

惑星科学／太陽系科学 研究領域の目標・戦略・工程表

目次

前書き	3
(a) 目標（将来ビジョン）	4
(a.1) 今後 10—20 年の世界のサイエンスの動向と海外プロジェクトの動向	4
(a.1.1) 月探査	4
(a.1.2) 火星探査	4
(a.1.3) 小天体探査	5
(a.1.4) ガス惑星系・氷惑星系・Kuiper-Belt 天体（KB 天体）探査	5
(a.1.5) 系外惑星	5
(a.2) 日本の戦略・狙うサイエンス・期待される成果	5
(b) 具体的戦略	8
(b.1) 太陽系探査プログラム案	8
(b.1.1) 戦略的中型提案	9
(b.1.1.1) Martian Moons eXploration [2024 年頃戦略的中型計画]	9
(b.1.1.2) ソーラー電力セイル探査機（OKEANOS）による外惑星領域探査の実証 [2026 年頃戦略的中型計画]	10
(b.1.1.3) 月面その場観測による KREEP 物質・年代測定の探査計画 [2028 年頃中型]	11
(b.1.1.4) 火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画 [2030 年代前半の中型]	12
(b.1.1.5) 月裏側原始地殻サンプルリターン探査計画 [2035 年頃の戦略的中型（政策的支援型）]	14
(b.1.2a) プログラム的小型計画案（理学）	14
(b.1.2a.1) ペネトレータ技術実証探査計画：月震計による内部構造探査 [2025 年頃的小型]	14
(b.1.2a.2) 火星宇宙天気・宇宙気候探査計画（旧火星大気散逸探査計画[のぞみ後継機]） [2026 年頃的小型]	15
(b.1.2b) プログラム的小型計画案（工学）	17
(b.1.2b.1) マルチフライバイによる地球接近小天体（流星群母天体）探査 [2022 年頃的小型]	17
(b.1.2b.2) 火星エアロキャプチャオービタ [2026 年頃的小型]	18
(b.1.3) 機器の提供による国外探査計画・小規模計画	19

(b.1.3.1) 木星氷衛星探査計画：日本分担部分 (JUICE-JAPAN)	19
(b.1.3.2) 彗星アストロバイオロジー探査・サンプルリターン (CAESAR)	20
(b.1.3.3) 系外惑星大気の紫外線分光観測.....	21
(b.1.4) 将来探査コンセプト提案.....	22
(b.1.4.1) 火星周回大気探査コンセプト案.....	22
(b.1.4.2) 月の地下空洞直接探査.....	23
(b.1.4.3) 火星の地下空洞直接探査.....	24
(b.1.4.4) 長周期トランジット系外惑星探査・超小型衛星計画.....	26
(b.1.4.5) 系外惑星の主星に対する紫外線モニタリング.....	27
(b.1.4.6) 超小型衛星による明るい近傍恒星周りの系外惑星トランジット観測.....	27
(b.2) 戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発.....	28
(b.3) 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.....	28
(b.4) 惑星保護.....	29
(c) 工程表 (ロードマップ)	30
(c.1) 探査プログラムの工程表.....	30
(d) 工程表とミッションプランの改訂.....	31
(d.1) 惑星科学研究教育コンソーシアム.....	31

前書き

本文書のベースとなっているのは、2014年11月に宇宙科学研究所より発出された「研究領域の目標・戦略・工程表提出のお願い」(RFI)への回答として、日本惑星科学会会長およびその諮問委員会から2015年2月に提出された「惑星科学／太陽系科学 研究領域の目標・戦略・工程表」(RFI回答文書2015)である。RFI回答文書2015は、RFI発出からおおよそ2か月という短期間で取り纏められたものであったが、その内容はそれまでの日本惑星科学会内での活動、すなわち1996年6月の「日本惑星科学会将来計画員会報告書」や2009年12月から2014年5月にかけての「月惑星探査の来る10年」活動の流れを受けたものであった。その後、RFI回答文書2015で挙げられていた火星衛星探査計画(MMX)やDESTINY+が次期ミッションとして抽出され、2017年末現在、プロジェクト化に向けて議論が進められている。

本文書もこの流れを踏襲し、中心となる考え方は変えずに、そこに含まれる情報を整理・アップデートする形での改訂を行った。戦略的小型計画の考え方については理学ミッションと工学ミッションを明確に区別した。また、RFI回答文書2015では数件のみの紹介に止まっていた「主な搭載機器の開発戦略」について、広く情報提供を呼びかけ、潜在的なものも含め、多くの機器の開発状況を紹介するようにした。国内でこれだけ多くの機器開発が進められているというのは心強く感じられる反面、各研究室・個人の単位での開発となっているものも見受けられる。今後の機器開発には、多様性を維持しつつも戦略的に推進すべき課題を抽出し、コミュニティとして後押ししてゆく仕組みが必要であろう。

本文書の作成(改訂作業)にあたっては、まず日本惑星科学会惑星探査専門委員会を中心に改訂の計画をたて、委員会からの主査の依頼を快諾してくれた臼井寛裕会員(東京工業大学地球生命研究所)と、自薦・他薦の37名の会員からなるRFI回答文書改訂作業部会によって行われた。今回の改訂作業で明らかになったように、「目標・戦略・工程表」は作成後のメンテナンスが必要である。日本惑星科学会惑星探査専門委員会では今後、継続的に改訂を行うための仕組みを作る予定である。なお、今回の改訂作業は日本惑星科学会の会員によって行われたが、本来、惑星探査の戦略は日本惑星科学会に閉じることなく、理学・工学の共同はもちろん、近縁の研究分野とも密に議論を行って検討・議論・調整されるべきものである。そのような枠組みも模索してゆく必要があるだろう。枠組みの一案として日本惑星科学会では、惑星科学が本質的に学際分野であることに鑑み、他学会にも呼びかけ、大学等の研究教育機関間の有機的ネットワークにより、惑星科学分野における研究の高度化ならびに高度人材の養成を促進する「惑星科学研究教育コンソーシアム」を立上げ、その統括部門の下に惑星探査検討室(仮称)を設置し、探査計画・ロードマップの立案・調整機能、機器開発戦略・体制の検討を進めようとしている(惑星科学研究教育コンソーシアムに関しては(d)章参照)。

なお、RFI回答文書2015にもあるように太陽系探査、とりわけ重力天体着陸探査は所要経費が大きく、戦略的中型計画の資金枠(300億円程度)に収めるプロジェクトとすることはかなり困難である。一方で、こうした探査が将来の日本にもたらす政策的価値は高いと思われる。そこで、一級のサイエンスを実現できることを条件として、戦略的中型の資金枠をはみ出す部分については、政策的経費の支援を受ける形で推進する方策を検討すべきであると提言したい。

(a) 目標（将来ビジョン）

太陽系科学における探査対象は、岩石／ガス惑星、岩石／氷小天体など多岐にわたり、宇宙望遠鏡を用いた系外惑星観測まで含まれる。以下、(a.1) 節では、探査対象ごとに今後 20 年の世界サイエンスの動向や探査計画を挙げる。これらの探査が究極的に見据える方向は、太陽系における生命の存在や存在可能環境の探索といえる。世界の動向を踏まえた日本の戦略・狙うサイエンスを(a.2)節で述べる。

(a.1) 今後 10—20 年の世界のサイエンスの動向と海外プロジェクトの動向

(a.1.1) 月探査

科学的意義・工学的ハードル：2000 年代に始まった「かぐや」など各国の探査機による周回探査の成果を踏まえ、着陸機によるその場分析探査、サンプルリターン（SR）探査へと計画が移りつつある。月は、地球に最も身近な天体として、これまで最も多くの科学情報を提供し、岩石天体の形成・進化過程、地球型惑星への揮発性物質供給の記録媒体として重要性は高い。また、将来の人類居住圏の拡大に資する科学も多く期待され、探査価値が高い。一方で、我が国は、着陸経験が無く、ましてや重力天体での移動サンプリング、重力天体からのサンプルリターンの経験も無い。

今後の動向・探査計画：今後、いち早く月探査を予定しているのは中国である。中国は、嫦娥 1、2 号で周回技術を修得した後、嫦娥 3 号で着陸、ローバ探査を実施成功している。また、嫦娥 5 号 T1 で、月軌道からの地球帰還技術の習得を行っている。2018 年には嫦娥 4 号で裏側着陸その場探査を、嫦娥 5 号で表側からのサンプルリターンを目指している。インドは周回探査機チャンドラヤーン 2 号（2018 年に打ち上げ）を、韓国は初めての月周回衛星計画（Lunar Pathfinder Orbiter、2020 年打ち上げ）を計画している。一方、アメリカ、ヨーロッパ、ロシアなど、構想レベルでの探査計画はいくつか聞こえてくるものの、プロジェクトとして確定している着陸、サンプルリターン探査計画は無い。

日本の月探査は、2015 年以降、新しい動きを見せている。ピンポイント自律着陸技術の習得を目指した SLIM 計画が 2015 年にプロジェクト化されるに至り、2020 年度の月着陸を目指して開発が行われている。また、ペネトレータ実証計画が WG として活動しており、月の地下空洞直接探査計画が RG として活動し、WG 化の準備を行っている。一方、ポスト ISS の国際的な宇宙開発の動向とも関連して、「国際協働」による月探査、「有人」宇宙活動に関わる月探査も企画されていくことが予想される。実際、JAXA の部門横断的な国際宇宙探査推進チームが主導するかたちで、月着陸その場観測（最初に月極域での揮発性成分探査、2020 年代前半打ち上げを目指してインドなどとの協力の可能性を検討中）計画と、月着陸サンプルリターン探査（通称「HERACLES」：高緯度探査、ヨーロッパとの協力）計画が、いずれもプロジェクト化を目指して検討開始されている。今後の月探査は、月の起源と進化の科学とともに、月の将来の人類居住圏の拡大に資する科学もまた、重要な探査課題となると考えられる。

(a.1.2) 火星探査

科学的意義・工学的ハードル：火星は液体の水を表層に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。21 世紀に入り、着陸機による地質学・地球化学的探査が本格化し、得られた情報を周回機が高空間解像リモートセンシングで全球に拡張することにより火星の科学が飛躍的發展を遂げ、億年スケールで、**生命を育む舞台やその環境を全球的に遷移させてきたハビタブル惑星**という描像が得られている。例えば、かつて古海洋として表層に存在していた水は、現在は地下水としてグローバルに遍在している可能性が指摘されており、表層・浅部地下環境の共進化過程の理解の重要性を示している。

今後の動向・探査計画：火星探査に関する今後の動向および探査計画を表 S1 にまとめた。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（2030 年代）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着陸探査を成功させ、国際的な信頼を獲得することが必須となる。我々は、先行する欧米の探査では軽視されてきた地下環境に着目するという日本独自の視点と、それを可能にする新規な地下環境探索技術に基づき、火星の表層・地下環境進化の包括的な解明を目指している。

(a.1.3) 小天体探査

科学的意義・工学的ハードル：はやぶさによる小惑星イトカワ SR、Rosetta による 67P/Churyumov-Gerasimenko (CG) 彗星周回・着陸探査により、小天体物質には、惑星材料物質や生命前駆物質の形成・進化・移動といった太陽系のダイナミックな物質進化が記憶されていることがわかった。今後、はやぶさ 2、OSIRIS-REx による含水鉱物や有機物を含む試料の採取が期待され、日本が国際的に優位に立つ探査分野でもある。

今後の動向・探査計画：小天体探査に関する今後の動向および探査計画を表 S2 にまとめた。ミッション期間は、探査対象天体到着（予定）からとして示した。また、まだ計画が承認されたわけではないが、中国 Chinese Academy of Sciences (CAS) では 2022 年打ち上げ予定で 1 つの探査機で 3 つの小惑星を訪れるミッションを検討中である。

(a.1.4) ガス惑星系・氷惑星系・Kuiper-Belt 天体 (KB 天体) 探査

科学的意義・工学的ハードル：いくつかの氷天体においては生命を育み得る条件を有する可能性が示唆されている。今後はその物理化学的条件の把握を主眼とした環境調査の段階となり、そのための高精度かつ軽量の質量分析装置や、複雑有機物の非変質捕獲装置の開発、それらの長期運用を支える放射性同位体電池や放射線耐性技術の獲得が必須となる。また、氷惑星は太陽系の全容把握と惑星形成論への本質的な制約を得るために残された最後の鍵と位置付けられ、探査の検討が進んでいる。

今後の動向・探査計画：ガス惑星系・氷惑星系・KB 天体探査に関する今後の動向および予算承認済みの探査計画を表 S3 にまとめた（提案されたものの予算未承認の計画については APPENDIX-1 参照）。

(a.1.5) 系外惑星

惑星系の多様性と起源の解明および生命保有惑星(いわゆるハビタブル惑星)の検出と環境条件の理解を目指した系外惑星研究の今後 10-20 年における主要課題として、以下の 3 つが挙げられる。科学的意義・工学的ハードルおよび今後の動向・探査計画など、詳細については APPENDIX-2 を参照されたい。

(A) 公転周期が 100 日以下の惑星(短周期惑星)の特徴づけ

可視域から中間赤外域にわたって分光できる大型宇宙望遠鏡 JWST による系外惑星大気の特徴付け(トランジット観測)に大きな期待が寄せられている。しかし、JWST は汎用望遠鏡であるため観測時間は限られる。そこで、ARIEL や FINESSE が系外惑星専用望遠鏡として提案されており、採択されれば 500-1000 個のトランジット惑星について大気組成をサーベイすることが可能となる。したがって、両ミッションが採択されるか否かが今後の系外惑星研究の世界的動向を左右すると言える。

