は「アストロバイオロジー」を標題に掲げ、天文学、惑星科学、地球科学、生物学といった学問分野を横断し、太陽系天体に生命の存在・痕跡をさぐる探査、地球に似た環境をもつ系外惑星の探索、地球での生命誕生・初期進化をたどる調査など、宇宙における生命の存在・分布・進化・将来に関する総合的研究を進めており、今後もこの流れは継続されるであろう。太陽系探査においては、太陽系形成過程を明らかにしていく流れの中で、生命前駆物質を含む彗星や始原的小惑星のその場観測・サンプルリターン（SR）、火星および氷衛星といった生命が存在する可能性がある天体の探査、さらには系外惑星の大気観測などを軸として進展していくと想定される。また、生命の誕生条件だけでなく、生命圏の持続条件の理解や、現在と過去における生命およびその痕跡、さらには資源獲得を含めた人類の居住可能性の検討にまで目標が広がっていくであろう。つまり、太陽系における持続的生命生存可能環境の探索（Continuous HAbitable Solar-system Environment、CHASE）という壮大なビジョンである。しかし、探査的手法でのアプローチは段階的かつ各段階に時間を要するため、その射程は 100 年を超えるものとなろう。

そこで、特に今後 20 年程度のスパンの太陽系探査においては、太陽系における生命生存可能環境の形成と進化の探求が適切な科学目標となると考える。生命生存可能環境とは、単に地球生命の起源・進化に留まらず、より包括的に太陽系に広がる生命が存在する可能性のある有機反応ネットワークを持つ天体環境群を指し、その形成と進化の探求は具体的に以下の二つの根源的な問いに集約される。一つは、このような天体環境群がいかに形成したのかという「A. 生命生存可能環境の普遍性」への問いである。初期太陽系における惑星移動や物質輸送、スノーライン以遠から内側太陽系への揮発性成分の持ち込み、ジャイアントインパクトを伴う地球型惑星形成の理解もこれに含まれる。これらの過程によって、地球型惑星のみならず氷衛星においてもその初期水量や大気・海洋組成が決定され、生命につながる環境群が形成された。もう一つは、反応ネットワークをもつ天体がどこにどれだけ存在するかという「B. 生命生存可能環境の多様性」への問いである。小天体、氷衛星、火星における、生命前駆物質を含む反応ネットワークの特性とその決定要因（熱・内部進化、惑星大気・気候）を、実試料や観測に基づき理解する試みがこれに含まれる。地球では天体進化と生命進化によって、生命誕生前の環境進化に関する情報がほとんど失われている。したがって、当然のごとく、この復元には地球以外の太陽系天体に記録されたこれらの情報が不可欠となる。さらに、生命生存可能環境の探査で得られる、環境に対応した生命の有無に関する知見と地球生命環境との比較、さらには系外惑星観測によって得られる生命生存可能環境の普遍性に関する知見、これらを統合することによって宇宙における生命の形成と進化、普遍性の理解への突破口となる。

具体的なアプローチとしては、太陽系探査のプログラム的実施によって、現在や過去に関する実証的なデータを積み上げていく必要がある。現在ある探査計画では、「A. 生命生存可能環境の普遍性」に答えるものとして、Martian Moons eXploration（MMX）、ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査（OKEANOS）、木星氷衛星探査計画（JUICE）が計画され、彗星 SR 探査（CAESAR）がこれに続く。また、「B. 生命生存可能環境の多様性」に答えるものとして、現在進行中の「はやぶさ 2」に加えて、上と同様に MMX、JUICE が計画され、小型周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査が続き、系外惑星観測、さらには火星地下圏・生命圏着陸探査へとつながる。これらの探査は、太陽系科学分野が推進できるアストロバイオロジーのアプローチであり、さらに日本に強みのある極限環境生命科学・地球化学などの他分野の専門家と協力することによって真の生命の定義を解明することが期待できる。生命生存可能環境の普遍性・多様性の解明を目指したこれらの探査では、実証に基づいた環境の解読・復元が最重要であり、生命とその痕跡、生命関連物質の

検出はもとより、大気や流水、堆積場や反応場に関する環境指標の読み出し、年代決定などを並行して行うべきである。また、比較惑星学的な手法で、太陽系における生命につながる表層環境の進化を俯瞰的に理解していく戦略が必要である。最近の太陽系形成論はダイナミックな惑星移動を示唆しており、それらの影響が各天体にさまざまな形で刻印されているはずである。各探査を通じて環境の特性を記述する指標群を明らかにし、激変する太陽系環境を共有する各天体環境をそれらの指標が形作る多次元空間に配置することで、太陽系における生命祖依存可能環境の普遍的描像を明らかにしていく。アストロバイオロジーは世界的潮流であるものの、そのなかで生命を育み得る環境の誕生と進化という視点で、太陽系全体を誕生期から生命の誕生をへて現在まで俯瞰すること（つまり CHASE）を探査のバックボーンに据えるのは、日本独自の視点である。

1.2　火星探査に関する海外の動向

NASA は火星探査のロードマップとして、2000 年代の「水およびその痕跡の発見」、2010 年代の「ハビタブル環境の理解」、そして 2020 年代には「生命の痕跡の発見」を提示している（図 1）。このロードマップに従い、火星サンプルリターン計画（MSR: Mars Sample Return）および有人火星探査計画へ向け、着々と準備が進められている。2020 年には MSR 用のサンプルキャシュを搭載したキュリオシティーとほぼ同型のローバーが火星に向けて打ち上げられる予定である（Mars2020）。また、それに先立ち、2015 年からは周回機メイブンによる火星大気の観測が開始され、2018 年からは着陸機インサイト（InSight）による火星内部構造探査が予定されている。

2000 年代初頭までほぼ米国により主導されてきた火星探査は、欧州宇宙機関（ESA）によるマーズ・エクスプレスの成功を受け、国際協調の時代に突入し、現在その流れはさらに加速しつつある（火星探査の歴史に関しては臼井・宮本（2014）を参照いただきたい）。地球に匹敵するほど複雑で多様な惑星である火星を理解するためには、国際的な枠組みの中で科学目標を精査し、お互いを補完し合うような総合的・相補的な探査計画を策定する必要がある。このような国際的な取り組み（MEPAG）は NASA が主導する形で既に始まっており、科学測機の提供という形で現実化している。例えば、Mars2020 のローバーには、フランスやスペインなどの科学測機が搭載されることが決定している。また、科学測機の提供だけでなく、Mars2020 と競合かつ補完関係にある ESA の複合探査ミッション（ExoMars）や、MSR のプレカーサとなる日本の火星衛星サンプルリターン計画（MMX: Martian Moons eXploration）が予定されている。国際的な枠組みでの実施が検討されている火星サンプルリターン・火星有人探査（2030 年代以降実施）に日本が主導的な役割を果たすためには、それまでに独自の火星探査を成功させ、国際的な信頼を獲得することが必須となる。

1.3　日本の探査プログラムにおける戦略的火星探査プログラム位置づけ

1.1 節で述べた CHASE 火星探査は極めて重要な役割を果たす。火星は、内側太陽系の外縁部、すなわちスノーラインに近接する位置に存在するため、外側太陽系からの物質輸送や巨大ガス惑星の移動に対して、これらの影響を最も鋭敏に受けてきたことが予想される。また、初期火星の表層には豊富に水が存在し、生命生存可能な表層環境が地質年代に渡って存在していたことが、これまでの探査から明らかになっている。内部海が存在する氷天体は太陽系にも複数存在するが、表層に液体の水が長期間存在していたのは、地球を除けば火星のみである。このように「A. 生命生存可能環境の普遍性」、「B. 生命生存可能環境の多様性」という両方の根源的問いに対して、火星は唯一無二の重要性を持つ。数多ある太陽系天体のなかでも、火星は上記の両方の問いに迫ることのできる理想的な天体と言っても過言ではない（図 2）。これまでは CHASE の持つ 2 つの根源的な問いについて説明してきたが、具体的な探査目標は対象や方法ごとに異なるために再整理する必要がある。特に火星に関して、探査内容と対象を整理すると、「A. 生命生存可能環境の普遍性」に関しては

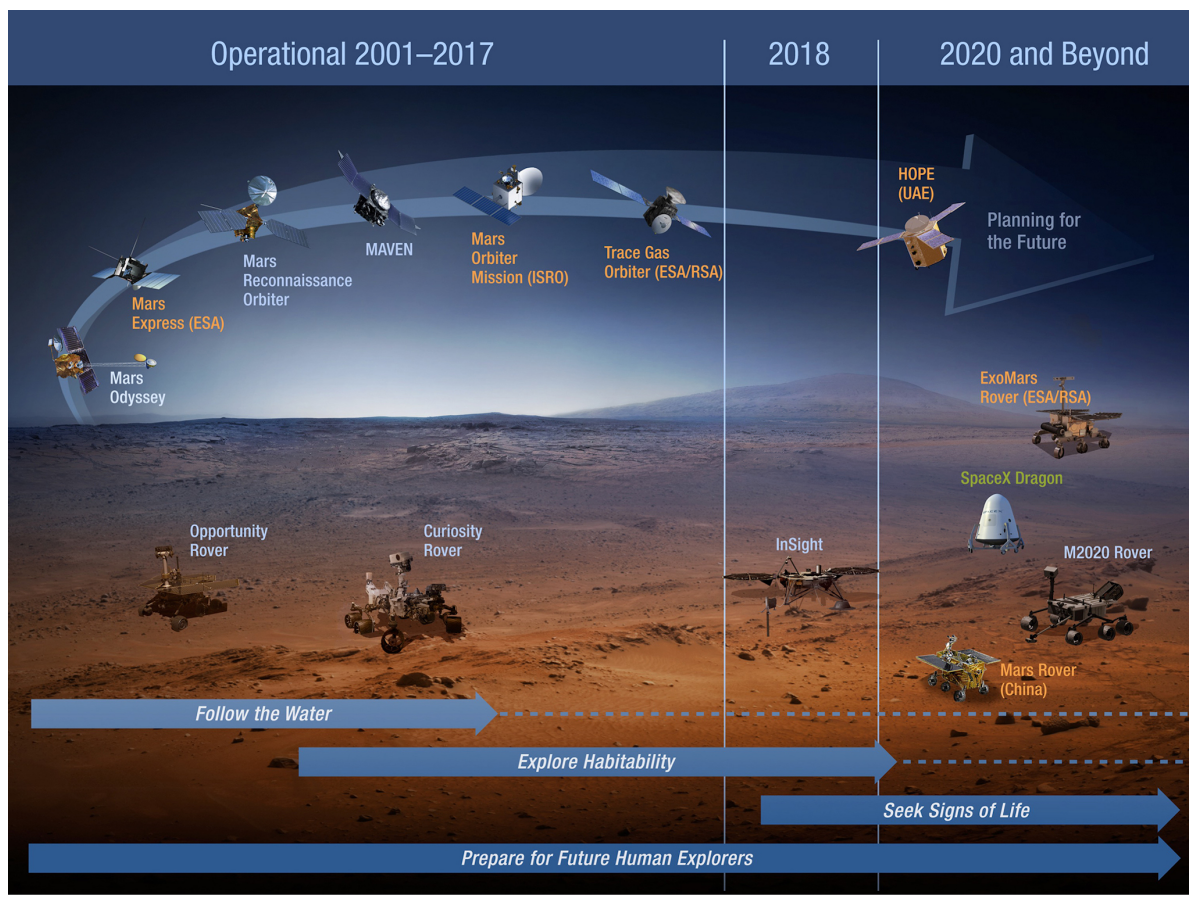

図 1: 将来火星探査計画（Mars Exploration Program report）の概要。第 33 回 MEPAG 会議報告書より抜粋

A1　惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動、天体への供給
A2　惑星・衛星の形成・初期分化

「B. 生命生存可能環境の多様性」に関しては

B1　地下熱水環境：鉱物―水―有機物反応系
B2　生命前駆物質の形成・進化
B3　大気（海洋）散逸・光化学反応
B4　生命およびその痕跡

が挙げられ、これらを、広い時空間スケールを見渡す視点で理解するためのミッション計画が重要となる。以下では、この A1 から B4 の分類にしたがって、火星に着目して日本の戦略と期待される成果を述べる。

A1 については、MMX による SR が直接的な貢献をする。火星の衛星であるフォボス・ダイモスの起源については、水や炭素を含む始原的な D 型/C 型小惑星の捕獲説と、地球の月と同様の巨大天体衝突説の 2 つがあり未だ決着がついていない。MMX ではこの火星衛星起源論に決着をつける。特に前者の捕獲説の場合は、惑星材料物質・生命前駆物質の移動、地球型惑星への供給に制約を与えることになる。太陽系遠方から飛来した小天体が、火星に重力的に捕獲される確率は低いため、実際に D 型/C 型小惑星が火星に捕獲されたことがわかれば、そのような小惑星群が内側太陽系へ高フラックスで供給されていたことが示唆される。このような小惑星の供給の定量化は、火星のみならず地球や金星への惑星材料物質の供給や惑星表層環境の形成の理解につながる。

A2 では、火星衛星 SR と火星着陸機によるその場岩石分析が重要となる。上記のように、火星の

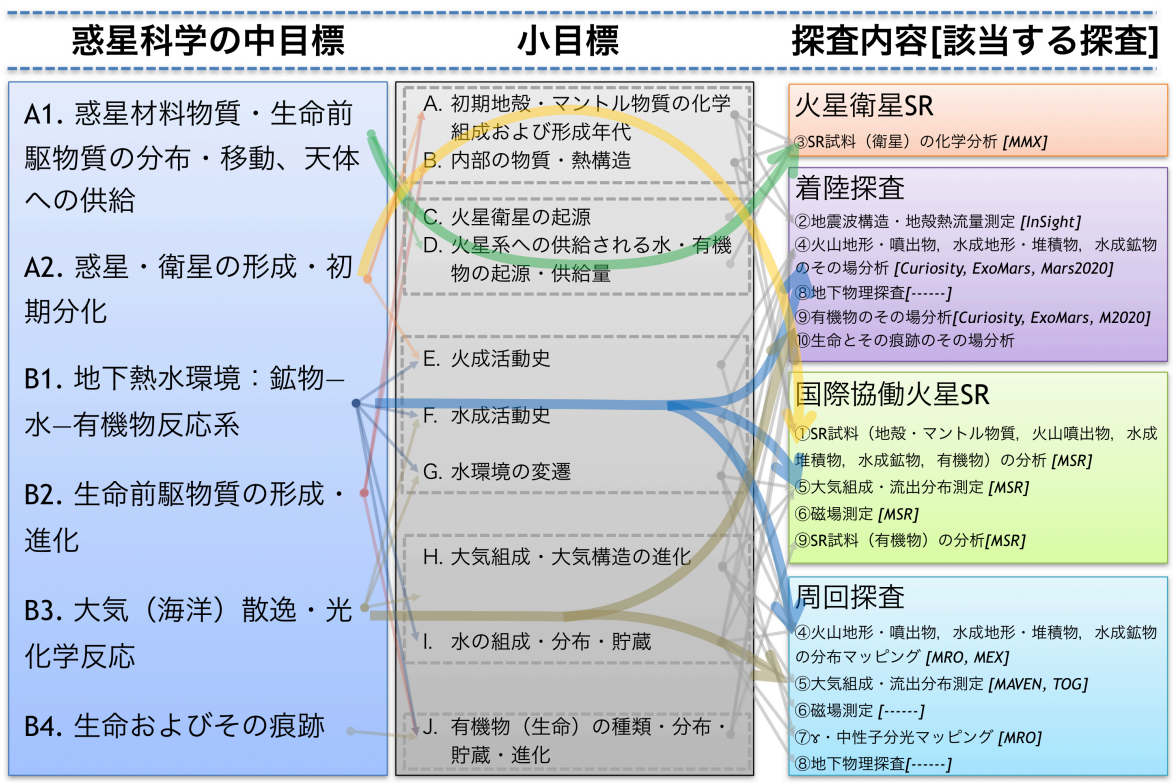

図 2: 火星探査プログラムにおける科学目標

衛星は、小惑星の捕獲説の他に、地球の月と同様に巨大天体の衝突で衛星が形成したという説もある。巨大衝突説であった場合、衛星には初期火星の原始地殻成分も多く含まれる。原始地殻の化学組成は、初期火星の分化過程を反映しており、それを地球に持ち帰ることは、広く地球型惑星の形成領域における初期状態の解明に資する。また、着陸探査車による火星地下圏・生命圏探査では、表層物質のその場化学分析も行う。着陸地点には、水と未反応の地殻も衝突掘削された岩片として複数存在していることが高い確度で予想される。これら地殻成分のその場化学分析によって、地球のプレートテクトニクスに伴う地殻のリサイクルに似た固体惑星進化が、火星にも存在していたのかを理解することができる。

