

惑星科学／太陽系科学 研究領域の目標・戦略・工程表

日本惑星科学会
会長 倉本 圭

目次

前書き.....	1
(a) 目標 (将来ビジョン)	1
(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.....	2
(a.1.1) 火星探査.....	2
(a.1.2) 月探査.....	2
(a.1.3) ガス惑星系・氷惑星系・Kuiper-Belt 天体 (KB 天体) 探査.....	2
(a.1.4) 小天体探査.....	3
(a.1.5) 系外惑星観測.....	3
(a.2) 日本の戦略・狙うサイエンス・期待される成果.....	3
(b) 具体的戦略.....	5
(b.1) 太陽系探査プログラム案.....	5
(b.1.1) 戦略的中型計画案.....	6
(b.1.1.1) 【M1】火星衛星サンプルリターン探査計画 [2026 年頃中型]	6
(b.1.1.2) 【M2】火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画 [2030 年頃中型 (政策支援型)]	7
(b.1.1.3) 【M3】火星大気散逸探査計画 (のぞみ後継機) [オプション: 2024 年頃中型]	8
(b.1.1.4) 【M4】月面その場観測による KREEP 物質・年代測定の探査計画 [2026 年頃中型]	8
(b.1.1.5) 【M5】月裏側原始地殻サンプルリターン探査計画 [2030 年頃中型 (政策支援型)]	9
(b.1.2) プログラム的小型計画案.....	10
(b.1.2.1) 【S1】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 [2021/23 年頃小型]	10
(b.1.2.2) 【S2】火星探査プログラムにおける工学実証探査計画 [2021/23 年頃小型]	11
(b.1.2.2.1) マルチフライバイによる地球接近小天体 (流星群母天体) 探査コンセプト案.....	11
(b.1.2.2.2) 火星周回大気探査コンセプト案.....	12
(b.1.2.2.3) 非着陸火星内部構造探査コンセプト案.....	12
(b.1.2.2.4) 火星着陸機環境計測パッケージ案.....	13
(b.2) 小規模プロジェクト案.....	13
(b.2.1) 木星氷衛星探査計画: 日本分担部分 (JUICE-JAPAN) [プリプロジェクト段階]	13
(b.3) 現在公募中の戦略的中型計画に応募予定の提案.....	15
(b.3.1) 火星着陸探査技術実証ミッションにおける MELOS:火星生命探査計画.....	15
(b.3.2) 外惑星領域の航行技術, 探査技術, 及び未踏の科学領域の開拓.....	16
(b.4) 主な搭載機器の開発戦略.....	17
(b.4.1) 元素測定装置.....	17
(b.4.1.1) レーザ励起ブレイクダウン分光分析装置 (LIBS)	17
(b.4.1.2) 能動型蛍光 X 線分析装置 (Active X-ray Spectrometer, AXS)	17
(b.4.2) 質量分析器 (Mass Spectrometer, MS)	18
(b.4.3) 地中レーダ (Ground Penetrating Radar, GPR)	18
(c) 工程表 (ロードマップ)	19
(c.1) 太陽系探査プログラムの工程表.....	19
(c.2) ミッション毎の準備期間・運用期間.....	20
(d) 工程表とミッションプランの改訂.....	20
(d.1) 惑星科学研究教育コンソーシアム.....	20

前書き

日本惑星科学会では、2010年より、「月惑星探査の来る10年」という活動を通じて、惑星科学における重要なサイエンスの抽出、ミッション提案の募集を経て、今後十数年の中期ビジョンの共有とそのビジョンに位置づけられたフラグシップミッションの立案とコンセプトの作成を行ってきた。その結果、今後10年程度で行うべき戦略的中型ミッション候補として、火星着陸機・ローバ生命探査を主とする複合科学探査、ソーラー電力セイル探査機によるトロヤ群小惑星探査、その場年代計測装置による月惑星年代学探査の3つに集約され、ポリッシュアップされてきた。

現在、提案募集中の戦略的中型宇宙科学ミッション公募（募集中の中型AO）に向けて、太陽系探査に関わる2つの工学実証ミッション候補の提案（「火星着陸探査技術実証」、「外惑星領域の航行技術、探査技術、及び未踏の科学領域の開拓」）が準備されているが、これら提案のサイエンス部分は前述の「月惑星科学の来る10年」でのフラグシップミッション案のうちの2つに対応している。この2提案の科学的価値は高く、国際動向の中でも挑戦的なものであるが、その実現可能性等の評価は、今後の選定プロセスに委ねるべきであろう。

一方で、今回の「研究領域の目標・戦略・工程表提供のお願い」(RFI)は、2013年9月に宇宙科学研究所から提示された「宇宙科学・探査ロードマップ作成の基本となる考え方」に基づいて発出されている。この「基本となる考え方」において、太陽系探査科学分野については、「最初の約10年を機動性の高い小型ミッションによる工学課題克服・技術獲得と先鋭化したミッション目的を立て、10年後以降の大型ミッションによる本格探査に備える」との主旨が述べられており、これは、「月惑星探査の来る10年」で設定された条件とは異なるため、そこでの検討内容は、基本的価値判断は変わらないものの、具体的な工程表としては抜本的な見直しを迫られることとなった。日本惑星科学会におけるこの見直し作業は、現在、途中段階であり、学会としての成案を策定できていない。

そこで今回のRFIに対しては、2つの戦略的中型ミッション提案の採択を前提とせず、前述の「基本的な考え方」の主旨に則った形で、今後20年の太陽系探査の目標・戦略・工程表を策定し、提出することとした。本文書は、その作成を、日本惑星科学会会長が、同学会将来計画専門委員会を通じて、同委員会将来惑星探査検討グループ長である並木則行に諮問し、ISAS RFI 検討作業部会を立ち上げ、約2ヶ月の短期間で取りまとめられたものである。こうした切迫した状況での限られた時間の中での検討であったため、検討の熟度はまだまだ低い。また、太陽系探査は理学と工学の密接な連携のもとに進めるべきものであるため、今後、共同での検討も積み上げ、改訂していく所存である。

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」を立ち上げ、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、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（後述）。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。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、こうした大型ミッションを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) 火星探査

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。

【今後の動向・探査計画】

1. ダイナミックな環境進化の全容：地下水圏・表層水圏・生命圏・気候・地質年代			
2012–	Mars Science Lab (Curiosity)	地質学・地球化学	NASA
2016–	ExoMars Trace Gas Orbiter	微量ガス分布	ESA
2018–	ExoMars Rover	生命圏・古環境	ESA
2020–	Mars 2020	生命圏・古環境	NASA
2025?–	Mars Sample Return	サンプルリターン	米/欧/中
2. 環境進化の決定要因・駆動力：惑星形成・分化・内部ダイナミクス・磁場・大気散逸			
2014–	MAVEN	大気散逸	NASA
2016–	ExoMars Trace Gas Orbiter	微量ガス分布	ESA
2016–	InSight	火震・熱流量	NASA
3. 火星上での化学進化や生命発生進化：生命圏（痕跡含む）・水圏・現存生命 Curiosity, ExoMars Rover, Mars 2020			

(a.1.2) 月探査

「かぐや」など各国の探査機による周回軌道からの探査の段階から、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。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の月の重要性は高い。

【今後の動向・探査計画】

1. 内部物理探査・内部物質探査：月の形成と進化			
	MoonRise	下部地殻・マントル SR	NASA
	Lunar Geophysical Network	月震・熱流量・磁場	NASA
2. 極域探査・サンプルリターン：内側太陽系への揮発性物質供給			
2017–	Chandrayaan-2	極域着陸	印
2018–	Luna シリーズ	極域揮発性物質探査（SR 含）	露
2019–	Resource Prospector Mission	極域揮発性物質着陸探査	NASA

