

# 惑星科学／太陽系科学 研究領域の目標・戦略・工程表（2019年改訂版）

## 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) 水星探査 .....   | 4  |
| (a.1.3) 金星探査 .....   | 5  |
| (a.1.4) 火星探査 .....   | 5  |
| (a.1.5) 小天体探査 .....  | 5  |
| (a.1.6) ガス惑星・氷惑星探査 .....   | 6  |
| (a.1.7) 氷天体（氷衛星、Kuiper-Belt 天体）探査 .....                                    | 6  |
| (a.1.8) 系外惑星 .....   | 7  |
| (a.2) 日本の戦略・狙うサイエンス・期待される成果 .....  | 7  |
| (b) 具体的戦略 .....  | 9  |
| (b.1) 惑星探査プログラム案 .....   | 9  |
| (b.1.1) 戦略的中型提案 .....  | 10 |
| (b.1.1.1) 火星衛星探査計画（MMX） [2024 年] .....                                     | 10 |
| (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 [2030 年頃] ..                  | 11 |
| (b.1.1.3) 戦略的火星探査：火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画 [2030 年代前半] .....                      | 12 |
| (b.1.2) プログラム的小型計画案 .....  | 13 |
| (b.1.2.1) 深宇宙探査技術実証機（DESTINY <sup>+</sup> ） [2022 年] .....                 | 13 |
| (b.1.2.2) 戦略的火星探査：周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査<br>（MACO）計画 [2028 年頃] ..... | 14 |
| (b.1.3) 延長計画 .....   | 15 |
| (b.1.3.1) はやぶさ 2 .....   | 15 |
| (b.1.3.2) あかつき .....   | 16 |
| (b.1.3.3) ひさき .....  | 17 |
| (b.1.4) 国際宇宙探査 .....   | 18 |
| (b.1.4.1) 月極域探査計画 [2020 年代前半] .....  | 18 |
| (b.1.4.2) 月探査用貨物輸送ミッション実証機（HERACLES） [2020 年代後半] .....                     | 19 |
| (b.1.4.3) 戦略的火星探査 [2020～30 年代] .....                                       | 20 |
| (b.1.5) 機器の提供による国外探査計画・小規模計画 .....   | 20 |
| (b.1.5.1) 小惑星探査機 Hera／熱赤外カメラ TIRI [2024 年] .....                           | 20 |
| (b.1.5.2) NASA Discovery 計画 Moon Diver への小型観測機器プロープ提供 [2024 年] .....       | 21 |
| (b.1.5.3) 系外惑星大気の紫外線分光観測 [2025 年頃] .....                                   | 22 |
| (b.1.5.4) 土星衛星離着陸探査計画（Dragonfly） [2026 年] .....                            | 23 |
| (b.1.5.5) Comet Interceptor（ESA Fast mission） [2028 年頃] .....              | 24 |
| (b.1.6) 将来探査コンセプト提案 .....  | 24 |
| (b.1.6.1) 火星オービターコンセプト .....   | 24 |
| (b.1.6.2) 月の地下空洞直接探査 [2020 年代] .....                                       | 25 |
| (b.1.6.3) 火星の地下空洞直接探査 [2020～2030 年代] .....                                 | 26 |
| (b.1.6.4) 長周期トランジット系外惑星探査・超小型衛星計画 [2026 年頃] .....                          | 27 |
| (b.1.6.5) 系外惑星の主星に対する紫外線モニタリング [2020 年代] .....                             | 28 |

|   |    |
|---|----|
| (b.1.6.6) 超小型衛星による太陽系近傍恒星周りの系外惑星トランジット観測 [2024 年頃] .....  | 29 |
| (b.1.6.7) 近赤外線分光観測による小惑星の含水鉱物探査 (Watery / Hydrated Asteroid<br>Measurements: WHAM) [2020～30 年代] ..... | 30 |
| (b.2) 戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発 .....  | 31 |
| (b.3) 将来の探査における化学分析とキュレーションの長期展望 .....  | 32 |
| (b.4) 惑星保護 .....  | 32 |
| (c) 惑星探査を支える人材の育成（惑星探査コンソーシアム） .....  | 34 |
| (d) 工程表（ロードマップ） .....   | 36 |

**付属資料**

SUPPLEMENT（図・表など）

APPENDIX（詳細事項）

## 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」(Request for Information: 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)、ならびにこの改訂を行った RFI 回答文書 2017 (2018年1月発行)、RFI 回答文書 2018 (2019年5月発行)である。RFI 回答文書 2015 および 2017 で挙げられていた火星衛星探査計画(MMX)や深宇宙探査技術実証機(DESTINY+)が、宇宙科学研究所の次期ミッションとして抽出され、2019年末現在、プロジェクト化に向け検討作業が進められている。

本文書も基本的にこの流れを踏襲しつつ、国内外の惑星探査を取り巻く科学や関連政策の動向、各提案の練り上げの状況等を踏まえ、旧文書を再整理・アップデートする形での再改訂を行った。特に、今回は、新たな惑星探査の枠組みとして登場した国際宇宙探査を踏まえ、戦略的中型、公募型小型、また旧文書において政策支援を必要としていた各探査計画の再編を提案する。また将来探査のコンセプト提案、推進すべき機器開発について、将来探査の具体化の検討に資するよう、項目を充実化させた。RFI 回答文書 2018 からの主な変更点については APPENDIX-0 にまとめた。

本文書の作成(改訂作業)は、2018年改訂と同様に、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、委員会からの依頼を快諾してくれた倉本圭会員(北海道大学)と、自薦・他薦の88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。日本惑星科学会惑星探査専門委員会では今後も、継続的に改訂を行う予定である。

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「**惑星探査コンソーシアム**」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(惑星探査コンソーシアムに関しては(c)章参照)。

## (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)では、探査対象ごとに今後 20 年の世界の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、太陽系内外における生命の存在や存在可能環境の理解といえる。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)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：月は、形成・マグマオーシャン・その後の進化の三つのステージが全て観測により強く制約されている唯一の天体であり、その後の進化は月の小さなサイズのため単純である。従って、月の形成から現在に至るまでの一貫した歴史の解明は、火星や地球のようなよりサイズが大きく複雑な天体の歴史を解明する上でまたとない出発点となる。こうした月科学の重要性が一つの駆動力となり月探査が行われてきた。今世紀に入ってから月探査は、周回探査の成果を踏まえ、着陸機によるその場分析探査、サンプルリターン探査へと移りつつある。また最近の重要な方向性は国際協力と民間企業の直接的参入である。

今後の動向・探査計画：国別では、中国は既に月周回・表側軟着陸に成功していたが、2019 年には月裏側にヨーロッパ提供機器も搭載した嫦娥 4 号が軟着陸、ローバ走行観測にも成功し、マントル物質発見を発表した。早ければ 2019 年に月の表側からサンプルリターンを行うが、月軌道からの地球帰還技術の習得は既にされている。インドは、周回探査機チャンドラヤーン 2 号を 2019 年に打ち上げたが月面軟着陸に失敗し、今後は不透明である。韓国は米国と協力して、月周回衛星計画を企画しているが未定が多い。ヨーロッパ、ロシアは、国の宇宙機関のプロジェクトとして開発、実施段階となっている月探査計画は無い。米国 NASA は、2024 年までに再び月に宇宙飛行士を送るという ARTEMIS 計画を発表し日本も協力表明している。

世界的に民間独自による月探査への参入も増加している。2019 年、イスラエルの SpaceIL 社は、月着陸に失敗したものの SpaceX 社のロケットで月着陸船を打ち上げた。NASA は民間主導の探査の動きを後押しすべく Commercial Lunar Payload Services (CLPS) program を発表、数社が名乗りを挙げている。たとえば、Astrobotic 社は、Spacebit 社の縦孔探査用ミニロボットを運んでの 2021 年月面軟着陸を目指している。CLPS ではないが、日本の ispace 社は月着陸商業ミッションを 2021 年にも行うとしている。

JAXA はピンポイント自律着陸技術の習得を目指す SLIM 計画をプロジェクト化し 2020 年度の月表側着陸を目指している。また、インドから着陸機供給を受けての月極域水探査も検討している。ESA、カナダ宇宙機関との共同でサンプルリターンを目指す HERACLES にも参加しているが、NASA が月面有人探査構想を発表したことを受け、再検討中である。一方、宇宙理学委員会下の月火星の地下空洞直接探査 RG は、海外協力も視野に入れた WG 化の準備を行っている。（日本の探査についての詳細は、後述）

#### (a.1.2) 水星探査

科学的意義・工学的ハードル：水星は、太陽に最も近く、最も小さく、また岩石に対する金属コアの割合が最も大きい、といった様々な点で地球型惑星のエンドメンバーである。海も大気も持たず衝突クレータに覆われた表面は、水星が生命とは無関係の惑星であることを物語るようである。しかし、過去の激しい火山活動の痕跡や現存する固有磁場などは水星が活動的な惑星で有り続けていることを意味し、地質活動や磁場生成などの点で活動的であるがゆえに生命を育むことのできた地球がどのように形成し進化してきたのか、特に初期の状況を探る上で、水星は重要な情報源であることを意味する。具体的には、水星は、他の惑星にはあまり残されていない太陽系初期の情報や地球型惑星の材料物質の酸化還元状態に関する情報を提供しうる。また水星表層に発見された水氷は、太陽系内における揮発性物質の輸送を解き明かす鍵でもある。

水星は太陽に非常に近いため、周回軌道投入に必要なエネルギーが大きい。また探査機は地球周囲の 10 倍に及ぶ太陽光に加え 430°C に達する水星表面からの熱放射にさらされるため、熱対策が非常に重要である。前者については地球・金星・水星のフライバイの利用、後者については耐熱性の高い断熱材や反射材の利用と適切な周回軌道設計が求められる。

今後の動向・探査計画：JAXA と ESA 共同の BepiColombo 国際水星探査計画が進行中である。同探査機は 2018 年 10 月に打ち上げられ、2025 年 12 月に水星軌道の投入予定である。ROSCOSMOS は 2030 年代以降に水星着陸探査機 Mercury-P の打ち上げを検討している。また NASA decadal survey に水星着陸探査機の white paper が提出されている。

### (a.1.3) 金星探査

科学的意義・工学的ハードル：金星は地球とほぼ同じ大きさの惑星であり、下部マントルを有するが、プレートテクトニクスは起こっていない。従って、火星と金星の比較からは下部マントルが惑星進化に及ぼす効果を、金星と地球の比較からは惑星進化におけるプレートテクトニクスの役割を解明できると期待される。さらに、その表層の環境は地球と大きく異なっている。この環境が作られた過程を解明することは、地球がなぜハビタブルなのかという根源的な問いに答えるための鍵となる。

1990年のMagellan以降、金星探査はESAのVenus Expressと日本のあかつきしかない。この2機の探査機による大気科学の進展には、約35年前に発見されたCO<sub>2</sub>大気の「窓」波長が貢献している。高温・濃密な大気の下部を探るためさらなるブレークスルーとして、あかつきが発見した「表面地形から雲頂までつながる大気重力波」も挙げられる。そのような中で世界的には様々な金星探査が構想されてきた。たとえば、希ガスや同位体の計測により大気の起源と変遷を解明する、高解像度SARや熱放射モニタにより火成活動・地殻形成を解明する、気球プラットフォームや周回機からの大気観測により物質循環を解明する、などである。

今後の動向・探査計画：ISRO（インド宇宙機関）が2020年代前半にSARや光学リモートセンシングによる金星周回機ミッションを計画している。またESA Cosmic VisionのM5クラスミッションの3候補の一つとして、地表・地下のレーダー探査と地表熱放射のマッピングを行うEnVisionが検討されている。NASAでも様々なタイプのミッション案が検討されている。コミュニティのフラッグシップ的なミッションとして、ロシアが主導してNASAも参加を検討しているVenera-Dがある。これは2020年代後半以降の打ち上げを目指す、周回機と着陸機からなる大型計画であり、大気と地殻の構造と組成を総合的に調べるものである。