B1 については、着陸機による火星地下圏・生命圏探査を中心に進めることが鍵となる。火星は、欧米の探査が大きく進展しており、火星史が解読された：38 億年前以前は地表水量が少なく、地殻深部での熱水活動や大規模水循環が起きていたが、38〜35 億年前には地表を海が（少なくとも間欠的には）広域に覆い、層状堆積物を伴う流水地形を残し、さらに 35〜30 億年前には、気候が寒冷乾燥化し、表層水は酸性化したことが推定されている。この火星のダイナミックな環境進化の全容を把握し、背後にある進化の決定要因や駆動力を理解すること、さらには前生命化学進化や生命発生進化の可能性を検証することが重要となる。とりわけ、一部の深いクレータの底に露出しているとされる 38 億年前以前の火星の地下熱水圏の物質科学/物理探査/年代学探査が日本の独自性を出すものと期待される。着陸探査に必要となる着陸点への運搬や誘導制御の技術、あるいは搭載機器に用いられる技術は、小型月実験機 SLIM などを含めて、これを技術実証していく必要がある。他方、火星衛星表面には、天体衝突などで放出された火星本体の表層物質が含まれていることが予想されている。火星衛星 SR によって、表層環境を記録した試料を複数得ることで、火星の環境進化史や化学進化の理解につながることも期待される。

B2 については、MMX による SR と着陸探査によるその場分析の意義が大きい。上述のように、火星衛星フォボス・ダイモスは始原的な D 型/C 型小惑星が捕獲され形成された可能性があり、捕獲後は地球接近小惑星のように太陽に近づくこともないため、熱変成を受けにくく、内部に氷を保持する

可能性が高い。また、着陸機による火星地下圏・生命圏探査では、上述のように地下熱水圏の地上への出口となる深いクレータの底へアクセスする。地下熱水圏は、水素が豊富に存在する還元的な環境であることが室内実験などから予測されており、そのような還元的雰囲気下で有機物合成や化学進化も進行した可能性がある。これらが地表に現れる領域を探査することは、初期火星における生命前駆物質の形成・進化に対する最も有効な手段といえる。

B3 については、地球とは異なる境界条件（磁場の有無や惑星質量）を有する、火星大気の散逸やダイナミックスを理解する手法が有効であり、火星宇宙天気・気候・水環境探査が主たる役割を果たす。周回機観測によって、太陽風などの宇宙環境（外的要因）の変化に対する大気の瞬時応答とそのダイナミックスを明らかにすることで、40 憶年にわたり宇宙環境が火星大気進化に及ぼした影響を理解する。また、周回機観測に基づき宇宙環境の変動に対する地表放射線環境の変化を定量化することは、有人火星探査における宇宙飛行士の安全性の担保に直接的に資する。これは、今後の国際協働探査における日本の独自の貢献となる。着陸実証機は、軌道投入・着陸技術の立証のみならず、現在の火星において活動的な地質活動を見せる地表境域をこれまでにない空間解像度で撮影することで、その地質活動を誘発する原因（大気循環あるいは液体の水の季節的な形成・活動）を制約し、現在の火星における気候や水環境の理解を可能にする。さらに、MMX においても、火星衛星表面に打ち込まれた元素を帰還試料から抽出・分析できる可能性がある。

B4 に関しては、火星宇宙天気・気候・水環境探査と火星地下圏・生命圏探査をプログラム的に配置して進めていくことが重要となる。欧米の探査機によって、近年、火星および氷衛星での有機物、生命生存環境の発見が相次いでいる。欧米に遅れる事なく日本の特徴を生かした探査が望まれる。具体的には、火星表面での生命探査顕微鏡（LDM）は欧米にはない技術であり、これを搭載した着陸機による現存生命の検出を目的とした探査が考えられる。着陸候補地点には、現在の火星において活発な地質活動を有する Recurring Slope Lineae（RSL）といった小規模地形も含まれる。現存生命の検出を目指した生命探査は、そのリスク軽減のため、地質・地球化学探査とセットで企画すべきであろう。現状の戦略的火星探査プログラムにおいては、火星宇宙天気・気候・水環境探査における着陸実証機で候補地域の地質・地形調査を行い、活発な地質活動を誘発する原因を明らかにしたうえで、生命探査を行うという一連の流れが理想的である。着陸候補地点は、小規模かつ傾斜のある地域であり、そのような地域への着陸技術、および試料のその場分析技術は、月における実証を経る必要がある。生命探査において、実験室での回収試料の分析が決定的な科学的知見をもたらすことは論を待たない。はやぶさによって獲得した SR 技術は、はやぶさ 2・MMX のみならず、海外探査計画への参入へとつながる好循環を生んでいる。2030 年代に行われる米国による MSR においても、この流れを継続させることで日本の存在感を世界に示す。

このように戦略的火星探査プログラムは、CHASE が今後 20 年に定めた科学大目標に対して、文字通り戦略的に迫るものである。「A. 生命生存可能環境の普遍性」に関しては、MMX が中心的な役割を果たし、同時に、はやぶさ 2 や OSIRIS-REx の小惑星 SR 探査の知見を合わせる。これにより、2020 年代の後半には、火星を含む内側太陽系の初期状態や揮発性成分の持ち込みについて実証を伴う理解レベルに到達する。2030 年代には、OKEANOS や JUICE、CAESAR によってこの理解を外側太陽系へと展開し、初期太陽系形成の全容について実証的に理解することができる。「B. 生命生存可能環境の多様性」に関しては、まずは火星宇宙天気・気候・水環境探査が中心的な役割を果たし、同時に木星系氷衛星探査計画 JUICE の知見と合わせる。これにより、2030 年代前半には、太陽系内に広がる生命生存可能環境の多様性や持続性について実証を伴う理解レベルに到達する。2030 年代後半には、これに続く火星地下圏・生命圏探査が中心となり、火星において生命を育む環境を地質・化学に基づき読み解き、そこにおける生命の痕跡、あるいは生命前駆物質や現存生命の検出へと進んでいく。

2　戦略的火星探査プログラム提案

2.1　戦略的火星探査プログラムのロードマップ

火星 TF では、2030 年代の「火星地下水圏・生命圏探査火星着陸探査（2.4 節）」を今後 20 年のマイルストーンと見据え、2020 年代の「MMX（2.2 節）」および、それに続く「小型周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画（2.3 節）」の 3 つからなる、**戦略的火星探査シリーズ**を提案する。なお、各探査の意義および惑星科学における位置づけは 1.3 節を参照されたい。

我々の提案する戦略的火星探査シリーズは（図 3）、工学および観測装置の技術開発の観点において、月探査やその他の惑星探査ミッションと紐づけられ（図 4）、国際宇宙探査の視点で JAXA 全体の惑星探査ロードマップ（図 5）に組み込まれるよう策定した。つまり、（１）2020 年代中盤の MMX（2.2 章）を端緒に、同時期に実施される月着陸探査（SLIM・月極域探査など）で獲得される重力天体着陸技術を生かしながら、（２）2020 年代後半から 2030 年代初頭にかけ、火星での着陸実証技術の獲得を目指した火星周回機探査（2.3 章）を行い、（３）2030 年代の本格的火星着陸探査（2.4 章）へとつなげていく。また、2020 年代から 2030 年代にかけては、国際協働での MSR 計画が実施される。日本が MSR に主体的に参画していくためには、技術協力やリターンサンプルの共有などで国際化の進みつつある MMX を参考に、火星周回探査においても国際協働の枠組みでの実施を検討すべきである。

図 3: 火星 TF の提案する戦略的火星探査プログラム案の概略

2　戦略的火星探査プログラム提案

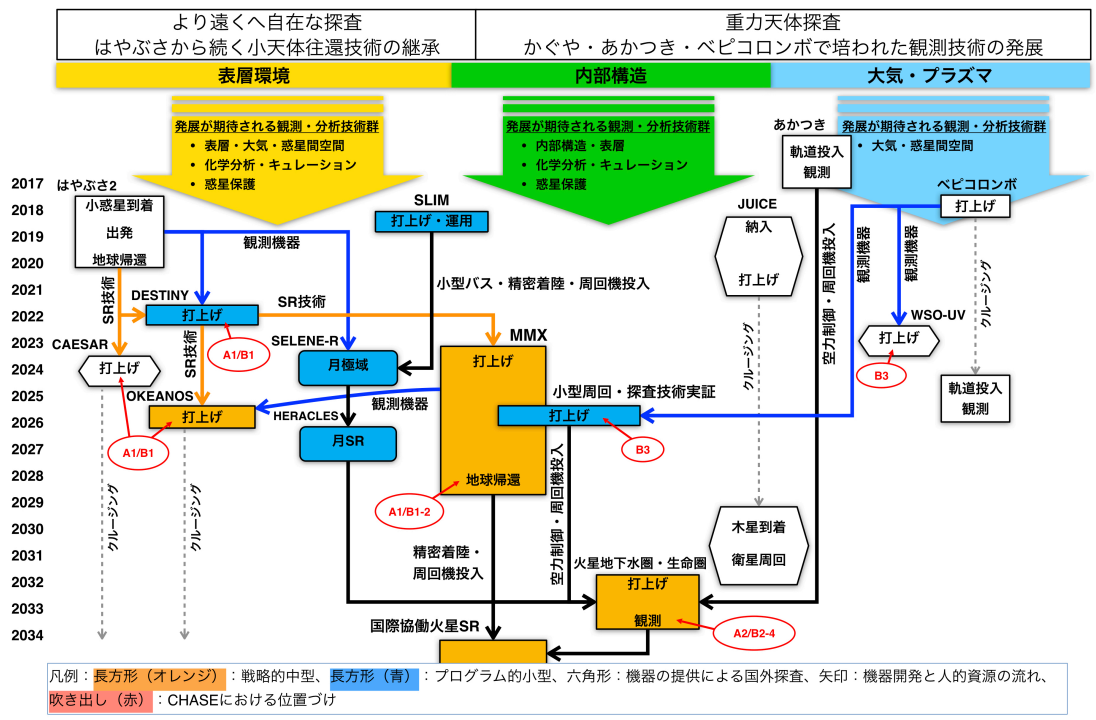

図 4: 惑星探査プログラムにおける惑星探査技術の開発・発展と戦略的火星探査プログラムとの関連（2018 年惑星科学会 RFI 資料を基に改定）

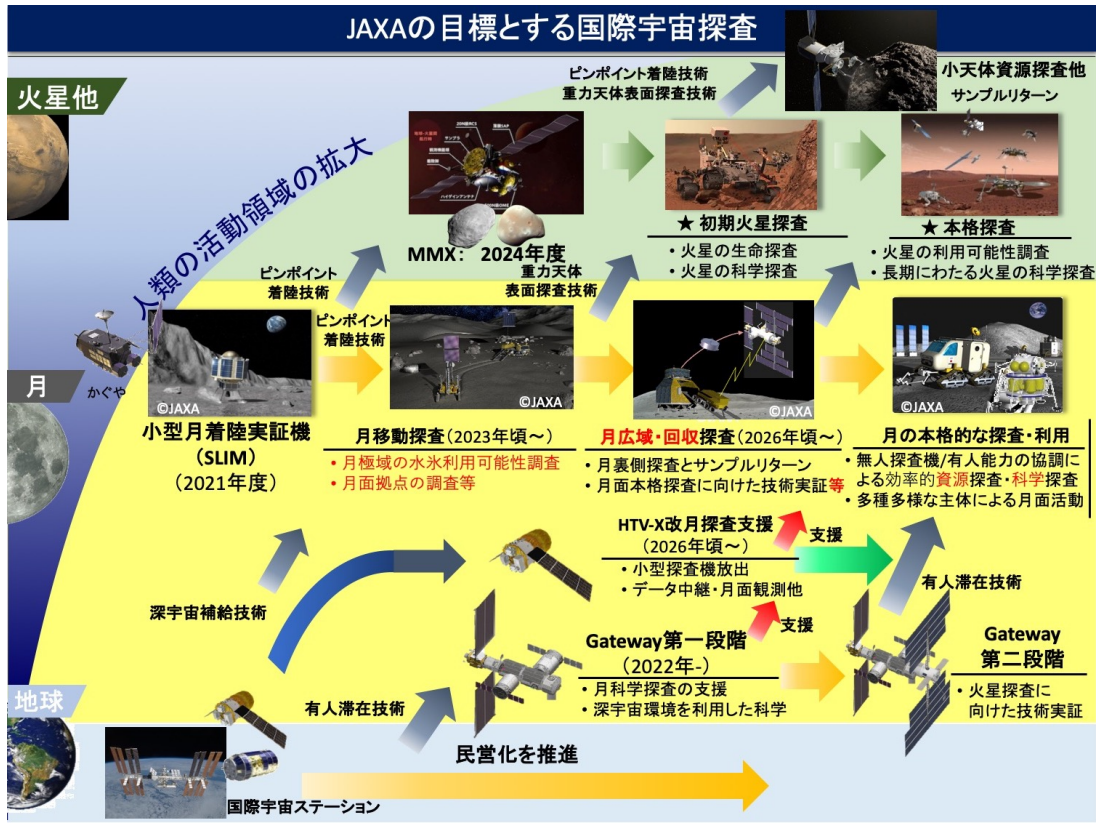

図 5: JAXA の目標とする国際宇宙探査戦略案（国際宇宙探査センター資料）

2.2　戦略的火星探査シリーズ–1：Martian Moons eXploration（MMX）

■背景と目的：　火星衛星フォボス・ダイモスは、唯二つの地球型惑星付随小型衛星である。共に低アルベドで D 型/C 型小惑星類似スペクトルをもつが、ほぼ火星赤道面内円軌道をとるという特徴がある。成因については、前者の特徴に整合的な始原的小惑星の捕獲（捕獲説）か、後者に調和的な火星周囲の破片円盤からの集積（円盤説、地球の月の成因に類似）かで論争が続いている。既に複数の探査機フライバイ観測はあるが、可視近赤外域での鉱物吸収が不明瞭であり、表面物質は未同定である。ランデヴーや着陸などは行われていない。ロシア等の Phobos-Grunt はフォボス表層物質の SR を目指し 2011 年に打上げられたが、地球軌道の離脱に失敗した。2024 年の打ち上げを目途に、戦略的中型探査計画 1 号機として準備が進められつつある火星衛星探査計画 MMX は、近傍観測によって表面組成、表層環境や内部構造を調べるとともに、フォボスに着陸して表面物質を採取して地球に持ち帰り、(1) 衛星の起源と歴史（捕獲説なら太陽系初期進化・生命前駆物質の情報、円盤説なら火星材料物質と集積・変成過程）と（2）火星環境を支配する天体衝突史・大気散逸史の制約を目的とする。回収試料の酸素同位体比などを火星隕石や将来得られる MSR 物質と比較することで、衛星起源論争に決着がつけられる。また、火星起源物質の抽出やその同位体・年代分析についても、その場探査では実現できず、回収試料の分析が必須である。衛星は常に同一面を火星に向けているため、対火星表裏の比較や軌道方向に対する前後の比較ができるサンプリングが有効である。氷起源物質の D/H 比測定から火星環境進化の初期値が決められる可能性もある。同時に軌道からの火星大気の観測（日変化や大気の運動・物質輸送の理解）も組み合わせる。本探査は、火星衛星を通じて、初期太陽系での物質の分布・移動から、原始惑星誕生過程、ハビタブルな表層環境変動までの長期間の前生命環境進化を実証的に明らかにできる。

■領域内での位置づけ：　火星探査と小惑星探査をつなぐ位置にあり、火星着陸ミッションと強く連携した火星周回探査という側面と、はやぶさシリーズを継承・発展させる SR ミッションとして、より始原的で太陽加熱の影響の少ない（捕獲説）もしくは複雑な成因（円盤説）の小天体からの SR に挑戦する側面がある。そのため双方のコミュニティからの研究者の参加が実現しており、さらに比較衛星形成論として、地球–月系の起源と進化を探求する月科学/地球科学コミュニティとの連携も進展しつつある。