(a.1.3) ガス惑星系・氷惑星系・Kuiper-Belt 天体（KB 天体）探査

Pioneer 10, 11, Voyager 1, 2 によるフライバイで初めて間近に見た世界は、Galileo, Cassini による木星系探査（大気プローブ投下含む）、土星系探査（タイタン着陸含む）により理解が進み、太陽系形成論における重要性だけではなく、氷衛星内部という新たな生命圏の可能性が指摘されている。

【今後の動向・探査計画】 [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。]

1. 木星系・土星系および氷衛星探査：惑星形成論／未知なるハビタブルワールド？			
2016–	JUNO	木星系（大気・内部構造・磁場）	NASA
2030–	JUICE	ガニメデ・エウロパ・カリスト	ESA/JAXA
他、エンセラダスプルームサンプルリターンなどの計画提案も			
2. 冥王星・太陽系外縁天体探査：人類未到の太陽系外縁部			
2015–	New Horizons	冥王星・KB 天体フライバイ	NASA
3. 氷惑星探査：惑星形成全体像を把握するための最後のピース 天王星探査計画提案 [Uranus Orbiter and Probe (NASA), Uranus Pathfinder (ESA)] あり			

(a.1.4) 小天体探査

はやぶさによる小惑星イトカワ SR, Rosetta による 67P/Churyumov-Gerasimenko (C-H) 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】 [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.]

1. 近地球型小惑星サンプルリターン: 太陽系始原天体・生命前駆物質・小天体軌道進化			
2018-	はやぶさ 2	近地球 C 型小惑星 1999 JU ₃ SR	JAXA
2018-	OSIRIS-REx	近地球 B 型小惑星 ベンヌ SR	NASA
2025?-	MarcoPolo-X?	近地球始原小惑星 SR (案)	ESA/中
他, 近地球小惑星捕獲ミッション (Asteroid Redirect Mission) など			
2. メインベルト起源小天体: 太陽系始原天体・惑星形成論・小天体の形成, 分化			
2015-	Dawn	準惑星セレス周回探査	NASA
2024?-	Phootprint	火星衛星フォボス SR (案)	露/ESA
3. メインベルト以遠起源氷小天体: 初期太陽系雪線・氷/有機物の形成			
2014-	Rosetta	67P/C-G 彗星周回・着陸探査	ESA
2015-	New Horizons	冥王星・KB 天体フライバイ	NASA
他, エンセラダスプルームサンプルリターンや彗星核着陸などの計画提案も			

(a.1.5) 系外惑星観測

1995 年の最初の系外惑星の発見以降, 発見された系外惑星の数は 2 千個に迫り, 系外惑星研究は「発見」の段階から, **ハビタビリティを含めた個々の惑星の「特徴」の研究**, さらに**一般化した比較惑星形成論の構築**へと転換期を迎えている.

【今後の動向・望遠鏡計画 (宇宙望遠鏡を中心に)】

1. 公転周期が約 1000 日以下の惑星 (短周期惑星) の「特徴づけ」			
2015-	Kepler's second mission (K-2)		NASA
2017-	Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)		NASA
2024-	PLAnetary Transits and Oscillations of stars (PLATO)		ESA
2017-	Fast INfrared Exoplanet Spectroscopic Survey Explorer		NASA
2018-	James Webb Space Telescope (JWST)		NASA-ESA-CSA
2. 中周期惑星 (周期 1,000-10,000 日) の周期と質量の分布・太陽系類似系の存在確率			
2013-	GAIA		ESA
2024?-	Wide-Field Infrared Survey Telescope - Astrophysics Focused		NASA
3. M 型矮星周囲のハビタブルゾーンに存在する地球型惑星の検出, 大気成分同定・バイオマーカー探索 K-2, TESS, PLATO, JWST などに加えて			
2021-	Thirty-Meter Telescope (TMT) 【地上望遠鏡】		米/日/中/加/印など

(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環境探査, さらに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, **ハビタビリティ** (生命圏の持続条件, 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年程度のスパンでは、地球生命圏との対比によって、太陽系探査においては、太陽系における**前生命環境の進化—生命圏の誕生・持続に至る条件の解明—(PreBiotic Environmental Evolutions, CHASE-PBEE)**こそが、適切な科学目標となると考える。前生命環境とは、生命が関与しない有機反応ネットワークをもつ天体環境を指し、生命材料物質や生命環境(生命誕生・維持を可能にする天体環境)の準備過程とみなせる。地球外生命探査だけでなく、この準備過程を解明してこそ、宇宙における生命の普遍性の理解への突破口となる。しかし、地球ではその後の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失われ、ほとんど残っていない。

このため生命の起源に関するCHASE-PBEE側からのアプローチは、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。とかく生命探査は、生命の有無のみが注目されるが、それだけでは不十分で、前生命環境進化を理解するための探査こそがアストロバイオロジーの推進には必要である。

CHASE-PBEEを探求する探査では、実証に基づいた環境の解釈・復原が最重要であり、単に生命関連物質の検出のみならず、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、CHASE-PBEE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はあるが、前生命環境進化という視点で太陽系全体を誕生期から現在まで俯瞰すること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。

CHASE-PBEEに対する宇宙科学的アプローチと関連天体を整理すると、

- C1. 生命前駆物質の形成・進化：彗星，始原的小惑星，惑星間塵
- C2. 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，水星
- C3. 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
- C4. 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)
- C5. 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)

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C1からC5の分類に従って、日本の戦略を述べる。

C1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探査の資産を活かし、より始原的な小惑星/彗星SRに挑戦する意義は大きい。しかし、メインベルトや彗星からのSRはミッション期間が10年を超えるため、トロヤ群探査のような長時間に見合う意義がある未踏の探査を行うか、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かである。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高く、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、始原的な小天体の物質進化の解明のみならず、火星物質(C3)や大気散逸(C4)の手がかりを得られる。ロシアや米国にも探査計画があるものの、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。

C2については、日本においてははかぐやの成果を活かした月年代学探査が有効である。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。これと小惑星マルチフライバイ探査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、火星衛星探査は、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。

C3 については、火星探査と氷衛星探査を並行して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（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。現存生命探査も科学的インパクトは大きいですが、リスク軽減のため前生命環境進化の観点とセットで探査を企画すべきである。

氷惑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、本格的な氷衛星ミッションの端緒となると期待される。さらに、エウロパ内部海探査やエンセラダス噴出物 SR が検討されており、国際協力の進展が期待される。

C4 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。今年 12 月に軌道投入に再挑戦する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。

C5 に関しては、月は、45 億年前の原始地球で起きた天体衝突（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と推定されている）。また C2 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、月における地質探査やその場年代学探査が重要である。また、ペネトレータによる月惑星の内部構造探査の価値も高く、その技術実証が不可欠である。

日本の太陽系探査は小天体ランデヴー探査・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、惑星周回探査や重力天体着陸探査には未成功である。将来の国際共同太陽系探査ミッションに参画して、意義ある役割を果たすためには、ヘリテージを最大限生かしながら、日本独自の戦略のもとに、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。

(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-PBEE 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【M1】**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 項)。それに向けた技術開発と工学実証のための小型ミッション (b.1.2.2 項) 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ミッションを目指したい。そうした着陸ミッションとして、現時点では 2030 年代に【M2】**火星地下水圏・生命圏の着陸探査**を提案する (b.1.1.2 項)。さらに【M3】**火星の大気散逸探査**は STP