(B) 公転周期が 100-104 日の惑星(中周期惑星)の発見と特徴づけ、太陽系類似系の存在度の決定

トランジット法によって 1AU 以内にある地球程度の惑星を検出できる PLATO と重力マイクロレンズ法によって中周期惑星を検出できる WFIRST、アストロメトリ法はよって長周期惑星も検出可能な GAIA によって、系外惑星の統計的理解がさらに拡大することが期待される。また、WFIRST や WSO-UV には 1-5AU 程度の木星型惑星の反射光の直接撮像が可能になるコロナグラフも搭載予定であり、これらの惑星については大気組成などについての特徴付けも可能になってくるだろう。

(C) 主に低温度星周りのハビタブルゾーンに存在する地球型惑星の大気成分の同定とバイオマーカの検出

K2 や TESS、PLATO によって検出されるであろうハビタブルゾーン内の惑星に対して、JWST や 30m 級地上大型望遠鏡を用いた可視域～赤外域での分光観測による大気の特徴づけが期待される。しかし、地球型惑星の酸素 (O₂) やオゾン (O₃) といったバイオマーカの検出は極めて難しく、日本が提案に参画している紫外線宇宙望遠鏡 WSO-UV が広がった酸素原子 (O) を検出できる唯一の観測として期待される。また、NASA では、バイオマーカ探査を念頭に置いた 2030 年以降打ち上げ予定の宇宙望遠鏡として 3 つの可能性(LUVOIR・HabEx・OST) を検討中である。

(a.2) 日本の戦略・狙うサイエンス・期待される成果

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科学の最も重要な課題といえよう。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）、火星および氷衛星の内部海や噴水、大気を持つ土星衛星タイタンなどの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、太陽系生命環境の持続（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る。

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。始原的小天体、準惑星、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、生命材料物質や反応場のみならず、初期地殻・大気・海洋、巨大隕石衝突などについてもほとんど失われている。この復元には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の実施によって、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。特にリソースの限られた日本の場合、的確なプログラム設定とそれに沿った戦略的機器開発と探査群の配置、積極的な国際協力の推進が不可欠である。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) (章番号b.1.1.1、以下同様)、ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査 (OKEANOS) (b.1.1.2)、木星氷衛星探査計画 (JUICE) (b.1.3.1) が計画されており、ペネトレータ技術実証による月内部探査 (b.1.2a.1)、月面その場観測・年代測定 (b.1.1.3) もこれに続く。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」や「あかつき」に加えて、上と同様にMMX、OKEANOSが計画され、地球接近小天体探査 (b.1.2b.1)、火星エアロチャプチャ (b.1.2b.2) と火星宇宙天気 (b.1.2a.2) が続き、系外惑星観測 (b.1.3.3)、彗星アストロバイオロジー探査・SR (CAESAR) (b.1.3.3)、火星地下圏・生命圏着陸探査 (b.1.1.4) へとつながる。これらの探査は、惑星科学会として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・復原が最重要であり、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、各天体に特化せず、比較惑星学的手法で、太陽系における前生命環境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。各探査を通じて前生命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り、そのなかで前生命環境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）を探索のバックボーンに据えるのは、日本独自の視点である。

これまではCHASEの持つ二つの根源的な問いについて説明してきたが、具体的な探索目標は天体ごとに異なるために再整理する必要がある。探索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

A1. 惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動、天体への供給：月、小惑星、彗星

A2. 惑星・衛星の形成・初期分化：月、水星、火星、分化小惑星（ベスタ、E型小惑星など）

「B. 生命生存可能環境の多様性」に関しては

B1. 生命前駆物質の形成・進化：彗星、始原的小惑星、惑星間塵

B2. 地下熱水環境：鉱物—水—有機物反応系：火星、氷衛星、始原的小惑星

B3. 大気（海洋）散逸・光化学反応：火星、金星、タイタン、系外惑星（大気）

B4. 生命およびその痕跡：火星、氷衛星、タイタン

などが挙げられ、これらを、太陽系全体の時間・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立案が重要となる。以下では、このA1からB4の分類に従って、日本の戦略を述べる。

A1については、日本においてはかぐやの成果を活かした月年代学探索が有効である。キークレータの絶対年代をその場測定で決めることができれば太陽系年代学の基準となっている月クレータ年代学を精密化できる。これと小惑星・彗星探索の知見をあわせることでメインベルトからの物質供給の歴史を紐解くことができる。また、火星衛星探索は、衛星の成因の解明のみならず、比較衛星学という観点から地球型惑星形成過程を探る上でも不可欠である。

A2ではまず月が重要な探索対象となる。月は、45億年前の原始地球で起きた単発または多重天体衝突（ジャイアントインパクト）で形成され、地球生命誕生時の地表環境を議論する上で貴重なマグマオーシャンから固化した初期地殻が残されている（この結晶の固化過程の際に固相・液相間の元素の分配が生じ、地球生命の誕生に不可欠な栄養塩も液相濃集元素として地殻に取り込まれた可能性が示唆されている）。またA2で述べた月のクレータ情報は、地球への天体衝突史を読み出し、地球の前生命環境進化を知る上でも貴重である。よって、月における地質探索やその場年代学探索が重要である。また、ペネトレータによる月惑星の内部構造探索の価値も高く、その技術実証が不可欠である。他方、火星についても、小天体の捕獲以外に、地球と同様に巨大天体の衝突で衛星が形成したという可能性もある。火星衛星SR探索は、衛星そのものの起源の解明のみならず、より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ものである。

B1については、日本がS型小惑星（はやぶさ）とC型小惑星（はやぶさ2）で積み重ねたSR探索の資産を活かし、より始原的な小惑星／彗星SRに挑戦する意義は大きい。メインベルトや彗星からのSRはミッション期間が10年を超える一方で、未変質の有機物の情報を得ることができる未踏の探索である。この場合、短周期彗星やトロヤ群天体が対象となるであろう。一方で、それらよりも有機物はやや変質を受けている可能性はあるが、短期間で帰還可能な天体の中で最も始原的な天体を求める方法もある。後者において理想的な天体は火星の衛星である。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。火星衛星SRを行うことで、始原的小天体での物質進化の解明のみならず、火星物質（C3）や大気散逸（C4）、地球型惑星・衛星の形成（C5）の手がかりを得られる。ロシアや米国にも探索計画があるものの、衛星が2つある点を活かした国際協力による比較研究が重要である。

B2については、火星探索と氷衛星探索を並行して進めることが鍵となる。火星は、欧米の探索が大きく進展しており、火星史が解読された（ただし年代はモデル年代であり絶対年代ではない）：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。着陸探査に必要な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前生命化学進化の理解につながることも期待される。

氷衛星は地球や火星の地下熱水活動と対比できる場であり、その環境場と物質循環の解明は地下熱水生命圏の成立過程を理解する上で欠かせない。日欧協力ミッションJUICEは木星氷衛星探査を目指しており、我が国の関わる本格的な氷衛星ミッションの端緒となると期待される。これに加えて、米国によるエウロパ探査が2020年代中盤に予定されている。エンセラダスへの探査も検討されており、氷衛星については国際協力による進展が期待される。

B3については、火星や金星と地球の大気と比較する手法が基本である。2015年12月に軌道投入に成功した金星探査機あかつきの成果や海外動向も踏まえて、今後検討を進めるが、大気光化学反応や大気散逸といった観点から前生命環境進化の研究に資することができる。火星の大気散逸については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。比較惑星大気学の確立には、現在の惑星気象・気候の理解も不可欠であり、その探査も工夫して行うべきである。さらに、系外惑星の大気観測（大気化学反応、大気散逸）の推進についても国際情勢の中で検討されている。

B4 に関しては、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、生命検出に探査の成否が強く依存する現存生命探査は、そのリスク軽減のため前生命環境進化（B1~B3）の観点とセットで企画すべきである。また生命探査においては、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（b.3）。はやぶさによって獲得したサンプルリターン技術は、はやぶさ2・MMXのみならず、OSIRIS-REx や CAESAR (b1.3.3) など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。

日本の太陽系探査は小天体ランデヴァー探査・SR 探査においては、はやぶさシリーズにより一定の優位性を保っているが、重力天体着陸探査は未成功である。日本独自の探査戦略（CHASE）を進めるためには、小天体のみならず重力天体への着陸探査が必須となる。将来の国際協働太陽系探査ミッションに参画し、意義ある役割を果たすためには、日本の資産を最大限生かしながら、サイエンス価値の高い惑星周回・着陸探査を進めていかなければならない。その具体的な探査戦略・ロードマップをb章・c章にまとめた。

(b) 具体的戦略

(b.1) 太陽系探査プログラム案

初期に現在の地球に近い表層環境を保持していた火星は、地下熱水環境・大気散逸・光化学反応のそれぞれにおいて、**前生命環境進化**の探求には欠かせない天体である。一方、小惑星および彗星は、惑星材料物質、生命起源物質が原始惑星系円盤や微惑星においてどのように進化し、惑星形成過程においてどのように移動したかを知ることができる貴重な情報源である。さらに月は、地球では失われた原始地殻が残されており、地球生命の発生以前の**前生命環境**の一場面を凍結しているともいえ、前生命環境の理解において欠かせない存在である。

欧米の大型火星探査が進行する中で日本に限られたリソースの中で太陽系探査を進めていくためには、CHASEの文脈のなかで火星と小惑星を組み合わせた戦略を持つべきである。そのため、始原的小惑星起源の可能性の高い**火星衛星からのサンプルリターン探査**を2020年代半ばのマイルストーンとして戦略的中型ミッション案として置く（b.1.1.1）。それに続く技術開発と工学実証のための小型ミッション（b.1.2a.2）を戦略的に進めるとともに、その先に日本の特徴を生かした**火星着陸探査（火星地下水圏・生命圏の着陸探査）**を提案する（b.1.1.4）。一方、小惑星探査に関しては、ソーラー電力セイル実証機IKAROSにより得られた技術と、はやぶさ・はやぶさ2により確立した電気推進を統合した推進技術に基づき、近地球型小惑星から外惑星領域へとその探査領域を拡大すべく、**木星トロヤ群小惑星への着陸探査**を目指す（b.1.1.2）。

月科学はアポロの探査によって飛躍的に発展し、「マグマオーシャン」と「ジャイアントインパクト」の2つの概念をもたらした。引き続き月探査計画では、我が国も「かぐや」によって得られた科学データに基づき原始地殻の理解を更に進展させ、月の岩石学的構造の理解に大きく貢献してきた。我々は「かぐや」やLUNAR-Aにおいて必要な技術・経験・研究体制を培っており、地球では失われた前生命環境について、月地殻の包括的理解を目的とする研究プログラムを推進することは今や必然である。そのために、2020年代前半に月震計による地殻厚の決定から、2020年代後半の月面その場観測で理学的・技術的な実績を積んだ後に、2030年代に月の裏側からのSRにいたるまでを一貫して推進する。具体的には、ピンポイント軟着陸技術（SLIM・地下空洞直接探査）、硬着陸技術（ペネトレータ技術実証探査）（b.1.2a.1）を着実に実証し、その場観測技術（月KREEP物質・年代探査）（b.1.1.3）を経て、重力天体のSR技術（月裏側地殻SR探査）までの段階的な進展を狙う。月探査に関しては、将来の有人探査・資源探査を含めた国際協働での実施が本格的に検討されつつある。地球からのアクセスが容易な月面での一連の技術獲得は将来の火星着陸探査への効率的な導入としても意義を持つ（図1：ロードマップを参照）。

なお、機器の提供による国外探査計画・小規模計画への参画および将来探査へのコンセプト提案に関しては、それぞれb.1.3節、b.1.4節に記載する。

(b.1.1) 戦略的中型提案

(b.1.1.1) Martian Moons eXploration [2024年頃戦略的中型計画]

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サンプルリターン（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火星SR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 10g 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(TL)、多色広角カメラ(WAM)、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：宇宙研におけるミッション定義審査をクリアし、近くプリプロジェクトに移行する見込みである。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。

(b.1.1.2) ソーラー電力セイル探査機 (OKEANOS) による外惑星領域探査の実証 [2026 年頃戦略的中型計画]

背景と目的：本ミッションは小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS の技術を継承し、はやぶさ・はやぶさ 2 で着実に実績を積んだ電気推進技術を組み合わせたソーラー電力セイル探査機を使用して外惑星領域の探査を行うものである。木星トロヤ群小惑星にランデブー探査、さらに着陸探査を行う計画である。オプションとしてサンプルリターンまたはマルチランデブーも検討している。また、巡航中には探査機を観測プラットフォームとして活用する。惑星間ダスト分布や磁場環境の動径方向依存性、ダストフリー環境での赤外線天文観測、地球との長距離基線を利用したガンマ線バースト位置検出などを計画している。現在、戦略的中型計画として提案され、2025-26 年度の打ち上げを目指している（2017 年現在のフェーズは Phase-A1）。

木星トロヤ群小惑星は、木星軌道上のラグランジュポイント L4、L5 に位置する小惑星群であり、スペクトルタイプは主に D/P 型の始原的な小惑星である。揮発性成分（氷や有機物）を含んでいると考えられ、太陽系の起源・進化や地球の水や有機物供給源として重要である。これまでに探査例がなく、また、隕石試料などとしても分析例がほとんどない（Tagish Lake 隕石等、一部の隕石は D 型由来と考えられている）ため、太陽系形成・進化過程解明のミッシングピースとして期待が高い。また、木星トロヤ群小惑星の起源は惑星形成時の惑星移動と密接に関係しており、これらを解き明かす鍵となる天体である。巡航中に行う動径方向観測では、ダスト分布のその場観測と黄道光の観測から、地球から木星軌道までのダスト分布を 3 次元的に理解するとともに、黄道光の起源を探る。また磁力計によるプラズマ乱流の計測から、太陽風の加熱機構を解明する。