■サイエンス成果が与えるインパクト：　フォボスは国際的に見れば探査計画が複数あり探査対象としての注目度が高い。一方でダイモスはフライバイ観測も少なく未知な点が多い。そのため MMX には、国外からも高い関心が寄せられ、CNES、NASA がそれぞれ近赤外分光撮像装置と中性子ガンマ線分光計を開発・供給することが確約され、また軌道設計・着陸運用の検討や既存データの解析が国際協力の下で進められつつある。ダイモスについても近傍観測に限定されるものの飛躍的なデータ量の増加が期待され、全体として 2 つの衛星の比較学を進め、衛星の成因と火星圏環境進化の両目的に対してモデル制約力を高めることに貢献できる。また、火星衛星は将来の有人探査においても前哨基地や通信中継などの観点から注目されており、そうした計画に対しても貴重な科学情報をもたらすことになる。

■主要キー技術と開発状況：　ロシア・欧州共同での Phootprint 計画が ExoMars 後継の SR 探査候補として、NASA Discovery ミッション候補として PADME 計画、PANDRA 計画、MERLIN 計画がフライバイ探査（MERLIN は着陸を含む）として、それぞれ検討されていたが、いずれも実現のめどは立っていない。MMX 計画においては、SR 技術については、はやぶさシリーズの優位性を継承できる一方、フォボスが比較的大きな重力を持つことから、自律航法を取り入れた軟着陸を行うとともに、マニピュレータとコアラーを組み合わせた試料採取法が検討されている。衛星近傍での長期滞在には擬周回軌道の利用、往還航行については短時間での加速に優れミッション期間を短縮できる

化学推進を採用したシステム検討が進められている。衛星史・火星史の読み出しのため、サンプル量を 10 g レベルに増量し多地点からの試料採取を狙う。そのために帰還カプセルの大型化、試料混合の抑制が必要となる。観測装置には、表面地質、表面組成、周衛星環境の解明を主目的に、望遠カメラ（TENGOO)、多色広角カメラ（OROCHI)、近赤外分光イメージャ（MacrOmega)、ガンマ線中性子スペクトロメータ（MEGANE)、ダスト分析器（CMDM)、質量分析装置（MSA)、レーザ高度計（LIDAR）がノミナル機器として選定され、それぞれ設計開発が開始されている。MacrOmega と MEGANE についてはそれぞれ仏 CNES、米 NASA が提供し、それぞれの開発に日本側のメンバーも加わっている。一連の機器による観測は、着陸点選定、試料産状の決定、そして衛星近傍軌道からの連続撮像から火星大気循環の解明にも用いられる。

■準備検討体制：　JAXA におけるミッション定義審査・概念設計・システム要求審査は完了し、2019 年度初頭にプロジェクト化の予定である。探査機システム、軌道ダイナミクス、SR 技術に関しては宇宙研を中心に検討・基礎開発が進められ、科学面については北大、東北大、東大、東工大、名大、神大、国立天文台、立教大、千葉工大、早大など大学研究者らからなるサイエンスボードが検討をリードしている。搭載観測機器の検討・開発は、宇宙研の支援のもと、大学研究者を中心に進められている。

2.3　戦略的火星探査シリーズ–2：小型周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画

■背景と目的：　上述のように、今後 20 年程度の太陽系探査において、太陽系における生命生存可能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、表層に安定に水が存在するハビタブルな環境を保持していた地球外太陽系天体として、比較惑星学および宇宙生命学的研究を行う上で理想的な天体といえる。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、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一歩として、小型周回・探査技術実証機を組み合わせ、火星の大気や放射線環境の太陽変動への応答を調べるとともに、将来の着陸探査に向けた詳細観測と技術実証を目的とした火星宇宙天気・気候・水環境探査計画である。特に、極端な太陽変動への瞬時応答を調べることで、火星をとりまく宇宙環境と、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、将来の着陸探査に必要な技術獲得と表層および浅部地下水環境の調査を行う。

約 40 億年前の火星は海を持ち温暖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した気候を持つ惑星である。このような気候変動を引き起こすには、表層を覆っていた海水と 1 気圧分程度の CO_2 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。火星宇宙気候研究の重要課題として、水と CO_2 大気を宇宙空間に逃がすことができる物理機構の解明が挙げられる。現在の火星はグローバルな固有磁場を持たず、太陽風と大気が直接相互作用し、これまでに、NASA の火星探査機 MAVEN 等によって火星大気散逸現象を含む火星圏環境について多くの基本的描像が得られつつある。特に、惑星間コロナ質量放出（ICME）時の大気散逸率の増加や太陽高エネルギー粒子（SEP）によって引き起こされるオーロラ、残留磁化による誘導磁気圏の非対称、水素散逸率の短期変動などの、最近の MAVEN による発見は、火星周辺の宇宙環境や大気散逸率に太陽変動・固有磁場・下層大気や表層からの水輸送が大きな影響を与えることを示した。

太陽高エネルギー粒子の火星大気への侵入は、この相互作用の形態に依存するが、最近発見された新しい火星オーロラを使うことで、この相互作用の形態を可視化できる可能性がある。惑星地殻起源の残留磁化強度に差のある南北両半球を同時に撮像することで、固有磁場が大気散逸や放射線環境に与える影響をグローバルに捉えることが可能となる。また、将来の火星有人探査にとっても、火星周辺の宇宙放射線環境把握は重要であり、火星の宇宙放射線環境と太陽変動の関係を理解することは、火星の宇宙天気研究の重要な課題となっている。新しい火星オーロラの発見は、高エネルギー粒子環境を探査する手段として、火星オーロラのイメージングが有用な手段になることを示唆している。

さらに、現在の水循環を理解するのみならず、生命探査や有人探査を行う上でも、液体の水が現在の火星に存在するかを明らかにすることは優先度の高い課題である。現在の火星において、斜面上に現れる暗い筋模様（RSL）が発見されたことにより、その成因が流水なのか、水とは関係ない重力流なのか、その成因の解明が上記課題の解決に直結する重要事項となっている。RSL の成因を明らかにする鍵の一つは、高空間解像度での地表画像と表面スペクトルの取得、および形成地点付近での温度・湿度の計測である。先行探査を上回る高空間解像度を実現して細長い形状を持つ RSL 上の物質を特定し、重力流に伴う筋模様周辺へのダストの堆積の有無を調べるためには、各々、高度 100 km 以下からの分光観測、および高度 30 km 以下での近接撮像・分光観測が重要となる。RSL 周辺地域の気象条件の解明が、その成因の理解に直結することは言うまでもない。また、RSL の成因が流水である場合、地表浅部における帯水層・氷層の存在が期待される。RSL は火星の中・低緯度に分布しており、周回機によるレーダーサウンディングや高空間解像度撮像・分光観測を組み合わせることによって、広域的な地下帯水層・氷層の空間分布を明らかにするとともに、将来の着陸探査の候補地点選定にも貢献できる。

2　戦略的火星探査プログラム提案

本計画は、こうした近年の先行火星探査における新発見も踏まえ、ハビタブル惑星の理解に向けて、小型周回・探査技術実証機により火星における宇宙天気・気候・水環境を探ることを目指している。具体的には、以下の 3 つの達成目標を掲げ、その実現に向け、8 つの観測項目を計画している（表 1）。

1. 定地方時観測により、太陽変動への応答関数を観測的に導出し、過去 40 億年にわたり大気散逸がどのように変遷してきたのか、時系列で推定可能にする。すなわち、大気散逸が気候変動に果たした役割を理解する [下記の観測項目: B, D, E に対応]
2. 火星オーロラを用いて火星周辺の宇宙環境を可視化し、南北半球の比較により、放射線環境と大気散逸への固有磁場の影響を理解する [観測項目: A, B, C, D]
3. RSL に着目して現在の火星水環境を測定することで、火星の水循環を推定するとともに、将来の着陸探査の事前調査を行う [観測項目: F,G,H]）

モデル科学機器		観測項目	開発状況	搭載実績
周回機	磁場観測器	B, D	要求を満たす技術は既存。小型・省電力が必要な場合には開発が必要。（他計画用に現在開発中）	あらせ、 MMO
	高エネルギー粒子計測器	C	観測原理は確立。小型・省電力化が現状の課題。(三軸探査機用を2018年度に飛翔実験予定)	あらせ(スピン探査機用)
	電子計測器	D	搭載実績は多数。小型省電力化は発展的課題。	あらせ他
	イオン質量分析器	D, E	搭載実績は数例。小型省電力化や高質量分解能は発展的課題。(MMX用[M/dM=100]を現在開発中)	あらせ、 かぐや他
	大気流出観測カメラ	E	高コントラストオプティクスの要素実験は了。小型・軽量化のためオーロラカメラとの共通化を検討。(BBMによる迷光総合評価を今後実施予定)	あかつき(ベース機器)
	オーロラカメラ	A	IMAP/VISIをベースに、MAVEN/IUVSチームと協力してSNR・光学概念設計を検討中。迷光対策等のため大気流出観測カメラとの共有化を検討。	
	レーダーサウンダ	F	技術的な実現性のリスクはなし。但し前搭載から10年を経ており、担当可能なメーカによる高周波化・新規部品によるリソース削減見通の再検討が必要。	のぞみ、 かぐや
	中性大気流出観測器*	E	海外協力での搭載を検討。	
	テラヘルツ分光器*	G	天文・地球観測ミッションで、技術・手法は確立され、観測実績も豊富。小型省電力化が発展的課題。	Herschel、 SMILES他
着陸技術実証機	高解像カメラ	H	はやぶさ２/DCAM等を参考に詳細は今後要検討。	はやぶさ２
	気象測器	H	詳細は今後検討予定。小型省電力化も課題。	

*オプション機器

表 1: モデル科学機器の開発状況

■領域内での位置づけ：　本計画のうち周回機については、ISAS にて戦略型中型計画公募への提案を目指し 2011 年末に設立された、火星大気散逸探査（のぞみ後継機）検討 WG と地球電磁気・地球惑星圏学会（SGEPSS）地球型惑星圏環境分科会が中心となり検討を進めてきた探査計画が母体となっている。この火星周回探査計画については、SGEPSS 運営委員会の承認を得て同学会長名で提案した「火星における宇宙天気・宇宙気候探査計画」が、日本学術会議のマスタープラン 2017 の学術大型研究計画の一つとして選定されている（計画番号 79、学術領域番号 24-2）。また、各学術コミュニティから宇宙科学研究所に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。また、その後の更なる学会を超えた分野横断的な火星研究者コミュニティにおいて火星探査のシリーズ化を視野に入れたロードマップの議論を深めた結果、着陸技術実証機を加え、我が国の火星探査の MMX（2.2 節）の次のステップとして本火星探査タスクフォースにより位置づけられた。この過程で、将来の着陸探査

に必要な技術獲得と表層および浅部地下水環境の調査の実施を目的に加えている。

■サイエンス成果が与えるインパクト：　近年、太陽の活動が惑星環境に与える影響の理解は大きく前進し、地球においては太陽活動が我々の生活に及ぼす影響を予測する宇宙天気研究が多方面で推進されている。また、多数の系外惑星が発見される中、惑星の生命居住可能性（ハビタビリティ）の理解の観点から、主星の活動と惑星圏環境の関係をより普遍的に理解しようという惑星の宇宙気候探求の機運が高まっている。火星が過去にどのようにハビタブル環境を獲得し失ったのか、過去の気候を推定するにも現在の水環境の理解は不可欠である。我々の検討している「火星宇宙天気・気候・水環境探査」は、この学際的な新しい研究の大きな流れの中にあり、本計画で得られる知見は、遙か彼方の系外惑星がどのような大気と表層環境を持ちうるかを、推定する手がかりを提供する。また、火星有人探査にとっても、火星周辺の宇宙放射線環境把握は必須といえる。世界的には、宇宙天気フォーラムなどで、火星周辺の放射線環境の議論が始まっているとともに、火星有人地表探査へのステップとして、火星有人周回探査の検討なども始まっており、本計画は、学問的な価値に加えて、将来人類の活動領域を火星にまで拡大するために重要な探査であるという側面も持っている。

■主要キー技術と開発状況：　前述の科学目的達成のため、本計画では、モデル科学機器を表 1 の通りを設定しており、その開発状況・搭載実績等は表の通りである。一方で、探査機システムとしての小型周回・探査技術実証機の組み合わせは、3 章で述べるように、規模に応じて複数の解が考えられており、今後の検討課題となっている。ただし、最小規模のエアロキャプチャオービターであっても、搭載科学機器としてオプションを除く総重量約 40 kg、電力約 90 W が搭載可能であれば、達成目標のうち、1 と 2 は達成できる。各探査機システムに関する主要キー技術と開発状況については、3 章を参照いただきたい。

■準備検討体制：　ISAS、東大、東北大、大阪大を中心に理学研究者約 40 名と工学研究者約 10 名で検討を実施してきた。中型計画を想定した ISAS 旧火星大気散逸探査（のぞみ後継機）検討 WG での検討においては、2013〜2014 年度に戦略的開発経費によってミッション要求に基づいた探査機システム検討を行い、周回機については、軌道設計や科学機器配置等も含めて成立解があることが確認された。また、各観測機器の開発要素の検討については、科研費や基礎開発経費、各担当者の持つ資金で行っている。今後は着陸技術実証機の検討チームと合同して検討を進めていく予定である。

2.4　戦略的火星探査シリーズ–3：着陸機による火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画

火星は、時間的・空間的に生命を育む環境をダイナミックに変化させてきたハビタブル惑星である。現在広く受け入れられている火星進化の描像によると、38 億年前以前の火星では地表面に存在した水量は少なく、地殻深部での熱水活動や地下水循環がおきていたが、38〜35 億年前には地表にも液体の水が豊富に存在するようになり、流水地形を残し、さらに 35〜30 億年前には、気候が寒冷乾燥化し表層水も酸性化したと推測されている。38〜35 億年前に表層の流水によって形成された層状堆積物は、アクセスしやすく、Curiosity や ExoMars といった大型探査はこのような層状堆積物を集中的に調査している。他方、火星のダイナミックな環境進化を理解する上では、異なる時代や空間を調べることも必要不可欠である。現在、38 億年前以前に活発に起きていたと考えられる、地殻熱水活動に伴う地下水圏・生命圏をターゲットとする計画はなく、環境進化の全容を理解する上で重要なパーツが空白のままである。本提案では、38 億年前の地殻熱水環境・地下水に関連した露頭のローバによる着陸探査を行う。露頭に存在する炭酸塩・蛇紋石の地球化学的分析に基づき、以下の項目を明らかにする：1）火星地下水の化学的キャラクタリゼーションと化学合成生物のハビタビリティの理解（水溶液組成、pH、酸化還元ポテンシャルの推定）、2）初期火星温暖化機構の制約（大気 CO_2 分圧の推定）、3）水素・炭素の表層リザーバサイズと水散逸史の制約（炭素・水素・酸素同位体化学）。

もう一つの大きな研究目的は、現在の生命生存可能性と生命の探査である。Curiosity や Mars Reconnaissance Orbiter 等の近年の探査は、現在でも地下氷があり、地球と同程度の熱量が地下から移動しており、生命の生存に可能な元素（CHONSP）、酸化還元エネルギー源化合物（硫化鉄やメタン）、有機物の存在を明らかにした。また火星環境は地球微生物であっても生存可能な環境であることも明らかとなってきた。こうした背景から Curiosity、ExoMars、Trace Gas Orbiter、Mars2020 は生存可能条件、メタンや有機物にターゲットとする探査を行いあるいは予定している。その先を行き、4）生命生存可能条件の検討、5）有機物だけでなく、6）生命（細胞）その物の探査を行う。