分野においては最重要の太陽系探査と位置づけられており、本工程表においてもオプションの 1 つとして記述する (b.1.1.3 項)

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・縦穴探査 (小型 3 号機)、SELENE-R)、硬着陸技術 (【S1】ペネトレータ技術実証探査) (b.1.2.1 項) を着実に実証し、その場観測技術 (【M4】月 KREEP 物質・年代探査, b.1.1.4 項) を経て、重力天体の SR 技術 (【M5】月裏側地殻 SR 探査, b.1.1.5 項) までの段階的な進展を狙う。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 SR 探査への効率的な導入としても意義を持つ。

なお、工学実証ミッションや相乗り機会を利用した、焦点を絞り、かつ科学的価値の高い小型ミッションを機動的に行うことが肝要であり、そのようなミッションコンセプトを b.1.2 小節に記載する。

(b.1.1) 戦略的中型計画面案

(b.1.1.1) 【M1】火星衛星サンプルリターン探査計画 [2026 年頃の戦略的中型]

背景と目的：火星衛星フォボス・ダイモスはただ 2 つの地球型惑星の小型衛星である。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、可視近赤外域で鉱物吸収がほとんど見られず、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。本ミッションは、今後の国際情勢を勘案し、火星衛星のどちらかを選び、ランデヴーによって表層環境や内部構造 (帰還試料と組み合わせ岩石/氷質量比が同定可能) を調べる観測後に、着陸し、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、火星起源物質の年代分析や散逸大気のインプランテーションによる元素の同位体測定 (捕獲起源の場合、始原ガスとの分離が必要) 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 (日変化の理解)、地表の熱慣性変動観測等もオプションとして組み合わせる。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。

研究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期待され、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の糸口もある。

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注目度は高い。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。日本が後発であれ火星衛星探査に参入することは、例えば欧州がフォボス SR を日本がダイモス SR を行うといった協力関係を築くことで、全体として 2 つの衛星の比較学を進めることができ、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、海外との比較：ロシア・欧州共同での Photoprint 計画が ExoMars 後継の SR 探査候補として、NASA Discovery ミッションに提案予定の PADME 計画がフライバイ探査として、それぞれ検討されている。よって、2 衛星のどちらを SR 対象天体とするかは国際情勢の中で判断すべきである。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が、衛星ランデブーは新規要素で、往還航行については化学推進と大型電気推進の両面から、サンプリング方式については子機降下・再ドッキングなどの手法を含め検討されている。衛星史・火星史の読み出しのためには、サンプル量の増量と多地点からの試料採取に関する検討が重要である。揮発性物質を保存するため、昇温を抑えた帰還カプセル開発なども必要である。観測装置としては、可視赤外分光イメージャ、中性子スペクトロメータ、元素分析装置 (LIBS, APXS など)、地中レーダ、質量分析計、ダスト分析器などが検討されており、海外との協力も視野に入れている。また、宇宙風化の少ない内部試料採取や、内部構造探査や熱流量測定は効果的である。これらを実現できるインパクトや小型ローバ、ペネトレータ等のヘリテージを活用した探査オプションとして検討していく。さらに、現在の火星大気散逸をモニタするため、火星軌道上でターゲット板を暴露し、地球に帰還させることによりインプラント元素 (同位体) を読み出すことも検討されている。地球とのレーザ測距なども将来の光通信にもつながり興味深い。工学実証小型衛星を先行させるのが望ましい。

準備・検討体制：現在は概念検討段階である。宇宙研では、昨年後半より週に一度の頻度で、工学系と太陽系科学系の若手が議論を重ねてきた。また、北大、東大、東工大、名大、神大、千葉工大、国立天文台などの若手研究者へ議論を展開している。搭載機器候補の一部は火星着陸技術実証探査や小型 3 号機候補として BBM 開発や設計が進められている。火星探査プログラムの総合的検討の中で共通機器開発や国際協力検討を通じて、火星着陸探査にも資する形で推進すべきである。

(b.1.1.2) 【M2】火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画 [2030 年頃の戦略的中型 (政策的支援型)]

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) 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)。

研究領域での位置づけ：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。

狙うサイエンス成果とインパクト：

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、火星の温暖化機構が制約されれば、ハビタブル惑星の探索可能性も見直されることになり、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、水散逸史への制約は、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。

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。我が国の重力天体探査における着陸精度と走行能力で十分アクセス可能である。搭載装置としては、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、概念検討段階である。ただし、LIBS や質量分析計の開発は、東大、立教大、千葉工大で、ローバについては、火星着陸探査技術実証 WG 内での開発内容を転用可能である。

(b.1.1.3) 【M3】火星大気散逸探査計画（のぞみ後継機） [オプション：2024 年ごろの戦略的中型]

目的と研究領域内での位置づけ：火星探査機「のぞみ」が目指した科学目的をさらに発展させ、火星気候変動の謎である火星の二酸化炭素と水の行方を探る。世界初の火星電磁気圏クローズアップ撮像とその場観測、そして太陽風モニタ観測を組み合わせることにより、NASA の MAVEN までの「統計的描像」から極端現象も記述できる「瞬時描像」への質的変換を達成し、過去の大気散逸量の推定と表層環境変動の理解に不可欠な、大気散逸機構の太陽変動応答特性を明らかにする。

サイエンス成果が与えるインパクト：観測的に実証した現在の散逸機構とその応答特性に基づき、過去 40 億年の間での大気散逸の火星表層環境変動に対する影響を明らかにする。こうした知見は、遍く大気を保有する非磁化惑星のハビタブルゾーンの理解に資するのみならず、撮像とその場観測の組み合わせで空間構造と速度分布関数の両者を捉え、KHI、磁気再結合等の物理機構が物質輸送に果たす役割を実証的に明らかにするという、宇宙プラズマ物理学の新しい観測手法の開拓も期待される。

主要キー技術と開発状況：搭載機器候補は、磁場計測器、電場・波動計測器、プラズマ・中性粒子計測装置群、ラングミュアプローブ、クローズアップカメラ、紫外分光観測器、大気光撮像カメラ、赤外カメラ、超安定発振器、太陽 EUV 放射量計測器、太陽風観測器である。主要キー技術はクローズアップカメラの迷光対策で、要素技術実験などにより実現性を検証する。

準備・検討体制：宇宙研、名大、東北大を中心に約 40 名と宇宙研工学約 10 名で検討を実施している。

準備状況、外部資金獲得状況等：宇宙理学委員会の WG を母体として検討を進めており、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。現在はデータダウンリンク量、プロジェクト経費総額の再検討を行っている。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.1.1.4) 【M4】月面その場観測による KREEP 物質・年代測定の探査計画 [2026 年頃の戦略的中型]

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と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や量を把握することは必須であり、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で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、分析技術を確立し、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【M5】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、海外との比較：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のコアラとバルブは実績のある海外メーカからの調達を検討、ローバは SELENE-2/R 用に開発中で目処はついている。サンプル採取・受け渡し用ロボットアームも SELENE-2 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。