領域内での位置づけ：はやぶさの S 型小惑星イトカワ、はやぶさ 2 の C 型小惑星リュウグウに続き、本ミッションではより始原的な D/P 型小惑星を目指す。

また、2021 年の打ち上げを予定している NASA の LUCY はマルチフライバイにより複数のトロヤ群小惑星のリモートセンシングを行い、これらのバリエーションを明らかにするミッションである。一方で、本ミッションは 1 つの天体を詳細に分析するといった相補的な関係にあり、お互いの成果を合わせることで、科学的成果におけるシナジーが期待される。

いくつかの惑星形成理論が予想するように、木星トロヤ群小惑星の起源は惑星形成時の惑星移動と密接に関係している。木星トロヤ群小惑星の物理特性を調べることは惑星形成期の様相の理解につながることから、地上観測でも木星トロヤ群のサイズ分布、カラー分布、総質量、自転周期分布等を調べる観測が昨今進みつつある。OKEANOS や NASA の LUCY 等の木星トロヤ群ミッションの立ち上げは、木星トロヤ群天体のさらなる地上観測を促進させるものと思われる。

さらに、巡航中に行うダスト分布のその場観測と黄道光観測は、初めて近地球軌道を超えたディープスペースで黄道光を観測するとともに、ダストのその場観測との協調によりダストの3次元的理解を可能にする。また地球から木星軌道までの高頻度の磁場観測により、Voyager が見出した太陽風の温度が理論予測より高い問題を解く。

サイエンス成果が与えるインパクト：(1)惑星形成論の制約：トロヤ群の起源(形成場所)を明らかにすることにより、惑星形成論の制約が可能である。トロヤ群が太陽系外縁部起源であった場合は、惑星移動仮説を支持し、木星軌道付近を起源とする場合は古典論的形成論を支持する。このために、水質変質(含水鉱物)の有無や水素・窒素の同位体を測定することにより、トロヤ群の起源を明らかにする。(2)太陽系内における軽元素同位体の空間分布：スノーライン以遠の太陽系物質科学的進化について、軽元素同位体(CHON)をトレーサーとして解き明かす。水をはじめとする揮発性物質の地球領域への供給源とその道筋の解明も期待される。(3)有機物の形成と進化：トロヤ群小惑星に含まれる有機物の分子種及び同位体比を調べることににより、太陽系円盤外縁部での有機物の形成や、微惑星での初期水質変質における有機物の形成・進化などが明らかになると期待される。また、オプションとして、地球生命の起源の鍵となる、アミノ酸のキラル分析も検討している。(4)太陽系動径方向のダストの移動とその環境：黄道光の起源(小惑星・彗星のいずれであるか)、ならびに太陽風の加熱機構を明らかにすることにより、ダストスケールの物質の分布と移動の様子、および惑星間空間中でのダスト表面物質に対する環境や影響を明らかにする。

主要キー技術と開発状況：軽元素の同位体、および有機物質質量分析を行うため、小型・高性能の質量分析装置(High resolution mass spectrometer, HRMS)を開発中である。同時に、試料の前処理システムとして、サンプルボックスの加熱や、さらに高温熱分解炉、試料分離のためガスクロマトグラフィー(GC)システムの検討を進めている。GCはExoMars用のものをベースとしてフランス、CNRS チームとの共同開発を実施する。HRMSは大阪大の開発する小型MULTUMと上述の前処理部分を含めた一つのシステムとして検討中である。サンプリングシステムは、はやぶさ・はやぶさ2をベースとした表面からのサンプリングデバイスと、新規開発である地下からのサンプリングデバイス(最大深さ1m)から構成される。赤外分光やラマン分光などの観測装置は海外で宇宙実績のある機器を搭載予定である。ランダーはDLRとの国際協力で開発する方針であり、JAXA・DLRのJoint Studyも実施している。赤外線観測装置(EXZIT)は口径10cmのOffset Gregorian望遠鏡であり、小型ロケット実験CIBER-2のアルミ製望遠鏡などの実績をベースにした設計が行われている。ダスト観測装置(ALDN2)は、IKAROS搭載ALADDINから、コネクタの長寿命化、検出器のダイナミックレンジ拡大などの改良が行われている。磁力計(MGF2)は、あらせ(ERG)搭載MGF、水星磁気圏探査機(MMO)搭載MGF-Iから、ソーラー電力セイル探査機の薄膜の先端マス部に搭載するための改良と検出器の感度向上が行われている。ガンマ線バースト観測装置(GAP2)は、IKAROS搭載GAPをベースにした設計が行われている。

準備検討体制：宇宙研プリプロジェクト所内準備チームとして検討を行っている(2017年現在のフェーズはPhase-A1)。また、DLRとのJoint Studyによるランダーの検討も複数回実施済みである。観測機器については国際協力体制で推進している。

(b.1.1.3) 月面その場観測による KREEP 物質・年代測定の探査計画 [2028年頃中型]

背景と目的：アポロ月試料の中に K、REE、P など液層濃集元素に富んだ岩石(KREEP)が存在し、マグマオーシャン固化の最終段階で残液から生じたとされる。表面観測から液層濃集元素に富んだ領域(PKT領域)が月表側に存在することが分かっているが、その最大濃集度や濃集層厚は不明である。本提案ではPKT領域内でも特に液層濃集元素に富む地域に存在する若いクレータ(Aristillus)に着陸し、(1)月面その場放射性年代測定によるインパクトメルトの固化年代から同クレータ形成絶対年代を求めることでクレータ年代学を高精度化し、隕石重爆撃の時間進化を知る。また、(2)液層濃集元素量の測定に

より月全球の熱源元素量を推定し、月の熱史を制約する。さらに同クレータにより放射性年代がリセットされていない岩片が見つければ(3)年代測定によりマグマオーシャンの固化終了時期を特定できる。

領域内での位置づけ：前生命環境や生命誕生の場面設定を理解する上で、地球形成時における栄養塩の蓄積や有機物の供給のタイミングと量を把握することは必須であり、そのためには KREEP の分化と隕石衝突過程の理解が本質的である。本提案はこの大問題に対し地球-月系での隕石頻度の年代変化を知ることによって直接的に回答を与えるものである。また重力天体表面での移動、試料採取、分析技術を確認し、その場における試料選別が行えるようになることで将来のサンプルリターン探査への地歩を築く。

サイエンス成果が与えるインパクト：マグマオーシャン固化時における熱源元素を含む液相濃集元素の地殻への取込み過程を理解し、全球の熱源元素量の推定により地球型惑星の分化過程と熱進化を理解する。またクレータ年代学を高精度化し、隕石衝突頻度の経年変化から太陽系全史における地球への物質供給過程を把握する。それらの知見は地球の大気と海洋の成因、地球生命構成元素 (C、H、O、N) と栄養塩元素 (Ca、Fe、Mg、P、K 等 20 元素) の供給過程に対して回答を与えることになる。

主要キー技術と開発状況：着陸機と小型ローバからなる。年代観測装置と分光カメラを着陸機に搭載し、ローバで月面を移動し岩石片/レゴリスのサンプリングにより試料を着陸機まで搬送し、着陸機に搭載した観測機器により試料の選別と測定を実施する。キー技術である年代観測装置については、レーザパルス照射で試料をプラズマ化して K と Ar を同時に抽出し、プラズマ分光法によって K を、質量分析計によって Ar を定量することを検討している。これまでに、フライト実績のあるレーザを使用したカリウム計測の原理実証、試料容器に用いる真空シール材の検討が完了している。また小型の年代計測装置をローバに搭載し、伊豆大島でフィールド実験を行なっている。ローバは SELENE-2・月極域探査用に開発してきた実績があり、目処はついている。サンプル採取・受け渡し用ロボットアームも月極域探査用に開発が進む。月面でその場年代測定や KREEP 岩石の測定を行おうという計画は海外では現在までにないが、中国は3年以内に月表側からのサンプルリターンを計画しており、それらの試料はクレータ年代学の精度向上に貢献するとみられ、本計画と相補的である。

準備検討体制：東大、名古屋大、立教大、東大地震研、JAXA、阪大などが検討・開発を行っている。ピンポイント着陸技術、表面探査技術の一部は SLIM・月極域探査で確立する。年代観測装置については科研費「惑星表面その場年代計測装置の開発」を得ている。

(b.1.1.4) 火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画 [2030 年代前半の中型]

背景と目的：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CO₂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、現在でも地下水があり、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がある。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：1) 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CO₂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、**Recurring Slope Lineae (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。

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石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、あるいはレーザー誘起分光分析装置(**LIBS**)およびラマン分光計の2種類の組み合わせ

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：現在は、火星着陸RGを中心とした検討段階である。ただし、LIBS や質量分析計の開発は、東大、立教大、千葉工大で、生命検出装置については東京薬科大で、地下探査レーダーは東大で、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。

(b.1.1.5) 月裏側原始地殻サンプルリターン探査計画 [2035年頃の戦略的中型(政策的支援型)]

背景と目的：月裏側高地には表側より早期にマグマオーシャン(MO)から固化した原始地殻が存在していることが、かぐや等成果で強く示唆されている。未採取のこのような原始地殻物質を地球に持ち帰り、詳細な放射性年代測定や主要・微量元素組成測定、同位体測定などを行うことにより、MOの固化時間、純粋な斜長岩形成過程、表裏での地殻形成時期の差異を明らかにし、初期地殻形成のタイミングとその過程を理解する。また原始地殻物質の化学組成測定により地殻形成時点(斜長石晶出時点)でのマグマ組成を推定し、先に行うKREEP物質の探査で得られるMOの最終残液の化学組成推定結果と合わせてマグマの分化過程を遡り、月MOのバルク組成推定を行う。また、斜長石晶出段階での揮発性元素濃度を把握することでマグマ中の揮発性元素量推定をより正確に行う。

領域内の位置づけ：本ミッションの成果は月のバルク組成や初期分化(MO固化)年代の理解、地殻形成過程の理解、揮発性物質の供給メカニズム解明につながる。地球には約40億年より古い岩石が残されておらず、地球の前生命環境である生命の誕生にとって不可欠な栄養塩供給母体と前駆的の化学進化の場であった原始大陸に関する情報は月の高地地殻とKREEP物質の比較から得られ、月面その場観測によるKREEP物質・年代測定の探査計画ミッション(b.1.1.3)に続く本ミッションによって地球の前生命環境の場面構築をするための知見を得られる。

サイエンス成果が与えるインパクト：月MOの固化年代、化学組成を知るとともに地殻形成過程を押さえることで地球型天体の分化過程の理解の基礎を構築する。月バルク組成の推定によって巨大衝突過程を検証し、地球型惑星形成に関する基礎情報を与える。これら情報から月の科学だけでなく、前生命環境としての地球型天体の形成と初期環境進化、地殻の形成につなげる。

主要キー技術と開発状況、海外との比較：着陸機と小型ローバからなり、ローバには分光カメラと元素分析装置を搭載する。ローバで移動し岩石片/レゴリスの分光と、元素分析、サンプル選別を行った後で着陸機に持ち帰り帰還カプセルに搬送、月面から地球に帰還する。キー技術であるサンプル採取と受け渡し機構およびサンプル選定手順については先行ミッションにより実証する。帰還カプセルは火星衛星SR同等品等を用いる。これまでにNASA New Frontiersプログラムに月裏側巨大盆地からのSR提案(MoonRise)がなされたが最終選定で敗れた。他に月裏側SRの計画はこれまでに無く、かぐやの成果をもとにした日本独自の提案である。

準備・検討体制：阪大、JAXA、名大、千葉工大、放医研、中央大などが検討を行っている。サンプル採取・受け渡しおよび選定手順については先行する月面その場ミッションにより実証する。月離陸システムは月面着陸と技術的には同じであり、SLIM・月極域探査で実証される。サンプルの帰還カプセル技術ははやぶさシリーズで確立されている。資料選定や採取の自律機能化に向けて検討を始めている。検討の一部はSELENE-2・月極域探査で行っている。

(b.1.2a) プログラム的小型計画案(理学)

(b.1.2a.1) ペネトレータ技術実証探査計画：月震計による内部構造探査 [2025年頃の小型]

背景と目的：ペネトレータは、探査対象天体に衝突貫入して、搭載した科学観測機器を設置する小型バス機器である。火星衛星サンプルリターン探査や将来の重力天体内部構造探査での応用を目指し、ペネトレータ技術の工学的実証を行う。実証に際しては、地球近傍天体である月をターゲットとし、LUNAR-A計画で開発されたペネトレータの改良(小型軽量化を含む)をし、その内部にその場計測しか行えない地震計と熱流量計を搭載する。理学バス機器としての有効性を示すために、月の初期分化過程の第一義的な情報である月地殻厚の決定を隕石の衝突月震を用いて行うとともに、月の代表的な地域で熱流量観測を行う。

領域内での位置付け：ペネトレータ技術を有することは我が国の固体惑星科学探査の発展において大きな武器となる。多点同時観測が威力を発揮する地震観測の国際協力による実現を高め、日本が主導的な役割を果たすことに資する。また、小型バス機器技術は低リソースでの未踏天体の斥候探査にも有効であり、ソフトランディングが技術的に困難な地域における探査の実現にも有効であるため、機動性の高いミッションプランを構築しやすくする。

サイエンス成果が与えるインパクト：月の地殻量は、月形成直後におけるマグマオーシャンの固化過程の結果であり、将来のマントル構造探査とともにマグマオーシャンの規模やその分化（分別結晶作用）の程度を知る上で最重要課題である。この知識を得ることで、単に月分化過程を解明するだけでなく、初期地球における液相濃集元素の分配問題、ひいては初期生命に必要な生体必須元素の濃集過程の一面を定量的に議論できるようになる。また月の全球組成を地球のそれと比較して理解することにより、月形成円盤内での物質の分配や円盤進化を制約する上で重要な知見を得ることが可能であり、衛星・惑星形成環境を知る手掛かりとなる。