■領域内での位置づけ：　太陽系天体における生命前駆環境の理解のためには、化学進化や初期生命進化に必要な 3 つの要素（エネルギー、環境、物質進化）に関して、様々な天体を貫く共通の問いに、探査を通じて答えていくことが重要となる。本提案の 1）の目標は、初期火星における上記エネルギーの問いの答えに直結し、2）および 3）は上記の環境に関する問いに答えるものある。また 4)、5）は現在における化学進化や初期生命進化に必要な 3 つの要素（エネルギー、環境、物質進化）に関して答えを与え、6）でその最終段階の生命そのものを探査する。これらは惑星科学およびアストロバイオロジーの中心課題であるだけでなく、「生命探査」は国際宇宙探査計画 8 つの大目標の一つでもある。

■サイエンス成果が与えるインパクト：　着陸機による火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画の科学的意義・波及効果を下記の 7 項目にまとめた。

1. 地下水のキャラクタリゼーションとハビタビリティ：地下水のキャラクタリゼーションとハビタビリティ：本提案では、火星露頭の炭酸塩や粘土鉱物の鉱物化学組成から、当時の火星地下水中の溶存主要元素濃度、pH、溶存炭酸イオン濃度や酸化還元ポテンシャルを推定する。熱水・地下水の化学的キャラクタリゼーションが行われれば、合成生物学による化学進化の再現や、地質学による初期地球へのフィードバックも行われるだろう。また、生物エネルギー論に基づいた生命代謝経路とバイオマーカの推定を行うことができる。
2. 温暖化機構の制約：炭酸塩の組成から溶存炭酸イオン濃度と pH が推定できれば、溶存平衡にある大気 CO_2 分圧やその温室効果も理論的に推定できる。地球型惑星のハビタブルゾーンの外側境界は、火星の理解に基づき設定されており、火星の温暖化機構の制約は、ハビタブル惑星の探索可能性の見直しにもつながり、系外惑星学への波及効果も大きい。

3. 物質循環と水散逸：本提案では、炭酸塩の炭素・酸素同位体および蛇紋石の水素同位体測定も行う。炭酸塩の同位体比測定は、当時の炭素循環に関するリザーバの存在を定量的に制約することを可能にする。加えて、蛇紋石が含む水素同位体比を測定することで、当時の水の水素同位体比や水散逸量を推定することができる。炭素循環に関する情報は、地球化学の惑星探査への本格的参入を促し、水散逸史の制約は、固体惑星分野と超高層磁気圏分野との協力関係の構築につながる。
4. 現在の火星活動：生命生存環境の観測はとりもなおさず現在の火星の活動と将来予定される有人宇宙探査への居住可能性を検証する観測となる。重要な観測として地下における氷および水の数 cm から数十 m 規模での存在状態の探査、関連した熱流量と、鉱物や地質解析が含まれる。とりわけ、RSL などの現在も活動的な場所が重要なターゲットとなり、また掘削探査も視野に入れる必要がある。現在も活動的な火星という描像を検証する探査となる。
5. 有機物の探査：有機物の起源としては現在過去の宇宙由来（隕石等）、過去の生物あるいは前生物反応由来の有機物がある。Curiosity が有機物を泥岩中で発見したことから火星での有機物の存在はすでに明らかであるが、その有機物の由来や性質は全く不明である。地質的存在状況と合わせて探査し、その質量分析によって有機物の火星における普遍性、由来、生物進化との関係を明らかにする。前生物史あるいは生物史を調べる上で必須の課題といえる。
6. 生命探査：生命が発見されれば、現在数百万人の研究者が研究している地球生物学を宇宙に通じる「生物学」へと一変させる、生物学における Copernicus 的転換となる。発見されない場合でも、有人火星探査の安全、惑星保護の確認のための必須の探査である。
7. 将来の有人火星探査を見据えた地下空洞探査：隕石による破壊や角礫岩化、太陽風による変成、ダスト嵐による撹拌効果を受けていない火星の「地下」において、ハビタビリティ（生命圏の誕生と持続条件・人類の居住圏の拡大）に関わる知見の拡大を意図する探査（火星火成活動調査、火星古地場調査、火星生命調査、火星の水調査）を目指す。

■主要キー技術と開発状況：　上記の探査を行うための着陸可能候補地の 1 つが McLaughlin クレータである。同クレータは、熱水活動に由来する地下水の湧出口であり、クレータの底には炭酸塩や蛇紋岩などの粘土鉱物を含む層状堆積物が 10〜20 km の範囲に存在している。また、Isidis basin の南側のクレータ壁や Nilosytis Mensae といった南北半球境界の斜面にも粘土鉱物や炭酸塩が露出しており、これら地域では広範囲に地下水および熱水の湧水があった可能性がある。上記地域および RSL へのアクセスにはいずれも斜面への高精度の着陸技術を必要とするが、月小型着陸機 SLIM によるヘリテージを活かしつつ、今後の重力天体での技術立証の積み上げによって実現する。またダークスポット等の平坦な場所に最近できたクレータも多い。これらも地下にアクセスする上で重要な候補となる。搭載装置としては、地下探査レーダーの他、試料の観察のための顕微鏡、鉱物化学分析を行うための α プロトン X 線分光計（APXS）および近赤外分光計、あるいはレーザ誘起分光分析装置（LIBS）およびラマン分光計の 2 種類の組み合わせが考えられる。また、同位体分析用の質量分析計も必要となる。これら機器の開発は構想段階であり、海外協力を得つつ進める。

■準備検討体制：　選定された場合には、JAXA 国際探査センターが主要実施機関となるべきと考える。ただし、主要観測機器の開発は、東大、立教大、千葉工大、玉川大、生命探査顕微鏡（LDM）ワーキンググループ（WG）で行っている。またローバについては、慶応大を中心に行っている開発内容を転用可能である。地下空洞探査に関しては、上記グループに加え、産総研や放医研など産業界にも幅広く協力体制を募っている。

3　技術開発戦略

3.1　戦略的火星探査に必要な技術

本稿で提案する戦略的火星探査を実現するためには多様な技術が必要である。最終ゴールを火星表層へのアクセスと火星地下水圏・生命圏の探査（2 節参照）と想定し、これを実現するために必要な技術のマトリックスと現在の技術到達度（TRL）の概要を表 2 に示す。いくつかの技術については、既に TRL の高い水準に到達しているが、火星特有の環境や、期待する技術要求が現在の能力を超えること考慮すると、既に宇宙応用が進んでいる技術についても TRL は低くなる場合がある。例えば、深宇宙通信技術は既に多くの探査ミッションで実用化されているが、火星探査アーキテクチャでは大容量通信が望ましいことを考慮すれば、その TRL は低いと考えることができる。大気突入技術は既に地球圏においては実用化されているが、火星大気においては未経験である。

本稿で提案する戦略的火星探査を実現するために特に重要な技術は、大気を有する重力天体の探査目標地点近傍へ正確に着陸する（Entry-Descent-Landing; EDL）技術、着陸点から探査目標地点へアクセスする技術、探査目標地点において試料等を採取する技術、そしてそれらの試料を分析する技術である。また、火星表層環境における熱・電力技術については、既存の技術の延長上にあるものの季節変化や希薄な大気による影響が顕著な火星表層環境での実績がないため、研究開発が必要な重要技術の一つと考えられる。深宇宙通信技術については、既に探査ミッションにおいて実績があるものの、性能向上が強く期待されている。火星よりダウンリンク可能なデータ容量が増加すれば、探査の成果拡大が期待できるとともに、宇宙エンタテインメント等の需要が高いスピンオフも期待できるからである。しかし、一般に通信容量を増加するにはアンテナ規模を大きくし電力を増加させなければならず、探査機の規模を小さくできないという本質的な制約を与えてしまう。要すれば、小規模の送受信システムを用い低電力で大容量の通信を可能とする通信技術を獲得することが望ましい。

技術	TRL	備考
深宇宙大容量通信	5	深宇宙通信については実用化されているが、戦略的火星探査では、大容量で小型・省電力の通信技術を獲得することが望ましい
高精度軌道決定・軌道制御	9	既に実用化されている
大気突入減速・耐熱	8	地球では実用化されているが火星圏では実証されていない
空力誘導	8	地球ではHSRCによる実証が完了している
超音速パラシュート	4	BBM実証まで完了も、現在は開発プログラムが休止状態にある
自律航法誘導(TRN)・障害物回避軟着陸	5	月圏での実証・実用化の計画が進められているが、現時点では低TRLに留まっている
着陸推進系	8	HTV等のRCSの利用が可能と考えられるが、重力環境では未実証である
探査ロボット・表面自律移動	5	地上でのフィールド試験に留まる。月圏での実証・実用化の計画が進められているが、本質的に火星表層では異なる技術となる
サンプリング技術・機構	5	はやぶさのサンプラは微小重力環境下のみで使用可能で、異なる技術が必要となる
火星表層環境での計測・分析	5	既存の測器で利用可能なものもあるが、多くは新規開発が必要である
表層環境での熱・電力制御(越夜・越冬技術)	3	実用化された既存技術の延長上にあるが、火星表層環境では机上評価に留まる。
重力天体用の構造・機構	4	重力環境では未実証であるが、地上での評価が可能と考えられる
ダスト環境での機構・潤滑	4	月圏での実証・実用化の計画が進められているが、火星表層環境では本質的に異なる
惑星保護技術(滅菌設備・検査設備)	4	カテゴリIVはパイロットプラントを用いた基礎研究がおこなわれている段階である

表 2: 戦略的火星探査に必要な技術と技術到達度（TRL）の概要

3.2　戦略的火星探査におけるアーキテクチャと技術開発ロードマップ

戦略的火星探査の実現に必要な技術のすべてを、一つの火星探査ミッションを実行する活動の中で獲得することは、コスト、時間、人的リソースの点でも極めて困難である。したがって、個々の必要技術の研究開発を進めながらも、利用できる実証済みの技術は最大限活用し、また他の宇宙ミッションで獲得が期待されるものを適切に取り込み発展させることによって、火星探査ミッションの実行時にすべての必要技術が獲得されている状況を作り出すことが望ましい。他の宇宙ミッションで獲得される技術を最大限活用するためには、他のミッションとの時系列な相関の中で、火星探査に必要なすべての技術が効率良く最短時間で獲得され、また他のミッションおける実績や技術の熟成によって高い信頼性を担保できるように、戦略的な技術開発を行わなければならないことを意味する。

戦略的火星探査においても、一度にすべての技術を用いるミッションを実行するのはリスクが高く、必要な技術を前駆的なミッションによって段階的に実証することが適切であろう。この場合、前駆的なミッションに用いられるアーキテクチャと技術は、主ミッションで用いられるそれらと本質的に同じものでなければならないことは言うまでもない。また、将来我が国が国際協働有人火星探査へ参加し、そのアーキテクチャの中で主要な役割を担うことを最終的な目標としている観点からは、火星有人アーキテクチャと調和的な技術の獲得を選択的に行うことが望ましい（このアーキテクチャの中では、我が国は、HTV-X を発展させた HTV-M を用いて火星軌道へ貨物を輸送し、エアロキャプチャによって軌道投入し、火星ステーションへランデヴーすることや、軌道上／火星上での環境制御生命維持サブシステム、中規模の着陸システムとローバ等移動プラットフォームによる探査を担うことを検討している)。火星後発国の我が国は、このような基本的な戦略を採用しなければ、効率的に（最小コストかつ最短時間で）最終ゴールに近づくことができず、将来の国際協働有人火星探査では限定的な参加に留まることが危惧される。

このような観点から、戦略的火星探査に必要な技術獲得に向けて、ミッションのアーキテクチャと技術開発ロードマップを以下に考察する。主ミッションのシステムアーキテクチャとしては、以下の 3 つが考えられる：

1. 超小型・分散型プラットフォームによる探査
   概要：　小型プラットフォームを多地点に分散させ、火星の多様性に関わる広域情報を獲得するもの。
   利点：　最もシステムが簡素・軽量で、コストも低い。一度の探査で多地点に到達し、火星の多様性に関わる広域情報を取得可能。技術的にも柔軟エアロシェル、世界初の分散型小型プラットフォームなど、世界に類を見ない独創性を示す。
   欠点：　システムが簡素な反面、技術的難易度は高い。ミッション期間が短期間で、獲得される成果が「広く浅く」となりかねない。国際協働火星探査に至るロードマップとの相性も良くない。
2. 定点プラットフォームによる探査
   概要：　ランダ等の定点プラットフォームを着陸させ、プラットフォーム近傍（特に掘削による地下探査など）の詳細探査を行うもの。
   利点：　システムが比較的簡素・軽量で、コストも低い。固定プラットフォームの利点を生かした詳細観測（地震探査、高深度掘削による内部探査、回転計測など）も可能。将来の国際協働火星探査に至るロードマップとの相性も良い。
   欠点：　固定プラットフォームのため観測情報が極めてローカライズされる。このため、着地点の選定、着陸精度が重要となる。表面移動技術が獲得できない。
3. 移動プラットフォームによる探査
   概要：　ローバや飛行機等の移動プラットフォームによって中〜広域の詳細探査を行うもの。

利点：　移動可能距離の範囲内で広域な詳細情報を獲得することが可能。このことは着地点精度への制約を緩和し、ミッションの自由度を拡張し、計画を冗長とする。将来の国際協働火星探査に至るロードマップとの相性が最も良い。

欠点：　移動プラットフォームゆえに探査範囲は平面的に限定される（地下探査も可能であるが定点プラットフォームに比べると劣る）。技術的難易度はランダに比べて高く、コストも高い。

なお、いずれのアーキテクチャにおいても、ミッションの実現時点において、独自のオービタを有することが極めて有効である（あるいは必須である）ことは言うまでもない。主ミッションにおいて、オービタと地上系プラットフォームを同時に実現するミッションは、かつて MELOS ワーキンググループにおいて検討されたが、システムが複雑で規模が巨大（大型ミッションクラス）となることが分かっており、実現することが極めて困難である。したがって、オービタを前駆ミッションにおいて実現し、主ミッションにおいてこれを利用する、という 2 段階（あるいはそれ以上）の探査プログラムを想定することが合理的である。先駆ミッションにおいてオービタを用いることは、①火星オービタとして火星環境の長期的な科学観察（例えば火星宇宙天気・宇宙気候探査ミッション）を行うプラットフォームを提供し、②既存の海外の地上系プラットフォームへのデータリレーサービスの提供など国際協力に寄与し、③前駆ミッションに続く着陸ミッションのためのインフラストラクチャー（データリレー / EDL 支援機能等）を提供し、また④着陸ミッションの着地点選定に必要なリモートセンシングデータの獲得を可能とするなど、複数の利点を有する。

主ミッションのアーキテクチャとして 1〜3 のいずれを選択するか、ということは、戦略的火星探査のみならず、将来の国際協働火星探査へ我が国がどのように参加するか、という根源的な戦略へ影響を与える。2 および 3 は欧米がこれまで火星探査を行ってきたアーキテクチャであり、主流である一方、火星表層へのアクセスについては技術的な斬新さに欠ける。このため、探査目標地点の選定と、そこでどのようなサイエンスを行うか、という点において高い独自性や国際競争力が要求される。しかし、一旦このようなミッションを実現すれば、いわゆるオーソドックスな火星表層へのアクセス技術の獲得が可能であって、これに続く定点プラットフォームや移動プラットフォームを用いた火星表層環境の探査の実現が容易となり、国際協働有人火星探査においても、火星表層環境の探査を継続的に行う道が開ける。逆に 1 は技術とミッション形態において独自性が高く、このようなミッションを実現することによって、我が国の独自性を国際的に示すことが可能である。我が国が将来火星探査において、オーソドックスな火星表層環境の探査は他国に委ね、独自性の高いミッションを行うことに価値を見出すのであれば、1 は最善の選択の一つとなるであろう。いずれを選ぶかについては、広く議論して決定すべきである。