一方、日本でも比較的小型の探査が議論されている。たとえば小型プローブを突入させ大気組成・同位体比を観測する、周回機から超小型衛星を放出して衛星間電波掩蔽を行い3次元大気循環を調べるといったことが考えられている。金星は高温・濃密な大気ゆえ手ごわい対象である一方、約35年前のブレークスルーは地上観測によりもたらされた。観測手法を発達させ、それを機動的な小型探査により開花させてゆくアプローチは重要性を増すと考えられる。

### (a.1.4) 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で火星の科学が飛躍的発展を遂げ、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。また、火星の火山活動の歴史と表層環境の間には強い相関があるとかねてより推測されており、その解明は、同様に内部活動と表層環境の間に相互作用があると推測される地球の進化を理解する上でも重要な意味がある。

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.1.5) 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からのサンプルリターン（SR）、ロゼッタによる67P/Churyumov-Gerasimenko彗星の周回・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。微量であってもSRにより持ち帰られた試料の詳細分析は実に様々な情報を我々に提供した。SRは小天体探査で取り組むべき極めて重要な項目であることが公知され、はやぶさ2やOSIRIS-RExでは含水鉱物や有機物を含む試料の採取を最重要目的の一つとして進行中である。さらにMMXはフォボスからのSRを計画している。またはやぶさ2でインパクターによる実験が実施され、探査方法として成立することが確認された。今後新たな探査方法としてミッションに取り入れられていくものと思われる。実際DARTは小惑星の衛星にインパクターを衝突させ、衛星の軌道がどのくらい変化するかを確認しようとしている。

今後の動向・探査計画：日本は岩石小天体への着陸・SRの実績がある。次期SRの技術的目標としては始原天体から有機物あるいは氷を変成させることなく採取して持ち帰るという、ややハードルの高い挑

戦へ舵を切ることになろう。その前段階として「宇宙で有機物をどのように分析するか」この課題に挑戦するのが DESTINY<sup>+</sup> (D+) と OKEANOS である。

近地球小天体であり且つ自身がダストを放出している Phaethon とその周辺の関連ダストを観測対象とする D+は、地球への有機物供給の経路を探る重要なミッションと位置付けられる。D+はダストの速度と組成のその場分析装置を持ち、フライバイに至るまでの地球-月軌道空間と Phaethon 周辺で惑星間/星間/Phaethon 由来ダストを区別してダスト中の有機物の分析を行う。またこのミッションは世界初の太陽へ落下する過程にある天体（太陽接近小惑星）へのフライバイでもあり、太陽加熱による天体表面の熱変成、崩壊に伴う塵の放出などを観測する稀有な機会である。Phaethon 軌道の制約から D+は Phaethon に対して高速フライバイを実施することになるが、高速フライバイでの高解像度画像取得や複眼式多色測光カメラ撮像が実現できれば、将来的に探査対象をより多様な軌道の天体へと広げることができる。

日本での小天体探査がこれまで地球軌道近傍に限られていた中で、OKEANOS では初めて外惑星領域を目指す。木星トロヤ群小惑星を周回/着陸探査により詳しく調査し、着陸探査では地上隕石ではまだ明確には確認されていない D/P 型天体（有機物や氷を含むと考えられている）の表面物質を初めて採取・分析する。着陸機に搭載される小型の質量分析器を中心とするサンプル分析機構は日本では新規技術であるが、今後探査の幅を広げるために必ず実現すべき項目である。

小天体探査に関する世界の今後の動向および探査計画については表 S2 にまとめた。

#### (a.1.6) ガス惑星・氷惑星探査

ガス惑星（木星・土星）

科学的意義・工学的ハードル：木星と土星の起源解明の鍵は深部に隠されたコア質量、そして形成後段階の集積過程や周囲の環境を反映する大気組成にある。木星・土星を対象とした周回軌道の探査は Galileo, Cassini-Huygens そして Juno と継続的に実施されている。木星に関しては殊に Juno の活躍により、内部構造（特にコア）、大気の組成や運動、雲分布、磁場の詳細な情報が得られ始めている。一方の土星に関しては、Cassini の功績にも関わらず、重力場計測や大気組成（特に酸素や希ガス）の情報は限定的である。それゆえ、土星の次期探査で周回機やプローブによる詳細なその場測定は不可欠である（過去、土星大気中の希ガスの存在度及び同位体比の測定を目指した Kronos 計画が ESA で提案された）。近年、ALMA による原始惑星系円盤の詳細観測が進み、惑星のガス集積とそれに付随して形成される周惑星円盤に対する理解が進展する。周惑星円盤はガス惑星への重元素供給とともに衛星系形成の母体となることから、木星や土星の衛星系形成の理論的解明に繋がる。

今後の動向・探査計画：JUICE を筆頭に、木星・土星衛星系の探査が計画されている（詳細は APPENDIX-1）。新たな試みとして、木星の地震波や土星リングに励起された振動の検出を契機にして、木星の自由振動の地上観測から内部構造を探る計画（JOVIAL）も進行中である。

氷惑星（天王星・海王星）

科学的意義・工学的ハードル：天王星と海王星は Voyager 2 号のフライバイ以降、地上望遠鏡や地球周回衛星（例、HST や Spitzer）による大気観測を除いて、30 年近くの長きに渡り、スペースベースの直接探査は実施されていない。そのため、内部構造や熱史に加えて、自転周期さえ、未だ議論されている。今後、Juno や Cassini と同水準な大型探査計画の推進が不可欠であり、i) 氷惑星の大気組成および希ガスの存在度、ii) 重力場計測に基づく内部構造の推定（鉄・岩石/氷比率、大気量、差動回転の有無および深さ、深部の氷物性）、iii) 磁場の強度分布や自転速度の測定が実施されることによって、謎に包まれた氷惑星に対する我々の理解が大いに深まる。近年、太陽系外で海王星サイズの惑星が多数発見されている事実からも、天王星や海王星をベンチマークとして、太陽系外の海王星サイズの惑星の起源解明に対する貢献も期待される。

今後の動向・探査計画：今後 10–20 年で、天王星や海王星の包括的な理解を目指した探査計画が米国を中心に議論されている（詳細は APPENDIX-1）。

#### (a.1.7) 氷天体（氷衛星、Kuiper-Belt 天体）探査

科学的意義・工学的ハードル：従来探査はいくつかの氷天体に対して生命を育み得る条件（液体、エネルギー、有機物の長期的安定的共存）を有する可能性があることを明らかにしたが、フライバイ探査や観測機器性能の制約から情報は極めて不十分であり、可能性の域を出ない。今後は各天体の全容を精査しその物理化学的特徴を把握する「環境調査」を、実証的に行う必要がある。そのための、高精度かつ軽量の質量分析装置や、表面の掘削（地下海への到達）機構や潜水装置、揮発性物質や複雑有機物の非変質捕獲装置の開発が必要とされるとともに、長期間の運用を可能にする放射性同位体電池（特に土星系以遠）、そして木星や土星系調査では高度の放射線耐性が全ての機器において必須である。

今後の動向・探査計画：氷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.1.8) 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。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 (2021 年打ち上げ予定) 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、ESA-M4 ミッション ARIEL (2028 年打ち上げ予定) は系外惑星専用望遠鏡として提案されており、1000 個程度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。なお、2018 年より ARIEL への日本からの参加が検討されている。また、2030 年前後に打ち上げ予定で、日本も参画している ESA-M5 候補の赤外線望遠鏡 SPICA は、JWST より超波長に感度があることと 12-18 $\mu$ m で高分散分光が可能であることにより、相補的な特徴付けが期待される。

##### (B) 公転周期が 100-10<sup>4</sup> 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、アストロメトリ法に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 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ーの検出

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 (O<sub>2</sub>) やオゾン (O<sub>3</sub>) といったバイオマーカーの検出は難しい。一方、日本が提案に参画している紫外線宇宙望遠鏡 WSO-UV は広がった酸素原子 (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、バイオマーカー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活動圏の拡大、居住可能性の検討にまで目標が広がっていくであろう。つまり、**太陽系における生命生存可能環境** (Continuous HAbitable Solar-system Environment、CHASE) の理解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持続性**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、このような環境を持つ天体群がいかに形成したのかという「**A. 生命生存可能環境の形成**」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と初期分化の理解がこれに含まれる。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、生命前駆物質の化学進化を経て、生命につながる環境群が形成された。もう一つは、化学反応ネットワークや物質循環シ

システムをもつ天体がどこにどれだけのくらの期間存在するかという「B. 生命生存可能環境の持続性」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、化学反応ネットワークの特性とその決定要因（熱・内部進化、水・表層環境、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、反応場のみならず初期地殻・大気・海洋、天体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。これら二つの問いに対する理解を統合することが、宇宙における生命生存可能環境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形成」に答えるものとして、既にプロジェクト化された「木星氷衛星探査計画(JUICE)」や「小型月着陸実証機(SLIM)」があり、Martian Moons eXploration (MMX) (b.1.1.1)、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)も計画されている。さらに、地球接近小天体探査(DESTINY+) (b.1.2.1)、月極域探査(b.1.4.1)、HERACLES 計画(b.1.4.2)、月・火星の地下空洞探査 (b.1.6.2) (b.1.6.3)も続く。また、「B. 生命生存可能環境の持続性」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」、プロジェクト化された「みお」「JUICE」に加えて、上と同様に MMX、OKEANOS が計画されている。さらに、火星宇宙天気・気候・水環境探査 (MACO) (b.1.2.2)、系外惑星観測 (b.1.5.1) (b.1.6.4, b.1.6.5, b.1.6.6) が続き、火星地下圏・生命圏着陸探査 (b.1.1.3) へとつながる。

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）を探査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、具体的な探査目標は天体ごとに異なるために再整理する必要がある。探査内容と対象を整理すると、

「A. 生命生存可能環境の形成」に関しては

- A1. 惑星・衛星の形成・分化：月、水星、火星、分化小惑星（ベスタ、E型小惑星など）
- A2. 惑星材料物質・揮発性分子の分布・移動、天体への供給：月、小惑星、彗星
- A3. 生命前駆物質の化学進化：彗星、始原的小惑星、惑星間塵

「B. 生命生存可能環境の持続性」に関しては

- B1. 水環境・表層環境・物質循環：火星、氷衛星、始原的小惑星、系外惑星
- B2. 大気進化・大気循環：火星、金星、ガス惑星、タイタン、系外惑星
- B3. 生命およびその痕跡：火星、氷衛星

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 B3 の分類に従って、日本の戦略を述べる。

A1 では月および火星が重要な探査対象となる。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。月離着陸実証探査を通じて、月の大部分を構成するマントル、マグマオーシャン固化過程の記録を留める初期地殻や KREEP を含む物質を得ることは、地球型惑星形成領域の初期状態を知る上で極めて意義深い。さらに月の内部進化は、より大きな岩石惑星の内部進化の雛型であり、その熱史・火成活動史の解明は火星や地球において表層環境の変遷に重要な影響を及ぼした内部活動の歴史を解明する上でも重要な意味を持つ。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 探査は、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。さらに、水星についても、その巨大なコアや特徴的な地殻組成、固有磁場の起源を明らかにすることは、内側太陽系における惑星形成史を実証的にひも解くことに直結する。

A2 については、日本においては月探査と小天体探査が有効である。特に、揮発性物質の受け手である月や火星、その送り手である小天体にそれぞれ含まれる揮発性分子の化学・同位体組成を解明・比較していく戦略が肝要となる。月極域探査は、地球—月系の水の供給史に実証的に迫るものであり、また火星衛星探査は、衛星の成因の解明のみならず、火星領域における揮発性物質獲得過程を探る上でも不可欠であ

る。さらに月については、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クレータ年代学を精密化できる。これと小惑星・彗星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。特に、木星トロヤ群や短周期彗星に含まれる揮発性分子の化学・同位体組成の解明は、地球型惑星形成領域への水や揮発性分子の送り手に関する物質科学的制約であり、惑星材料・揮発性物質の分布や起源を知る上で不可欠な情報を与える。