主要キー技術と開発状況：ペネトレータは、軟着陸機構や温度制御機構を必要としないため、1機あたりの質量リソースが小さくなる。そのため、地震や熱流量のような多点展開による地球物理学観測を実現する上で優位性を持っている。ペネトレータでは、大きな貫入衝撃に耐えるため、機器類のポッティング技術や負荷を他に流す技術が必要となる。LUNAR-A以降の開発において、耐衝撃技術の確立と確認（2010年）は取れている。現在は搭載機会を増やすために小型軽量化の検討や3軸姿勢制御衛星からの分離機構の開発を進めている。海外では、過去に火星探査を目的としたペネトレータ類似の技術を用いたMARS96、DeepSpace2が実施されたがいずれも失敗している。イギリスの月探査計画であるMoonLite計画の中でもペネトレータの開発が行われ貫入試験なども実施されてきたが、計画自体が経済悪化等の理由で滞っている。火星大気の観測を目的とするMars MetNetにおいて、パラシュートと組み合わせたsemi-hard penetrator（MetNet Lander）が提案されている。2016年にアリゾナで開催されたワークショップにおいて、外部評価委員から国際連携を促進するためにも開発したペネトレータの実証試験を早くやるべきとの評価を得た。

準備検討体制：LUNAR-A中止後、ロシアの月探査計画(LUNA-GLOB)とのタイアップのためにペネトレータの開発を継続してきた。2010年には熱構造モデルに対する熱応力負荷試験、貫入試験を実施してそれ以前に確認されていた不具合対策に決着をつけ、技術完成のめどをつけた。現在は、2015年に理学委員会で認められた小型衛星月ペネトレータ計画APPROACH2 WGの中で、増強型イプシロンロケットでのミッション化に向けてペネトレータの小型軽量化を含めたさらなる検討を行っている。また、月震波解析に重要な隕石衝突の位置、衝突時刻を特定する上で必要となる月面衝突発光の地上観測を実施する計画をすすめている。観測時間、検出率の拡充のためには国際的な観測ネットワークの整備が必要不可欠であり、2017年度からフランスとの共同観測チームを立ち上げ、共同観測を実施している。開発体制は、宇宙研/JAXA、東京大学地震研究所、東工大、東北大、京大、高知大などで構成されている。

ペネトレータ及び軌道離脱モータ、分離機構のFM品相当の開発はLUNAR-A計画時に進められた。また、LUNAR-A計画中止後はロシアの月探査衛星(LUNA-GLOB)への搭載に向けて、2007年に理学委員会の月内部構造探査WGとして活動が認められ、2014年の小型科学衛星3号機への搭載検討まで戦略的開発経費を獲得し、ペネトレータの技術完成にめどをつけた。さらに、小型軽量化の検討の一環として火山ペネトレータの開発をテーマとする科学研究費（2015-2017）を得て検討を進めている。また、日仏共同月面衝突閃光観測プロジェクトは日本学術振興会の二国間交流事業SAKURAプログラムとして採択されており、2017-2018の2年間、共同観測を実施する予定である。

(b.1.2a.2) 火星宇宙天気・宇宙気候探査計画（旧火星大気散逸探査計画[のぞみ後継機]） [2026年頃の小型]

背景と目的：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。火星宇宙気候研究の重要課題として、水とCO₂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。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る。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実見は、高エネルギー粒子環境を探索する手段として、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た。

本計画は、こうした火星における宇宙天気・宇宙気候に関する新発見を踏まえ、火星オーロラの動態を明らかにし火星圏での高エネルギー粒子環境の理解を目指す。また、火星圏の太陽風・太陽放射変動への瞬時応答を明らかにし、大気散逸が気候変動に果たした役割を理解しようとする我が国主導の火星探査計画となっている。具体的には、2つの達成目標(1. 火星圏の太陽風・太陽放射変動への瞬時応答を明らかにし、宇宙への大気散逸が気候変動に果たした役割を理解する、2. 火星オーロラの動態を明らかにし、火星圏での高エネルギー粒子環境を理解する)を設定し、そのために、6つの観測項目(磁場観測、高エネルギー粒子観測、オーロラ撮像、太陽風・太陽放射観測、電離大気流出観測、中性大気流出観測[一部オプション]、大気上下結合観測[オプション])を実現する。

領域内での位置づけ：本計画は、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である。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において、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)。一方、その後の国内外の新たな火星圏探査計画の動向と、MAVENの科学成果を受け、科学目的を先鋭化した結果、2016年末に戦略型中型計画ではなく、公募型小型計画として検討を進めることを決定し、中型WGとしての活動は2016年末に終了した。現在は、インハウスでの検討を進めつつ、惑星科学会とSGEPSSにまたがる火星研究の議論を通じ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ている。加えて、火星エアロキャプチャ技術実証検討チーム(b.1.2b.1)との連携などを通じ小型計画での技術的成立性について検討を行ってきており、2017年度内にISASに小型計画を目指したWG提案を予定している。その上で、2020年頃のミッション提案、2026年頃の打ち上げを目指す。

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。我々の検討している「火星宇宙天気・宇宙気候探査」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、モデル科学機器として、表S4の項目(オプションを除く総重量約30kg、電力約80W)を設定している。その開発状況・搭載実績等は表S4を参照されたい。

準備検討体制：ISAS、東大、東北大、大阪大を中心に約40名と宇宙研工学約10名で検討を実施。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およびSGEPSS地球型惑星圏環境分科会を母体として検討を進めてきており、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った。現在は、公募型小型計画に規模を変更し再検討を行っている。また、各観測機器の開発要素の検討を、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。

(b.1.2b) プログラム的小型計画案（工学）

(b.1.2b.1) マルチフライバイによる地球接近小天体（流星群母天体）探査 [2022年頃の小型]

背景と目的：1万個を超える地球接近小天体(Near Earth Object: NEO)は、メインベルトやさらに太陽系外縁部にあった小天体が軌道不安定から近日点距離が1 AU程度以下まで低下したもので、多様なスペクトル型が存在する。NEOの物質分布や物理化学特性の理解は、地球の出発物質や進化過程の解明、太陽系の物質移動・供給過程の理解、さらには地球のスペースガードの観点から重要である。

DESTINY+ (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage, Phaethon fLyby with dUSt science)は、2015年度のイプシロンロケット打ち上げのJAXAの小型探査計画に工学ミッションへの理学ミッション相乗りの形で応募し、MDRの結果、理学ミッション内容のさらなる強化を行い、2016年度のデルタMDRを経て、現在フェーズA検討中である。本探査では、地球飛来ダストの特定供給源である主要流星群の母天体を探査標的とする。中でも、ダスト放出メカニズムがわかっていない活動小惑星であり、公転周期が短い(3200)フェートン(ふたご座流星群母天体、公転周期1.4年)を最重要標的とする。他の探査標的候補としては、2003EH1(しぶんぎ座流星群母天体、公転周期5.5年)、2P/Encke彗星、2004TG10(おうし座流星群、公転周期3.3年)もある。これらの天体は軌道傾斜角が10度以上と大きく、相対速度も10 km/s以上であるため、小型衛星によるマルチフライバイ(一回の打上機会ですべて天体を同時に探査)が有効である。DESTINY+では、フェートンを秒速33km/secでフライバイした後、エクストラミッションとして、フェートンからの分裂天体である2005UDをフライバイする計画である。高速フライバイによる限られた観測時間内で、彗星及び彗星小惑星遷移天体から、効率的に最大限の物質科学情報を得るために搭載すべき必要最低限の「ミニマム観測機器セット」の開発・整備を目指す。現状想定している機器は、(1)可視の超望遠カメラ、(2)紫外可視近赤外のマルチバンドカメラ、(3)飛行時間(TOF)型ダスト質量分析装置である。(1)で10m/pix以下の空間分解能で天体の表層地形を撮像(距離1000km以下を想定)、(2)で100m/pix以下の空間分解能で地域毎の紫外可視近赤外のスペクトルの傾きから物質分布を制約、(3)でPhaethon周辺ダスト、ダストトレイル、惑星間ダスト・星間ダスト(Phaethon到達までのクルージング中の観測)の質量、組成、電荷、速度をその場分析を行う。

本探査で得られたデータから、地球へ直接物質供給をする始原天体の物理化学特性および太陽加熱による物質変遷過程、ダスト放出メカニズムを解明すると共に、地球に飛来する1 AU付近の惑星間ダスト(星間ダスト含む)のダスト粒子毎の由来に制約を与えることにより、地球飛来ダストが、地球への有機物供給の主要媒体であること、そして地球生命の前駆物質であるという仮説実証に必要な不可欠な情報を取得する。

領域内での位置づけ：彗星及び活動小惑星は、はやぶさ2が狙うC型小惑星やOSIRIS-RExが狙うB型小惑星と同等に、炭素質の始原物質を保持しており、前生命環境進化の解明への重要な手掛かりを持つと考えられる。また、流星群母天体を探査標的とするため、流星群の地上天文観測と小天体探査の有機的分野融合、相補的な科学成果が期待される。また、はやぶさシリーズで実証されたNEOへのランデヴーや多角的リモートセンシング観測の技術と知見の継承・発展が可能となる。さらに相対速度の大きい天体への高速フライバイ、マルチフライバイ、高速撮像・観測など挑戦的技術の実証機会となるとともに、NEOに限らず太陽系小天体のフライバイ探査による効率的な科学探査の標準観測セット開発・整備が図れる。

サイエンス成果が与えるインパクト：流星群母天体かつ活動小惑星の探査は世界初であり、はやぶさ(S型)、はやぶさ2(C型)、OSIRIS-Rex(B型)、Rosetta(彗星)探査と相補的な成果が期待される。また、近接撮像および周辺ダストのその場観測により、始原天体における有機物の残存条件、分裂・崩壊・衝突、塵の放出など小天体の物理的進化過程理解への手掛かりが得られる。また、ふたご座流星群の流星体の地上分光観測及び始原的分化隕石の分析から示唆される母天体フェートンのNa枯渇及び不均質の由来が、太陽加熱の影響であるという仮説検証につながる。さらに、フェートンは複数の分裂天体(2005UD、1999YC)を持つため、これら分裂天体のマルチフライバイは、その前駆天体の間接的な内部探査とみなせ、分裂小天体群の理解にもつながる。

主要キー技術と開発状況：高速フライバイにおける、衛星の姿勢安定、接近、高速追尾が必要となる。DESTINY+では電波および光学航法による軌道決定と、高速フライバイ時の視線追尾制御とそれによる高精度の接近・撮像技術の実証が予定されている。超望遠可視カメラは、同時期に開発が進められるMMXカメラとの共通化を図り、開発のマンパワーや開発コスト、スケジュールの最適化を図る。飛行時間型ダスト分析装置は、ドイツのStuttgart大学チームの協力を得て、Cassini搭載CDAを小型衛星搭載用に改修したモデルを搭載する計画である。

準備検討体制：現在はミッションのフェーズA検討段階である。DESTINY+所内プロジェクト準備チームおよびドイツチーム（TOF型ダスト分析装置）の協力の下、準備を進めている。イプシロンロケットDESTINY+による、フェートンと分裂天体2005UDへのマルチフライバイについて、軌道設計および推薬解析で実現性が示されている。現在の打上げ予定時期は2022年度後半。打ち上げ後、約2年間の地球周回軌道でイオンエンジンにより徐々に高度をあげ、月スイングバイの後、さらに1年半から2年の飛行でPhaethonに到着予定である。現状、国内外の20の大学・研究機関（千葉工大、国立天文台、JAXA、東京流星観測網、東北大、広島大、九州大、立教大、神戸大、阪大、日大、北大、総研大、会津大、日本スペースガード協会、ソウル大、NASA/JSC、アリゾナ大学、Stuttgart大学、Max Planck研究所）から約30名の惑星科学及び天文学の分野横断的な専門家の協力の下、検討を進めている。

(b.1.2b.2) 火星エアロキャプチャオービタ [2026年頃の小型]

背景と目的：欧米諸国が先行し、2020年代にはアジア諸国による火星探査も計画される中で、今後わが国が火星探査を行う場合、その意義、目的、および成果が強く問われる。その一つの回答として、極めて挑戦的なミッションである火星衛星サンプルリターン（MMX）が検討されていることは、我が国の太陽系探査における戦略を明確に示したものと見えよう。このように、わが国は太陽系探査において新規性と独自性に重きを置き、これを実現する探査工学においても、はやぶさに見られるように、高い創造性を持って果敢な挑戦を続けてきた。将来の火星探査においても、このフィロソフィーは受け継がなければならない。一方、火星着陸探査を実現するためには、探査機を目標とする着陸点へ高精度で運搬するEDL（entry-descent-landing）技術を獲得することが必須である。しかしEDL技術は、言わばロケットと同様のインフラ技術であり、技術の独創性よりも質（精度・信頼性）が強く求められるものである。

このように相反する要求の中で、火星エアロキャプチャオービタは最適なソリューションであり、最も高い成果をもたらすことが期待されるミッションである。本ミッションでは、エアロキャプチャにより火星オービタを投入する。その目的は、MMXの系譜を継承する将来の火星着陸探査の前駆ミッションとしてEDL技術の大部分を実証すること、これに続く火星着陸探査に必要なプラットフォーム機能（データリレー機能、EDL支援機能など）を提供すること、またオービタとして火星環境の長期的な科学観測を行うプラットフォームを提供すること、その結果として将来の火星着陸探査における着地点決定のための情報を獲得することである。エアロキャプチャは、惑星周回軌道投入において推進系を用いる場合よりもオービタの質量を増大させることができる有望な技術であるが、これまで惑星探査において実現された例がない。これを世界で初めて実現することは、わが国の探査工学のフィロソフィーに適うものであり、わが国の強みである大気突入技術の国際競争力をさらに高めることが期待される。さらに、エアロキャプチャ技術の獲得は、将来我が国が国際共同有人火星探査に参加する際、火星圏への物資輸送の一翼をHTV-M（H-III Transfer Vehicle to Mars、火星ステーションへの輸送を行うエアロキャプチャオービタ）によって担うという構想にも合致し、その開発にも寄与することが期待される。