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。

準備状況、外部資金獲得等：ピンポイント着陸技術は SLIM/SELENE-R で確立する。表面探査技術は SELENE-R で一部実証する。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.1.1.5) 【M5】月裏側原始地殻サンプルリターン探査計画 [2030 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、【M4】ミッション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push 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【M4】(b.1.1.4 節)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：これまでに「来る 10 年」の月惑星探査計画に提案するため以下の検討体制を組み、それ以降検討を続けて来た。2011-2013 年には JSPEC の次期月探査計画検討 WG の活動の一環としてサンプルリターンミッションの技術的検討および探査地点の科学的選定に向けた議論を実施し、着陸機、月離脱システムや帰還カプセル等については SELENE-2/R の検討成果を踏まえて実現可能性を確認している。今後は更にコアメンバーを増やし、学際的な研究チームを組み学際研究計画としての

詳細を詰める。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。

準備状況、外部資金獲得等：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・SELENE-R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/Rで行っている。

(b.1.2) プログラム的小型計画案

火星衛星サンプルリターンと火星地下水圏・生命圏の着陸探査を目標においたプログラムを設定する場合、現在の日本が重力天体への軌道投入に未だ成功していない実情を鑑みると、小型ミッションを活用した工学実証ミッションを戦略的に進めていくことが必須である。その中にはプログラムの戦略性の高い理学用バス機器を実証する小型ミッションがあり、(b.1.2.1)項に記載する。他方、(b.1.2.2)項には、工学実証ミッションに相乗り可能なCHASEの文脈の中で有効な小型探査コンセプトを列挙した。挑戦的で先鋭化された科学目的を持つミッション提案や、既開発の観測装置を組み合わせ、短期間で高い成果が期待される提案がある。具体的な小型の工学実証ミッション計画については、太陽系探査プログラムのビジョンのもとに工学系での検討が進められている段階であり、本文書においてそれを記述することはしない。

(b.1.2.1) 【S1】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 [2021/2023年頃の小型]

背景と目的：ペネトレータは対象天体に対し衝突貫入設置する内部に科学観測機器を搭載した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表面探査での応用を目指し、それまでにペネトレータ技術の工学的実証をおこなう。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を小型軽量化し、内部に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共に高地領域の熱流量観測を行う。

領域内の位置付け：ペネトレータ技術を有することは我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るため、機動性の高いミッションプランを構築し易くする。

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の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共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場面を定量的に議論できるようになる。

主要キー技術と開発状況、海外との比較：ペネトレータでは軟着陸機構や温度制御機構を必要としないので、1機あたりの質量リソースが小さく、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である。ペネトレータ技術において高い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は取れている。現在は搭載機会を増やすために小型化の検討や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、火星探査を目的としてペネトレータ類似の技術を用いたMARS96、DeepSpace2がある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。

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は継続されてきた。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、技術完成の目処をつけた。現在は増強型イプシロンロケットでのミッション化に向けて小型軽量化への検討を始めている。

開発体制：宇宙研/JAXA、高知大学、地震研究所、東工大、東北大、京大など。

準備状況・技術的準備状況、外部資金獲得等：ペネトレータおよび軌道離脱モータ、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に戦略的開発経費を獲得し、ペネトレータの技術完成に目処をつけた。

(b.1.2.2) 【S2】火星探査プログラムにおける工学実証探査計画 [2021/2023年頃の小型]

【M1】火星衛星SR探査計画および【M2】火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画火星を成功させるには、それに向けた工学実証探査を戦略的に行う必要がある。実証すべき工学技術や確立すべきインフラはいろいろあり得るので、その検討は工学系と密接に連携して進めていく必要がある。それは今後の課題である。ここでは、そのような工学実証ミッションが行われた場合のCHASE-PBEEの視点からの小型探査コンセプトを列挙する。

(b.1.2.2.1) マルチフライバイによる地球接近小天体（流星群母天体）探査コンセプト案

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。本探査では、始原物質の情報を持つ彗星／彗星小惑星遷移天体で、かつ地球軌道と交差する主要流星群の母天体を探査標的とする。中でも、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、2003 EH₁(しぶんぎ座流星群母天体、公転周期5.5年)、2P/Encke彗星、2004 TG₁₀(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(一回の打上機会に複数天体を同時に探査)が有効である。フライバイでの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)超高感度の可視近赤外(<1μm)カメラ、(2)飛行時間(TOF)型ダスト質量分析装置、(3)熱赤外イメージャである。(1)で10m/pix程度で天体表層撮像(距離200kmを想定)、さらにフィルタによる多バンド画像撮像、(2)で周辺ダストの質量、組成、電荷、速度をその場分析、(3)で周辺ダスト及びダストトレイルの熱特性を測定する。

本探査では、イプシロンロケット+DESTINY+ミニマム観測機器セットで、流星群母天体(=地球軌道を交差する彗星や彗星小惑星遷移天体:CAT天体)のマルチフライバイによるその場観測により、1 AU付近での始原的天体の表層状態、周辺ダスト(～表層物質)のフラックス、熱特性、化学組成データを取得する。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を解明し、地球への生命起源物質の集積に直結する成果が得られる。

研究領域内での位置づけ：彗星及びCAT天体は、はやぶさ2が狙うC型小惑星やOSIRIS-RExが狙うB型小惑星と比べ、より始原的な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CAT天体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導かれる、小惑星フェートンがNaに枯渇することや、始原物質と分化物質が混在するという仮説が検証される。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、海外との比較：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。超小型衛星 PROCYON では NEO 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。超高感度可視近赤外カメラは、宇宙ステーション搭載流星観測カメラ（メテオ）をベースに、放射線耐性や熱設計を考慮し、小型衛星搭載用に改修したモデルの搭載を検討している。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の搭載を、熱赤外イメージャははやぶさ 2 搭載 TIR の小型モデルを検討している。

準備・検討体制・準備状況：現在はミッションの概念検討段階である。DESTINY WG 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 2005 UD 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。打上げ時期にもよるが、1年半から2年の飛行で2天体のマルチフライバイが可能である。現状、国内外の16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、産総研、立教大、神戸大、阪大、日大、北大、総研大、日本スペースガード協会、NASA/JSC、Stuttgart 大学、Max Planck 研究所）から25名の惑星科学の分野横断的な専門家が検討を進めている。

(b.1.2.2.2) 火星周回大気探査コンセプト案

目的と研究領域内での位置づけ：大気ダスト、地表ダスト、水蒸気、氷雲、微量気体、大気温度、地表温度のグローバル分布の変動を高高度から長時間・高空間分解能でマッピングし、ダスト気象学と水循環を明らかにする。火星において世界初となる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、工学実証探査、データ中継衛星、火星衛星探査、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する。赤外カメラなど厳選した観測装置を周回機に搭載して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。

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、ダストや水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。

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、中間赤外カメラ、望遠カメラ、超高安定発振器である。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。主要キー技術はサブミリ波サウンダの小型化で、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。

準備・検討体制：宇宙研、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。

準備状況－技術的準備状況、検討のための外部資金獲得状況等：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.1.2.2.3) 非着陸火星内部構造探査コンセプト案

目的：火星の表層環境は長期的に見るとダイナミクスを伴う火星内部の熱環境の変遷とともに変化してきた。火星内部のダイナミクスを理解することは、火星の表層環境変遷を理解する上で欠かせない。火星内部の不均質構造やグローバルな熱流量は現在の火星の内部ダイナミクスを表現しており、それ故、本提案では内部構造を把握することで火星の環境変遷の駆動力を理解することを目的とする。この目的を達成するために、(A)地殻熱流量、(B)ダイナミックポグラフィ、(C)地殻構造を軌道上の観測から推定することを目指す。(A)と(B)によってマンツルの動きを捉え、(C)と合わせて表層環境と惑星内部の進化を探る。(A)の推定のための手法として(a)複数周波数による輝度温度測定を、また(B)と(C)の推定のための手法として(b)ドラッグフリー制御衛星搭載の重力偏差計による高精度重力場観測をそれぞれ候補とする。