A3については、日本が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。これと先進的な地上分析を組み合わせることによって、生命前駆物質やその他の複雑な有機分子が、単純な分子種から、どのような場でどこまで化学進化したかを実証的に明らかにする路が拓ける。メインベルトや彗星からのSRは、ミッション期間が10年を超える未踏の探査であり、短周期彗星やトロヤ群天体が重要な対象となるであろう。

B1については、火星探査と氷天体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、大まかな火星史が解読されている。今後は、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が重要となる。とりわけ、水の存否を超えた、現在や過去の火星における水環境（水の化学的特性）や物質循環（大気や水の循環とそれに駆動される表層物質の化学反応、および気候、火成活動、磁場、太陽活動などその内的・外的支配要因）の理解は、未だ謎が多く、生命生存可能性に直結する探査項目となる。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や国際協働探査を含めて、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、火星の環境進化史の理解につながることも期待される。氷衛星あるいは氷準惑星は、地球や火星の地下水圏と対比できる場であり、その理解は地下生命圏の成立過程を理解する上で欠かせない。JUICEは木星氷衛星探査を目指しており、我が国の関わる氷衛星探査の端緒となると期待される。今後10年程度のスパンでは、系外惑星の大気からその表層環境を推定する観測も本格化する。系外惑星観測においても、太陽系天体の表層環境の理解は不可欠のグランドツールであり、観測と探査の有機的連携が求められる。

B2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り、これに系外惑星の大気観測が加わる。特に、光化学反応や大気循環、大気散逸といった観点から生命生存可能環境の進化の理解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。また、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、火星宇宙天気・気候探査の果たす役割は大きいものとなる。さらに、系外惑星の大気観測（大気化学反応、大気散逸）も重要な項目である。今後20年で、惑星大気観測の主たる対象は、太陽系天体から系外惑星へと移行することは確実であり、そのような中、地上望遠鏡では観測の難しい波長（紫外光など）での大気観測や長期トランジット観測は、国際情勢の中でも独自性・重要性が高い。JUICEを通じた木星大気循環の理解は、このような系外惑星大気理解と相補的な関係を構築し推進すべきである。

B3に関しては、火星および氷衛星での有機物、生命生存可能環境の発見が相次いでいるなか、これらを発展させる形で今後重要性が増すことは必須であろう。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（A3）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。将来の国際宇宙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・(d)章にまとめた。

## (b) 具体的戦略

### (b.1) 惑星探査プログラム案

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、水環境・表層環境、大気進化・大気循環、生命およびその痕跡のそれぞれにおいて、**生命生存可能環境の進化**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、惑星材料物質や揮発性分子の分布・移動や天体への供給、生命前駆物質の化学進化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-月系への天体衝突史の記録媒体であると同時に、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、生命生存可能環境の形成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、原始火星へ揮発性物質をもたらした小天体由来の可能性の高い**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)。また、はやぶさ・はやぶさ 2 で培った電気推進技術を向上させ、軽量深宇宙航行技術実証を兼ね、地球型惑星への揮発性物質供給の一翼を担っていたとされる**惑星間塵ならびに流星群母天体を探査する公募型小型ミッション**(b.1.2.1)を進める。また、カプセル放出後も航行を続行するはやぶさ 2 の観測リソースを活かし、これまで接近例のないタイプの小天体フライバイ観測を進めることも有益である。

さらなる小天体探査に関しては、IKAROS により実証されたソーラー電力セイル技術を発展させ、惑星材料物質が凍結保存されている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**を戦略的中型ミッションとして目指す (b.1.1.2)。また日本が培ってきた小天体サンプルリターン探査技術を活かし、インパクト実験などにより地球接近天体の物理特性を解明する近地球小惑星探査 (b.1.5.1)、生命の原物質となりえる高揮発性成分を豊富に含む内部太陽系初訪彗星の待ち受け探査 (b.1.5.5)、彗星サンプルリターンミッション (2019 年にダウンセレクションとなった CAESAR の後継または類似の計画) 等、海外小天体探査への機器・技術提供を進める。

火星本体への展開としては、日本の独自性を生かし、水環境・表層環境・物質循環に係る火星地下水圏・生命圏へのアプローチを段階的に進めることを提案する。まず、火星周回・探査技術実証を兼ねた**火星宇宙天気・気候・水環境の探査**を公募型小型ミッションとして行い、着陸精査すべき地域を抽出する (b.1.2.2)。そして、**火星地下水圏・生命圏の着陸探査**を戦略的中型ミッションとして実施したい (b.1.1.3)。これらは、火星衛星探査と併せ、人類の活動圏の拡大を主目的とする**国際宇宙探査** (b.1.3) への貢献も期待される。

月科学はアポロ計画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、地球の起源と分化の理解をも刷新した。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・研究体制を培い、また SLIM においてピンポイント着陸技術を確立しようとしている。地球では失われた前生命環境を解明するうえでも、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。他方、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着陸探査や SR 探査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。我が国が主導する、あるいは、重要なパートナーとして参加する新たな月探査の機会を活かし、**揮発性物質探査、内部構造探査、SR にいたる包括的な科学調査**を推進することを提案する (b.1.3.1) (b.1.3.2)。

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.1.4) と (b.1.5) に記載する。

探査計画全体の流れに関しては、最終ページにあるロードマップ (図 2) を参照のこと

## (b.1.1) 戦略的中型提案

### (b.1.1.1) 火星衛星探査計画 (MMX) [2024 年]

**背景と目的：** 戦略的中型探査計画 1 号機として 2024 年の打ち上げを目標に準備が進められつつある火星衛星探査計画 MMX (Martian Moons eXploration) は、近傍観測によって火星衛星の表層組成や内部構造を調べるとともに、フォボスからのサンプルリターン (SR) を行うことによって、(1) 衛星の起源および進化、(2) 初期太陽系における物質輸送ならびに火星形成過程 (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)、(3) 火星表層の進化を駆動する大気過程や古環境を解明・制約することを目的とする。

火星の衛星フォボス・ダイモスは、太陽系において三つしかない、地球型惑星の衛星の二座を占める。共に低アルベドで D 型/C 型小惑星に類似する反射スペクトルをもつ一方、ほぼ火星赤道上の円軌道をとるという特徴がある。その成因について、反射スペクトルに整合的な始原的小惑星の捕獲 (捕獲説) と、軌道に調和的な火星周囲の破片円盤からの集積 (円盤説または巨大衝突説、地球の月の成因に類似) の間で論争が続いている。これまでに複数の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。

MMX は SR 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をつける。特にフォボスに関して、詳細地形撮像、レーザ測距、可視・赤外分光撮像、中性子・ガンマ線分光、イオン質量エネルギー計測、ダスト計測、ローバ探査を実施し、ダイモスの観測と併せて衛星の起源に独立な制約を与える。そして、試料分析と組み合わせ、初期太陽系における物質輸送ならびに火星形成過程に迫る。SR 試料からは火星起源物質を抽出し、その同位体・年代分析か

ら火星古環境の制約を試みる。火星大気のグローバル観測を並行実施し、火星表層環境の進化を駆動する大気諸過程を明らかにする。

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、将来の本格火星探査への布石としての側面と、はやぶさシリーズの継承・発展形としての側面がある。そのため双方のコミュニティからの研究者の参画が実現しており、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検討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、中性子ガンマ線分光計と近赤外分光撮像装置がそれぞれ NASA と CNES、ローバが CNES と DLR により開発・供給されることが確約され、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、初期太陽系の進化、火星圏環境進化に対して制約力を高めることに貢献できる。また、火星衛星は将来の火星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。

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 計画と PANDRA 計画がフライバイ探査として、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たミッション期間を短縮できる化学推進と分離式モジュール構成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 レベルに増量し複数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、望遠カメラ (TENGOO)、ライダー (LIDAR)、多色広角カメラ (OROCHI)、近赤外分光イメージャ (MacrOmega)、ガンマ線中性子スペクトロメータ (MEGANE)、ダスト分析器 (CMDM)、質量分析装置 (MSA)、ローバが選定され、それぞれ設計開発が開始されている。海外提供装置の開発に、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：2019 年度中にプロジェクト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、科学面については海外機関研究者の参画の下、北大、東北大、東大、東工大、名大、神大、国立天文台、立大、千葉工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、サイエンスサブチームの構築が進んでいる。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 [2030 年頃]

背景と目的：本ミッションは木星トロヤ群小惑星にランデブーし、全球のリモセン観測と着陸機による詳細な表層直接探査を行う戦略的中型計画として提案中であり、2030 年頃の打ち上げを目指す。小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS の大面積薄膜の展開・発電技術と、はやぶさ・はやぶさ 2 の電気推進技術を進展させた高比推力のイオンエンジンを組み合わせたソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査を行う工学ミッションが第一義的目的である。この技術は中型規模の探査機で木星系・土星系など外惑星系天体へのランデブーやサンプルリターンを実現できる唯一の手段である。しかし低コスト化の必要性から、高比推力イオンエンジンの技術実証は実施するが台数削減して化学推進で補填する案 1 と、化学推進とソーラーセイル (光圧推進) で実施する案 2 とで、比較検討中である。

木星トロヤ群小惑星は、主に D/P 型の揮発性成分 (氷や有機物) に富む小惑星群であり、太陽系の起源・進化や地球への水や有機物の供給源を理解する上で不可欠な探査対象である。過去に探査例はなく、隕石試料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・進化過程の解明のため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木星型惑星の移動を解き明かす鍵となる。

巡航中は深宇宙観測プラットフォームとして活用する。地球から木星への軌道上ではダストや磁場の動径方向観測や黄道光の観測を実施、木星軌道到達後は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検討している。

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、OKEANOS では D/P 型小惑星を目指す。2021 年に打ち上げ予定の NASA の Lucy は複数のトロヤ群小惑星をフライバイ観測し、これらの多様性を明らかにするが、OKEANOS は 1 つの天体を詳細に分析するという相補的な関係にあり、科学的成果におけるシナジーが期待される。惑星形成理論から、木星トロヤ群小惑星の起源が惑星形成時の木星型惑星移動と密接に関係していると推定される。木星トロヤ群の

サイズ分布、カラー分布、総質量、自転周期分布等の物理特性を調べる地上観測とも連携して、惑星形成過程の解明につなげることができる。

**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：水質変質（含水鉱物）の有無や水素・窒素の同位体比測定からトロヤ群の起源（形成場所）を明らかにすることにより、惑星形成論を制約できる。トロヤ群が太陽系外縁部起源であった場合は、ニースモデルなどの木星型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。(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。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で、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。(4)小天体の形成・進化：天体表面の観測や物性値の測定により、天体内部の熱史や表面の風化・浸食といったスノーライン以遠の小天体の形成・進化過程を明らかにする。(5)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：**軽元素の同位体分析や有機物質量分析を行うために小型・高性能の質量分析装置（HRMS）を、段階加熱・高温熱分解炉等の試料前処理機構とともに開発中である（詳細は b.2 参照）。試料採取機構として、はやぶさ・はやぶさ2をベースとする表面サンプリングと、新規開発の地下サンプリング（最大深さ 1m）の開発を進めている（地下サンプリングはリソースの関係で非搭載）。赤外分光などの観測装置は主に宇宙実績のある海外機器を搭載予定である。着陸機は 40kg クラスの MASCOT 型のもを DLR と国際協力で開発予定である。また、クルージングサイエンス機器も既開発品をベースとしている。搭載機器一覧を表 S4 に示す。

**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 2018 年度でプリフェーズ A2 終了、現在は次の戦略的中型ミッションの AO に向けて準備中である。DLR との Joint Study による着陸機の検討も実施中（LOI 締結）である。観測機器は国際協力体制で推進している。