領域内での位置づけ：火星着陸探査技術実証WG（2014～2015）を再編し、2016年度に設立された火星環境探査RGにおいては、目標として2030年代の火星着陸探査を実現することが掲げられている（b.1.4）。火星着陸探査を行うためには中規模以上のシステムが必要であり、これに要する技術も多岐に渡るため、段階的に効率よく技術獲得とインフラ整備を進める必要がある。本ミッションは、火星着陸探査に必要な前駆ミッションとして位置付けられ、小型ミッションとしてコストを抑制しながら、火星着陸探査に必要なEDL技術などを部分的に実証し、データリレーや地上観測など火星着陸探査ミッションに必要なプラットフォーム機能を実現するものである。

また、本ミッションで実現される火星オービタは、火星圏の科学観測のためのプラットフォームを提供するため、火星宇宙天気・宇宙気候探査計画 (b.1.2a.2) や火星周回大気探査計画 (b.1.4.1) をはじめとする探査計画と連携することによって大きなシナジー効果が期待される。現在、これらの計画と連携した技術的成立性や概念検討を進めており、2020年までにミッション提案を行い、2026年頃打ち上げることを目標としている。

サイエンス成果が与えるインパクト：本ミッションで実現するサイエンスとそのインパクトについては、中期的な目標として掲げる火星着陸探査 (b.1.1.4)、また連携する火星宇宙天気・宇宙気候探査計画 (b.1.2a.2)、及び火星周回大気探査計画 (b.1.4.1) を参照されたい。

主要キー技術と開発状況：本ミッションの主要キー技術を表S5に示す。火星オービタは小型科学衛星標準バスの利用を想定しており開発要素が少ないが、火星地表系との火星標準通信系 (UHF) は新規開発要素となる。その他はエアロキャプチャに関するものであるが、その多くは小型回収カプセルによって2018年に部分実証される計画である。個々の要素技術の開発リスクは高くないものの、エアロキャプチャはシステム技術としての難易度が高く、地球近傍でのシステム実証が必要である。

準備検討体制：2017年現在、JAXAのエアロキャプチャ検討チームを中心とする工学研究者8名と、火星環境探査RG、火星宇宙天気・宇宙気候探査検討チーム、火星周回大気探査検討チームの理学研究者約20名で検討を行っている。小型ミッションとしてのエアロキャプチャは、過去にメーカ検討を含めた概念検討を実施しており、これらの成果は今後の検討にも利用できる。

(b.1.3) 機器の提供による国外探査計画・小規模計画

(b.1.3.1) 木星氷衛星探査計画：日本分担部分 (JUICE-JAPAN)

背景と目的：ESA・日本共同探査計画JUICEの科学的課題は(1)系外惑星を意識した巨大ガス惑星の世界の理解、および、(2)アストロバイオロジーを意識した氷衛星 (ガニメデ、エウロパ、カリスト) の探査である。「巨大ガス惑星系の起源と進化」という大テーマのもと、木星周回軌道からの木星磁気圏の観測、氷衛星エウロパ・カリストのフライバイ観測、太陽系最大の氷衛星ガニメデの衛星周回観測による精査を実施し、生命居住可能領域の探査を行うことで、「生命存在可能領域としての氷衛星内部海の形成条件」を解明する。JUICEには国際公募によって選定された11の観測機器が搭載される。このうち、4つの機器 (RPWI、GALA、PEP/JNA、SWI) については日本からハードウェアの一部を提供し、2つの機器 (JANUS、J-MAG) についてはサイエンスCo-Iとして参加する。

領域内での位置づけ：JUICEミッションでは(i) 系外惑星の形成の理解につながる普遍的惑星形成論の確立、(ii) 地球外生命探査につながる生命存在可能領域形成条件の理解、(iii) 太陽系最強の加速器木星磁気圏を用いた宇宙粒子加速の理解、という成果が期待される。特に(ii)はCHASEの目標そのものであり、JUICEミッションはCHASEの中で大変重要な地位を占めている。

サイエンス成果が与えるインパクト：氷衛星は「地球とは異なる生命居住可能性」を探索するための最重要対象天体であり、従来の探査によって存在可能性が提示された氷地殻下の海「内部海」の存否を確認することそしてそのような環境を保持する天体の起源と進化の解明に迫ることが、JUICEの重要な目的である。JUICEではガニメデ全球を周回極軌道から精査することに加えて、カリストとエウロパのフライバイ観測も実施する。氷衛星すべてを詳細に比較検討することで、人類にとってまったく新しい探査対象である氷衛星間の相違がどのようにして生じたのかが理解される。特に、同程度のサイズと質量を持ちながらも表層と内部状態が全く異なるガニメデ (強い内部分化を経て金属核を持ち、ダイナモ作用により固有磁場が生成されている) とカリスト (氷と岩石が単に混ざっただけの未分化状態) との対比、内部海の存在可能性の強さと、南極地域からの水噴出から特に注目を集めるエウロパの内部構造の理解 (氷地殻の薄さ、内部海の深さ、表面物質同定からの海底状態の推定)、そして変成をほとんど受けていないカリストから木星系誕生時の情報を読み解くこと、は太陽系科学研究に新展開をもたらす。

主要キー技術と開発状況：搭載機器に共通する技術的課題は木星環境への対応である。木星周辺で発生する放射線は非常に高く、探査機外部に露出する機器には400—1000 kradの耐性が要求される。また、ガニメデ周回中の探査機温度は170 K付近まで下がるため、各機器は大きな熱歪みにさらされる。特に光学機器はアライメントにずれが生じないように、設計に留意しなければならない。JUICEは電力を太陽電池

で賄うため、電力リソースが厳しく、地球ヘデータダウンリンクを行う間(8時間/日)はヒータ電力も抑制される。

2011年に打ち上げられたNASAのJUNOは、2016—17年の1年間、重力場計測（コアサイズ推定）や木星大気組成にフォーカスしたミッションを行っている。木星全体の大気気象現象を長期間追跡することは難しい。一方、現在米国で計画中のEuropa Clipperはエウロパをターゲットとし、衛星周回軌道ではなく、木星周回からのフライバイを重ねて探査を行うため、科学成果はJUICEに比べて限定的である。ただし、JUICEより先に木星系に到着するため、サイエンスインパクトは大きい。

準備検討体制：JUICEの選定と同時に観測機器AO発行と選定の日程が発表されたことを受け、2012年9月開催の理学委員会で日本からAOに参加するチームの提案書審査が実施され、6チームがAOに参加することになった。2012年10月以降、ESAで審査がなされ、その結果、11観測機器が選定され、日本からハードウェア貢献をするのは4チーム、その他、2チームに日本からのサイエンス貢献があることとなった（2013年2月）。さらに、2013年6月の理学委員会では、WGの形をJUICEに対応する形へと改めることを木星WGが提案し、2013年9月に正式にJUICE-JAPANが設立された。2014年9月の理学委員会において小規模プロジェクトとして承認され、2016年9月にプリプロジェクトへ移行した。2017年12月にプロジェクト審査が行われた。

JUICE-JAPANには国内の大学・研究機関から理学・工学をあわせて、139名の研究者が参加している。チームの構成は、プロジェクトマネージャ、プロジェクトサイエンティスト、PA担当、とISASから観測機器貢献をする3チーム、サイエンスチームである。2017年現在、各機器の開発を急ピッチで進めている。今後は、日本での国際会議の主催などサイエンス活動を含めて本格化していく。特に、日本では惑星形成論や極限環境生物学と、JUICE探査との有機的連携を強く主導する。

(b.1.3.2) 彗星アストロバイオロジー探査・サンプルリターン (CAESAR)

背景と目的：彗星は太陽系の中で最も始原的な天体であり、星間分子雲から原始惑星系円盤形成に至る太陽系誕生の情報が彗星の固体粒子や揮発性物質に保存されている。また、彗星には生命構成有機分子など多くの有機物が含まれていると推定されており、それらの有機分子は彗星から放出された塵に含まれて地球を含む多くの惑星に供給されてきた。そのような彗星塵は地球の前生物環境において、宇宙からの最大規模の有機物供給源であったと考えられる。彗星の試料については、惑星間塵の分析とNASAのStardustミッションで回収された試料の分析が行われてきたが、いずれも回収できたのはサンプリングや大気圏突入時に変質を受けた極微量の固体微粒子のみで、変質を経験していない鉱物や有機物、揮発性成分の情報を引き出すには至っていない。2016年までESAの探査機Rosettaが67P/Churyumov-Gerasimenkoについて、その周回軌道から詳細な観測を行った。また、着陸機philaeによる有機物や揮発性分子のその場分析を試みたが、philaeは着陸に失敗し計画した分析のほとんどを行うことができなかった。Comet Astrobiology Exploration Sample Return (CAESAR)はNASAのNew Frontier 4に提案されている計画の1つで、短周期彗星である67P/Churyumov-Gerasimenkoの彗星核から100g程度の固体物質と揮発性物質の両方を採取して低温で地球に持ち帰る計画である(PI: Steven Squires)。この計画は国際共同計画であり、JAXA宇宙研がサンプルリターンカプセルの開発を担当し、また日本人研究者がリターンサンプルの主要な科学分析を担当することになっている。2024-2025年の打ち上げ、2038年の地球帰還を目標にしている。CAESARでは始原的な彗星鉱物・有機物・揮発性物質を地球の実験室で詳細に分析することによって、(1)太陽系の起源と初期進化過程、(2)地球における水および生命材料の起源に直結する情報を引き出す。

研究領域内での位置づけ：日本の小天体探査は、はやぶさで成果をあげ、はやぶさ2へと引き継いでいる。これらの探査で持ち帰ることが期待される小惑星物質は、太陽系の始原物質であった無機物や有機物が小惑星において水や熱により各種の変質過程を経た物質であり、太陽系小天体内部での物質進化過程の情報を得ることができる。一方で、CAESARでは集積後の天体内部での二次的過程を受けていない太陽系の究極的な始原物質そのものの獲得を目指している点に違いがある。また、彗星は地球や火星の前生命環境への水や有機物の供給源としての意義も持っている。この意味では小惑星は隕石の母天体として、彗星は主要な宇宙塵の母天体として、別々の過程で多様な有機物を供給している。したがって、彗星サンプルリターンは小惑星サンプルリターンと相補的な関係にある。

サイエンス成果が与えるインパクト：現在の太陽系天体の中で最も始原的な天体である彗星の固体試料と揮発性試料の両方を実験室レベルの超高精度で分析すれば、太陽系の材料物質に関して彗星のリモートセンシング観測や他の天体試料の分析では得ることができない重要な情報を得ることができる。未変質の彗星には、太陽系形成時に存在した先太陽系物質が最も豊富に保存されていると予想され、太陽系原材料物質の起源や多様性、太陽系における変質に新しい知見を与えることが可能となる。また、地球の前生物環境に大量の有機分子を供給したと考えられる彗星に含まれる有機物の実態を理解できれば、地球の前生物環境に宇宙からもたらされる生命材料の量と種類が推定できる CHASE に直結する成果となる。しかし、人類は彗星のマクロ試料を獲得しておらず、それを分析したことは一度もない。CAESAR で持ち帰る試料から得ることができる情報は人類にとって科学的に全く未踏の情報である。

主要キー技術と開発状況：彗星の低温試料を可能な限り変質を避けて地球に持ち帰るためのサンプルリターンカプセル(SRC)を JAXA が開発する。はやぶさのサンプルリターンカプセル技術を最大限に活かして開発を進めるが、サイズおよび要求される温度条件がはやぶさ、はやぶさ2よりも非常に厳しいために、それを満たすための挑戦的な技術要素を含んだ開発となる。SRC の開発は既に始まっており CAESAR にむけて開発する大型ヒートシールドやパラシュート技術、搭載電子機器、低温のサンプルリターンを実現する熱設計技術は MMX および OKEANOS にも活かされるものである。現在のところサイエンス側で要求する水準を満たす概念設計が完了し、試作段階に入っている。そのほかの機器全ては米国で開発・管理する。

準備・検討体制：NASA New Frontier 4 の AO に、米国・日本・欧州の理学・工学の研究者でプロポーザルを提出した。提案された 12 の計画のうち 2 つのみが 2017 年 12 月に一次審査を通過し、CAESAR はその一つである。現在、2019 年の最終審査に向けて準備中である。宇宙研では、MDR、準備審査、SRR を終え、現在は Phase A2 である（2017 年 12 月 22 日現在）。2019 年の NASA 側の最終審査通過とともに Phase B を目指している。

(b.1.3.3) 系外惑星大気の紫外線分光観測

背景と目的：バイオマーカーの最有力候補である酸素と水を有する地球型惑星（生命保有惑星候補）を検出し、そして、**海洋・大陸の有無や気候状態等の惑星表層環境の制約を得る**ことを目的とする。Kepler 宇宙望遠鏡の可視光トランジット観測による系外惑星サーベイによって、地球と同程度の輻射を主星から受け（つまり、地球と同程度の放射平衡温度で）、地球程度の大きさを持つ惑星が存在することが明らかになった。残念ながら、Kepler によって検出された惑星は地球から遠いため 大気特性の制約などの特徴付けはほぼ不可能である。しかし、（WSO-UV 打ち上げ以前に行われる）K2 や TESS、CHEOPS といった次世代トランジット観測サーベイによって、地球から比較的近い恒星（近傍星）のまわりに同様の惑星が多く発見されることはほぼ確実である。本計画では、それらの惑星を観測ターゲットとする。