研究領域内で位置づけ：天体の内部構造はその天体の進化や環境変動を探る上で最も基本的な情報で

ある。内部構造探査の有力な手法は地震計ネットワーク観測であるが、火星の地震活動度や大気励起振動の大きさは現在のところ不明である。その情報は2016年打ち上げ予定の米国のInSightによってもたらされるであろう。その結果、火星での地震観測が有効と判断されれば、日本独自のペネトレータによる観測探査計画（b.1.2.1小節参照）の推進や国際協力による地震観測ネットワーク探査への参加が有力な選択肢となる。一方、地震活動度が低いと判明した場合、もしくは中型ミッションの枠での火星着陸が困難な場合には、本提案を内部ダイナミクスに迫る代替候補として位置づける。近年、精密な重力場観測手法としてドラッグフリー技術を用いた重力場観測は地球周回衛星（GOCE）で実現され、重力場モデルの精度向上に貢献している。大気のない月では衛星間測距技術を応用した低高度重力ミッション（GRAIL）が成果をあげ、内部構造に関する新たな知見をもたらした。火星では大気抵抗等の非保存力の影響が問題となるが、加速度計やdrag-free制御機構を持つ衛星による惑星重力観測は世界的にもまだ例がない。軌道上からの熱流量観測も同様であり、実現に向けての課題は多いが日本が取り組む意義は高い。

サイエンス成果が与えるインパクト：火星の表層環境変動は内部の熱的進化と共に変動してきた。それ故、現在のマンツルの動きやグローバルな熱流量というマンツルの駆動力を知ることは長期的な火星環境変動を理解する上で決定的に重要である。また、重力場の時間変化の観測は、火星表層における流体質量の短期変動の把握につながるという波及効果を持つ。

準備・検討体制：体制は未構築であるが、想定される体制には東大、国立天文台、ISAS/JAXA、一橋大、NICTなどの研究者・技術者が含まれる。

準備状況：DECIGOパスマインダーチームによってドラッグフリー制御およびレーザ干渉計の検討が進められている。

(b.1.2.2.4) 火星着陸機環境計測パッケージ案

目的と研究領域内での位置づけ：本計測パッケージは着陸機の周辺環境を計測し、着陸機周辺の環境条件を記述する。着陸機に課せられる科学目標がどのようなものであっても、観測地点周辺環境の記述は科学観測の基本である。本計測パッケージの最小構成はそのような基本情報を提供するものと定義され、全ての着陸機への搭載を想定している。最小構成を拡張した計測パッケージの搭載が可能な場合には、周回機からでは計測不能な高空間分解能・高時間分解能の観測を大気境界層で実施する。

サイエンス成果が与えるインパクト：大気と地面の間をつないで大気の振る舞いを大きく規定している大気境界層の物理過程を解明することは、惑星表層環境一般について理解する上で欠かすことができない。複数の測器を組み合わせた総合的な気象観測によって大気境界層を記述することができると、惑星大気モデルの妥当性を検証するためのベンチマークが得られ、その検証の過程からは惑星表層環境を統べる新しい物理過程が発見される可能性もある。火星は数多ある惑星のひとつにすぎないが、その境界層を観測することは惑星表層環境の理解を深化させるためには必須である。

主要キー技術と開発状況：開発中の測器は、温度計、圧力計、放射温度計、風速計、粒子センサ、LIDAR、天空光観測カメラ、などである。全ての着陸機に搭載される環境計測パッケージは、主科学目標に影響を与えないよう、なるべく少ないリソースで稼働する必要がある。そのため測器には基本的に枯れた技術を使うことにし、小型化・省電力化・高精度化といった方向の開発を進めている。また、測器とは別に、観測された大気現象を解釈するのに必須となる数値モデルの開発も併せて進めている。

準備・検討体制：岡山大、福岡大、千葉工業大、北海道大、東北大、千葉大、東京理科大、桜美林大、宇宙研、岐阜大、滋賀県立大、京都大、奈良女子大、理研、神戸大、九州大などから30名程度の研究者が参加している。

準備状況、外部資金獲得など：火星着陸探査技術実証WGの下で気象サブグループを組織して活動している。現在は少額予算（WG配分予算や岡山大の競争的資金）を用いて準備を進めている。

(b.2) 小規模プロジェクト案

(b.2.1) 木星氷衛星探査計画：日本分担部分（JUICE-JAPAN）〔ワーキンググループ段階〕

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, 海外との比較: 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, 地球へ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う予定である。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, 現在提案中の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-JAPAN WG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。JUICE-JAPANのプリプロジェクト化の承認が得られた後は, JUICE-JAPAN プリプロジェクトチームを発足させることになる。このチームの構成は, 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, と観測機器貢献をする4チーム, サイエンスチームである。

準備状況, 検討のための外部資金獲得等: 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, 現在は2015年3月のプリプロジェクト移行を目指している。

(b.3) 現在公募中の戦略的中型計画に応募予定の提案

この節に掲載する 2 つの探査計画は、現在公募中の戦略的中型計画に応募予定の提案であり、それぞれの WG メンバーであるサイエンス検討担当者に内容を記載いただいたものである。

(b.3.1) 火星着陸探査技術実証ミッション [2014 年度戦略的中型計画公募に応募予定] における MELOS:火星生命探査計画

研究領域内での位置づけ：火星に大量の液体の水が過去の一時期に存在していたことは、もはや間違い無い。火山活動はごく近年（少なくとも数 Ma くらい）まで継続していることが知られている。現在の火星マンツルの温度は地球とさほど変わらないほど高いことがわかった。従って、40 億年前から現在まで生命活動が継続できる帯水層と呼べる環境は おそらく常に（少なくとも断続的に）火星の地下のどこかに存在していた可能性が高い。いずれの場合でも、地下の帯水層の内部に生命活動が存続していた可能性がある。現在まで断続的に続く火山活動（泥火山等の揮発成分の放出イベントを含む）、地殻活動、インパクトなどにより、帯水層の物質が地表に放出されていると考えられるため、帯水層で生き延びた微生物が存在するのであれば、それらは表面の大気・ダストの移動と共に、火星表面で広範囲に移動し生息に適した地で生き延びる可能性がある。Melas Chasma は Marineris 峡谷の中心やや東側に位置し、この中央地点は生命探査に適した場所として一つの有力な候補と考えられる。ここにはリカリング・スロープ・リニア（RSL）と呼ばれる流水地形が存在する。しかもコンファームド・RSL と呼ばれるもので、HiRISE による高解像度撮像を繰り返し行った結果、春から夏にかけて RSL が形成されることが知られている。RSL は液体の水の存在が確実視される唯一の火星上の現象であり、現在の火星表面で最も生命存在の可能性が高く、その周辺にも生命が存在する可能性がある。従って本計画は、**現在も動的な火星という火星史の描像と現存する生命の存否を検証する。**

目的：火星着陸探査技術実証ミッションの一部として、RSL 周辺で、1) 可視および近赤外カメラで地表を、地中レーダで地下構造を探査し、2) とりわけ帯水層（あるいは氷層）の存在を探り、3) 現在の知見で火星表面付近において最も存在確率の高い所で、 10^4 細胞/グラム土壌の感度（地球で最も細胞密度の小さい地域で生命検出ができる感度）で検出可能な生命の存否を明らかにする。