### (b.1.1.3) 戦略的火星探査：火星地下水圏・生命圏の着陸探査計画 [2030 年代前半]

**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。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) 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、2) 初期火星温暖化機構の制約、3) 水素・炭素の表層リザーバサイズと水散逸史の制約。

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。近年の探査により、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）、有機物の存在が明らかとなっている。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：**本提案の科学的意義・波及効果を下記の7項目にまとめた。

- 1) 地下水のキャラクタリゼーションとハビタビリティ：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ーの推定を行うことができる。
- 2) 温暖化機構の制約：炭酸塩の組成から溶存炭酸イオン濃度とpHが推定できれば、溶存平衡にある大

気CO<sub>2</sub>分圧やその温室効果も理論的に推定できる。地球型惑星のハビタブルゾーンの外側境界は、火星の理解に基づき設定されており、火星の温暖化機構の制約は、ハビタブル惑星の探索可能性の見直しにもつながり、系外惑星学への波及効果も大きい。

- 3) 物質循環と水散逸：本提案では、炭酸塩の炭素・酸素同位体および蛇紋石の水素同位体測定も行う。炭酸塩の同位体比測定は、当時の炭素循環に関するリザーバの存在を定量的に制約することを可能にする。加えて、蛇紋石が含む水素同位体比を測定することで、当時の水の水素同位体比や水散逸量を推定することができる。炭素循環に関する情報は、地球化学の惑星探査への本格的参入を促し、水散逸史の制約は、固体惑星分野と超高層磁気圏分野との協力関係の構築につながる。
- 4) 現在の火星活動：生命生存環境の観測はとりもなおさず現在の火星の活動と将来予定される有人宇宙探査への居住可能性を検証する観測となる。重要な観測として地下における氷および水の数cmから数十m規模での存在状態の探査、関連した熱流量と、鉱物や地質解析が含まれる。とりわけ、RSLなどの現在も活動的な場所が重要なターゲットとなり、また掘削探査も視野に入れる必要がある。
- 5) 有機物の探査：有機物の起源としては宇宙由来（隕石等）あるいは、生物／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、地球生物学を宇宙に通じる「生物学」へと一変させる、生物学におけるCopernicus的転換となる。発見されない場合でも、有人火星探査の安全、惑星保護の確認のための必須の探査である。
- 7) 地下空洞探査：隕石による破壊や角礫岩化、太陽風による変成、ダスト嵐による攪拌効果、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。

**主要キー技術と開発状況：**上記の探査を行うための着陸可能候補地の1つがMcLaughlinクレータである。同クレータは、熱水活動に由来する地下水の湧出口であり、クレータの底には炭酸塩や蛇紋岩などの粘土鉱物を含む層状堆積物が10-20 kmの範囲に存在している。また、Isidis basinの南側のクレータ壁やNilosytis Mensaeといった南北半球境界の斜面にも粘土鉱物や炭酸塩が露出しており、これら地域では広範囲に地下水および熱水の湧水があった可能性がある。上記地域およびRSLへのアクセスにはいずれも斜面への高精度の着陸技術を必要とするが、SLIMによるヘリテージを活かしつつ、今後の重力天体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 $\alpha$ プロトンX線分光計および近赤外分光計、あるいはレーザ誘起分光分析装置およびラマン分光計の2種類の組み合わせが考えられる。また、同位体分析用の質量分析計も必要となる。これら機器の開発は構想段階であり、海外協力を得つつ進める。

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

## (b.1.2) プログラム的小型計画案

### (b.1.2.1) 深宇宙探査技術実証機（DESTINY<sup>+</sup>） [2022年]

**背景と目的：**近年の隕石、彗星、小惑星、惑星間塵、星間塵における様々な有機物の発見から、地球生命の前駆物質となった有機物や炭素質物質の外來仮説実証は、惑星科学、天文学分野の第一級の課題として精力的に研究が進められている。地球に飛来する固体微粒子（以下、ダスト）は年間4万トンを超え、炭素質隕石の数倍の炭素量を含むため、地球外からの主要な有機物供給源と考えられている。流星群ダストはダストトレイル経由で地球に到達し、由来天体が特定される点で科学的意義が高い。流星群母天体は軌道離心率が大きく地球との相対速度が大きいため、フライバイのみが実現可能な探査手段である。主要流星群の一つであるふたご座流星群の母天体の小惑星(3200) Phaethonも軌道離心率が大きく相対速度は秒速35kmである。Phaethonは彗星と小惑星の特徴を併せ持つ炭素質小惑星で、太陽に0.14 auまで接近し、近日点(0.14au)付近でダストを放出する活動的小惑星である。本計画は、地球生命の種となる有機物の地球外來仮説実証を大目的に据え、地球への有機物供給源である「ダスト」の実態と起源解明を目指し、ダストの輸送経路である①惑星間空間、②ダストトレイル、③ふたご座流星群母天体の小惑星 Phaethon を探査機で辿り、ダスト粒子毎の質量、速度、飛来方向、化学組成のその場分析、及びPhaethonの地形及び地質調査を目的とする。最接近フライバイ距離は500kmを想定。エクストラミッションとして、Phaethonからの分裂天体と考えられている小惑星2005UDのフライバイを計画している。

搭載予定機器は、(1)追尾機能を有する望遠カメラ(TCAP)、(2)可視近赤外域の多バンドカメラ(MCAP)、及び(3)衝突電離型ダスト検出器と飛行時間型質量分析計が一体となったダストアナライザ(DDA)である。

**領域内での位置づけ：**本計画は、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方針」内の1) イプシロンロケット高度化等を活用した低コスト・高頻度な宇宙科学ミッションの実現、及び2) 大型ミッションによる本格探査に備え最初の約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の設定、の二項目に対応する。本計画の大目的は、日本惑星科学会の長期ビジョン「太陽系生命環境の持続(Continuous Habitable Solar-system Environment, CHASE)」に即する。「ダスト」を切り口に、惑星科学及び天文学の分野横断的な連携により、地球生命の起源、太陽系物質進化及び惑星形成論という普遍的課題に取り組む。

**サイエンス成果が与えるインパクト：**惑星間空間におけるダストその場分析から期待される成果は以下の通り。①大気圏通過の影響を受けていないダストの物理化学データを踏まえ、成層圏や地上で回収されたダスト分析や地上・宇宙望遠鏡による惑星間・星間ダスト観測に基づく地球飛来ダストの従来理解が検証できる。②ダストの化学組成及び地上分析で得られないダストの軌道情報に基づき、ダスト粒子毎の由来が制約可能となり、惑星間ダストの全体像への新たな制約が得られる。③速度と到来方向に基づき特定される星間ダストの化学組成から、太陽系に流入する星間ダスト中の有機物の存在有無が明らかになる。④星間ダスト、ダスト放出炭素質小惑星の周辺ダスト、惑星間ダストといった、一連の太陽系物質進化過程を代表する物質情報が得られる。また、世界初の活動的小惑星かつ太陽接近小惑星の近接撮像により、太陽加熱を受けた始源天体における有機物の残存条件、分裂・崩壊・衝突、塵の放出といった、太陽系小天体の普遍的な物理化学進化プロセスの理解への重要な手掛かりが得られる。

**主要キー技術と開発状況：**本計画はイプシロンロケット打ち上げで電気推進による宇宙航行技術の実証及び高速フライバイ撮像を技術的目標とする。目標天体に対する電波・光学複合フライバイ航法及び視線追尾制御による天体の近接・高速フライバイ観測がキー技術となる。理学観測では、世界初の高速追尾機能を有する望遠カメラ及び、高速フライバイにおける多色観測を可能にする「複眼式」多バンドカメラという新規技術に挑む。また、ハレー彗星探査以降、探査機搭載ダスト分析装置の開発実績を積んできたドイツチームの協力により、Cassini 搭載 CDA を小型、軽量化した世界最高性能の衝突型ダスト分析装置の開発を進める。陰イオンと陽イオンを分析する二台のダストアナライザを搭載することで、より多くの有機物分子種の特定を目指す。三機器共に概念設計フェーズをまもなく完了し、2020年度から基本設計フェーズに移行する予定である。上記三機器の開発を通じ、フライバイ探査の成果最大化を目指した観測機器パッケージの開発・整備を図り、小天体探査機会の拡大と充実を目指す。

**準備検討体制：**JAXA/ISAS の「2015年度公募型小型計画宇宙科学ミッション」公募に応募し、理工合同委員会による二度のミッション定義審査を経て2017年4月のISAS所内計画審査と同8月の所内プロジェクト準備審査に合格した。今年度概念設計フェーズから基本設計フェーズに移行予定である。本計画は理工連携ミッションであり、ロケット・探査機の開発はISASが、サイエンス推進とカメラ開発は千葉工業大学を中心となり進める。ダストアナライザはDLRとの国際協力により提供され、シュツツガルト大学が中心となり開発を進める。理学ミッションの計画立案には、日本惑星科学会、天文学会に所属する研究者、欧米の惑星科学・天文学分野の研究者、アマチュア天文家など、合計20機関の研究・教育機関に属する総勢約60名が協力・参加した。サイエンスチームは上記研究者に加え、ロゼッタ、はやぶさ2、OSIRIS-REx チームメンバや Phaethon・2005UD の地上観測協力者も合わせ、総勢約100名の国内外の研究者で構成される。2017年12月に Phaethon、2018年10月に2005UDの国際観測キャンペーンを組織し、国内外の研究者の協力を得て地上及び宇宙望遠鏡により測光、分光、偏光、電波観測を行った。観測結果は、2018年2月と2019年2月に千葉工業大学で主催した国際シンポジウムにて情報共有と議論を行った。また、2019年7月から10月にかけて、Phaethonによる恒星食観測の国際キャンペーンを行い、欧米、アフリカ、日本で観測が成功した。

#### (b.1.2.2) 戦略的火星探査：周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査(MACO)計画 [2028年頃]

**背景と目的：**生命生存可能(ハビタブル)惑星成立の条件は何なのか。この人類の根源的な問いに対し、今後の太陽系探査において、太陽系におけるハビタブル環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となっている。約40億年前の火星は海を持ち湿潤な気候であったと推定される一方で、現在の火星は寒冷乾燥な気候をもつ。従って火星は、過去にハビタブルな環境を保持し、進化の過程でそれを失った地球外太陽系天体として、ハビタブル環境の持続性を調べるために国際的にも重要な探査対象となっている。火星がハビタブル環境を失った際の大規模な気候変動を引き起こすには、多量の水とCO<sub>2</sub>大気が地下に貯蔵もしくは宇宙空間に流出して表層環境から取り除かれる必要がある。その中で、過去の激しく変動

する太陽条件下での宇宙空間への CO<sub>2</sub> 大気の散逸機構の解明が、喫緊の要請となっている。すなわち、本計画で提案している、ICME などの極端な太陽変動への大気散逸現象の応答の観測は、過去の太陽で頻発した極端現象への瞬時応答の理解を通して、従来の統計的描像から脱却した過去への演繹を可能とし、火星宇宙天気・気候研究にブレークスルーをもたらすと期待されている。

また、現在の水循環を理解するのみならず、生命探査や有人探査を行う上でも、現在の火星に液体の水が存在するかは重要課題であり、斜面上に現れる暗い筋模様（RSL）の成因が流水なのか、水とは関係ない重力流なのか、その成因の解明が待たれている。本計画では、RSL の成因を火星飛行機等による高解像度観測等から同定し、現在の火星表層での水の有無を明らかにする。さらに、周回機によるレーダーサウンディング等により広域的な浅部地下帯水層・氷層の空間分布を明らかにし、将来の着陸探査、有人探査に向けて候補地点選定に重要なデータ取得も目的としている。このように本計画は、ハビタブル惑星の理解に向けて、周回・探査技術実証機により火星における宇宙天気・気候・水環境を探ること、火星総合探査に向けた技術実証を目指しており、具体的には、3 つの達成目標を掲げ、その実現に向けて 8 つの観測項目、11 種類のモデル科学機器を設定している（APPENDIX-3 参照）。