上記のトランジット観測サーベイおよびその後の視線速度法フォローアップによって、惑星の半径と質量、主星からの距離（軌道半径）が得られる。半径と質量の関係から、地球のような岩石を主成分とする惑星を抽出することができる。さらに、主星の光度と惑星の軌道距離から、その惑星の主星光照射量（つまり、放射平衡温度）が得られる。問題は、その惑星が H₂O を海として保持しているか否かである。惑星上に海を保持できる主星周りの領域は「**ハビタブルゾーン**」と呼ばれる。ハビタブルゾーンは便宜上、主星光照射量をもとに定義されることがあるが、実際には、雲の分布や惑星の自転などに関する不確定性から、主星光照射量のみでは惑星上に海が存在しうるかどうかは決められない。一方、惑星半径に対する観測精度の限界のため、地球型の比較的希薄な大気や海が存在を可視光トランジット観測から確認することもできない。そこで、**紫外線トランジット観測で遠方まで広がる外圏大気を捉えることによって観測限界が緩和され、生命保有惑星に特徴的な要素を検出できる**、というのが本計画の画期的な着眼点である。なお、近傍星では、太陽型 FGK 星に比べて低温の M 型星が圧倒的多数を占める。また、主星が低温であるため、ハビタブルゾーンが主星に近く、トランジットの検出確率も高い。そのため、本計画では特に、M 型星まわりの惑星を主なターゲットとする。また、惑星を持つ恒星の紫外線強度測定も実施する。

領域内での位置づけ：系外惑星の観測研究は天文学分野が牽引している状況であり、惑星科学分野において宇宙望遠鏡計画の検討はほとんど進められていない。赤外線領域の光量が多い赤色矮星系の観測

に対象が移りつつある中で、本計画では別の視点から紫外線観測の有効性が示されておりユニークなものとなっている。ハッブルは想定寿命を越えており、代わりの紫外線宇宙望遠鏡として検討されているのは、ロシアが開発中の World Space Observatory-UV(WSO-UV)のみである。WSO-UV 側から、本チームに機器提供の依頼を受けており、世界に先駆けて新規成果を得ることが期待される。

サイエンス成果が与えるインパクト：ロシアが開発中の 1.7m 紫外線宇宙望遠鏡に開発中の高感度紫外線分光器を搭載することにより、1 年程度で 20 個程度の地球型惑星の観測を行い、地球と同程度酸素を有する惑星があれば検出可能となる見込みである。水素原子や酸素原子の検出によって、直接生命保有惑星であることを決定付けることはできないが、有力候補を絞り込むことに貢献できる。太陽系外の地球型惑星の特徴付けは超大型計画が目標としている内容であり、酸素の検出には JWST でも数年を要すると見込まれている。装置開発に必要な予算は数億円程度であり、コスト対効果の高さも本計画の特徴である。

主要キー技術と開発状況：真空紫外領域の分光素子と光検出器で構成される分光器を使用する。分光素子である回折格子は CLASP、光検出器はひさき、BepiColombo/PHEBUS、PROCYON/LAICA で実績があり、同型品を用いることで、上記目標（1 年で 20 個程度）が達成される。主に科研費により感度向上に向けた技術開発を続けており、現時点で光検出器の感度は 1.5 倍以上向上している。

準備検討体制：亀田真吾（立教大）、生駒大洋（東大）、村上豪（JAXA）、成田憲保（東大）、塩谷圭吾（JAXA）を中心メンバーとして、系外惑星紫外分光 WG（UVSPEX WG）として活動し、装置設計・観測計画の検討を進めている。また、WSO-UV に搭載予定である、ロシアが開発中のコロナグラフ装置の検討協力を田村元秀（東大）、西川淳（天文台）と共に進めている。

(b.1.4) 将来探査コンセプト提案

以下の将来探査コンセプト提案については、長期的視点からの重要性・領域での位置づけを述べるものであり、各提案間の順位付けは行わない。

(b.1.4.1) 火星周回大気探査コンセプト案

背景と目的：Mars Global Surveyor (MGS) 以来、太陽同期極軌道衛星によって火星大気の平均的溫度構造、水蒸気やダストなどの 3 次元分布が明らかになってきた。しかし、そのような現在の気候の形成および維持のメカニズムを明らかにするには、より高い時空間分解能で火星大気を動的に捉えなければならない。すなわち、水蒸気、氷雲、大気ダスト、微量気体、大気温度、地表温度（熱慣性）のグローバル分布の変動を高高度から高時間・高空間分解能でマッピングし、火星の水とダストの循環を明らかにする。大振幅の日変化サイクルが本質的な役割を果たす火星気象の特性に注目して、火星において世界初となる昼夜を問わない連続グローバル大気観測を狙う。金星探査機「あかつき」や SMILES での実績を活かしたフルパッケージの火星気象観測を目指しつつも、火星エアロキャプチャなどの工学実証探査、MMX、火星大気散逸探査といった他の火星ミッションとの相乗りも検討している。中間赤外カメラなど厳選した観測装置を周回機に搭載して昼夜を問わず連続的な気象画像を得ることにより、小規模ながらコストパフォーマンスの高いミッションを実行可能である。MMX や、UAE が 2020 年に打ち上げを目指す Emirates Mars Mission (EMM) も、一部の測器を用いて火星赤道軌道から連続グローバル撮像を行う計画である。

領域内での位置づけ：斜面風や対流による水蒸気およびダストの混合過程の日変化をとらえるためには、同一地点の半日以上以上の観測が必要である。しかし、MMX にしても EMM にしても注目地域を半日以上視野におさめ続けられないことと、夜間の全球画像を高頻度で得られないことにより、上記の様々な観測量の時空間変動を常時観測することはできない。特に、夜間は最も気温が低下して H₂O 氷雲が形成されやすく、かつ有力なダスト巻き上げメカニズムの一つである下降斜面風のピークである。それらは通常数 100 km に満たない空間スケールであることを考えれば、EMM 搭載の FTIR が 100-300 km/pix の空間分解能しかないことも不十分な点である。つまり、本提案が昼夜を問わず水やダストの変動を観測することができる、初の火星気象衛星といえる。

サイエンス成果が与えるインパクト：火星気候の変遷を解明するうえで、流体力学・雲物理・エアロゾル物理に立脚して気候システムを素過程から理解することは必須である。「あかつき」の経験を生かしつつ火星気象衛星ミッションを世界に先駆けて実現することにより、水やダストの輸送を担う素過程

とそれらが火星気候システムにおいて果たす役割を明らかにする。特に、メソスケール（空間スケール数 10-数 100km、時間スケールは数時間）の現象は、より時空間スケールの大きな循環に水蒸気やダストを供給する重要なプロセスであるが、EMM を含めた他のミッションの missing window にあたる。これを埋めることで地球にも引けをとらない動的な火星大気物質輸送過程が明らかになる。

主要キー技術と開発状況：搭載機器候補は、偏光カメラ、サブミリ波サウンダ（FIRE）、中間赤外カメラ、望遠カメラ、超高安定発振器（USO）である。大気微量成分の観測のため赤外分光器の搭載も検討している。主要キー技術は FIRE の小型化および中間赤外カメラの高感度化で、前者については、JUICE 搭載機器の国際チームで小型センサの開発が進んでいる。

偏向カメラおよび望遠カメラによって、様々なスケールの氷雲やダストイベントの発生や輸送過程が可視化される。中間赤外カメラは氷雲およびダストイベントの上部の温度を計測することで、背景にある大気現象を特定するために必須なそれらの到達高度を得る。また、地表面温度（結果的に熱慣性）も観測できる。すでに、あかつき、はやぶさ 2、UNIFORM などに搭載され運用されてきた。FIRE は ISS への搭載実績があり、大気中のダストの有無にかかわらず、氷雲やダストイベントの周囲の大気温度や微量気体の 3 次元分布を観測することができる。USO はあかつきへの搭載実績があり、電波掩蔽によって大気温度の鉛直分布を観測する。他の機器に比べて 1 桁上の鉛直分解能を有しており、氷雲やダストイベントから放出される内部重力波を観測できると考えられる。

準備検討体制：宇宙研、東大、滋賀県立大、神戸大、NICT、立教大、岡山大、東北大などから約 10 名の研究者が参加して検討している。宇宙理学委員会の WG を組織して活動してきたが、「あかつき」の金星周回軌道投入失敗を受けて次の惑星気象ミッションの実施タイミングを見直すこととなり、いったん WG を解散した。その一方、火星のプログラムの探査の機運が高まる中、近い将来の周回機ミッションに一部の気象観測機器を相乗りさせる可能性も視野に、これまで検討してきた気象衛星単独ミッションの形態にとらわれずに幅広く可能性を追求する方針とした。

(b.1.4.2) 月の地下空洞直接探査

背景と目的：月火星の表面環境は、既に「かぐや」をはじめとする遠隔探査、着陸その場/表面移動探査、更に月ではサンプルリターンによって詳細に調査がなされてきている。今後の月火星探査の一つの主軸は、地下直接探査へと向かうものであるが、近年、月火星の地下空洞の存在が確実になってきた（図 S1）。そこで、隕石による破壊や角礫岩化、太陽風による変成、ダスト嵐による攪拌効果、を受けていない月の「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（月-地球系への物質供給調査、火成活動調査、古地磁気調査、更に揮発性物質調査等）を目指す。なお、この計画は、宇宙理学委員会の下リサーチグループ活動で検討が深められている。まずはその場観探査を考えているが、更にはサンプルリターン、そして、火星の地下空洞探査へと発展させることも考えられている。

サイエンス成果が与えるインパクト：1) 月-地球系への物質供給調査：地球で認められるように、溶岩チューブは、壁、天井、床で表面が火成活動終了に伴う内部の急激な温度低下によりガラス皮膜で覆われることが多く、高い密閉性を有する。したがって、溶岩に捕獲された揮発性物質が逃散しにくく、探査でそれら物質が回収できる可能性が極めて高い。月-地球系に、地球集積後 5 億年経った約 40 億年前に地球の水、地球の生命を作る源となった有機物が、地球に持ち込まれたという「後期隕石重爆撃説」が、1970 年代より提唱され（e.g. Tera et al. 1974）ている。この仮説を検証することは地球生命の由来を解き明かすための一つの重要なステップであり、そのためにも、月や火星が持つ、水を含む揮発性物質の詳細情報が有益である。こうした探査により、「生命を構成する物質（特に水と有機物）は、どう地球などの天体に供給されたかに関わる知見を集積する」という科学界へのインパクトが期待出来る。

2) 月火成活動調査：地下空洞の入口となっている縦孔が存在するマリウス丘と静の海は、PKT 領域（Jolliff et al. 2000）に位置し、熱エネルギー源の天体での偏在を理解する上で極めて重要である。チタンもまた重要な熱源分布を解明するキー元素であるが、PKT 領域にチタンが多くみられることが判明している。地下空洞（溶岩チューブ）への入口となっている縦孔の壁や溶岩チューブ内より得るサンプルからは、内部から噴出したそのままの組織、組成で、放射線物質の具体的な量やその変遷を追うことが期待される。また、縦孔の壁には、溶岩が複数回流したことによって形成された何層にもわたる地層らしきものが認められる。これらが実際に累重した地層であるならば、マリウス丘や静の海の火成活動に

ついて経年変化も追える可能性がある。このように、地下空洞での探査により、「生命を維持するためのエネルギーが、天体ではどのように存在したのかに関わる知見を集積する」また、「生命を発現させる環境因子はどのようなものであったのかに関わる知見を集積する」という科学界への大きなインパクトが期待出来る。

3) 電磁場-ダスト-粒子相互作用調査、月古磁場調査：天体のダスト環境は、生命の発現、そして維持に大きく影響する因子である。縦孔の底では、日中常に日陰境界が生じる場所であることから、日陰境界での電磁場形成と、その電磁場とダストや粒子との相互作用を理解する上で重要なデータを得られる。また、地下空洞を作る溶岩壁や床には、冷却固化時に周囲磁場があれば磁場を獲得した可能性がある。月表面と異なり隕石重爆撃を受けていない、溶岩チューブを構成する岩体には、ある一定方向の強い残留磁気として現在観測される可能性が高い。電磁場-ダスト-粒子相互作用、月古磁場の調査も、やはり「生命を発現させる環境因子に関わる知見を集積する」という科学界への大きなインパクトが期待出来る。

4) 若いクレータモデル年代を持つ溶岩被覆域調査：隕石衝突もまた、生命の発現、維持、そして死滅を大きく左右しうる環境因子である。マリウス丘の縦孔の10km西に、Hiesingerら(2016)は、10億年に形成した若いクレータモデル年代を持つ溶岩被覆域を見いだしている。このように若い年代を持つサンプルは未だ無い。その領域の放射性年代調査により、クレータ年代学の精密化を図る。若い年代の噴出物調査により、隕石衝突という「生命を発現させる重大な環境因子に関わる知見を集積する」ということが可能であり、成功すれば科学界に大きなインパクトを与える。

主要キー技術と開発状況: 月の縦孔の内部を直接探査するミッション(UZUME)の検討は宇宙科学研究所の「月火星の地下空洞直接探査」のRGで議論が続けられている。縦孔付近のピンポイント着陸はSLIMで獲得された技術を使い、着陸機から縦孔に降下して未踏の縦孔内部の空間を直接探査する。月縦孔への降下については、テザー付きのプロブを投擲やローバで縦孔内部に降ろすことにより達成する計画である。

風化を受けていない月の縦孔の側壁は掘削をせずレゴリス層の詳細な鉛直構造を明らかにすることが出来る貴重な露頭である。また、縦孔に繋がるとされる巨大な溶岩トンネル内部は、隕石衝突、宇宙線被爆、極端な温度変化から長期間に亘り隔離されており、そこにある鉱物は過去の履歴を良く残す。そのため、縦孔の側壁や溶岩トンネル内部を4K級の分解能でステレオ画像撮影を行う小型のカメラや、溶岩トンネル内部の3次元の精密測量などを行うための3次元レーザスキャナ、内部の環境(温度、放射線等)を計測する小型の機器の検討を進めている。