サイエンス成果が与えるインパクト：現在も活動度が残る火星という描像を検証する。地球外生命の発見に至らない場合でも、欧米で計画されているサンプルリターンや、今後検討が進む火星着陸有人探査に安全性を担保することになる。生命が発見されれば、地球外生命の発見となる。

主要キー技術と開発状況、海外との比較：**生命探査顕微鏡（LDM）**：火星環境に対応した色素系を開発している。海外で宇宙用蛍光顕微鏡の開発は行われていない。微生物の検出には $1\ \mu\text{m}$ の解像度が必要である。LDM はそれを実現しており、海外の宇宙用顕微鏡の 10 倍高い解像度である。

地中レーダ（GPR）：これまでの周回機のレーダでは地中貫通能が不足しており、火星の地中構造の解析はほとんど行われていない。ローバからレーダで初めて地中構造を解析する事が、周回機への適用の一步となる。地中での 20m 以上の深度で 20cm 以上の厚さを持つ構造を検出する。

可視近赤外カメラ：高精細カラーカメラで周囲の地質学的なコンテキストを把握。近赤外までの波長域をカバーすることで、硫酸塩岩など鍵となる鉱物の組成とその分布、産状を把握する。

準備・検討体制：主査：藤田(JAXA, 工学火星着陸機 WG), 科学主査：佐藤 (JAXA), GPR 主査：宮本 (東大), LDM 主査：山岸 (東薬大, 理学火星生命探査 WG), ローバ主査：石上 (慶応), 赤外カメラ主査：亀田 (立教)。それぞれ数十人の検討体制で、全体会合および担当者会合を毎週実施。

準備状況：今年度、工学 WG で火星着陸生命探査ミッション全体の検討を実施した。LDM は既存の BBM を火星用へ特化した設計が今年度で終了する。GPR は、BBM があり、RSL に特化した設計検討を今年度終了する。画像解析技術開発等は新学術領域等の科研費で進めている。

(b.3.2) 外惑星領域の航行技術，探査技術，及び未踏の科学領域の開拓 [2014 年度戦略的中型計画公募に応募予定]

目標：実験機と本番機の 2 つのミッションを行う。実験機では、ソーラー電力セイル探査機がトロヤ群小惑星にランデヴーして、子機を着陸させ、表面および内部サンプルを採取し、その場分析を行い、オプションとしてサンプルリターンも行う、というミッションシーケンスを実現することで必須となる技術実証をまとめて行う。特に、宇宙風化を受けていないフレッシュな内部サンプルをその場で分析することで高い科学的成果を早期に引き出すことが可能となる。さらに、深宇宙空間での巡航飛行環境を利用した複数の科学観測も実施する。これらは太陽系科学のみならず天文学、宇宙物理学の大きな進展に寄与すると同時にトロヤ群小惑星に到着前の比較的早い段階で成果が得られる。実験機を踏まえ、本番機で本格的なサイエンスミッションを行う。

研究領域内での位置づけ：日本学術会議が 2014 年 2 月に制定した「マスタープラン 2014」において、「**宇宙探査ミッションを支える宇宙技術実証プログラム**」が重点大型研究に選定された。このプログラムでは、ソーラー電力セイルを用いた外惑星領域往復、試料採取技術等を実証することが掲げられており、実験機はまさにこれに応えるものであり、「より遠く、より自在な、より高度な」宇宙探査活動を目指す宇宙工学委員会の方針に沿うものである。また日本惑星科学会が 2014 年に最終まとめを行った「月惑星探査の来る 10 年」において、「**ソーラー電力セイル探査機によるトロヤ群小惑星探査および深宇宙空間観測**」は、次期フラッグシップミッションの最終 3 候補のひとつとなった。ここで評価されたサイエンスは「月惑星探査の来る 10 年」の大テーマ「生命に至る宇宙物質の進化」に関わるものであり、本番機で実施する内容である。

トロヤ群小惑星到着前後の巡航飛行中に行う赤外線背景放射観測の科学的意義については、光赤外線天文連絡会からの RFI に回答する文書に詳細が記述されている。

成果が与えるインパクト：実験機と本番機で達成できる世界初・世界最高は以下の通りである。

- ・世界初： 光子推進と電気推進のハイブリッド推進、外惑星領域往復、メインベルト以遠での赤外背景放射観測、トロヤ群小惑星探査、トロヤ群小惑星サンプル採取。
- ・世界最高：イオンエンジンの比推力、地球帰還カプセルの速度。

主要キー技術と開発状況、海外との比較：主要キー技術はソーラー電力セイルによる外惑星領域の航行・探査技術である。ソーラー電力セイルは、はやぶさで実証したイオンエンジンを高比推力化、IKAROS で実証したソーラーセイルを大型化して構成する日本独自のアイデアである。これを用いることで、目標天体を S 型、C 型地球近傍小惑星から、より遠方の始原性の高い D/P 型トロヤ群小惑星とし、はやぶさシリーズで確立する小惑星探査技術を発展させる。海外の類似ミッションとして、ESA の彗星探査機 Rosetta が挙げられるが、100 kg の着陸機 Philae を彗星に輸送するために約 3 ton の探査機を必要とした。一方、ソーラー電力セイル実験機は約 1.2 ton で同じ 100 kg の子機をトロヤ群小惑星に輸送できるため、中型計画規模での外惑星領域の直接探査が可能となる。欧米でもトロヤ群探査が提案されているが、いずれもマルチフライバイ／ランデヴーであり、着陸探査を行うのは日本のみである。

準備・検討体制・開発状況：ソーラーセイル WG は 133 名の研究者で構成され 2001 年から活動を行っており、ソーラー電力セイル探査機開発のリスク軽減のフロントローディングとして、IKAROS ミッションを先行して実施した。コアメンバーは IKAROS、はやぶさ、はやぶさ 2 のミッションでも中心的な役割を果たしておりプロジェクト間の情報共有ができています。また実験機の子機開発について DLR と LOI を結んだ。

(b.4) 主な搭載機器の開発戦略

(b.1)節から(b.3)節の探査プログラムを遂行するためには、それぞれの科学目的に相応しい世界最高性能の搭載機器を開発する必要がある。同時に、今後の10年間、またその次の10年間も打上げ機会が一定数に限定されるであろう状況の中で、当該分野の研究者は従来にも増して海外ミッションへ積極的に参加し、国際協力の下で最先端の探査データを獲得しなければならない。そのためには国際競争力の高い、独自の機器を開発し、宇宙実証していかなければならない。従って本文書にはミッション計画とともに、将来探査に必須となる観測装置、発展性が見込まれる観測装置として、元素測定装置 (b.4.1 小節) と質量分析器 (b.4.2 小節)、地中レーダ (b.4.3 小節) について特記する。

(b.4.1) 元素測定装置

元素分析は、拡散反射分光測定による鉱物相同定と合わせて、固体天体の物質同定に必要不可欠である。ケイ酸塩鉱物などは固溶体を持つため、結晶構造は同じでも、化学組成が結晶生成時のメルト組成や温度により可変であり、鉱物相特定とその化学組成（主要元素濃度）が理解されて初めて正しい物質特定が可能になる。将来の太陽系探査に必須となるであろう元素分析装置には、LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy)、APXS (α Proton X-Ray Spectrometer, PIXE & XRF) などの手法が有効であると考えられる。

(b.4.1.1) レーザ励起ブレイクダウン分光分析装置 (LIBS)

装置概要: LIBS はレーザと分光計を用いた元素分析装置であり、地上においては幅広い分野で使用されている。LIBS は、軽元素を含むほぼすべての元素の測定が可能であり、測定時間が短く（数秒から数十秒）、試料の前処理が必要なく、ある程度の遠隔測定が可能などの利点を持つことから、着陸惑星探査においても有用な元素分析装置になると期待されている。