**領域内での位置づけ：** 今後 20 年程度の太陽系探査において、太陽系における生命生存可能環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となっている。その中で火星は、ハビタブルな環境を保持していた地球外太陽系天体として、比較惑星学および宇宙生命学的研究を行う上で理想的な天体といえる。2030 年代には国際協働による火星サンプルリターンが計画されており、そこで日本が主導的な役割を果たすためにも、太陽の影響を受ける大気と浅部地下環境の共進化過程に着目した我が国独自の火星探査の実施が喫緊の要請である。本計画は、JAXA 国際宇宙探査センターの火星タスクフォース報告書にて、国際協働宇宙探査に向けた我が国の戦略的火星探査の MMX に続く重要な一歩（APPENDIX-3）として位置づけられている。また、周回機部分は、JAXA 宇宙科学研究所（ISAS）の火星大気散逸探査（のぞみ後継機）検討 WG 等を中心に検討してきた探査計画が母体となっており、日本学術会議のマスタープラン 2017 の大型研究計画「火星における宇宙天気・宇宙気候探査計画」として選定されている（計画番号 79、学術領域番号 24-2）。また、ISAS に学会から提出された工程表のうち、太陽地球惑星圏研究領域の工程表（SGEPSS）と太陽系・系外探査プログラムの工程表（日本惑星科学会）に記載されている。

**サイエンス成果が与えるインパクト：** 本計画は、過去の太陽で頻発した極端現象への惑星圏環境の瞬時応答の理解を目指した火星宇宙天気・気候探査計画であり、火星をとりまく宇宙環境の新たな観測手段を開拓し、過去 40 億年にわたり宇宙への大気散逸が火星の気候変動にどのような影響を及ぼしてきたのかを明らかにすることで、火星圏研究にブレークスルーをもたらすと期待されている。多数の系外惑星が発見される中、主星の活動と惑星圏環境の関係を理解しようという宇宙気候探求の機運が高まっており、本計画で得られる知見は、系外惑星がどのような大気と表層環境を持ちうるか（ハビタブル環境を持つか否か）を推定する知的基盤を提供する。また、本計画で実現する宇宙放射線環境や表層・浅部地下水環境の把握は、将来の着陸探査や火星有人探査に不可欠な知見を提供する。本計画は、学術的な価値に加えて、人類の活動領域を火星へと拡大するために重要な探査である。さらに工学的には、重力天体突入・降下・着陸に関する着陸探査に向けた航空宇宙工学、ロボット工学等の幅広い発展が促され、総合的な技術の体系的な獲得が可能となる。

**主要キー技術と開発状況：** 本計画では、11 のモデル科学機器を設定しており、その開発状況・搭載実績等は付録の表 S5 の通りである。一方で、探査機システムとしての周回機と着陸技術実証機の組み合わせは、APPENDIX-3 に記載されているように規模に応じて複数の解が考えられており、今後の検討課題となっている。ただし、最小規模のエアロキャプチャオービターであっても、搭載科学機器としてオプションを除く総重量約 40kg、電力約 90W が搭載可能であれば、達成目標のうち、1 と 2 は達成できる。各探査機システムに関する主要キー技術と開発状況については、APPENDIX-3 を参照いただきたい。

**準備検討体制：** 太陽惑星系科学、惑星科学、宇宙空間物理学、航空宇宙工学、天文学、アストロバイオロジーなど幅広い専門分野を持つ理工合同の研究者チーム（約 90 名）により検討されている。これまでに、ISAS 旧火星大気散逸探査検討 WG が得た戦略的開発経費により、ミッション要求に基づいた探査機システム検討を行い、周回機については軌道設計や科学機器配置等も含めて成立解があることが確認された。また、各観測機器の開発要素の検討については、科研費や基礎開発経費、各担当者の持つ資金で行っている。なお現在、月から火星への探査を推進する米国等から国際宇宙探査の枠組みで火星周回探査における協働の可能性の打診などを踏まえ、国際協力による戦略的中型計画での実施の可能性も並行して検討している。

### (b.1.3) 延長計画

#### (b.1.3.1) はやぶさ 2

**背景と目的：** 「はやぶさ 2」は 2020 年末に地球に帰還予定で、試料入りのカプセルを放出後、母船はダイバート（離脱）する予定である。現時点の残燃料などを考慮すると、複数回の惑星スイングバイを経て、小惑星のスイングバイはもとより、ランデブーも可能性があることわかった。本延長ミッション

ンでは、航行中に得られる科学的成果に加え、最終的には未踏の小惑星にランデブーし、科学観測と表面探査を行うことを目的とする。

領域内での位置づけ：現時点において、2つの軌道ルートについて検討が進められている。一つは金星スイングバイを行ったのちに高速自転小惑星にランデブーするケースである。この場合は金星において、比較的シームレスな観測が実現でき、長期気候変動の確認や成因解明に寄与できるという位置づけである。もう一つはLタイプの小惑星をフライバイした後に高速回転小天体にランデブーするケースである。Lタイプの小惑星は直接探査されたことがないため、フライバイでも価値は高い。また、Destinyに先行してフライバイが遂行されるために、絶好のプリカーサーミッションと位置づけられる。上記の両ケースに共通するランデブー目標は、遠心力が重力を上回る高速自転小惑星（到着する天体は異なる）である。このような天体は直接探査されたことがなく、一枚岩天体なのかラブルパイル天体なのか、粒子放出があるのかなど解明すべき謎が多い。

サイエンス成果が与えるインパクト：航行中では数回の地球スイングバイを利用した搭載機器の性能評価、また、黄道光観測などが提案されており、宇宙空間を用いて可能になる理学成果が期待される。また、10年程度の長期間を必要とするものの、探査されたことがなく理学的にも価値の高い対象天体にランデブー可能であることは、地球への物質輸送過程の研究に関して、「はやぶさ2」がこれまでに挙げた成果に匹敵する新たなインパクトが期待される。なお、「はやぶさ2」にはプロジェクトが残り残されており、これらの射出試験を通じたアクティブな実験も可能であることも期待できる。工学的な面においても、航法誘導制御技術試験、イオンエンジン長時間運転、精密軌道決定などが実証でき、将来の探査技術の大きな礎となり得る点においてインパクトは大きい。

観測（装置・運用）：はやぶさ2には光学カメラ（ONC）、中間赤外カメラ（TIR）、近赤外スペクトルプロファイラ（NIRS3）、測距（ダスト）計測レーダー（LIDAR）を搭載しており、タッチダウンに伴う性能変化（劣化）は確認されているものの、いずれも健全で科学観測が可能な状態を維持している。

検討推進体制：現時点においてははやぶさ2工学システムおよびサイエンスチームの有志で構成するメンバーで検討を進めている。10年がかかりの長期ミッションになるために、今後、「はやぶさ2」にあまり関わってこなかった方、特に若手の研究者についても広く呼びかけ、惑星探査ミッションの後継者を育成することも積極的に行う。

### (b.1.3.2) あかつき

背景と目的：金星は地球とほぼ同じ大きさの惑星であるが、地球と大きく異なる環境を持つ。火山地形におおわれた地表、海は存在せず乾燥した濃い二酸化炭素の大気、それがもたらす大きな温室効果、硫酸の雲、といった環境の形成を地球との比較の観点から理解することは、地球がなぜハビタブルな惑星になれたのかという根源的な問いに答えるための鍵となる。これまでの観測で金星の基本的な特徴は分かったが、そのような姿を持つに至ったメカニズムの解明はこれからである。そこで我が国は、これまであまりアプローチされてこなかった大気力学の問題に着目し、金星周回軌道から大気の動きを刻一刻追いかける周回機ミッション「あかつき」を提案した。金星大気はほぼあらゆる場所で自転より遙かに速く西向きに流れており、雲頂にあたる高度70 km付近で100 m/秒に達する。この高速大気循環はスーパーローテーションと呼ばれる。「あかつき」の目的は、スーパーローテーションのメカニズムを解明し、スーパーローテーション大気に特有の様々な気象現象と物質循環を明らかにすることである。そのために紫外から赤外までの多波長の撮像を行い、複数の高度の大気の動きを同時モニターして3次元観測を実現した。

「あかつき」は2015年12月に金星に到着し、2018年3月にノミナル運用を完了したあと、2021年3月までの延長運用を実施中である。数時間から数年にわたる幅広い時間スケールの大気現象をとらえるために、およそ2時間ごとの連続的な撮像を中心とする定常観測を続けている。長期にわたる均質なデータが必要であるため、現在実施中の延長運用が終了する2021年3月まではこの定常観測を行う。実際、これまでに無かったこのようなデータセットによって、高速大気循環のメカニズムなどに関する重要な成果が多く得られている。

領域内での位置づけ：「あかつき」と並行してESAは金星周回機Venus Expressを送り込み、大気化学や地表面組成、惑星周辺の電磁気環境など、主に物質科学的側面から金星を調べた。今後もISRO、ESA、NASAが金星探査構想を持っているが、これらは地表のレーダー探査や大気・地表の物質科学的探査に重点を置いており、大気力学に関して「あかつき」を越えるデータが得られる見込みはない。「あかつき」がもたらすデータは世界の惑星気象学の研究者に広く利用されつつあり、今後も唯一無二のデータセットであり続ける。「あかつき」と協調した地上望遠鏡による観測も盛んに行われている。国内では「あかつき」を契機として、金星を中心に惑星大気の理論的・観測的研究が一層活発に行われ、現在は2019年度から科研費基盤(S)「あかつきデータ同化が明らかにする金星大気循環の全貌」が科学成果を

最大化すべく実施されている。2020年代に予定される日本のMMXにおける火星大気観測には「あかつき」の観測・データ解析の経験が反映されている。

**サイエンス成果が与えるインパクト：**スーパーローテーションを理解することにより金星の気候システムの理解が進み、金星の進化における大気的作用を論じる基礎を築くことができる。また、自転速度や大気量による大気循環パターンの決定プロセスは惑星科学一般における大問題であり、この理解を進めることは系外惑星研究も含めた波及効果を持つものである。観測手法としても、このような気象衛星的な探査は他に例がなく、幅広い時空間スペクトルを持つ惑星の流体现象にアプローチできる観測データを手にしたことで、地球気象学的手法を応用した惑星研究という新たなスタイルが構築されつつある。

**観測（装置・運用）：**2021年4月以降のさらなる延長ミッションでは、これまで手薄だったいくつかの重要な研究テーマに取り組むために、より挑戦的な観測を行うことが求められる。たとえば、(1)機器温度上昇を心配して2時間以上の間隔で実施していた撮像を1時間以下の間隔で行うことにより変化の速い現象をとらえる、(2)光学系への太陽光の漏れ混みを心配して控えてきた真夜中上空からの撮像を行う、(3)観測データを数値シミュレーションと統合する「データ同化」に最適化したサンプリングを行う、などである。データ同化は金星の大気大循環を観測データと整合的に理解し尽くすために必須の、金星大気研究の集大成となる試みであり、上記の科研費基盤(S)「あかつきデータ同化が明らかにする金星大気循環の全貌」と連携する。探査機の寿命を制約する残燃料の推定には幅があるが、このような観測に重点を置いた後期運用を行うことは可能であると期待される。なお、搭載観測機器のうちIR1(近赤外カメラ1)とIR2(近赤外カメラ2)が制御装置の不具合のため使用できない状態となっているが、残るUVI(紫外イメージャ)、LIR(中間赤外カメラ)、LAC(雷・大気光カメラ)、USO(超高安定発振器：電波遮蔽に使用)を引き続き運用する。