#	アーキテクチャ	概要
1	定点着陸実証機	EDLシステムとサービスモジュールから構成される着陸探査に特化した実証機で、MELOS提案の小型版。表層環境へのアクセスが可能で、表層環境探査に必要なほぼすべての技術実証が可能だが、オービタを有しない。
2	化学推進オービタ+ オプション地上系	化学推進により軌道投入されるオービタにオプション地上系として飛行機、ペネトレータ、あるいは簡易な着陸機等を搭載したもの。比較的小型のシステムで実現可能だが、表層環境探査のためのEDL実証は極めて限定的。一方、表層環境へアクセスできる点は価値が高い。
3	化学推進オービタ+ EDL実証機	化学推進により軌道投入されるオービタにEDL実証を取り込んだもの。表層環境探査に向けたEDL実証のレベルに応じて規模・コストが異なる。最もEDL実証の達成度が大きいものは1を取り込んだ初期MELOS形態となるが、極めて規模が大きなミッションとなる。
4	エアロキャプチャ オービタ(MACO*)	エアロキャプチャ（AC）によりオービタを投入するもの。ACによって定点着陸に必要な技術（着陸を除く）の実証が可能であると同時に、科学観測や通信リレー用の軌道プラットフォームが得られるが、表層環境へのアクセスはできない。
5	MACO+ オプション地上系	4にオプション地上系（2を参照）を搭載したもの。中型システムで実現可能で、ACにより着陸を除くEDL技術実証も可能。表層環境へアクセスできる点も価値が高いが、表面探査技術の実証は限定的。
6	MACO+ EDL実証機	4にEDL実証機を取り込んだもの。EDL実証のレベルに応じてACと重複する部分が発生する可能性が高く、システムも大規模となる。

表 3: 前駆ミッションのアーキテクチャ候補

■＝火星での実証が重要な項目		軌道上プラットフォーム	深宇宙大容量通信	高精度軌道決定・軌道制御	大気突入減速・耐熱	空力誘導	超音速パラシュート	自律航法誘導・障害物回避　軟着陸	推進系	探査ロボット・表面自律移動	サンプリング技術・機構	地上での計測・分析	表層環境での熱・電力制御（越夜・越冬技術）	重力天体用の構造・機構	ダスト環境での機構・潤滑	惑星保護技術（滅菌設備・検査設備）	規模・コスト
TRL		3	5	9	8	8	4	5	8	5	5	5	3	4	4	4	
1	定点着陸実証機	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	中
2	オービタ+ オプション地上系	○	○	○	△	×	△	×	×	×	×	△	×	△	×	○	中
3	オービタ+ EDL実証機	簡易EDL	○	○	○	○	×	○	△	△	△	△	○	○	○	△	○	中
		完全EDL					○		○	○	○	○				○	○	大
4	エアロキャプチャ オービタ（MACO）	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	小
5	MACO+ オプション地上系	○	○	○	○	○	△	×	×	×	×	△	×	△	×	○	中
6	MACO+ EDL実証機	簡易EDL	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	○	○	△	○	中
		完全EDL							○	○	○	○			○	○	大

表 4: 前駆ミッションのアーキテクチャと獲得可能な火星探査技術

ここでは一つの選択肢として、本稿で提案する火星地下水圏・生命圏の着陸探査を実現し、また将来の国際協働有人火星探査においても独自の火星探査を継続的に行うことを想定し、これに最も適合性の高い 3 のアーキテクチャを推奨し、これを実現するために最適と考えられる技術ロードマップを以下に検討する。主ミッションとして 3 のアーキテクチャを選択した場合、その前駆ミッションとして想定されるミッションのアーキテクチャを表 3 に、各アーキテクチャによって獲得可能な火星表層環境探査の必要技術の内訳を表 4 に示す。表 3 の 1 は、主ミッションである火星着陸探査ミッションのサブスケールモデルとなる定点着陸実証機を用いるものであり、着陸探査に必要なほぼすべての技術を獲得することができる。しかし、実現可能な規模に抑えるためにオービタを含まないアーキテクチャとなっており（NASA の MSL と同じアーキテクチャを用いる）、軌道上プラットフォームを獲得することができず、上記①～④を実現することもできない。また、一度にすべての技術実証を行うことになるため技術的なリスクが高く、規模も小規模に抑えることが困難であると考えられる。表 3 の 2～6 は 1 の欠点を克服するためにオービタを用いるアーキテクチャである。2 は化学推進を用いてオービタを投入し、オプション地上系として小型の地上系プラットフォームを投下するものである。システム規模を実行可能な範囲に抑える地上系としては、飛行機、ペネトレータ、あるいは簡易な着陸機を搭載することを想定しており、空力誘導や着陸推進系など、重要な EDL 要素技術の実証ができない。3 はこの欠点を補うために EDL 実証機を搭載するものであるが、システムの複雑さと規模は EDL 実証機の規模（あるいは取り込む技術の数）に応じて増大する。オービタに完全な EDL 実証機（1 に相当）を搭載したアーキテクチャでは、ほぼすべての技術実証を可能とし軌道上プラットフォームを実現するものの、システム規模とコストは大きくなり、実現は困難と考えられる。

表 3 の 4 は、オービタを実現しながら EDL 技術の部分実証を行うために、軌道投入にエアロキャプチャを用いるものである（Mars AeroCapture Orbiter ; MACO）。エアロキャプチャは、定点着陸に必要な空力減速や空力誘導による軌道制御を用いてオービタを軌道投入することから、これを用いることで、着陸の最終フェーズを除く EDL 技術の部分実証を行うことが可能である。また、エアロキャプチャはこれまで深宇宙探査において実行されたことがないことから、技術的独自性においても優れている。さらには、火星エアロキャプチャオービタは、火星圏輸送を行う HTV-M の実証ミッションとしての位置づけも担う。このように、軌道上プラットフォームを実現しながら、EDL 技術の部分実証を可能とし、将来の火星アーキテクチャへの連続性を有するという点において、MACO は前駆ミッションとして最も優れたソリューションの一つであると考えられる。しかし MACO 単体では火星表層環境へのアクセス手段がないため、地上系プラットフォームに係る技術を火星表層環境において実証できない。この欠点を補うものとして、オプション地上系を付加するもの（表 3 の 5）、あるいは EDL 実証機を付加するもの（表 3 の 6）が想定される。MACO は小型～中型規模の探査機で実現可能であるが、これらの地上系を付加することによって、獲得できる技術が増加する半面、システムの規模とコストは増大することとなる。最も推奨されるアーキテクチャは 4 または 5 であるが、5 においては地上系として何を選択しどの程度の規模とするかについて、十分な議論が必要である。

上記の議論に基づいて、前駆ミッションとして 4 または 5 を採用した場合の技術ロードマップを、他のミッションとの相関の中で図 6 に示す。定点着陸に必要な空力誘導技術は、2018 年に HTV 搭載小型回収カプセル（HSRC）によって実証され、現在、火星探査に向けた応用が進められている。着陸推進系を用い、画像情報による自律航法誘導（TRN）や障害物回避技術を有する重力天体への着陸技術は、SLIM–月極域探査（SELENE-R）–月サンプルリターン（HERACLES）という一連の月探査プログラムの中で獲得されつつあり、2020 年代後半の早い時期迄には火星着陸探査向けに十分な技術熟成度を実現していると期待できる。したがって、火星探査に必要な EDL 技術の技術到達度を効率よく向上させるためには、着陸最終フェーズの技術は月探査より得られる技術を活用し、2020 年代後半の早い時期までに MACO を実現して火星圏において大気突入減速・耐熱技術と空力誘導技術を獲得すればよいことになる。このように、MACO を 2020 年代後半の早い時期に実施することは、主ミッションである火星着陸探査に向けた深宇宙探査技術の継承と発展という観点からも最も合理的であり、さらには国際協働有人火星探査に向けた我が国の探査戦略にも調和的であると言える。

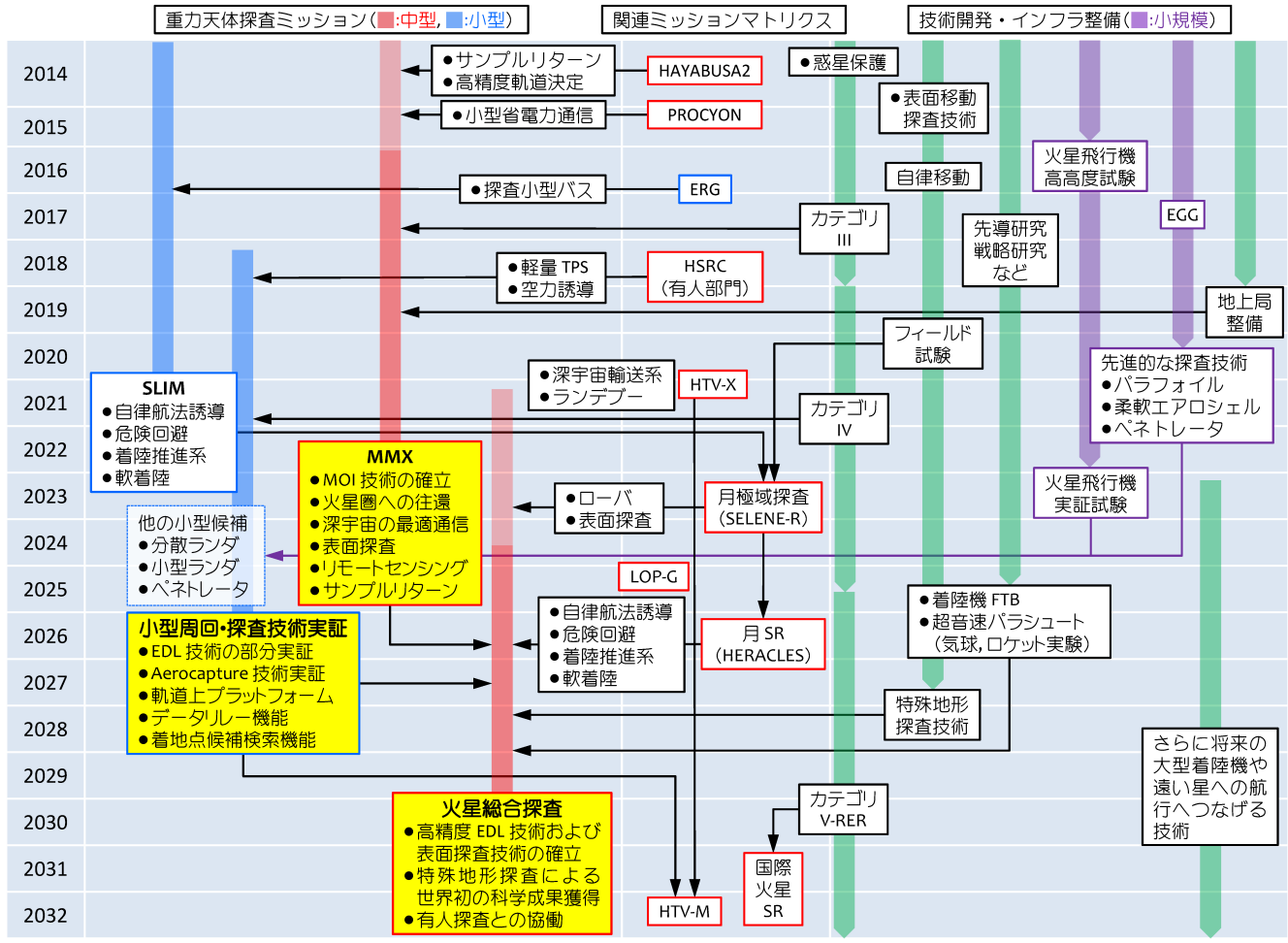

図 6: 戦略的火星探査の技術ロードマップ（案）

3.3　表面着陸技術（Entry-Descent-Landing; EDL）

本稿で提案する戦略的火星探査を実現する探査システムは、大気と重力を有する火星環境において、大気を利用した減速を最大限利用して降下し、探査目標地点や観測地点の近傍へ探査システムを正確に誘導可能な、自由度が高くロバストな定点着陸技術を有することが必要である。火星は多様性に富んでいるが、科学的に重要である着地点や観測地点は極めて局所的であって、着陸後のロコモーションによる移動距離を極小化する要請を考慮すれば、着陸精度として最悪でも数十 km 程度の精度で着陸することが要求される（より正確には 3.4.1 節の移動ロボットの移動能力とのバランスで決定される）。またそのような地域は、クレータや断崖の露頭であるなど、特殊な地形を有する場合も多い。すなわち、戦略的火星探査における科学目標を達成するためには、高精度で自在な着陸を行うことが必要である。また高精度の着陸技術は、特に火星においては、後述する 4.2.2 節の惑星保護の立場からも極めて重要である。例えば探査の目標地点として特別地域（special region）近傍を想定する場合、当該地域への汚染確率を COSPAR 惑星保護方針の要求する基準値以下にしなければならず、確度の高い正確な着陸や飛行が要求される。さらに将来の国際協働有人火星探査において我が国が担うべき役割として、我が国の強みである大気突入技術を発展させた着陸システムを用いることを想定すれば、着地点精度はクルーの安全に係る最重要項目であり、また我が国が特定地点の探査を担当する際も、これを獲得することによって我が国の国際有人探査における存在感を高めることが可能となる。このような議論から、戦略的火星探査における表層環境アクセスへの技術目標として

1. 目標とする探査地点への正確な誘導と着陸（定点着陸；着陸精度 < 20 km）
2. 高傾斜地など特殊地形への着陸（自在な着陸）
3. 目標とする観測場所へ正確に飛行すること（近接誘導）

の実現を目指すべきであると考える。

1 の技術要求を実現するためには、必要な減速を行いながら空力加熱から探査機を保護し目標地点近傍への正確な誘導を行う減速・耐熱・誘導システムと、着陸の最終フェーズにおいて十分な減速と障害物回避を行う着陸システム、あるいはこれを実行しながらローバ等の地上系プラットフォームを地表面へ降ろすステム（エアバッグシェルやスカイクレーン等）が必要である。減速・誘導システムとして最も有力なものは、アブレータを熱防御システム（TPS）とするエアロシェルによって探査機を保護し（大気突入カプセル）、これを用いて探査機を減速し、空力加熱から探査機を防御し、重心オフセットにより揚力カプセルとした上で RCS 等によるバンク角制御によって揚力方向を変化させ、目標地点までの誘導を行う極超音速空力誘導カプセルである。過去の諸外国のすべての火星地表探査においては大気突入カプセルが用いられており、我が国においても地球へのリエントリにおいて既に実用化されていることから（ただし火星環境では未実証）、大気突入カプセルを用いる方法が最も熟成した信頼性の高い技術であると考えられる。極超音速空力誘導技術は、米露では既に実用化されているが、我が国においても 2018 年 11 月に HTV 搭載小型回収カプセル（HSRC）により飛行実証され（TRL〜8）、基本技術が獲得された。現在 HSRC 後継機に向けた技術の熟成とともに、JAXA 研究開発部門の先導研究において火星探査を目標とした応用が進められており、本稿の提案する探査ロードマップに整合した開発計画となっている。当該技術を MACO によって実証することによって、2020 年代後半の早い時期には、火星着陸探査に必要な減速・耐熱・空力誘導技術が獲得される。

一方、我が国はインフレータブルエアロシェル（展開型膜面エアロシェル）を用いた大気突入技術研究開発の実績を有し、2012 年には観測ロケットを用いた MAAC 実験を、また 2017 年には ISS から放出された超小型衛星を用いた EGG 実験を行って着実な技術アップを図り、軌道上から地上へ帰還させる再突入実験（TITANS）も計画されている。しかし、現時点ではまだ軌道上から地上までの帰還実績を有しておらず、技術成熟度が十分とは言えない。NASA においても HIAD（Hypersonic Inflatable Aerodynamic Decelerator）や LHIAD（Lifting Hypersonic Inflatable Aerodynamic Decelerator）

など、柔軟 TPS を用いた展開型エアロシェルが検討されているが、これは将来の火星有人探査において必要となる巨大な貨物を火星表面へ輸送する際にエアロシェルがロケットフェアリング内に格納できないという課題を克服することを目的としており、膜面というよりも柔構造を用いたエアロシェルである。我が国が将来の国際協働有人火星探査のアーキテクチャにおいて巨大貨物を火星地表面へ運搬する役割を担うことを目標とするのでなければ、我が国にとっての技術的緊急性は低いと考えられる。インフレータブルエアロシェルの最大の利点は、その収納性が高いこと、展開が容易であること、軽量であること、システムが簡素であることであり、特に超小型・軽量の大気突入プローブにおいては、大気突入カプセルを用いたプローブをはるかに凌ぐ探査システムを実現することが期待できる。逆に、ある程度以上の規模（>10 kg）の地上系プラットフォームを地上へ送るためには、火星は大気が希薄であるため推進系による最終減速が必要であり（HIAD を用いた EDL システムも最終フェーズには推進系を用いた着陸システムを利用している)、システムはカプセルを用いた場合と同様に複雑となってしまう。最大の懸念は、エアロシェルが柔軟であることに由来する空力特性や物理特性の不確定性によって、定点着陸を実現するために必要な空力誘導を達成できるか明らかになっていない、という点であり、展開型エアロシェルによる空力誘導は、未だ研究の途上にあると言えよう。将来的には有望な技術であるため継続的な研究開発が望まれ、また超小型・軽量の大気突入プローブにおいて優れた探査システムを提供することが期待されることから、MACO の地上系オプションとして 2020 年代後半の早い時期に火星環境において実証するというアイデアも考えられる。