海外探査での搭載実績: 現在火星探査を行っている米国の探査ローバ Curiosity には 1.5—7 m の遠隔測定が可能で LIBS が搭載され、火星において元素分析を実現している。

開発状況: 国内においては、千葉工大を中心として月・火星探査用の汎用的元素分析装置としての LIBS 開発に向けた基礎研究が行われている。また、立教大を中心として LIBS と質量分析装置を組み合わせた月・火星探査用の年代測定装置の開発が進められている。

開発課題: 現状では以下の課題があり、重量や電力の厳しい制約がある中では LIBS に真の汎用性を持たせることは難しく、**探査対象や搭載方法や運用方法に合わせて特化した LIBS 開発が必要**となる。

●国内のレーザの問題: 一般的にレーザが安定して発振できる温度範囲は狭い。従って、LIBS は火星に比べて月や小惑星では難易度が上がる。国内では固体レーザ用の結晶開発を行える環境がない。

●焦点合わせの問題: LIBS では、パルスレーザビームを光学系により試料表面に集光することでエネルギー密度を上げて、逆制動放射により物質をプラズマ化する。露頭や転石、地表を直接測定する場合には、測定対象までの距離に応じて集光させるため、光学系に焦点合わせ機構（駆動部）が必要。

●キャリブレーションの問題: LIBS で元素分析を行うには、あらかじめ元素組成のわかっている参照試料を用いてキャリブレーションデータを取得する必要がある。キャリブレーションには、なるべく実際の対象に近い試料を準備する必要があり、天体により参照試料が異なる。

(b.4.1.2) 能動型蛍光 X 線分析装置 (Active X-ray Spectrometer, AXS)

装置概要: シリコンドリフト X 線検出器 (SDD) と焦電素子 X 線発生装置 (XRG) を組み合わせた蛍光 X 線分析装置である。高電圧電源が不要で、小型軽量である。また、必要な時に X 線を発生することができる。LIBS と比較して有利な点は、軽量・消費電力が少ないこと、放射性同位体を使用しない点で日本独自の装置であることなどである。一方、不利な点は軽元素 (O 以下) が検出困難であることである。カーボンナノチューブによる X 線発生装置を用いることができれば、軽元素から重元素の分析まで対応できるが、重量が約 500 g 増加してしまう。

海外探査での搭載実績: XRG の宇宙実験の実績はない。SDD の実績はある。

現状の開発状況: 概念設計は終了し、BBM による基礎試験を COOL-X および SDD を使用して早稲田大、KIGAM、LPL において実施した。構造設計については構成要素を決定済みである。熱設計・制御については熱解析を実施して、熱制御の成立性を確認した。また、分析試料に対する検討として、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を行った。

開発要素：XRG の高性能化（X 線発生強度の増加，安定化）を追求している。

開発課題：微量元素の定量化に向けて XRG の高性能化，動作寿命調査（必要なら長寿命化の検討）および検証が必要である。

(b.4.2) 質量分析器 (Mass Spectrometer, MS)

質量分析器は，STP 分野において，層の厚い開発ヘリテージのある粒子計測器とほぼ同一の基礎技術を用いる。月面／火星年代計測，火星衛星 SR 探査（その場物質計測），火星大気探査（中性大気の同位体計測），氷天体探査（揮発性物質の分子・同位体計測，火星極冠探査）など多岐にわたる太陽系探査において貢献が期待される。また，質量分析科学分野は，日本の物質科学分野に幅広い研究者層を擁している。そのため，質量分析器の開発には，両分野の研究者との協力関係が非常に重要であるし，両分野の研究者コミュニティへの成果還元も射程に入れたものとすべきである。オールジャパンで次世代探査を組む場合には，このような分野横断での取組みは，非常に重要な意味を持つ。

装置概要：質量分析装置は，年代（放射性同位体比），化学熱力学的安定性（揮発性物質の分子組成），物質循環（揮発性物質の同位体組成）など，地球での生命圏調査には必ず計測する基礎量を網羅的に知ることができる。惑星生命圏のキャラクタリゼーションを行うに当たって最重要な観測量を把握でき，CHASE の枠組みに於いて本質的な役割を果たすことが期待される。

海外探査での搭載実績：海外には，QMS，TOF，ITM など様々なタイプの質量分析装置が開発され，宇宙実績を上げている。

開発状況：現在の基礎開発を 2017 年まで継続し，以降の 2 年間で観測ロケット実験（柔構造エアロシエルを用いた地球成層圏での試験など）を実施する予定である。その後は 2020 年以降に相乗り衛星など超小型衛星への搭載を目指す。開発体制としては，理学分野では宇宙研の粒子計測グループ，立教大の宇宙物理グループ，地震研や九州大の同位体計測グループ，東大・新領域と理学部の深宇宙探査グループなどが開発に参画している。工学分野は，東大の新領域と工学部の大気再突入技術グループおよび超小型衛星グループと共同で検討中である。

開発課題：当面は， $m/\Delta m = 100$ の質量分解能を目指す。また，粒子計測器技術を質量分析装置へ転用するには，イオン化源開発が鍵であるが，計測粒子の初速の効果を無視できる点が有利となる。

(b.4.3) 地中レーダ (Ground Penetrating Radar, GPR)

機器概要：ローバ，または着陸機等の飛翔体から主に UHF 帯の電磁波を対象天体に放射し，その反射波を用いて対象の地下構造を把握する。周波数帯により分解能が決まり，探査深度は対象の周波数帯と誘電特性で変化するが，ほぼ解像度(10cm—数 m)の 50—100 倍程度。μ 秒で計測できるため，ローバ走行時やランデヴー時など高速で移動中でも非接触で地下構造探査が可能である。月や火星，小惑星などの固体天体は一般に均質なレゴリスで覆われているが，その層厚や下部の構造を効率的かつ高解像度で探査できる。地質構造のみならず誘電率分布から構成物質の推定が行える。表面探査で他の観測機器が何を見ているのか，地質学的なコンテクストの理解につながる。彗星，氷衛星まで含めて固体天体に幅広く応用できる。本体寸法 200×180×50 mm，重量 1,060 g，電力 30 W である。

現在の開発状況：小惑星探査 WG の支援を受け，2010 年頃に BBM を作成，現在は火星着陸技術立証 WG の支援で野外試験中（アンテナに関しては科研費および寄付金により開発中）である。