準備検討体制: ・ステアリング 理学(西堀俊幸、山本幸生、岩田隆浩、嶋田和人(JAXA))、工学(河野功、大槻真嗣、桜井誠人(JAXA))、・地質鉱物、火山、内部構造科学(佐伯和人(阪大)、諸田智克(名大)、長谷中利昭(熊大)、白尾元理(惑星地質研)、小松吾郎(伊ダヌツォ大)、小林敬生(韓国地質資源研)、清水久芳(東大)、寺菌淳也(会津大)、辻健(九州大)、道上達広(近畿大)、佐藤広幸(JAXA)、長岡央(早大))、・揮発性物質、電磁プラズマ放射線環境科学(橋爪光(阪大)、西野真木(名大)、三宅洋平(神大)、長谷部信行(早大)、小林進吾(放医研))、北村健太郎(徳山高専))、・生命物質、環境利用科学(横堀伸一(東薬大)、小林憲正(横国大)、道川祐市(放医研)、新井真由美(未来館))、・工学システム(古谷克司(豊田工大)、岩崎晃(東大)、岡田慧(東大)、大山英明(産総研)、有隅仁(産総研)、吉田和哉(東北大)、石上玄也(慶応大))。

(b.1.4.3) 火星の地下空洞直接探査

背景と目的: 月火星の表面環境は、既に「かぐや」をはじめとする遠隔探査、着陸その場/表面移動探査、更に月ではサンプルリターンによって詳細に調査がなされてきている。今後の月火星探査の一つの主軸は、地下直接探査へと向かうものであるが、近年、月火星の地下空洞の存在が確実になってきた(図 S2)。そこで、隕石による破壊や角礫岩化、太陽風による変成、ダスト嵐による攪拌効果、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。

サイエンス成果が与えるインパクト：1) 火星火成活動調査：火星での火成活動の詳細は、まだわかっていないことも多い（例えば、物質変遷、火成活動の周期等）。地下空洞（溶岩チューブ）への入口となっている縦孔の壁や溶岩チューブ内より得るサンプルからは、内部から噴出したそのままの組織、組成で、放射線物質の具体的な量やその変遷を追うことが期待される。また、月縦孔の壁には、地層らしきものが認められるが火星の縦孔にも同様の地層露頭が期待され、縦孔の規模も月より大きいことから、火星縦孔壁の露頭では月以上に長い期間に渡る火星活動の変遷の調査が期待出来る。火成活動の調査は、「生命を維持するためのエネルギーが、天体ではどのように存在したのか」また、「生命を発現させる環境因子としてどのような働きをしたのか」という知見の集積に貢献し、科学界への大きなインパクトが期待出来る。

2) 火星古磁場調査：火星溶岩チューブを作る溶岩壁や床には、地球溶岩チューブと同様、形成冷却固化時に周囲磁場があれば磁場を獲得した可能性がある。現在、火星でどのような固有磁場が存在したかはよく分かっていない。火星表面と異なり隕石重爆撃を受けていない、火星溶岩チューブを構成する岩体には、ある一定方向の強い残留磁気として現在観測される可能性が高い。火星古磁場の調査も、やはり「生命を発現させる環境因子に関わる知見を集積する」という科学界への大きなインパクトが期待出来る。

3) 火星生命調査：火星地下空洞内は、生命にとって有害な紫外線が到達せず、生命が発生し維持されている可能性がもっとも高い場所の一つである。MRO 搭載カメラ HiRISE チームにより、火星のタルシス三山他、エリシウム山の麓などにも多くの縦孔が見つけられている。特にエリシウム山の縦孔の中には、火星平均標高より低いところに存在するものがある事が分かっている。エリシウム山は、かつて海に覆われていたと考えられる北部低地平原に存在している。つまり、かつては十分な水が地下空洞を浸していた可能性さえある。かつて生命が発生したならば、これらエリシウム山の麓の溶岩チューブ内に痕跡が残存しているか、更に現在でも、火星生命体が連綿と生存している可能性さえあろう。火星の地下空洞を直接探査することは、火星生命を直接探査する最も直截的な方法であり、火星生命体、あるいは生命の痕跡が発見されれば、その科学的価値は非常に高い。

4) 火星の水調査：火星は自転軸の傾きの変化により比較的最近（～数百万年単位）の歴史の中で氷河期を経てきたという仮説が立てられている。その時代の氷が地表に暴露されず地下空洞の中で残存している可能性がある。そのような水は過去の気候の変遷や循環水の情報を保持しているはずで、調査の意義が高い。よってこうした火星の盆地の水探査は、火星の水の火星進化プロセスについて有益な情報をもたらすことが期待され、「火星に生命を発現させた環境因子に関わる知見を集積する」という点で、インパクトは大きい。

なお、火星には溶岩チューブ以外にカルスト地形としての深い穴が存在する可能性が示唆されている。例えばメリディアニ平原やヴァリスマリネリス内部には数十メートルから百メートル以上の大きさで数十メートルの深さの小盆地（一部は縦穴に形態に近い）が多数存在している。これらの穴は火山岩とは違う堆積岩にできるという点でその形成の歴史が違う。

主要キー技術と開発状況：火星の縦孔の内部を直接探査するミッション(UZUME)の検討は宇宙科学研究所の「月火星の地下空洞直接探査」のRGで議論が続けられている。縦孔付近の月ピンポイント着陸はSLIMで獲得された技術を使い、着陸機から縦孔に降下して未踏の縦孔内部の空間を直接探査する。また、MMXにより火星周回軌道投入に至る探査技術は、獲得されることが期待される。火星縦孔への降下については、テザー付きのプロブを投擲やローバで縦孔内部に降ろすことにより達成する計画である。

火星の縦孔の側壁は掘削をせずレゴリス層の詳細な鉛直構造を明らかにすることが出来る貴重な露頭である。また、縦孔に繋がるとされる巨大な溶岩トンネル内部は、隕石衝突、宇宙線被爆、極端な温度変化から長期間に亘り隔離されており、そこにある鉱物は過去の履歴を良く残す。そのため、縦孔の側壁や溶岩トンネル内部を4K級の分解能でステレオ画像撮影を行う小型のカメラや、溶岩トンネル内部の3次元の精密測量などを行うための3次元レーザスキャナ、内部の環境（温度、放射線等）を計測する小型の機器の検討を進めている。また、生命同定技術と探査における惑星保護技術も重要な開発課題と認識し他プロジェクト（たとえばMMXなど）での状況など情報収集等、検討を進めている。

準備検討体制：・ステアリング 理学（西堀俊幸、山本幸生、岩田隆浩、嶋田和人（JAXA））、工学（河野功、大槻真嗣、桜井誠人（JAXA））、・地質鉱物、火山、内部構造科学（佐伯和人（阪大）、諸田智克（名大）、長谷中利昭（熊大）、白尾元理（惑星地質研）、小松吾郎（伊ダヌンツォ大）、小林

敬生（韓国地質資源研）、清水久芳（東大）、寺藺淳也（会津大）、辻健（九州大）、道上達広（近畿大）、佐藤広幸（JAXA）、長岡央（早大）、揮発性物質、電磁プラズマ放射線環境科学（橋爪光（阪大）、西野真木（名大）、三宅洋平（神大）、長谷部信行（早大）、小林進吾（放医研）、北村健太郎（徳山高専）、・生命物質、環境利用科学（横堀伸一（東薬大）、小林憲正（横国大）、道川祐市（放医研）、新井真由美（未来館）、・工学システム（古谷克司（豊田工大）、岩崎晃（東大）、岡田慧（東大）、大山英明（産総研）、有隅仁（産総研）、吉田和哉（東北大）、石上玄也（慶応大））

(b.1.4.4) 長周期トランジット系外惑星探査・超小型衛星計画

背景と目的：トランジット法は、直接撮像法と並び、惑星そのもののキャラクタリゼーションを可能にする数少ない手法である。トランジットモニター専用衛星 Kepler は、4年間の観測期間を得て、数千個の惑星を検出し、大成功を収めた。この成功を受け、全天トランジットモニター衛星 TESS と PLATO が控えている（図 S3）。しかし、これらのミッションは Kepler (1 ton) 以上の長期間観測を想定していない。そこで、我々が提案するのは、超小型衛星による近傍恒星系の長期間モニター観測である。超小型衛星であるため TESS (350 kg) と同等程度 (10 cm 以下) の口径であるが、広視野かつ超小型衛星 (~50 kg) の低コストを生かした長期間モニターを行うことで、図 S4 のような中長周期惑星のトランジットを検出し、太陽系に存在するような長周期・冷たいガス惑星を検出することをめざす。それにより、系外惑星と太陽系惑星をつなぐサイエンスを行うことができる。また、本計画は TESS 後と PLATO までの空白期間をつなぐ計画を想定し、超小型衛星による低コスト化による今後のトランジット惑星探査の広視野長期観測の可能性を実証する目的も持つ。

サイエンス成果が与えるインパクト：Kepler 衛星のデータを標準的なパイプラインで検出した惑星の大半は、図 S5 の灰色の点で示すように周期が観測期間の 1/3-1/4 程度、すなわち約 1 年以下のものである。一方、図 S4 に示すように、非標準的な方法で観測期間中に一回（または二回）しかトランジット（シングルトランジット）を起こさない中周期惑星も発見されてきている。これらの周期の推定は間接的であり、また多くは False Positive の可能性を除去しきれないが、図 S5 に示すように周期数年付近に、海王星と土星の間のサイズの惑星の存在が示唆されている。この領域は惑星形成の現場とも言える雪線に近く、惑星形成論の観点から非常に重要な場所である。雪線付近でたまった原始惑星は、その場で巨大ガス惑星となるか、動径方向に移動して小さいまま恒星に近づいていくと考えられている。すなわち周期数年以上の観測が、惑星形成論の検証の要となってくる。しかし、Kepler 衛星は口径が 1.4m もあるためこれらの候補天体を、例えば視線速度法やアストロメトリで追観測したり、トランジット時のキャラクタリゼーションを行うことは非常に困難である。本計画では広視野で明るい恒星を多数観測することで近傍の追観測可能な長周期惑星を発見し、雪線付近での系外惑星の種類・存在量を明らかにすることを目的とする。

領域内での位置づけ：図 S5 や図 S6 に示されている太陽系の惑星の位置と比較すると、現在のトランジット法では太陽系惑星に対応する系外惑星は、信頼度の低いシングルトランジット探査で木星の領域にかかっているのみであることがわかる。今後のトランジットサーベイ衛星計画 TESS や PLATO では、周期 1 年程度の地球型惑星の検出が一つの目標となっている。一方、木星や Cool Neptune World などの周期数年以上の惑星発見は、地球型ほど高精度を要しないが長い継続観測期間が必要であるが、既存の将来計画の観測期間は Kepler に満たない。対して本コンセプトでは、太陽系惑星に対応する系外惑星、いわば、キャラクタリゼーション可能な近傍の第二の太陽系の探索を目指している。

主要キー技術と開発状況：高いポインティング精度を保つことのできる姿勢制御系をもつ超小型衛星と広視野多ピクセル CCD をもつ光学系、またリアクションホイール故障後のケプラー衛星 (K2) で開発された、多少のポインティングのずれを補正するライトカーブ解析手法等が主要な技術である。現在、検討段階であるが、超小型衛星の姿勢制御系については Nano Jasmine の開発実績が、CCD カメラの安定性・精度については「はやぶさ 2」光学カメラの観測実績などが検討に使える。

準備検討体制：本プロジェクトは、主として東京大学大学院理学系研究科、国立天文台の研究者からなる小規模グループの概念設計の段階である。

(b.1.4.5) 系外惑星の主星に対する紫外線モニタリング

背景と目的：Kepler 宇宙望遠鏡等の系外惑星サーベイによって、惑星の存在の普遍性が実証されたと同時に、惑星および惑星系の多様性が明らかになった。軌道要素と半径または質量の観測値から、太陽系内の惑星とは特徴の大きく異なる惑星が多数存在することが示唆されている。こうした多様性とその成因を解明するために、惑星大気の色や広がり、成分、温度等に観測的制約を与えることが、観測系外惑星科学の最優先課題となっている。そのために、現在進行中の宇宙望遠鏡ミッション K-2 や 2018 年打ち上げ予定の TESS、2026 年打ち上げ予定の PLATO による全天系外惑星サーベイによって、惑星大気の高精度分光観測に適した太陽近傍の明るいターゲットが多数発見されることが見込まれる。これに対して、2019 年打ち上げ予定の JWST や ESA-M4 として提案中の ARIEL (2026 年～) による近・中間赤外域でのトランジット分光観測に期待が寄せられている。

一方、惑星大気の特徴を理解するには、赤外観測による分子の検出だけでは不十分であり、大気光化学を駆動する中心星の紫外線の情報が欠かせない。そこで我々は、独自に開発した紫外線分光器を深宇宙まで送り、宇宙望遠鏡や地上望遠鏡を用いた可視・赤外トランジット観測-特に、系外惑星専用望遠鏡である ARIEL による赤外トランジット分光観測-との同時観測によって、系外惑星大気の色化学の解明を目指す。

領域内での位置づけ：現時点で紫外線観測が可能な宇宙望遠鏡は 2020 年頃に稼働を中止する Hubble のみであり、それ以降は 2023 年打ち上げ予定の WSO-UV のみである。しかし、WSO-UV は (JWST と同じく) 汎用望遠鏡であるため、中心星のモニタリングや多数のトランジットイベントに合わせた観測には適さない。本提案のような専用望遠鏡でのみそれが可能となる。

サイエンス成果が与えるインパクト：観測的バイアスから、トランジット観測の対象となる惑星は主星近傍を周回するものがほとんどである。そのため、それらは主星からの強い紫外線に常に晒されている。今後の観測対象の大多数を占める M 型主系列星は、紫外線強度の分散が大きく、かつ (太陽型星に比べて) 著しく時間変動することが知られている。