着陸の最終フェーズにおいて十分な減速と障害物回避を行う着陸システム、あるいはこれを実行しながらローバ等の地上系プラットフォームを地表面へ降ろすステムとしては、SLIM–月極域探査（SELENE-R）–月サンプルリターン（HERACLES）という一連の月探査プログラムの中で 2020 年代後半の早い時期に獲得・熟成される画像航法技術、着陸推進系技術、軟着陸技術等を火星探査向けに発展させることによって、火星着陸探査（本ミッション）に必要な技術獲得が可能となる。過去の火星探査ミッション概念検討におけるトレードオフによると、想定する中型クラス（地上系プラットフォームが 100 kg を超える）の探査システムにおいては、スカイクレーンを用いる方が着陸機を用いるよりもシステム重量を抑えることが可能であることが分かっている。技術的なハードルは高くなることが予想されるが、スカイクレーンは高傾斜地など特殊地形へ地上系プラットフォームを降着させることを可能とするため（地上系プラットフォームの方で高傾斜地や特殊地形に取り付く機能が必要)、月探査プログラムで獲得される着陸技術にスカイクレーンを付加したシステムの研究開発を行うことが望ましいと考えられる。

3.4　火星表面探査技術

これまでの火星表面探査は、着陸機による固定点の探査、あるいはローバを用いた移動探査が主流となっている。これら探査手法は、将来の火星科学探査を支える基盤技術であるが、これらに加え、本 TF がまとめる戦略的探査シリーズにおいては、RSL に代表される高傾斜地へのアクセス、縦孔など火星地下圏へのアクセス方法、高緯度での探査戦略も求められている。本節では、各探査手法の現状について特にその形態について概括し、将来探査への必要技術を俯瞰する。

3.4.1　着陸機や移動体による探査技術

着陸機を用いた火星探査での特長として、搭載カメラやロボットアームによる周囲のサンプル調査、固定点での長期間の連続観測などが挙げられる。特に気象探査や内部構造探査において、着陸機を用いる利点が大きい。また、移動探査に比べ、ミッションペイロードをより多く搭載することが可能であり、移動のための消費電力が無いことから、電力制約も低く設定できる。

火星表面での着陸機による探査は、1970 年代後半の Viking 計画が最初であり、その後、2018 年の InSight に至るまで 5 台ある。それぞれの着陸機の形態としては概ね画一化されており、衝撃吸収機構を有する 3 つの着陸脚と本体から構成されている。本体上部には、通信機器、マストを介したステ

レオカメラが配置される。また科学観測機器（例：気象観測）なども通常この上部に搭載されている。また、着陸機周囲の土壌サンプルを採取、あるいは観測機器を表面に設置するために、本体には比較的長尺なロボットアームを搭載している。

着陸機を用いた表層探査における技術課題として考えうるものとして、着陸時におけるスラスタ噴射によって火星表層の化学組成が変化する、あるいは土壌を吹き飛ばしてしまうなどの問題点がある。着陸機周囲のサンプル採取は着陸機搭載のロボットアームによって実施されるが、その長さには制限があるため、スラスタ噴射の影響圏外までの操作が実現しがたい。よって、表層サンプル採取およびその解析を主目的とした科学ミッションにおいては、スカイクレーン方式に代表されるような、火星表層のコンタミネーションを避けた着陸方法とするか、あるいはローバを用いた移動により、汚染の少ない地域を探査する必要があると考えられる。着陸方法については、着陸重量や着陸緯度によってもトレードオフが存在する。

火星極域探査において着陸機が使われている主な理由としては、電力収支の観点から推察するに、太陽高度が低く太陽電池による十分な発電量が見込めないため、電力消費の大きな移動探査は困難であることが考えられる。また、原子力電池を搭載するためにはシステム規模が巨大化し、着陸重量が増大してしまうため、Phoenix や InSight では太陽電池によって電力を賄っていると推察する。

移動ロボットによる表層探査：ローバを用いる科学探査の特長は、観測対象に極限まで近接し撮像する、あるいはサンプルを直接採取可能な点である。火星表面の露頭への LIBS による観測、火星岩石のドリリングやコアリングによる調査などはその好例である。

ローバを用いた火星表面移動探査の実績として、いわいるスタンドアロンタイプ（自立した通信や電源を有する）のローバでは、Mars Exploration Rovers の 2 機、Mars Science Laboratory での 1 機がある。いずれも 6 つの独立駆動する車輪を有しており、本体上部に航法誘導のためのカメラ（NavCam）、ならびに本体前後部に障害物検知用のカメラ（HazCam）を有している。また、通信系として、UHF 帯と X 帯の 2 系統を搭載しており、前者は火星周回衛星とのデータリレーとして、後者は地球との直接通信の際に使用される。電源系では、リチウムイオン系 2 次電池を基本として、外部電力ソースとして太陽電池あるいは原子力電池を用いた発電を行なっている。電力ソースについては、ローバの全備重量、搭載コスト、電力収支に基づいたトレードオフ検討により選択されている。熱制御系については、特に火星での夜間の断熱および保温がクリティカルとなっている。よって、これまでのローバでは原子力発熱装置を用いるとともに、熱収支を考慮して搭載コンポネントを平面配置とするとともに、火星大気をローバ外装の間隙部に閉じ込める方法（Gas Gap）によって、断熱性能を高めている。このように、ローバの形態も概ね標準化されてきており、Mars2020 はほぼ MSL の Curiosity と同型となることが示唆されている。

本報告書（国際宇宙探査委員会中間報告）の第 4 章「工学技術検討」において、ローバ・表面移動技術に関して技術的課題をまとめているが、ローバの主たる技術課題は、砂地上や岩石地を走破する不整地走行性能、長距離移動を実現する自律機能、火星環境で生き抜くための電源や熱制御技術がある。

3.4.2　特殊地形への探査

将来の火星探査において、科学的に重要な意味を持つ探査領域は、RSL に代表される急峻な斜面や露頭が多く存在する崖、あるいは、表層下の氷床や縦孔のようないわゆる火星地下圏へのアクセスが求められている。このような領域へは前述のスタンダードな着陸機やローバでは直接アクセス不可であり、特殊な移動機構やアクセス方法を開発する必要がある。

RSL や崖といった通常のローバでは走行不可能な領域へのアクセスについては、分離型ローバが提案されている。これは、テザーによって親機と接続された小型ローバが、急峻な斜面を降下し、サンプル採取後、テザーを手繰りながら親機へと帰還し、サンプルを運搬するというシステムである。小型ローバ展開時には投擲システムを用いて比較的遠方まで小型ローバを放出する検討も進められてい

る。以上のシステムについては、国内外の大学研究機関や民間企業においても、フィージビリティスタディが進んでおり、一部で地上実証試験も完了している。地下圏探査については、表層部分からコアラやドリルによって掘削し地下に向かって探査を進めるものが挙げられる。本報告書の第 4 章「工学技術検討」において記述があるが、2018 年 12 月現在時点においては、InSight に搭載されている Heat Flow Probe を土中に侵入させるための技術として、Self-Hammering Nail と呼ばれる自沈式のハンマ機構により、浅部土中へプローブを展開することが可能となっている。地上実験においては、5.5 時間で 5 m ほどの地中へと沈み込むことが確認されている。100 m 以上の深部へのアクセス方法については、掘削システムの必要電力やバス系必要機材の観点から比較的大規模な構造となると予想されるが、石油採掘企業が有する技術やノウハウの援用によって実現可能性が検討できると推察する。

3.4.3　探査形態の多様化に向けて

これまでの探査は、数 m から 50 km 程度の探査範囲が実現されているが、これらは「点」での探査、あるいは点の探査を連続した「線」の探査であり、ミッション期間も長大となっていた。より広域をより短時間で「面」の探査を実現することができれば、同一の時空間での広範な火星探査が可能となる。このような探査を実現するキー技術として、ドローンや飛行機といった火星大気中を飛行しつつ観測探査を行うものや、複数の小型ランダを広域に分散展開し、周回衛星との協調によりネットワーク探査をする技術などがある。ドローンや飛行機については、地球上での実証ならびに実用は広く知られており、火星大気における航続距離の向上や可搬ペイロード重量の緩和といった点を解決できれば、文字通り将来の火星探査の一翼を担う探査ツールとなる。また、小型ランダによる分散ネットワーク探査についても、搭載機器の小型化が達成できれば、将来の探査インフラ構築に大きな貢献を果たすことが期待される。いずれの探査システムにおいても、バス系、特に電力や通信系といった自立システムの小型化が必須課題である。高エネルギ密度のバッテリや高効率太陽電池セルにより、飛行航続距離の向上、あるいはランダの運用長期化が期待できる。さらに、低消費電力な小型通信機により、各探査システムへの重量・電力制約が緩和され、探査の自在性が向上するものと期待する。

3.4.4　まとめに代えて

将来の火星探査に必要な技術およびその開発については、実証済みの探査形態やシステムを積極的に援用しつつも、新たなニーズ（RSL 探査、地下水圏）を実現する探査ツール開発を進めなければならない。さらに、国際的な枠組みの中で推進される宇宙探査においては、他国と相補関係を築くためにも、標準的な探査技術を有しつつ、特殊地形探査や多様な探査形態を実現するツールやプローブの開発に注力すべきと考える。

3.5　戦略的なミッション実現の鍵となる搭載機器

先述のミッションを実現するためには新たな観測装置の開発も必要である。それぞれの火星探査計画のミッション要求およびリソースに対して適切な理学機器を用意するためには、国内で開発技術を養成することが肝要である。こうした開発はまた、月をはじめとする火星以外の様々な天体探査へも応用可能であることから、将来の惑星探査全体の展望を広げるものとして、惑星科学コミュニティにとって重要である。ここでは、火星探査に対応して国内で開発するべき機器を表 5 に示す。なお、各機器の詳細（科学目標・機器概要、開発状況と課題）は Appendix A にまとめた。

	Mission	MMX	周回機	着陸機	
	Missionのカバーするサイエンス	火星衛星の起源と歴史、火星の天体衝突史・大気散逸史	太陽に駆動される火星大気散逸の物理・化学と、表層及び浅部地下水	38億年前以前に起きていた地殻熱水活動に伴う地下水圏・生命圏	
観測の対象	観測器名	観測器とmissionのリンク*と開発ステップ			国内開発状況・実績等
内部構造	短周期地震計+広帯域地震計	→	→	○	地上基礎開発中。
	熱流量・熱伝導率計測システム	→	→	○	LUNAR-A向け開発実績あり。
	小型アクティブ地震計	→	→	○	地上基礎開発中。
	地下探査レーダサウンダ	→	○	→ ○	SELENEに搭載。 高周波化・軽量化などに向け開発中。
	宇宙探査用ミュオグラフィ	→	→	○	地上基礎開発中。
	重力偏差計	→	→	○	地上基礎開発中。
内部構造、周辺環境（太陽風）	磁力計	→ ○	→ ○		ERG、MIOに搭載。小型・軽量化に向けた開発中。
表層環境	AOTFを用いた小型近赤外分光撮像装置	→ ○		→	MMXに向け搭載品の開発中。
	分散観測用小型分離カメラ	→ ○	→	○	MMXに向け搭載品の開発中。
	ハイパースペクトラルイメージャー	→	→	○	SELENE-Rに向け開発中。
	レーザー誘起プラズマ発光分光計	→	→	○	SELENE-Rに向け開発中。
	ラマン分光計	→ ○	→	○	MMXに向け開発中。
	K-Ar年代計測器	→	→	○	地上基礎開発中。
	能動型蛍光X線分光計	→	→	○	SELENE-Rに向け開発中。
	サンプリングアーム	→ ○	→	○	MMXに向け開発中。
	サンプリングパッケージ（弾丸型）	→	→	○	OKEANOSに向け開発中。
	GCシステム	→	→	○	OKEANOSに向け開発中。
	赤外ファイバを用いた小型レーザ分光器	→	→	○	地上基礎開発中。
	生命探査顕微鏡	→	→	○	地上基礎開発中。
	フルカラー3Dイメージング装置	→	→	○	地上基礎開発中。
	月惑星表面長期その場観測ユニット	→	→	○（衛星）	地上基礎開発中。
	火星大気中インフラサウンド（微気圧波）計測マイク	→	→	○	観測ロケット（S-310-41号機）搭載実績あり。低周波特性の改善などに向け開発中。
表層環境、大気	中性ガス・イオン質量分析器	→ ○	→ ○	→ ○	SELENE、ERG、Cassiope、MIOなどに搭載実績あり。また、MMXに向け搭載品の開発中。SELENE-R、OKEANOSに向けても開発中。
大気	テラヘルツ分光器	→ ○	→ ○		ISS/SMILESの搭載実績あり。小型軽量化のための開発中。
	紫外線分光器	→	→ ○		ひさき、PROCYONの実績あり。
	高コントラストオプティクス	→	→ ○		地上基礎開発中。
	中間赤外カメラ	→	→ ○		あかつき、はやぶさ２に搭載。火星に向けた高感度化など、開発中。
	水素吸収セル	→	→ ○		のぞみに搭載。高性能化に向けた開発中。
周辺環境（太陽風）	太陽起源高エネルギー電子分析器	→	→ ○		ERG、MIOに搭載。小型・軽量化に向けた開発中。

＊)MMXについては、搭載決定機器のみをマークしている。

表 5: 火星探査ミッションに向けて国内で開発するべき機器

4　戦略的火星探査プログラムの推進体制

4.1　着陸探査学連携ネットワーク

我々が次世代へのマイルストーンとして目指す、2030 年代の火星地下水圏・生命圏探査では、重力天体への軌道投入および着陸（EDL）を基礎技術として習得・実証することが最低限、求められる。EDL 技術は、MMX および SLIM での習得が可能である。一方、火星探査の歴史を振り返るに、EDL に関しては可能な限り火星での実証試験を行うべきである。そこで、本格的な火星着陸探査のプレカーサーとして、周回機探査との組み合わせも含めた着陸技術実証も視野に入れながら検討を進める（海外先行例：ExoMars Trace Gas Orbiter）。

EDL に加え、我々が目指す火星地下圏探査では、高度着陸、地下観測、掘削といった多くの新規技術を必要とする。これらの新規技術に関しては、月惑星探査データ解析グループおよびイノベーションハブなどとの JAXA 内連携による開発に加え、大学共同利用連携を軸に加速させていくべきである（例えば、着陸探査学連携ネットワークの設置）（図 7）。着陸探査学連携では、MELOS 計画の検討段階より協力関係にある慶応大学・東北大学・千葉工業大学などを中心に、産業界を広く取り込んだ連携を考えている。着陸探査学連携ネットワークでは、高度着陸・地下観測・掘削に加え、高度な自立走行技術の獲得や、それらの技術獲得に必要な惑星模擬フィールドの整備も行う。これら地上でのロボティクス技術開発の場を提供する着陸探査学連携は、宇宙空間での観測装置・バス系の技術開発・実証を主目的とした深宇宙連携ネットワーク（東京大学宇宙惑星科学機構（UTOPS）が例の 1 つ）と相補的な協力関係が見込まれる。