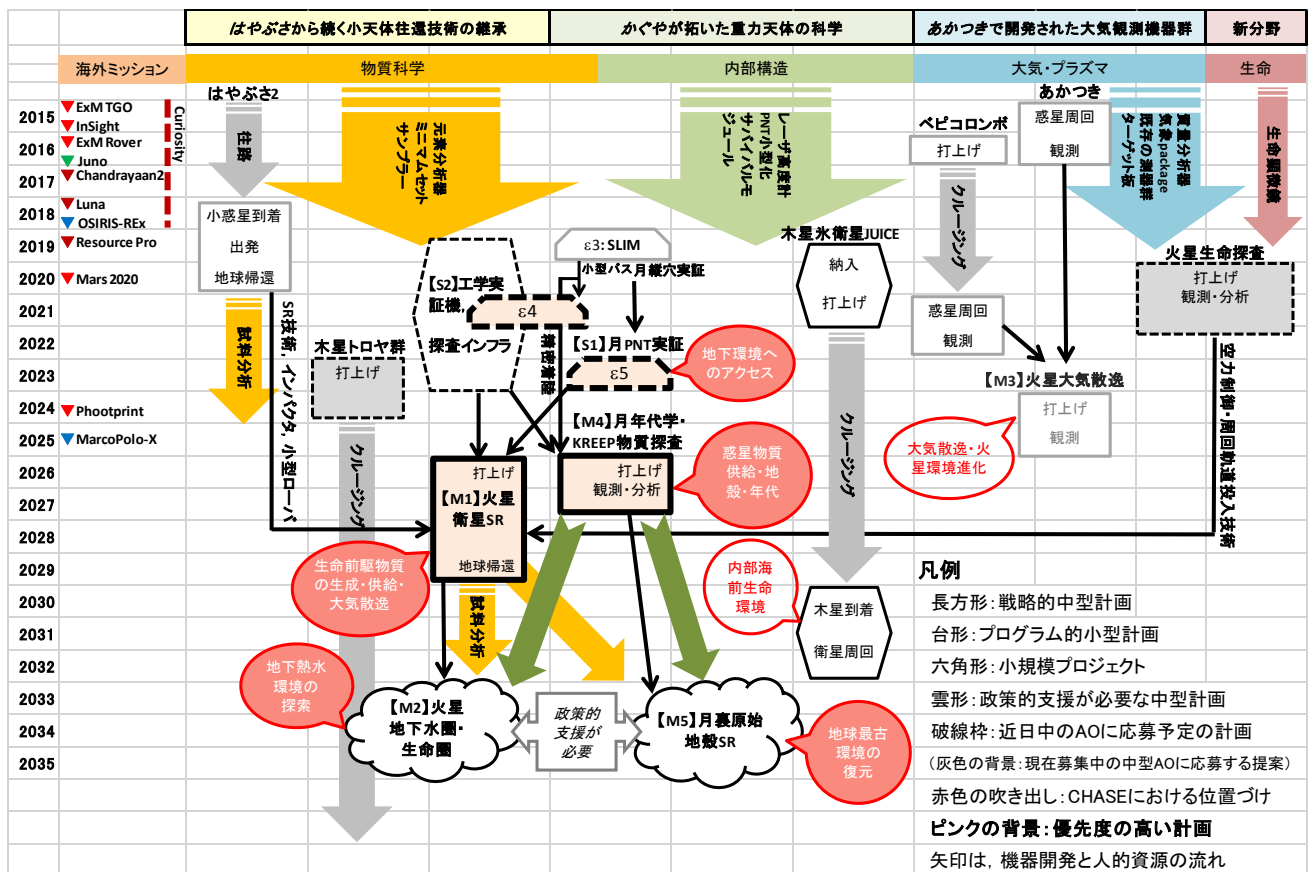
開発課題：宇宙実績は世界的にも無いが，地球工学分野では枯れた基礎技術であり，宇宙用レーダ製造実績のある宇宙機器メーカーに開発工程・リスク調査等を依頼した結果，小型化のための一部 MMIC 化が課題と指摘された（他に FPGA の速度，熱処理への不確定性など中程度のリスクは挙げられたが，エレキ部分に大きなリスクは無い）。一方で，①GPR 内部および搭載宇宙機との干渉を防ぐ EMC 対策，②対象天体の電磁波特性（特に減衰率）と可探深度の関連の明瞭化，④開発メンバーの開発経験不足は開発課題である。②については室内実験と野外調査を通じた実証実験を実施中である。

開発ロードマップ：MMIC 開発と専用デバイス性能確認に 1 年半，EM 制作（含む，部品手配，基本設計，試験）に 1 年，PFM 制作（含む，同左）に 1 年半の合計およそ 4 年で開発可能である。

(c) 工程表 (ロードマップ)

(c.1) 太陽系探査プログラムの工程表

本工程表では 2020 年代後半に【M1】火星衛星サンプリターン (SR) 探査(b.1.1.1 項)と【M4】月面その場観測による KREEP 物質・年代測定 (b.1.1.4 項)の探査の 2 つの戦略的中型ミッションが提案されている。さらにそれぞれ、その先の 10 年に向けて【M2】火星地下水圏・生命圏着陸探査(b.1.1.2 項)もしくは【M5】月裏側地殻 SR 探査(b.1.1.5 項)を政策的支援のもとに実施すべきと考える。また理学観測用の小型バスとして活用が望まれる【S1】ペネトレータの技術実証探査を 2020 年代前半に実現したい。同時に【S2】火星探査プログラムにおける工学実証探査を拡張イプシロンロケットで打上げたい。【M4】は、「月惑星探査の来る 10 年」のフラグシップミッション提案の 1 つを原型としており、SELENE-B/R を下敷きにした予備的なミッション評価によって、複数の課題が指摘されている。一方、【M1】は小惑星探査と火星探査の融合という観点から最近提案されたもので、現状ではミッションの全体像が固まっておらず、【M4】と比較評価できる段階にはない。従ってこの両者に対して現時点で優先順位を付けることは行わずに、両提案を早急にプレ WG/WG 化して、ミッション定義とシステム成立性の確認を実施することを要望する。WG として検討を深めた上で、科学評価はもとより、(i)搭載機器開発の達成度、(ii)海外類似ミッションとの関係、(iii)バス機器も含めた開発体制、(iv)予算見積もり、(v)政策的要因を総合的に、かつ、太陽系科学コミュニティが主体的に評価して、優先順位を判断するべきである。その期限は、本文書の提出から検討に要する期間と、コミュニティ内優先順位づけから戦略的中型ミッション公募に応募するまでの時間的余裕とを考慮して 2018 年度中とする。



特に検討を要する課題は、【M4】については、既存類似ミッション計画からの類推から、(v)予算見積もりが戦略的中型ミッションの上限を上回る可能性が指摘されている点である。他方で、【M1】については ESA/ロシアと NASA から類似したミッション提案 (Phootprint, PADME) が出されており、海外ミッション提案の採択状況・準備状況を注視しながら科学目標の差別化・区別化を図る方策が望まれる [(ii)海外類似ミッションとの関係、ただし、より高次元の国際協力につなげたいとの【M1】提案グループの主張は(b.1.1.1)項参照]。

(c.2) ミッション毎の準備期間・運用期間

FY	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
	[S1] ベネトレータによる内部構造探査																					
選定・準備	WG ▲小型AO プリプロ 開発																					
打ち上げ/運用	打上げ/運用1年																					
	[M1] 火星衛星サンプルリターン探査																					
選定・準備	WG ▲優先順位 プリプロ ▲中型AO 開発																					
打ち上げ/運用	打上げ/運用約3年																					
	[M4] 月面その場観測によるKREEP物質・年代測定の探査																					
選定・準備	WG ▲優先順位 プリプロ ▲中型AO 開発																					
打ち上げ/運用	打上げ(1ヶ月)/運用(2ヶ月)																					
	[M2] 火星地下水圏・生命圏の着陸探査																					
選定・準備	WG ▲中型AO 開発																					
打ち上げ/運用	打上げ/運用(約2年)																					
	[M5] 月裏側原始地殻のサンプルリターン探査																					
選定・準備	WG ▲中型AO 開発																					
打ち上げ/運用	打上げ/運用(2ヶ月)																					

(d) 工程表とミッションプランの改訂

前書きに述べた通り、将来 20 年のミッション策定において、検討時間の短さから本工程表の熟度は低い。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、データ解析、宇宙物質分析、シミュレーション、衝突実験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）の設立する。

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 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、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。