**検討推進体制：**これまでミッションを推進してきたJAXAと国内外の研究者からなるサイエンスチームと運用チームが観測計画を立案・実行する。

### (b.1.3.3) ひさき

**背景と目的：**2013年12月から観測を開始した惑星分光観測衛星「ひさき」は、先例のない極端紫外分光観測を武器に、地球周回軌道から主に木星内部磁気圏や金星超高層大気の詳細観測を実施している。さらに、2016年7月に木星軌道投入に成功した米国木星探査機JUNO、2015年12月に金星軌道投入に成功した日本の金星探査機「あかつき」と協調観測を実施し、複数衛星・探査機を用いた研究に取り組んできた。特に、木星磁気圏研究は、国際的な木星磁気圏探査の黎明期に当たり、「ひさき」衛星の極端紫外分光の継続観測が重要な役割を担ってきた。「ひさき」衛星の運用継続によって国際的な木星磁気圏研究をリードし、今後の木星探査においても重要な役割を担うことを目的とする。

**領域内での位置づけ：**磁気圏と大気の動力学は、惑星環境の進化や未来を理解する上で解明すべき重要課題である。宇宙望遠鏡は、惑星動力学を観測する上で最も高品質・長期間のデータを取得できる観測設備だが、ハッブル宇宙望遠鏡など既存の公共設備では、マシンタイムの制約で長期(1ヶ月以上)の監視ができず、動力学の全容は不明瞭だった。世界で唯一の惑星専用望遠鏡である「ひさき」は、極端紫外線分光撮像装置を搭載し、惑星上層大気、外圏大気、オーロラ、ならびに衛星からの散逸ガス(イオ・エンセラダス)を初めて長期間監視することにより、不明だった動力学を明らかにしてきた。

**サイエンス成果が与えるインパクト：**延長ミッションでは、木星や金星を周回する探査機(Juno、あかつき)との協調観測を積み重ね、「ひさき」によるグローバルな磁気圏・大気ダイナミクスの全容と、探査機で高精度に測定された磁場・プラズマ・大気運動を、初めて直接的に関連付ける。特に木星観測では、Junoにより紫外線を発光する磁気圏プラズマをその場観測し、「ひさき」による紫外分光によるプラズマ診断と直接比較できる。これにより、天文学では原理的に絶対不可能である放射源直接測定による放射診断の妥当性の検証が、世界で初めて可能になる。

**観測（装置・運用）：**「ひさき」に搭載されている極端紫外分光器(EXCEED)は、概ね打ち上げ当初の性能を維持している。受光部(MCP)の中で、特に光量が集中する水素輝線波長の近傍領域は周囲と比べて感度低下しているが、あくまで想定範囲内である。なお、高圧電源、チャージアンプ、演算回路部ともに経年劣化の兆候は示しておらず、「ひさき」の延長運用のみならず今後の新規ミッション(例えばロシア宇宙望遠鏡にむけた紫外線分光装置や「ひさき」に続く日本独自の紫外線宇宙望遠鏡)へ向けて長期運用への堅牢性を示したといえる。

**検討推進体制：**現ひさきプロジェクトチーム(主にJAXA/ISAS、東大、東北大、NICT所属研究者と国内外の大学・研究所のPDと大学院生)及び、海外を含む、ひさきサイエンスチーム(NASA Guest investigator program、光学・電波地上観測グループ、JUNO)で推進。

#### (b.1.4) 国際宇宙探査

人類の活動領域を月およびそれ以遠へ国際共同により拡大することを主目的に、日本を含む現行の国際宇宙ステーションの開発運用に関わる諸国が中心となつて進めようとしている、一連の月惑星探査が国際宇宙探査である。国際協力によって実施される宇宙探査すべてを指すものではないことには、留意されたい。

国際宇宙探査のロードマップは、19の宇宙機関（日米欧露中印など）からなる国際宇宙探査協働グループ（ISECG）により検討が進められ、現在その第3版が公表されている。各機関が、国内ステークホルダ等との協議を行う調整用ツールという位置付けであり、国際約束ではないが、閣僚級会合である国際宇宙探査フォーラム（ISEF、H30.3第2回 ISEF2とサイドイベントが東京開催）等を通じて各国の政策担当者や国民との情報共有がなされている。

現行のロードマップによれば、米国が主導して月周回有人宇宙ステーション Lunar Orbital Platform-Gateway（以下 Gateway）を2020年代に建設し、ここを中継基地として月面および火星の有人探査を展開する。同時に有人探査に向けた事前調査・基礎技術の獲得を目的とする無人探査も並行して実施する。

日本においては、深宇宙補給技術、有人宇宙滞在技術、重力天体離着陸技術、重力天体表面探査技術が、国際有人探査において優位性を発揮できる、あるいは波及効果が高いものとして識別され、同時に、科学的成果創出への貢献が重視されている（文部科学省科学技術・学術審議会宇宙開発利用部会H29.12.6）。JAXAは、ISASの科学探査である月精密誘導着陸技術実証を主目的とするSLIM、火星圏往還と火星衛星着陸を目指すMMXを、国際宇宙探査としても位置付け、またインド宇宙機関との共同による水資源の調査を主目的とする月極域探査ならびにESAと共同するGatewayを利用した大規模無人月サンプルリターン計画HERACLESについて、調査検討を進めている。R1.10.18には、月周回有人拠点の整備をはじめとする国際協力による月探査に、日本が参画することが宇宙開発戦略本部から公表された。これら月から火星へと向かう国際宇宙探査は、人類の活動領域の拡大だけでなく、CHASEを柱とする惑星科学の展開にも極めて重要な意義を持つ。

##### (b.1.4.1) 月極域探査計画 [2020年代前半]

**背景と目的：** 現在 JAXA では世界十数ヶ国の宇宙機関が参加する国際宇宙探査協働グループによる活動に参加しており、そこでの議論を受けて国際協働で行う探査をシリーズ化して複数回行う計画としている。月極域探査は、このシリーズ探査の初回としての実施を検討している。政策的には、宇宙基本計画工程表（2018年度改訂）に「月着陸探査活動（インド等との協力）」として記載され、2019年度以降の取組は「国際協力による月への着陸探査活動の実施等についても国際調整や具体的な技術検討を行う」とされている（ただし、本探査は実施が決まったものではなく、実現に向けて検討を実施している段階にある）。本探査は政策的な観点で計画されているミッションであり、科学課題の解明を主とする従来の月惑星探査とは異なる背景をもつ。これまでの月探査の成果から、月の85度以南、以北の高緯度地域には水が固体の状態が存在することが示唆されている。ただし、いずれの観測もリモセンによる間接的な観測であったり衝突により放出された物質を観測した局所的情報であったりと課題もあり、水の存在について確定的な情報は得られていない。そこで本探査では、月極域に着陸し、ローバによる周辺のもので観測を行うことによって、水が存在するかどうか、また存在する場合に資源として将来の探査に利用可能なかどうか、を判断するための観測データを取得することを目的とする。探査の詳細については2019年3月号の遊星人特集号「月揮発性成分の研究による科学と探査」を参照。

**研究領域内での位置づけ：** 太陽系において地球・月の周辺にどのように水や揮発性成分が過去においてまた現在においても供給されているのかを知る上で、過去から現在まで情報を残す月において水や揮発性成分の供給源や供給・保持メカニズム、量、分布など研究を行う意義は大きい。これまでにリモートセンシングなどによる複数の観測が行われてきたが、いずれもこの課題を明確にするには至っていない。本月極域探査では、月の極域に着陸して月表面および掘削による地下1.5m程度まで含めたその場観測を実施し、直接的な水の観測を初めて行う。現在、複数の国が極域での水探査を計画中であり、これらを協働探査として実施し、データを共有して成果を最大化することを各国の宇宙機関と議論している。月極域探査も、その一躍を担う予定。2019年10月に米国の極域探査が具体化され報道されたが、従来から検討されていた探査であり、日本が行う探査の計画は変わらない。

**サイエンス成果が与えるインパクト：** 月極域探査の主目的は「月極域に存在すると言われている水の資源利用可能性を評価すること」であり科学成果ではない。しかしながら、月極域に着陸して水の存在有無、その量や質（他の揮発性成分の化学組成など）、空間的な広がりや地下分布などに関する情報を得る計画である。月極域に水が濃集して存在するとすれば、それは月に外部から供給されたものであると考えられており、それが存在すればその起源（太陽風の水素原子と鉱物の酸素原子の結合か、または彗星などの天体を起源とするのか）や量から、地球・月近傍への水の供給起源や量の推定に繋がりが、太陽系内における水を含む物質の輸送過程や地球の水の起源を理解する上で、科学的な観点でも意義は大きい。また本探査では、月極域への着陸の機会を利用した科学観測の実施も検討されており、この機会を有効活用する意義も大きい。

**主要キー技術と開発状況：** 主要キー技術は、日照条件など条件の良い非常に限られた地点への着陸技術、数ヶ月以上の長期ミッションを可能にする高エネルギー密度電池、ほぼ真横からの太陽光照射に対応するためのタワー型太陽電池パネル、1.5 m までのレゴリス掘削・試料採取技術など。高精度月着陸技術実証ミッション(SLIM)によりピンポイント着陸技術が実証される他、他の技術については JAXA 内で数年に渡り検討・試作・評価を継続中。また本探査は 2013 年から SELENE-2 のオプションとして検討を開始し(2015 年 3 月終了)、2013 年 6 月からは NASA の RESOLVE(現 Resource Prospector) との協働実施を検討(2017 年 3 月に終了)。その後 2017 年 12 月からインドとの協働実施について検討開始。2017 年 10 月 JAXA にてプリプロジェクト候補として選定される。2018 年度、科学コミュニティから本探査への提言を議論するタスクフォース検討が行われ、報告書が提示されている。2018 年 12 月インドとの Joint MDR を実施。2019 年 2 月に観測機器の検討チームの公募(搭載する機器の選定を行う公募ではない)に対する選定を終了し、8 月まで検討作業を実施した。成果として各機器の要素試作・評価による TRL の向上、機器リソース、開発コストの見積もりと開発スケジュール計画の立案等が得られ、それら成果を元に探査の成立性検討を実施している。資源利用可能性評価以外の科学目的のための観測機器搭載希望の調査も公募と同時に実施しており、技術的な制約の有無など検討中。2019 年 7 月に JAXA 内での MDR、9 月に同フォローアップ会を実施した。インドによる Chyandrayaan-2 の着陸機不具合があるも、日印の協力関係は変わらない。今後 11 月中にプロジェクト準備審査を受けたのちプリプロジェクト化して観測機器を選定し 2020 年度前半に SRR を実施し、2020 年代前半での打ち上げを予定。

**準備・検討体制：** 2018 年 7 月、JAXA に設立した国際宇宙探査センター(JSEC)内に、月極域探査ミッション定義チーム(リーダー JAXA 星野健氏、他約 15 名、惑星科学会所属のチームメンバーは大竹真紀子、唐牛謙、白石浩章)を構築。観測機器の検討に惑星科学会から 20 名程度の研究者が参加し活動中。

#### (b.1.4.2) 月探査用貨物輸送ミッション実証機 (HERACLES) [2020 年代後半]

**背景と目的：** HERACLES (Human-Enhanced Robotic Architecture and Capability for Lunar Exploration and Science) は、欧州宇宙機関 (ESA) リードの元、カナダ宇宙庁 (CSA)、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、アメリカ航空宇宙局 (NASA) の 4 機関共同で検討が進められている。米国の有人月面探査計画であるアルテミス計画に対し必要な物資(暴露ローバ(宇宙飛行士登場・操縦)など)を輸送する「貨物輸送(カーゴラング)」を主目的とし、小型の離陸機を搭載することでサンプルリターンも実施可能なミッションを計画している。