紫外線照射は、大気の色化学を駆動し、大気の特徴を大きく左右する。化学平衡状態では存在しない分子が生成され、大気組成は紫外線照射量に依存する。また、強紫外線環境下では、有機物の雲が大気中で生成し、雲の特徴も紫外線量に依存することが理論的に予想されている。さらに、紫外線は上層大気を加熱・膨張させ、大気を散逸させる可能性がある。したがって、赤外線観測による大気分子の検出と同時に、主星の紫外線放射強度を知ることが大気特徴の解明に必須の情報を与える。

主要キー技術と開発状況：M 型主系列星では、真空紫外領域における輻射の大半を水素ライマン α 線が担っている。極端紫外領域の輻射は星間吸収のため観測できないが、ライマン α 線強度から推定するモデルが構築されている。ライマン α 線の観測装置はひさきとプロキオンでの実績がある。

準備検討体制：塩谷圭吾 (JAXA) ・生駒大洋 (東大) ・亀田真吾 (立教大) ・成田憲保 (東大) ・村上豪 (JAXA) を中心メンバーとして検討を進めている。

(b.1.4.6) 超小型衛星による明るい近傍恒星周りの系外惑星トランジット観測

背景と目的：ケプラー衛星により数多くの系外惑星が発見され、今後は各惑星の「特徴付け」が焦点となる。特に、惑星大気の色観測からは惑星表層環境を推定できるだけでなく生命兆候の検出にもつながりうるため、アストロバイオロジー研究の重要なマイルストーンとされている。トランジット法は系外惑星大気の色情報を得られる現時点で実績ある唯一の方法であり、具体的には、惑星トランジット時の主星光を分光し惑星大気の色吸収スペクトルを抽出する。このような分光観測を高精度で行うためには極力明るい恒星を観測することが有利となる。ところが、ケプラーが遠方の暗い恒星を主なターゲットとしていたこともあり、明るい恒星周りでこれまでに発見されたトランジット惑星は数が少なく、V 等級にして 5 等級より明るい恒星に至っては全く見つかっていない (図 S7)。そこで本提案では、望遠鏡を搭載する超小型衛星 (数 kg~50kg 程度) を用いて、太陽系近傍の明るい恒星周りにおいて惑星トランジット観測を実施することを目指す。特に、明るい近傍恒星系に対して次に挙げる観測を計画している：①視線速度法など他手法で見つかった惑星をトランジット法により追観測、②他の将来トランジットサーベイ計画 (TESS など) で惑星が発見された同一星においてさらに長周期の惑星などを探索、③未だトランジット

惑星が見つかっておらず他の将来計画でもメインターゲットとなっていない非常に明るい恒星（0～4等級(V等級)）周りで惑星を探索する。

サイエンス成果が与えるインパクト：独自に超小型衛星を開発し占有して運用することで、本提案以外の計画によって観測報告された恒星-惑星系をいち早くトランジットフォローアップ観測することが可能となる。これにより明るい恒星周りのトランジット惑星の数が増えるだけでなく、それら惑星の質量・サイズの決定や、複数惑星系（例えば TRAPPIST-1）の発見も期待できる。さらには、未だトランジット惑星が見つからない圧倒的に明るい恒星において新たにトランジット惑星を発見できる可能性がある。これら本提案により発見が期待される明るい近傍恒星周りのトランジット惑星群は、その後の格段に精度の高い詳細分光観測を可能とする。惑星環境に強く影響する未知の微量成分やバイオマーカの発見につながれば大きなブレイクスルーとなりうる。それ故に、系外惑星の精査に挑む次世代の大型望遠鏡の恰好のターゲットとなることが期待される。加えて、本提案が狙う星には、肉眼で見える星座を構成する星々が含まれるため、アウトリーチの観点からも社会的インパクトが期待できる。

主要キー技術と開発状況：明るい恒星にターゲットを絞ることで、超小型衛星に搭載可能な小口径望遠鏡であっても測光精度を達成するために必要な集光を可能とする。イメージセンサのピクセル感度ムラを低減し、かつ飽和を避けるためにデフォーカスした光学系を用いる。既に成熟しつつある超小型衛星の姿勢制御系は宇宙望遠鏡として機能するだけの指向制御性能を有しているが、それでも残る衛星姿勢のふらつきによる測光ノイズ(ジッターノイズ)を補正するために、ケプラーの姿勢系が故障した後に行った K2 ミッションで取られた補正方法を応用する。現在、ミッション系及びバス系の概念設計検討とターゲット星選定を進めている。

準備検討体制：本提案は千葉工業大学惑星探査研究センターを中心として、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻、宇宙科学研究所の研究者からなるグループによりミッションの設計検討を進めている。

(b.2) 戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発

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。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。各機器の詳細（紐づくミッション、科学目標・機器概要、開発状況と課題）は APPENDIX-3 にまとめる。

- ・ 内部構造：短周期地震計+広帯域地震計、熱流量・熱伝導率計測システム、小型アクティブ地震計、地下探査レーダサウンダ、宇宙探査用ミュオグラフィ、磁力計、重力偏差計
- ・ 表層：天体追尾可視望遠カメラ、AOTFを用いた小型近赤外分光撮像装置、分散観測用小型分離カメラ、ハイパースペクトラルイメージャー、能動型蛍光X線分光計、水分子検出・同位体分析装置、サンプリングパッケージ、GCシステム、赤外ファイバを用いた小型レーザ分光器、生命探査顕微鏡、月惑星表面長期その場観測ユニット、中性ガス・イオン質量分析器
- ・ 大気：テラヘルツ分光器、紫外線分光器、高コントラストオプティクス、中間赤外カメラ、水素吸収セル、火星大気中インフラサウンド（微気圧波）計測マイク、太陽起源高エネルギー電子分析器、中性ガス・イオン質量分析器
- ・ 惑星間空間：赤外線観測装置、ダスト観測装置

(b.3) 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

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。特に、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。したがって「はやぶさ 2」以降も、サンプルリターンは日本が推進し世界最先端の成果を目指す宇宙科学の重要な一手段として位置づけられることが期待されており、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、試料取り扱い環境の滅菌技術及び帰還試料の封じ込め技術の検討・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（重さでグラム以上、大きさでセンチメートル以上）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-4 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和目指す科学、手法についてまとめた。

(b.4) 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、また地球及び地球生物圏（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及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和、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。対象天体及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

り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及び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、2030年頃の火星地下水圏・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、わ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、及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、及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及び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。

(c) 工程表（ロードマップ）

(c.1) 探査プログラムの工程表

本工程表では、2030年代の火星地下水圏・生命圏探査火星着陸探査（b.1.1.4）を今後20年のマイルストーンと見据え、2020年代に中型および小型探査を戦略的に配置した（図1）。戦略的中型ミッション（M-class）として、2020年代中盤にMMX（b.1.1.1）を、2020年代後半に月面その場観測によるKREEP物質・年代測定（b.1.1.3）を配置した。また、2020年代には、プログラムの小型探査（S-class）として、理学観測用の小型バスとして活用が望まれるAPPROACH（b.1.2a.1）や重力天体への周回機投入・空力制御技術の獲得を目指す火星エアロキャプチャオービタ（AC）（b.1.2b.2）を配置する。火星ACでは火星宇宙天気探査（b.1.2a.2）との理工連携ミッションも検討する。また、はやぶさ2から続く小天体探査プログラムとして、2020年代前半にDESTINY+（b.1.2b.1）を、2020年代中盤にOKEANOS（b.1.1.2）を配置し、深宇宙移動技術・観測技術のさらなる成熟を図る。以上のミッションに関する準備期間・運用期間は表S6に示す。

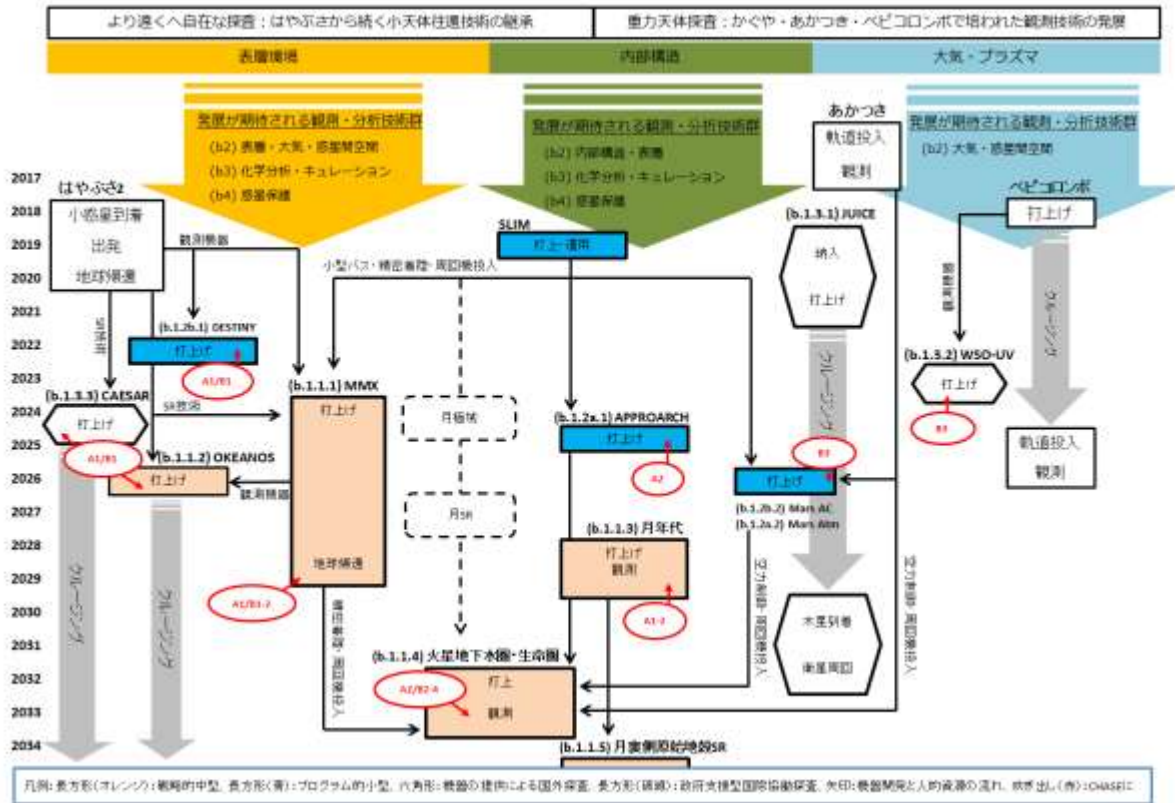


図1 太陽系・系外探査プログラムの工程表

(d) 工程表とミッションプランの改訂

太陽系科学のコミュニティにおいて、恒常的な工程表の改訂と、ミッションプランのアップデートが必要である。この役割を主体的に果たしていくために、太陽系科学のコミュニティは「惑星科学研究教育コンソーシアム」を設立準備中である。本文書の改訂を含めて、探査計画・ロードマップの立案・調整機能、機器開発戦略・体制の検討を主導するコンソーシアムについて概説する。

(d.1) 惑星科学研究教育コンソーシアム

大学等の研究教育機関間の有機的ネットワークにより、惑星科学分野における研究の高度化ならびに多様な高度人材の養成を促進する。

背景・必要性：

- ・ 惑星科学は我が国では後発で歴史が浅いため研究者が全国に散らばり、中核的研究所も確立しておらず基盤的な支援体制が不十分であり、横断的な研究や総合的な教育の支障となっている。
- ・ 惑星科学は本質的に学際分野であり、天文学、地球科学、太陽惑星圏科学、宇宙探査工学等にまたがる。とりわけ、太陽系探査等大型研究の立案と実施には、学際的な取り組みが必要である。
- ・ 我が国が本格参入した太陽系探査を発展させるには、戦略的な計画立案や人材育成が重要である。持続可能性を見据え、探査を支えるコミュニティの多様性を保持した生態系の構築が急務である。

組織と運営：

- ・ 搭載機器開発、データ処理・アーカイブ・解析、宇宙物質分析、シミュレーション、衝突実験、探査を支える理論研究等をそれぞれ得意とする各研究組織が有機的なネットワークを構築、基盤的な支援体制の早期確立を可能にし、同時に分散的にこれらを維持展開することで、その多様性と広がり担保する。
- ・ 上記組織代表者・有識者からなる運営委員会を統括部門に置き、コンソーシアムの活動と拡充整備を指揮する。統括部門は、知見共有基盤を提供し、国際連携・社会交流の窓口としても機能する。

- ・特に各機器開発等に必要大型基盤装置をコミュニティの共同利用に提供する搭載機器開発センター（仮）を設立する。

太陽系探査検討機能：

- ・統括部門に太陽系探査検討室（仮称）を設置し、宇宙研との連携のもと、探査プログラムの立案・検討、技術ロードマップの作成、探査案の磨き上げなどを行う。太陽系科学に精通した室長（常勤）ならびに室員（全国の中堅研究者数名）からなるチームを設ける。本検討室は、コンソーシアムのネットワークを活用し、ワークショップや、宇宙探査に豊富な経験を有する宇宙研研究者等を顧問に若手を集めた探査案作成合宿等を通じて、太陽系探査プログラムの検討ならびにプログラムに沿ったミッション定義・サイエンス要求の練り上げを行う。

準備状況：

- ・惑星科学研究センター（CPS）が中心となって探査立案スクールの定期開催など種々パイロット事業を進めている。
- ・米国月惑星研究所、欧州国際宇宙科学研究所等と相互協定を結び、国際連携窓口として確立。
- ・学術会議マスタープラン 2014 および同 2017 に、本コンソーシアムの構想を盛り込んだ「太陽系生命前駆環境の解明のための統合研究プログラム」を提案し、採択に至っている。
- ・コンソーシアム設立準備会により、定例会合を持ち、情報交換と組織設計を進めている。また各連携組織の有機的発展を図るべく、関連予算要求提案を連携の枠組みのもとで行いつつある。