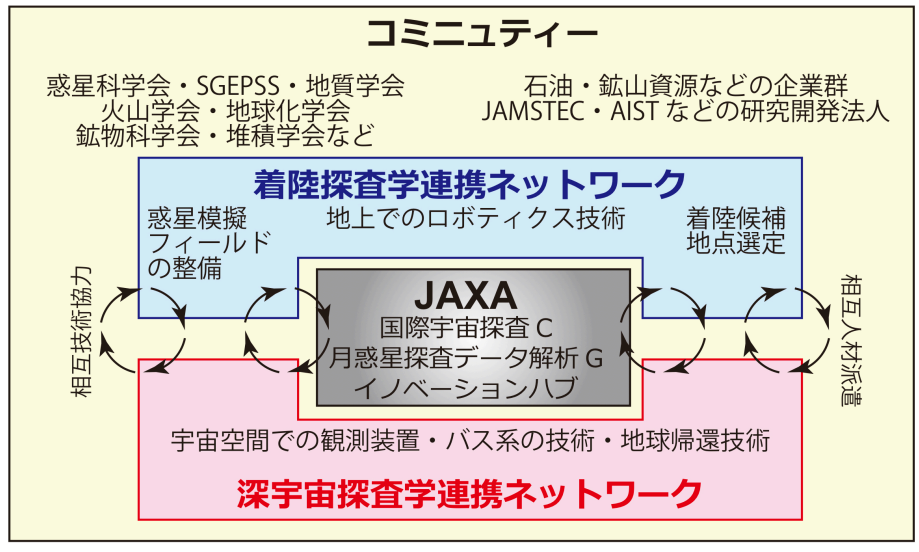

図 7: 推進体制

着陸探査学連携と深宇宙連携との協力で得られる地上および宇宙空間での探査技術の応用先は火星着陸探査にとどまらない。例えば、国際協働での検討が進められている月の極域探査・有人探査では、天体表面移動および掘削が日本の提供すべきキー技術として提案されている。月での技術実証は、自立性が必要とされる火星探査と、地球上での技術実証をつなぐという点において、高い戦略的価値を創出する。月や火星での技術実証により信頼性の担保された各要素技術は、その先にある MSR や氷衛星探査などの国際協働プロジェクトにおいて、日本のプレゼンス向上に貢献するであろう。

地質学的に多様な天体である火星への着陸探査では、着陸地点の選定が探査のサイエンス価値に直

結する。リュウグウなどの小天体とは対照的に、火星に限らず多くの重力天体では、既存の表面分光観測データが充実している場合が多く、それらのデータベースを活用した着陸探査計画立案が求められる。着陸探査学連携では、月惑星探査データ解析グループを受け入れハブとした大学連携の役割も担う。米国と比較した際、日本の惑星探査コミュニティは地球科学分野（地質学・火山学・水文学など）の研究者の取り込みが十分とは言えない。一方、地球科学の諸分野も、生物学などとの融合を進めつつあるが、同時に地球外にも未開拓のフロンティアを強く求めている。火星は両者の融合に最適な研究対象であり、“地球・惑星科学”を文字通り“地球惑星科学”とする可能性を秘めている。

4.2　サンプルリターン探査（MSR・MMX）に向けた PP およびキュレーション体制

太陽系の歴史、惑星進化、宇宙と生命の起源の解明を目指す惑星科学・惑星探査はこれまでにも我が国の宇宙科学における中心的なプロジェクトとして選定されてきた。探査のなかでもサンプルリターン探査は重要な特徴を持っている。世界初の小惑星サンプルリターンに成功した「はやぶさ」が世界に与えた影響は大きく、実証科学と技術開発の重要性を格段に高め「はやぶさ 2」の追い風となった。「はやぶさ 2」以降も、火星衛星からのサンプルリターン（MMX）や火星からのサンプルリターン（MSR）への参画が検討されている。サンプルリターンは持ち帰ったサンプルを地上での大型の高性能の分析装置で解析することを可能にするという点で、探査機での現場分析に比べて格段に分析精度を上げることができるという利点を持っている。

また惑星等の天体探査では惑星保護（Planetary Protection: PP）も重要な活動となる。惑星保護活動では二つの観点での検討が必要となる。それは探査対象となる天体の将来の探査を妨げないように天体を保護する活動と、サンプルリターンにおいて探査天体から地球環境を汚染する物質を不用意に持ち帰らないように地球環境を保護する活動である。サンプルリターン探査から科学的成果を最大限に引き出すためには、試料採取装置（サンプラー）開発、キュレーション、帰還試料分析との間の連携が非常に重要となる。本項ではこれらサンプルリターン探査技術および惑星保護に関してまとめる。内容は基本的に日本惑星科学会 RFI 文書 <https://www.wakusei.jp/~RFI_kaitei2017/for_all/> を参考にしている。

4.2.1　将来探査計画における化学分析・キュレーションの長期展望

「はやぶさ」「はやぶさ 2」の実施を背景に、サンプルリターンは日本が世界をリードする惑星探査であり、その優位性を確かなものとするためには、地球外物質科学と連動した継続的な将来技術開発が非常に重要である。サンプルリターン探査から科学的成果を最大限に引き出すためには、試料採取装置（サンプラー）開発、キュレーション、帰還試料分析との間の連携が非常に重要となる。サンプラーは、A）サンプリング機構と B）保管機構（キャッチャ、コンテナ）からなる。A に係る仕様項目には、i）回収量、ii）物質状態（固体、液体、気体）、iii）試料形状・サイズ（粉体、礫、岩体）、iv）地質情報（コアリング等）の保存、v）汚染対策（材料選定、部品洗浄、製造組立環境管理）、vi）サンプリング天体でのその場分析との連携、が挙げられる。B の仕様項目としては、vii）保管量、viii）物質状態（固体、液体、気体）、ix）温度・圧力、x）試料間の分離、xi）気密性、xii）汚染対策が挙げられる。

キュレーションでは、目標天体帰還試料の試料価値を損なわずに（試料を破損・紛失・汚染することなく）、i）帰還試料の探査機サンプラー容器からの取り出し・回収、ii）試料の初期記載、iii）保管、iv）分割・配布、のそれぞれの過程に対して技術検討・開発が求められる。サンプラー開発同様、従来探査における固体試料だけでなく、たとえば彗星のガスや氷などの気体や低温物質、火星地下水などの液体試料、あるいは高圧試料といった種々の試料が想定される。また目標天体試料が地球外生命関連物質を含有する可能性がある場合、試料取扱環境の滅菌技術および帰還試料の封込技術の検討・開発が求められる。

帰還試料の分析項目は主に、元素・同位体、岩石鉱物、揮発性物質、有機物、に分けられる。今後は

始原的な彗星や D 型小惑星から、分化天体（月、火星、火星衛星、水星、氷衛星など）に至るまでのさまざまな進化段階の太陽系天体物質を採取、帰還する計画が予想されることから、多様な帰還試料に対応できる分析体制の多様化を推進していくことが重要である。そのためには、はやぶさ、はやぶさ 2 で適用された放射光 X 線、電子顕微鏡、イオンマイクロプローブによる微量・局所分析法のさらなる発展はもとより、天体地質情報を保持した大型試料（重さで g 以上、大きさで cm 以上）を対象とした分析手法を新たに発展させる科学的意義は大きい。たとえば、ミュオンを用いた非破壊元素・同位体分析、中性子を用いた氷の物性分析、多核種・多次元核磁気共鳴分光（NMR）を用いた物質構造解析などは、将来的に汎用性が高まることが期待できる。また、貴重で少量の帰還試料に対して従来は十分考慮されていなかった表面電離質量分析（TIMS)、誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS)、燃焼/段階加熱式同位体質量分析などの湿式分析や破壊分析を積極的に活用し、帰還試料の全岩組成や試料構成成分の精密測定が重要になってくる。これらの化学分析とより多角的かつ詳細な惑星物質探査を結びつけることで、探査対象天体の形成史（材料物質の起源や混合、形成・変質/変成年代、地質活動の規模・メカニズムなど)、天体軌道進化、太陽活動の変遷を紐解くことができる。特に、帰還試料の先端計測分析技術開発、帰還試料と由来天体での地質情報との関連づけについては、各分析技術分野との開発連携、リモートセンシングや着陸観測・着陸分析が必須であるので、惑星科学会と他の学会コミュニティとのネットワーク構築が重要である。なお、Appendix-A.2 に、サンプラー仕様、キュレーション、および帰還試料の分析項目毎に、将来サンプルリターン探査におけるその重要性と目指す科学、手法についてまとめた。

4.2.2　惑星保護

■背景と目的：　太陽系天体の探査を行う上で忘れてはならないのは惑星保護である。惑星保護とは、化学進化の過程や生命の起源に関して重要な天体（保護される太陽系天体）に対して、将来の生物探査のために天体の状態を保持すること、また地球および地球生物圏（月を含む）を潜在的に有害な地球外の生物汚染源から保護することを目的として、国際的な合意の下に設定されている惑星保護方針（COSPAR Planetary Protection Policy）を遵守する活動である。その法的根拠は「月その他の天体を含む宇宙空間の探査および利用における国家活動を律する原則に関する条約（宇宙条約)」の第 9 条において定められている。すなわち、わが国が係るすべての太陽系探査ミッションは、公的機関か民間企業かに関わらず、探査機の打ち上げからコンポーネントや部品の供給に至るまで惑星保護方針を遵守しなければならない。

惑星保護方針においては、対象天体の化学進化の過程や生命の起源に関する重要性と、対象天体の汚染が将来の調査に悪影響を及ぼす重大性を考慮して、5 つのカテゴリが設定されている。対象天体およびミッション形態によってカテゴリは異なり、カテゴリに応じて異なる要求が設定されている。これまでの我が国の太陽系探査ミッションは、幸いなことに、要求事項が軽微なカテゴリに属したため、個々のプロジェクトにおいて惑星保護方針に準拠した設計基準を採用し、COSPAR において国際的な承認を得ることによって、ミッションを実現してきた。しかし、今後我が国が火星衛星サンプルリターン（MMX)・月圏への探査・木星圏トロヤ群小惑星探査（OKEANUS)、さらには火星探査など、惑星保護設計を必要とする複数のプロジェクトを実施する可能性があり、それらの中には多くの要求事項が課せられるカテゴリに属するものもあることから、わが国の惑星保護の基準を制定し、惑星保護の実施体制を整備するとともに、惑星保護に関わる技術を向上する必要がある。

■主要キー技術と開発状況：　惑星保護において重要な 2 つの項目は、わが国の惑星保護基準を制定すること、またこの基準を遵守する実施方法を確立することである。実施方法を確立するためには、実施手順を制定し、実施手順を実行するための技術を獲得しなければならない。

我が国の惑星保護基準は、2017 年度より JAXA 惑星等保護設計標準ワーキンググループにおいて検討が行われ、惑星等保護プログラム標準として制定される予定である。併せて、惑星保護の実施方法も、複数の文書に制定される。ただし、これらの文書は MMX への適用を想定して準備されたもの

であり、保護される太陽系天体への地表ミッション（火星着陸探査など）に適用していない。今後、このようなミッションを実施するためには、文書の拡張が必要である。

惑星保護においては主要な 3 つの技術は、①衝突確率解析・汚染確率解析、②滅菌、③バイオバーデンである。①は、宇宙機（打上げロケットの上段ステージやキックモータを含む）が保護される太陽系天体へ衝突する確率・汚染する確率が規定値以下となるかどうかを検証する技術であり、すでにのぞみやはやぶさを初めとするプロジェクトにおいて実行され、技術的な蓄積がある。②は、保護される太陽系天体へ影響を及ぼす（着陸など）ミッションにおいて、探査機に残留する微生物の数を規定値以下まで低減する技術であり、③はこれを検査し保証する技術である。過去に火星着陸探査を実施したことがない我が国では、②および③の技術を保持していない。今後、火星着陸探査を含む、保護される太陽系天体への探査を実現するためには、これらの技術を獲得することが必須である。

■推奨される将来計画：　惑星科学の目標の一つとして、2020 年後半に火星宇宙天気・宇宙気候探査計画が、2030 年頃に火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画が掲げられており、これを実現するためには、段階的に我が国の惑星保護の水準を向上させる必要がある。現在 MMX を契機として、我が国の惑星保護基準の制定と、この基準を遵守する実施方法が確立されつつある。今後、この基準と実施方法の適用範囲を拡張し、惑星保護の主要な技術を獲得することが強く推奨される。

具体的なロードマップとして、2020 年頃までに「惑星等保護プログラム標準」を拡張し、すべての惑星保護カテゴリに対応したものとして改訂を行うことが望ましい。併せて、惑星保護の実施方法をこれに準拠したものへと拡張して制定する。この拡張においては、特に滅菌、バイオバーデン、および汚染管理方法等を、新たな文書として制定する。次いで 2022 年度頃より、滅菌、バイオバーデン、および汚染管理技術を獲得するために、惑星保護設備の整備を行い、これに従事する研究者を育成する。過去の検討（火星着陸探査技術実証 WG）によれば、②および③の設備整備と人材育成には 3 カ年を要する。2026 年までに火星着陸探査を実現可能な惑星保護の水準を獲得できれば、2030 年頃の火星地下水圏・生命圏の着陸探査は可能となるであろう。

（惑星保護教育活動）これまでの我が国の探査が軽微な惑星保護活動を求められる探査に限定されていたため、我が国の探査関係者における惑星保護の必要性、要求、対応等の理解、技術は必ずしも高くない。上記、標準の制定に合わせて、惑星保護活動に関与する研究者および企業さらにその補助者への教育活動が不可欠である。

Appendix A　戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発（詳細）

優先するミッションを実現するためには高性能の搭載観測装置が必要である。また、優れた搭載観測装置を自前で持つことにより、国内の技術実証のための太陽系探査ミッション、海外の太陽系科学探査ミッションへの搭載機会を得る可能性も高くなる。そのために、戦略的な搭載機器の研究開発を実施する。ここでは、惑星科学分野の重要な研究対象と、対応して開発するべき機器を以下に挙げる。各機器について、①観測器名、②科学目標・機器概要、③開発状況と課題、④紐づくミッションを述べる。

A.1　内部構造

①惑星探査用短周期地震計 + 広帯域地震計。②月惑星の地震活動度調査、および地震学的手法を用いた内部構造探査に使用する。固有周期 1 秒の電磁式高感度短周期地震計と、短周期計に負帰還回路を接続する事による固有周期 10〜30 秒の広帯域地震計である。③短周期地震計については、ペネトレータに搭載しての地上観測を実施している。広帯域地震計においても、周波数応答の拡張、地動検出に成功しているが、広帯域地震計は負帰還回路の改良、ノイズ低減、温度、衝撃試験などが必要である。④着陸機。

①熱流量・熱伝導率計測システム。②月、惑星からの地殻熱流量の in-situ 測定により、温度勾配と熱伝導率を測定する。着陸機に搭載し地下にプローブを掘削埋設するタイプと、高速貫入プローブ（ペネトレータ）に温度センサー・熱物性測定センサーを搭載するタイプがある。③LUNAR-A（月探査）ミッション搭載で開発を行ったペネトレータプローブなどがある。熱流量測定の例としては、有人ではアポロミッション（15 号〜17 号）で、設置実績がある。また、搭載が予定されているものとして、Insight（火星探査）ミッション（2018 年打ち上げ予定）のためにドイツの宇宙機関（DLR）が開発した HP3 や、Lunette（月探査）ミッション（Discovery）および SLIM（月探査）などのミッションの搭載候補として米国が開発したプローブ（Pnetmatic and Percussive Penetration probe）がある。④着陸機。

①小型アクティブ地震計。②月惑星表面で人工振動を発生し、応答を観測することで地下の地震波速度構造を得る。地上における反射法地震探査を現地で実現するための小型軽量装置である。③課題は、人工振動源の選定と最適化、人工振動源埋没のための機構（微小重力天体の場合）。また、実際のミッションに搭載する際には別途開発中のサバイバルモジュール、短周期・広帯域地震計との連携が重要となる。④着陸機。

①地下探査レーダサウンダ。②月・火星・小惑星などの固体天体の地下・内部の構造、層序を観測することで、月では隕石衝突・火山活動・テクトニクスの理解、氷の探索、火星では鍵層の追跡や火山・構造地形の把握、小惑星では、分裂・衝突・崩壊などの物理的進化過程の解明などに貢献する。ローバまたは周回機に送受信機・アンテナを搭載し、アンテナから電磁波を放射することで対象天体からの反射波を計測して地下構造を把握する。③広域探査用の低周波地下レーダは SELENE 搭載 HF 帯レーダの開発・観測運用の実績がある。高分解能探査用の高周波地下レーダは、はやぶさ 2 オプション機器・小惑星探査 WG として、UHF 帯送受信機 BBM を開発。また、UHF 帯ビバルディアンテナも設計済である。東大・東北大・JAXA から約 10 名の研究者が参加して、(1) 月極域の氷探査に向けたアンテナ・送受信機の 1〜15 GHz 帯対応、(2) 将来の小惑星内部探査に向けた送受信機の軽量化・レーダトランスポンダの開発、に取り組んでいる。SELENE-R に提案のレーダは、EM 制作に 1 年半、PFM 制作に 1 年半の合計 3 年（小型軽量化を要する場合はその検討を含む 4 年）で開発可能と見込んでいる。④周回機、着陸機。