**研究領域内での位置づけ：** これまでの国内月惑星科学コミュニティ及びヘラクレス国際科学定義チームによる検討により、HERACLES 計画の科学スコープは以下の 5 つのテーマに絞られた；(1) 初期斜長岩地殻 (PAN) の組成及び形成年代、(2) マントル起源カンラン石探査によるマントル組成理解、(3) 若い玄武岩ユニット探査によるクレータ年代学の高精度化、(4) 内部構造探査、(5) 太陽風や微小隕石による月への水供給機構解明。これらのテーマは、2017 年度版「惑星科学／太陽系科学研究領域の目標・戦略・工程表」の月面その場観測による KREEP 物質・年代測定の探査計画、月裏側原始地殻サンプルリターン探査計画及び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と強い親和性を持ち、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：** 上記科学テーマの優先順位決定と、それらが実現可能な探査地域とアクセス可能な着陸地点に関しては議論中であるが、それぞれの科学テーマにより以下のような成果が得られる。月マグマオーシャンの固化年代、化学組成を知るとともに地殻・マントル形成過程に関する知見を獲得し、地球型天体の分化過程の理解の基礎を構築する。さらに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。前生命環境としての地球型天体の形成と初期環境進化、地殻の形成に対する知見を得る。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月-地球への物質供給過程を把握する。月で得られたそれらの知見は、地球の大気と海洋の成因、地球生命構成元素と栄養塩元素の供給過程に対しての解答を与えることになる。また、2018 年 12 月に科学コミュニティから本探査への提言を議論する「ヘラクレス計画の科学探査タスクフォース」が組織され、この計画に対する科学的・工学的な見地からの提言が 2019 年 2 月に取りまとめられた。(詳細は「ヘラクレス計画の科学探査タスクフォース報告書」を参照のこと。)

ただし、これまでの科学的な検討は「有人月探査技術実証」を主目的として行われていたが、HERACLES 計画の主目的が「貨物輸送(カーゴラング)」に変更されたことを受け、科学テーマの再検討を実施する予定である。

**主要キー技術と開発状況：** 貨物輸送のための着陸機、サンプルリターンのための離陸機、輸送される貨物として暴露ローバから構成される着陸船を想定しており、着陸機を JAXA・ESA で共同開発、離陸機を ESA が開発、暴露ローバを JAXA・CSA で共同開発する計画である。JAXA は有人着陸船へつながる技術実証を可能な範囲で行うこと、将来の有人圧ローバを視野に入れた暴露ローバの開発を着手する点が主要な技術開発として挙げられる。着陸機としては有人着陸機につながる大型の推進系と SLIM およ

び月極域探査で開発される技術を発展させた誘導制御系の検討を行っており、暴露ローバは月極域探査用ローバの技術発展型の検討を行っている。

準備・検討体制： JAXA、ESA、CSA から約 30 名により技術開発を実施。科学に関する議論は、日本、欧州、カナダ、アメリカ、ロシアから約 40 名の研究者によって実施されている。

#### (b.1.4.3) 戦略的火星探査 [2020~30 年代]

背景と目的： 国際宇宙探査の枠組みで、火星有人探査に向けた火星探査計画の検討が各国で行われている。日本は、火星衛星探査計画 (MMX) に続き火星無人探査を計画し、国際宇宙探査におけるメインプレーヤーとしての役割を果たすことが求められている。本提案では、国際的な競争と協力の環境下で日本が果たすべき役割を明確に認識し、その中でプログラム戦略をもってミッションを構築してゆくことを目的とする。

研究領域内での位置づけ： 火星は、内側太陽系の外縁部、すなわちスノーラインに近接する位置に存在するため、外側太陽系からの物質輸送や巨大ガス惑星の移動による影響を最も鋭敏に受けてきたことが予想される。また、初期火星の表層には豊富に水が存在し、生命生存可能な表層環境が地質年代に渡って存在していたことが、これまでの探査から明らかになっている。内部海が存在する氷天体は太陽系にも複数存在するが、表層に液体の水が長期間存在していたのは、地球を除けば火星のみである。このように火星探査研究は、惑星科学会の掲げる大目標「A. 生命生存可能環境の形成」、「B. 生命生存可能環境の持続性」の両者を包含するものである。

サイエンス成果が与えるインパクト： 我々は火星探査の科学的意義と探査内容を、上記の大目標に沿って、以下の 6 項目に整理した (図 S1) (なお、科学目標の 6 項目 A1-3 および B1-3 は(a.2)を参照されたい)。つまり、火星は、2つの根源的な問い (大目標) の両方に迫ることのできる理想的な天体であり、戦略的火星探査によって達成が可能となる。

主要キー技術と開発状況： 本活動では、火星探査に関連する各キー技術開発が時系列に従い戦略的に配置されているかの検討を行う。具体的には、2030 年代の「火星地下水圏・生命圏の着陸探査 (b.1.1.3)」を今後 20 年のマイルストーンと見据え、2020 年代の「MMX (b.1.1.1)」および、それに続く「火星宇宙天気・気候・水環境計画 (b.1.2.2)」の 3 つからなる、戦略的火星探査シリーズを提案する。我々の提案する戦略的火星探査シリーズは (図 S2)、工学および観測装置の技術開発の観点において、月探査やその他の惑星探査ミッションと紐づけられ、国際宇宙探査の視点で JAXA 全体の惑星探査ロードマップに組み込まれるよう策定した。つまり、(1) 2020 年代中盤の MMX を端緒に、同時期に実施される月着陸探査 (SLIM・月極域探査など) で獲得される重力天体着陸技術を生かしながら、(2) 2020 年代後半から 2030 年代初頭にかけて、火星での着陸実証技術の獲得を目指した火星周回機探査を行い、(3) 2030 年代の本格的火星着陸探査へとつなげていく。また、2020 年代から 2030 年代にかけては、国際協働での火星サンプルリターン (MSR) 計画が実施される。日本が MSR に主体的に参画していくためには、技術協力やリターンサンプルの共有などで国際化の進みつつある MMX を参考に、火星周回探査においても国際協働の枠組みでの実施を検討すべきである。

準備・検討体制： 将来の戦略的火星探査プログラムを構築するにあたり、2018 年 11 月、国際宇宙探査専門委員会の下に火星探査計画の科学探査タスクフォース (TF) が設置された。本提案は、火星 TF での検討がもととなっている。

#### (b.1.5) 機器の提供による国外探査計画・小規模計画

##### (b.1.5.1) 小惑星探査機 Hera/熱赤外カメラ TIRI [2024 年]

背景と目的： 本計画は、史上初の本格的国際共同 Planetary Defense ミッションである AIDA (Asteroid Impact and Deflection Assessment) の欧州担当ミッション Hera (検討中) に、日本の熱赤外カメラ TIRI を搭載して、小惑星 Didymos とその衛星の表層熱物性と物質を探査する計画である。AIDA は米国の DART (Double Asteroid Redirection Test、2021 年打上) を 2022 年に Didymos の衛星に衝突させ、生じる軌道変化 (衛星の公転周期の変化) を地上観測によって調査するのに加えて、Hera (2024 年打上検討中) が 2027 年に Didymos にランデブーして距離 30km から最終的には 10km まで接近し、可視カメラ、熱赤外カメラ、レーザ高度計と電波科学により、小惑星の素性を詳細に調査、衛星の軌道変化の精密計測、衛星表面の人工クレータ痕の詳細観測を実施する。さらに 2 機の子機による接近探査によって、詳細な表面地形や分光、重力計測、磁場計測、質量分析などが実施される。

本件は Hera プロジェクトから JAXA 宛に熱赤外カメラの提供の要請があり、「はやぶさ 2」TIR チームが対応して機器の技術情報交換を行い、具体的な搭載機器の提案を進めている。非冷却ボロメータ (1024 x 768 画素) を検出器として用い、視野角  $10^{\circ} \times 7.5^{\circ}$ 、波長 8~14  $\mu\text{m}$  の熱撮像に加えて、6 バンド以上のフィルタで多バンド撮像も実施する。3.5kg、25W 程度の装置となる予定である。

宇宙科学や宇宙開発では、過去に蓄積した科学的知見や技術を、人類共通の利益や危機に対して応用・適用することが強く求められる時代となった。AIDA は上記の方法によって、人類や文明社会にとって潜在的脅威である小惑星の地球衝突を回避するための技術実証を主目的とする。一方、小惑星の物性的・物質的特徴の理解や、実験室スケールで構築してきた衝突科学の実スケールへの応用と実践も副次的な目的である。

領域内での位置づけ： 「はやぶさ2」 TIR による史上初の小惑星の全球高解像度熱撮像によって、小惑星表層や巨大岩塊（母天体の内部構造の断片に相当）までが高空隙であることが判明したが、Hera の熱赤外カメラ TIRI はその熱撮像を継承する。さらに、熱赤外波長域（8~14 $\mu$ m）の多バンド分光による表層鉱物の判別、結晶か非晶質の割合の探査を追加することで、物質科学的特徴も取得できる。

Hera や AIDA 全体としては、「はやぶさ2」衝突装置 SCI による史上初の小惑星その場衝突実験の拡大版として、より高速かつ大質量の衝突実験による衝突痕やイジェクタ堆積物の詳細観測を行う貴重な機会を提供する。さらに数値シミュレーションと組み合わせ、衝突物理現象の進展に寄与する。

Planetary Defense は、地上観測で地球衝突の可能性のある小惑星の観測をしてきたが、2013 年のチェリャビンスク隕石で甚大な被害があったことから、探査機による衝突回避を行う必要性が強く主張されるようになった。AIDA が対象とする小惑星は、6600 万年前の地球生命の大絶滅を引き起こしたような巨大だが人類文明の継続期間に比べて低頻度のもではなく、100 年~数 100 年に 1 回程度衝突し得る、数 10m 級のものである。例えば 1908 年のツングースカ大爆発（半径 30~50km の範囲の森林が倒壊）が発生した。この衝突規模は、人口 1 千万人の巨大都市が消滅する規模の自然災害である。小惑星より 1 桁小さい数 m 級の探査機を打ち上げ、高速衝突させて軌道を変更させれば、地球衝突を回避できると考えられる。その技術を実証し、かつ小惑星の素性をより詳しく理解しておくことは、人類社会の長期的平安のためには必須である。

日本は今、国際共同 Planetary Defense ミッション AIDA に、僅か 1 機器の提供によって参加表明できるよい機会にある。むしろ、参加しないと表明する場合のデメリットは大きいと思われる。

サイエンス成果が与えるインパクト： 1) 小惑星 Didymos は S 型（Xk との説もある）であるが、表層物性や空隙率は不明である（「はやぶさ」によるイトカワ粒子も LL として極めて高空隙率である）。母天体が概して低空隙率であるのかどうかは、ダストから微惑星成長に至る過程を理解する上で、惑星形成論的にも重要事項である。2) Didymos の衛星はスペクトル型が不明であるが、同一の場合（分裂の可能性）と相違の場合（捕獲の可能性）があり、バイナリ小惑星の形成過程の理解にも重要である。3) 衛星（直径 160m）が史上最小の探査天体となり、そのサイズで表層の状態がやはり高空隙なのか岩盤なのかを調査することが重要課題である。4) Didymos と衛星の熱モデルを高精度で構築し、それぞれの YORP 効果と軌道進化から、BYORP 効果について評価できる最良の機会である。5) 「はやぶさ2」SCI よりも桁で大規模な衝突実験の結果評価について、小惑星の素性とクレータ痕内部のや周辺イジェクタの熱慣性調査を通じて、衝突科学の進展に寄与する。

主要キー技術と開発状況： 主要キー技術は非冷却ボロメータによる熱撮像カメラの技術であるが、ほぼ確立された技術の応用で対応できる。より確実な観測を実施するために、温度較正と探査機姿勢喪失時の直射日照射防止のためのシャッタ機構の搭載を検討している。また、表層物質の鉱物組成やアモルファス相の割合検知のためのフィルタホイール搭載を検討している。Hera の採否が 2019 年 11 月末の ESA 会合で決定されるため、その後を目的に WG 設立申請を行う予定である。

準備検討体制： 「はやぶさ2」搭載 TIR のメンバ中心に 10 名程度が定期会合に参加している。2019 年 9 月の AIDA 全体会議には 2 名が参加して技術調整している。2019 年度 ISAS 国際共同ミッション推進研究費を受けて要素技術の開発を実施中である。2019 年 11 月に Hera が正式採択されれば、宇宙科学研究所で WG を設立する予定である。