①宇宙探査用ミュオグラフィ。②宇宙線起源高エネルギー粒子ミュオンを検出し、その軌跡と数密度から地下 10 km 程度までの線密度を推定する。③地球での実証例は多数あるが、宇宙環境下での

フィジビリティスタディが課題である。現在、小型化および検出手法の改良を検討中。④着陸機。

①重力偏差計。②小天体と重力天体の内部密度構造の探査を目的とする。これまで全く観測がない小天体の内部密度構造を明らかにし、内惑星系への水の輸送過程に切り込む。あるいは重力天体の浅部密度構造を調べて、月の霜氷の存否や火星の地下水圏の広がりを確かめる。加速度計測ユニット 2 台を一定の距離だけ離して配置し、その方向の重力加速度の偏差（勾配）を観測する。加速度計測ユニット単独でも太陽輻射圧や大気密度の観測が可能である。③加速度計測ユニット単体の BBM が製作され、地上試験で加速度が必要な精度で計測できることが確認されている。また、弾道飛行による試験で、微小重力下での 6 自由度の参照マス制御や加速度計測に問題がないことがわかっている。基本原理は BBM のものを踏襲し、構造や電気回路を宇宙仕様に再設計する必要がある。まず、地球周回衛星への加速度計測ユニットの搭載をめざし、2 台を組み合わせた重力偏差計の開発につなげる。④着陸機。

①磁力計。②地球近傍から木星軌道までの磁場の観測を行う。太陽風の温度分布は理論モデルから予測される値よりも高いことが知られているが、本観測で電子スケールでのプラズマ乱流を検出することにより、太陽風の加熱機構の解明を目指す。また木星トロヤ群小天体において、バックグラウンド磁場の測定役割を果たす。本装置は、Fluxgate 方式の磁力計である。③ジオスペース探査衛星「あらせ（ERG）」の MGF、星磁気圏探査機（MMO）の MGF-I の改良型であり、軽量・高感度化を目指している。小型・軽量化が必要であり、回路部の小型化や機器配置の最適化設計を行っている。また高感度化が必要であり、検出器の改良を行っている。④MMX、周回機。

A.2　表層

①AOTF を用いた小型近赤外分光撮像装置。②火星衛星の起源論を決着させるとともに、火星圏の生命居住可能環境形成過程を明らかにする。近赤外域で分光観測を行い衛星表面の含水鉱物・水関連物質・有機物を検出する。③仏との国際協力のもと、はやぶさ 2 搭載器のヘリテイジを活かし開発を進めている。ExoMars 搭載用 AOTF を用いた鉱物計測を実施した他、熱設計・運用計画・SNR 検討を進めている。今秋到着予定の AOTF ブレッドボードモデルを用いて評価試験を実施、AOTF サイズや光学設計を決定する。課題である熱輻射成分・位相角依存について既存のフォボスデータや試験結果を活用し解決に当たり設計検討に反映する。④MMX。

①分散観測用小型分離カメラ。②探査機本体から複数の小型ユニットを分離し、探査計画の目的に合わせて分散観測を行う。主として可視光カメラ撮像、天体衝突時の加速度応答による地盤強度計測を行う。③IKAROS・はやぶさ 2 に搭載。MMX 搭載機器に提案、オプション機器として搭載検討中である。課題を細分化すると、小型ユニット分離機構の分離方向・姿勢の高精度化、分離速度の高速化、探査機本体-分離ユニット間の無線通信機・アンテナの最適化、太陽電池・二次電池による小型給電システム、超小型姿勢制御システムなどがある。④MMX、着陸機。

①ハイパースペクトラルイメージャー。②可視・近赤外光の任意の波長で画像を取得できる撮像装置。岩石鉱物の同定や水氷の存在の確認を行う。③JAXA 宇宙探査イノベーションハブの課題解決型プロジェクトによる水・氷探査のための、小型 2 次元分光器の開発経験や SLIM 搭載用のマルチバンドカメラ開発の経験を活かし、さらなる広波長帯域の画像分光装置の開発をめざす。開発課題は、広波長帯域化と耐宇宙環境化と小型化、運用形態に対応した光源種などの選定、各種月惑星探査着陸機やローバーに搭載できる画像分光装置の製作などである。④着陸機。

①レーザー誘起発光分光装置（Laser-induced breakdown spectroscopy; LIBS）。②LIBS は高い空間分解能（～300 μm）を持ち、短時間で遠距離物質（1.0～1.5 m）の化学組成分析を行うことができる。また、レーザアブレーションにより深さ方向（～1 mm）の分析が可能であるため、表面を覆うレゴリスや宇宙風化層を取り除いた岩石の化学組成データを取得できる。水素や炭素などの揮発性元素を計測することも可能である。③地上での基礎開発中。④着陸機。

①ラマン分光装置。②分子間結合種の同定により、有機物・塩・含水鉱物など地質学的・アストロ

バイオロジー的に重要な物質の組成分析を行うことができる。鉱物組成の情報は、LIBS・APXS 等による元素分析と相補的である。レーザーを用いるため遠隔・局所分析が可能で、所要時間も数分程度と非常に短時間であり、表面研磨などの試料前処理が不要である強みを持つ。③地上での基礎開発中。④着陸機。

① K-Ar 年代計測装置。②表層物質の K、Ar を定量する事で、その地質ユニットの年代を決定する。クレータ年代の推定精度の向上は、地球型惑星全般の表面年代推定精度向上および小天体のサイズ分布進化の復元に役立つ。③地上での基礎開発中。④着陸機。

①能動型蛍光X線分光計。②天体の着陸点周辺の主要元素を定量する。高いエネルギー分解能により元素同定能力に優れたシリコンドリフトX線検出器（SDD）と、X線発生装置（XRG）を組み合わせた能動型蛍光X線分光計（AXS）である。小型軽量かつ省電力で元素分析が可能。放射性同位体を使用せず必要な時にX線を発生することができるため、長期間にわたる地上試験での被爆を極力抑えることができる。③焦電結晶を用いた AXS に関しては、概念設計は終了し、BBM による基礎実験を COOL-X および SDD を使用して早稲田大学、KIGAM、LPL において実施。構造設計については構造要素を決定済。熱設計・制御は熱解析を実施し、熱制御の成立性を確認。試料表面粗さが蛍光 X 線分析に与える影響について調査済。これまで焦電結晶を用いて高輝度化に努めてきた。その結果、市販品 COOL-X と比較して、60 倍以上の高輝度化に成功。実験結果をもとに、焦電結晶型 XRG の試作品を作成中。焦電結晶型 XRG の宇宙実験の実績はないが、SDD の宇宙機への搭載実績はある（例 Chang' e-3 で使用）。微量元素の定量化に向けて XRG の高性能化（バックアップとして CNT をエミッターとした発生装置を検討中）、動作寿命調査（必要なら長寿命化の検討）、軽元素分析に向けた検出器側のX線窓材（Si3N4）の検討および実用化が課題。④着陸機。

①サンプリングアーム。②表層探査において分析サンプルを取得し、分析部に設置する。③MMX に向けて搭載品の開発中。④MMX、着陸機。

①サンプリングパッケージ（弾丸型）。②木星トロヤ群小惑星の表面および最大深さ 1 m の地下サンプルを 1 mg 採取することが目標である。表面サンプリング手法は、小惑星探査機はやぶさ・はやぶさ 2 と同様の弾丸方式をとる。この弾丸は、高圧ガスにより射出することで、コンタミネーションフリーなサンプリングを実現する。地下サンプリング手法は、高圧ガスを用いた掘削・サンプリングを行う Pneumatic 方式をとる。③表面・地下サンプリングいずれも、実験室レベルでの機能確認を終了している。フライト品を想定した設計を行うことが必要である。④着陸機。

①GC システム。②有機分子の詳細分析を行う。HRMS およびサンプリングパッケージとの組み合わせを前提としている。加熱されたガス状分子をガスクロマトグラフィーカラムに通し、各分子の保持時間の差により分離を行う。分離された分子は逐次 HRMS に導入することにより、マススペクトルのパターンから分子の同定を行う。誘導体化およびキラルカラムを用いたアミノ酸の DL 分離分析も想定している。③フランス CNRS により ExoMars 向けに開発中のものを使用予定。同等品の MSL 搭載実績あり。サンプリングパッケージおよび HRMS とのインターフェイスの検討中。④着陸機。

①赤外ファイバを用いた小型レーザ分光器。②ピンホール経由アクセスによる物質内・地下等へもアクセス可能な医療用赤外ファイバ挿入による希ガス・表層鉱物高精度計測を実現し、地球型惑星における水循環・表層と大気との相互作用を明らかにする。③赤外ファイバを用いた光混合・分波のための数値シミュレーション・実証用素子の製造を進めている。ファイバの特性試験を実施した。今後は、実証用素子を用いた実験結果を受けて、工学と連携して混合・分波の最適化・ブレッドボードの小型化と製作を進める。また、ブレッドボードモデルを用いた地上からの地球・惑星大気観測を通じて評価試験を実施する。④着陸機。

①生命探査顕微鏡。②鉱物、有機物、生物細胞を識別する。蛍光色素を用いて有機物・膜に囲まれた有機物・酵素活性を 1 μm の解像度で 104 細胞/g 土壌の感度で検出する。③科学目標を達成する原理実証と、光学部品の宇宙環境耐性試験をほぼ終了している。今年度中にこれを完了し、光学設計を完了する予定である（TRL3）。今後は、試料の装置への供給を前提条件として、細胞の濃縮、染色

と顕微鏡観察、画像を 1 μm 解像度 104 細胞/g 土壌を検出する BBM を完成させる。④着陸機。

①フルカラー 3D イメージング装置。②試料内部を物理的に露出させ、露出面画像を自動・無人取得する。1 ボクセルあたり産業用のマイクロ X 線 CT スキャンの 1 億倍以上の情報量を持つ。③地上実験室での開発を完了している。④着陸機。

①月惑星表面長期その場観測ユニット。②月・小惑星など、主に大気の無い固体天体の着陸探査で用いる。レゴリス層表面に着陸後に設置して、（主に熱設計・電力設計など技術的な意味で）長期生存し、主として地震観測、熱流量観測などの地球物理学的な長期定常観測を行う。③PM 製作が可能な段階である。課題は PM レベルの実証、薄膜太陽電池・二次電池による給電システム、探査機本体から分離・地面に設置する機構（探査機ごとに仕様変更が必要)、微小重力天体の場合にモジュールをアンカリングする機構である。④着陸機（衛星)。

①火星大気中インフラサウンド（微気圧波）計測マイク。②火星大気中を伝搬する微気圧波を測り、地表面 or 大気中での大規模変動現象の有無を調べる。③地球上の観測では多地点地上観測として整備が進んでいる。大気球（欧州 BEXUS）や観測ロケット（S-310-41 号機）への搭載実績もあり、7 hPa、−120 ℃の環境試験も実施済である。低周波特性の更なる改善が望まれる。BEXUS は学生実験のため、データ取得機器が故障し高度 11 km 以上ではデータが無く、再実験が必要である。温度サイクル試験や PPP 対応が課題。④着陸機。

A.3　表層・大気

①中性ガス・イオン質量分析器。②惑星大気およびガス化した固体物質をその場で入射口から取り込み、質量スペクトルを得る。必要な質量分解能（惑星大気用では数 10〜>3,000 程度、始原天体表面観測用では数 10000 程度を想定）に応じたいくつかの分析原理を選択可能なよう、並行して開発を進めている。測定対象の元素組成、同位体比から太陽系・惑星系の起源および進化に制約を与える。③太陽系プラズマ観測において飛翔体搭載実績のある技術と、地上実験で用いられる高分解能（M/δM>105）技術の両輪をベースに、新たな設計・試作を実施している。取り組んでいる技術的課題には、質量分析オプティクス開発（マルチターン飛行時間型質量分析器 MULTUM・リフレクトロン・四重極型・セクタ型など)、イオン化用電子銃開発、高圧電源開発、ガス化用レーザ照射機構の開発、誘導電荷検出器の開発などがある。④MMX、周回機、着陸機。

A.4　大気

①テラヘルツ分光器。②0.1〜数 THz 帯のヘテロダイン分光観測により、高度 0〜120 km 程度の CO・H_2O・HOx 種、これらの同位体などの時空間変化を捉え、大気の化学とダイナミクス（風や輸送など）のリンクに迫る。③ハーシェル（ESA)、IceCube や EOS Aura MLS（NASA)、ISS/SMILES（超伝導サブミリ波リム放射サウンダ/JAXA）などの搭載・運用実績がある。これらを利用・踏襲し、さらなる軽量化・省電力化の検討を進めている。課題として、軽量・省電力のシステム（アンテナ、受信機、分光計、観測/制御/データ処理の CPU 部）の検討が挙げられる。④周回機。

①紫外線分光器・撮像機。②系外惑星外圏大気の観測を目的とした、高効率の紫外線分光器。③立教大学で新規提案した MCP の表面形状変更により、1.5 倍以上の効率向上に成功している。BepiColombo/PHEBUS と類似した装置となっており、ひさき/EXCEED、PROCYON/LAICA などの開発実績から改良を進めている。検出器量子効率、回折格子効率のさらなる向上による探索可能範囲の拡大（20 pc -> 60 pc）が課題である。④周回機。

①惑星探査用高コントラストオプティクス。②惑星希ガス宇宙散逸・氷衛星地下海噴出ガスの 2 次元撮像を初めて実現するため、惑星本体からの光を抑える高コントラスト（離角 1 度で 7 桁以上）遮光バッフルを新たに開発する。③系外惑星観測技術で培った技術を活用し、微細ガウシアンエッジ構造をもつ遮光バッフルの概念設計・シミュレーション・実証用素子の製造を進め、離角 1 度で 8 桁を

達成している。今後は、徹底的な迷光対策、ビーム・検出器の最適化、入射角・波長に対する依存性の検証を突き詰め、ブレッドボードの製作および装置全体の小型化を図る。④周回機。

①中間赤外カメラ。②中間赤外放射を計測することで惑星大気および地表面温度分布を測定する。火星大気のダストストームや氷雲の発生頻度、分布をモニターし、それらが火星の気象に与える影響を解明する。月面閃光を捉えてその温度を直接を同定するとともに、隕石衝突時の月震位置・時刻の同定に貢献する。③「あかつき」搭載 LIR（「はやぶさ 2」搭載 TIR は同型機）、地球観測小型衛星 RISING-2 搭載 BOL、UNIFORM 搭載 BOL。温度が低い火星大気に応用するために、高感度化をはかる。200 K を下回る対象物を撮像した時の感度が要求に満たないことがあるため、光学系の改良、ピクセルビニングや時間積分で補う。④周回機。

①水素吸収セル。②惑星水素コロナ（ライマン α）の発光強度、温度、重水素水素比を測定する。当面の目標は火星コロナ発光強度と温度の分布から水素散逸率と太陽活動度の関係を明らかにする。水素コロナの観測は遠方から行う必要があるため、のぞみ後継機ではなく超小型探査機等別の機会を検討している。③「のぞみ」に搭載された。新型水素吸収セルは「のぞみ」セルの 3 倍以上の吸収効率を実現している。実用化の最終段階として、セル形状の最適化およびフィラメントの耐久試験に取り組んでいる。課題は、吸収性能の安定性の向上、機上校正方法の検討である。④周回機。

①太陽起源高エネルギー電子分析器。②半導体検出器により入射電子のエネルギー・飛来方向を同定する。惑星大気への入射フラックスをモニタし、大気変動に与える影響を評価する。③太陽系プラズマ観測において飛翔体搭載実績のある技術をベースに新たな設計・試作を実施している。科研費や東大–JAXA 連携拠点予算を用いて試作品開発・試験環境整備を進めている。プリアンプ等の ASIC 化による小型軽量化が課題である。④周回機。