#### (b.1.5.2) NASA Discovery 計画 Moon Diver への小型観測機器プロンプ提供 [2024 年]

背景と目的： 現在、米国 NASA は、Discovery（ディスカバリー）計画の公募を行っている。この公募に JPL の Laura Kerber 博士を PI として、月の静の海の縦孔の壁面を二輪（アクセル）ローバを降下させながら観測し、月の火成活動を解き明かそうとする「Moon Diver」チームが応募している。このローバに機器搭載の余地がある。そこで、宇宙工学委員会のもとに設置された「月極限地形探査ミッションにおける小型プロンプのシステム検討」チームと、宇宙理学委員会のもとに設置された「月火星の地下空洞直接探査 RG」が中心となって、小型観測機器プロンプの提供を検討している。このプロンプは、ローバの降下中に、ローバから放擲され、縦孔底から、あるいはまた縦孔内落下中に観測を行う。このミッションを通じて、様々な機会に応じられる小型観測機器プロンプの開発を行う。また、科学的成果として、月火成活動、縦孔環境に関わる情報を取得する。具体的には、静の海の縦孔の底に溶岩チューブを

確認させる構造（たとえば、天井アーチ、フラットな岩盤フロア）の情報や、縦孔底の温度・電磁場・放射線環境データを得ることを目指す。

**領域内での位置づけ：**本ミッションのめざすところは、工学的には、余剰スペースへの搭載機会を利用した小型軽量探査プローブの開発で、将来の国内外の大きささまざまなミッション機会に即座に対応できるプラットフォームを構築することであり、理学的には、月火成活動調査、縦孔環境計測を通し、「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」や「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」を集積することによる、惑星科学会が目的としてかかげる「生命生存可能環境の形成と持続性」の理解である。

**サイエンス成果が与えるインパクト：**1) 月火成活動調査：Moon Diver ミッションの目指す縦孔のある静の海は、PKT 領域に位置し、熱エネルギーの天体での偏在を理解する上で極めて重要である。そうした領域の火成活動において、実際に溶岩チューブが形成されるかどうかにより、溶岩の到達距離が変わる。言い換えると、溶岩チューブの存否の確認により、溶岩層の広がりへの制約を与える情報となる。更に溶岩チューブの高さ・幅・傾斜角度、溶岩鍾乳のピッチから、溶岩層の噴出時の温度が推定され、月の二次地殻形成の重要な情報となる。これらの情報は「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に関わる知見」や「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」を集積することに直結し、科学界への大きなインパクトが期待出来る。2) 電磁場-ダスト-粒子相互作用調査、月古磁場調査、放射線環境調査：天体の電磁場、ダスト、放射線環境は、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り月の過去の磁場形成の情報が得られる。また、月の縦孔、さらにその底に続く溶岩チューブは、月において、効果的に宇宙放射線被爆を遮蔽するため、その放射線環境の調査は、将来の人類の活動領域の拡大に寄与する。加えて同様の縦孔構造を持つ火星での生命発現可能性を探る上でも重要な情報を提供する。このように、電磁場-ダスト-粒子相互作用、月古磁場、放射線環境の調査も、「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。

**主要キー技術と開発状況：**縦孔の側壁や溶岩トンネル内部を、空間的、輝度的、波長的により詳細に撮像できるカメラの小型化や、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（磁場、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。これらは、「月極限地形探査ミッションにおける小型プローブのシステム検討チーム」、「月火星の地下空洞直接探査 RG」で検討を進めている。

**準備検討体制：**国内の大学・研究機関を中心として、理工あわせて約 50 名規模で検討している。Moon Diver チームとも、適宜情報を交換している。

### (b.1.5.3) 系外惑星大気の外線分光観測 [2025 年頃]

**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、2018 年に打ち上がった TESS により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発見され始めており、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 H<sub>2</sub>O 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実性から、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、低温度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、2020年代のうちに代替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、2025年打ち上げ予定)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。

2018年度には天文学分野（特に光赤外線グループ）との情報共有を進め、系外惑星観測だけでなく活動銀河の観測等でも紫外線領域の技術開発の需要が高まっていることが確認され、分野を超えた検討が開始されている。

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3億円程度であり、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。この技術は2038年頃の打ち上げを想定した超大型宇宙望遠鏡計画検討チームからも注目され、要開発技術要素として LUVUIR(2038年頃打ち上げを想定)の Decadal Survey 向け最終報告書に掲載されている。

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。2019年2月には、予算規模と計画の長さが JAXA 小規模計画には合わないということから、UVSPEX WG は戦略的海外協同計画向けの WG に変更された。その後、2019年4月に国際協力に関する協定(LOI)が INASAN-IKI-ISAS の3機関で締結されており、2019年5月に日本が提供する装置を含めた設計審査会が開催され、日本の装置搭載の方針が確認された。

#### (b.1.5.4) 土星衛星離着陸探査計画（Dragonfly）【2026年】

背景と目的：土星の衛星タイタンは土星最大の衛星であり、太陽系衛星の中では、唯一、厚い大気を纏っている。また、地球以外で安定した液体の存在が確認されている唯一の天体でもある。2004年～2017年にかけて土星系の周回軌道から行われた探査機カッシーニの観測では、北極付近に海や湖が存在することを発見した。また、カッシーニから切り離された着陸機ホイヘンスによる観測によると、複雑な有機化合物に覆われた水氷で構成される表層地形や流水活動によると思われる浸食地形の痕跡も見つかっている。2019年6月にNASAのニューフロンティア計画の4番目として採択されたドラゴンフライミッションでは、ドローン型探査機（水平尾翼付き離着陸機）をタイタン表面に送り込み、複数地点での大気・表層・内部構造の探査を行うことを計画している。ISAS/JAXA ではペネトレータ搭載用に開発した短周期地震計を提供することで検討を行っており、タイタン内部における地震活動度や氷地殻の構造を明らかにすることを目的としている。

領域内での位置づけ：ドラゴンフライミッションでは、ガスクロマトグラフィー質量分析計と中性子・γ線分光計によってタイタン大気中および表層におけるメタン、アンモニア等の有機物や水氷の探査を行い、それらの存在量や化学組成についての情報を与える。また、気象観測パッケージによって、表層付近の環境計測と表面物質の物理的特性について調査を行う。特に、地震計を使った観測では、氷地殻厚さや構成物質の弾性波速度を調べることで、タイタンを覆う氷の物性や地殻の形成・進化過程に関する情報を得ることができる。これらは、外惑星系における有機物・水の供給過程、存在条件について大きな制約を与えるものであり、日本の地震探査技術も用いて惑星科学会が掲げる生命前駆物質、生命生存可能環境の理解に大きく貢献できる。

サイエンス成果が与えるインパクト：ドラゴンフライが行う地震観測では、タイタン内部での地震発生の有無、活動度についての解明が期待できる。また、タイタン内部では潮汐力や氷火山に起因する地震が発生することが予測されており、これらを観測できれば、月、火星に続く3番目、氷衛星では初の地球外地震の発見となる。また、タイタン内部やそのダイナミクスについての情報を得ることで、氷衛星内部の現在の熱的状況や物質構造について制約を与えられる。これらの観測から、生命活動の鍵となる水氷と内部海がどの程度、こういった状態で氷衛星内に存在しているかの知見を得ることができる。

主要キー技術と開発状況：短周期地震計本体は、日本の月探査計画 LUNAR-A においてペネトレータ搭載用として開発したものをベースとする。現在、タイタン表面における温度（約-180℃）下での動作・性能確認と改良方針の検討を行っている。

準備検討体制：ペネトレータ搭載用地震計の開発経験者を中心に、ドラゴンフライミッションの推進母体であるジョンホプキンス大学応用物理学研究所（APL）と共同で開発を行う。（2019年11月現在）。

#### (b.1.5.5) Comet Interceptor (ESA Fast mission) [2028年頃]

背景と目的：Comet Interceptor は、力学的新彗星(dynamically-new comet：オールト雲領域から太陽系内側領域に飛来する超長周期彗星)に対し、複数探査機のフライバイによって電磁場・プラズマ観測、コマ物質観測、表面撮像などを行う。このサイエンスを実現するため、ターゲットとなる彗星が出現するまでの間はラグランジュ点で待機するという、新しいコンセプトの探査である。観測に成功すれば、太陽系初期に形成された小天体の形成環境・履歴に関する重要な知見を与えると期待される。また、超小型探査機による惑星探査の先駆けとしても極めて重要な意味を持つミッションである。

領域内での位置づけ：Comet Interceptor の科学目的は「力学的新彗星の観測と、過去の彗星観測との比較を通じた、彗星活動の多様性の理解」であり、初期太陽系の物質輸送・始原的小天体という観点で、生命生存可能環境の普遍性・多様性の理解に資するものである。また、彗星探査は、海外においても重要な潮流の一つを形成している。2019年度に公募のあった Voyage 2050 プログラムには2件の彗星探査に関する白書（AMBITION-Comet Nucleus Cryogenic Sample Return, submitted by Dominique Bockelée-Morvan; Cometary Plasma Science, submitted by Charlotte Götz）が提出され、さらにいずれの白書も Comet Interceptor を彗星研究の将来につながる重要な探査計画の一步として位置づけている。また、NASA の New Frontier 計画においても、彗星サンプルリターンミッションとタイタン探査ミッションが最後まで候補となっていた。NASA では最終的にタイタン探査が選択されたが、これによって直近の彗星探査の必要性・重要性は寧ろ増したともいえる。

サイエンス成果が与えるインパクト：Comet Interceptor は、力学的に新しい（太陽系内部領域に過去にほとんど滞在していない）、すなわち形成時の情報を多く残した彗星に対し、表面撮像、コマ物質観測、電磁場・プラズマ観測を行う探査であり、太陽系初期に形成された小天体の形成環境・履歴に関する重要な知見を与えると期待される。

主要キー技術と開発状況：Comet Interceptor に対してライマン $\alpha$ イメージャ、可視カメラ、イオン分析器、磁力計などを日本からハードウェア提供する予定である。これらは過去の日本の探査（はやぶさ2、PROCYON、かぐや、BepiColombo など）の搭載機器をベースにカスタマイズされる。さらに、これら理学機器を搭載する超小型探査機（ベースは PROCYON および EQUULEUS）も日本から提供する予定であり、超小型探査機による惑星・小天体探査という新しい潮流を作りうるものである。

準備検討体制：これまで、欧州の PI チームからハードウェア提供の打診を受けた研究者チームと、国内の彗星研究者が中心となって、ローカルに検討を進めつつある状況である。今後、ミッション選定を経て、理論、室内実験、地上観測の研究者を含むチーム体制を拡大していく。

#### (b.1.6) 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.1.6.1) 火星オービターコンセプト

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。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 では火星夜面の観測は予定されていないし、EMM は軌道傾斜角が大きいという静止軌道よりずいぶん遠いところを周回する。したがって、MMX にしても EMM にしても、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 H<sub>2</sub>O 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 100km 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 100-300km/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、我々の提案は、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」の経験を生かして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空白領域にあたる。これを埋めることで地球大気科学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きた。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要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、電波遮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 桁上高い鉛直分解能を有しており、境界層の構造や、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。

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。現在は MMX においては多色可視カメラと MacrOmega を用いた昼間のみの物質輸送観測を計画している。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、国際的な火星探査計画や、火星宇宙天気・宇宙気候探査計画といった他の火星ミッションとの相乗れも検討している。

#### (b.1.6.2) 月の地下空洞直接探査 [2020 年代]

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増えてきた (図 S3)。そこで、隕石による破壊や角礫岩化、太陽風による変成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目指し、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目指す。

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 F. et al. (1974) EPSL 22, 1-21) ている。この「後期隕石重爆撃説」を証明することは地球生命の由来を解き明かすための鍵であり、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を解く重要なキー元素であるが、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、溶岩が複数回流れ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する環境因子である。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、テザー付きのプロー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：**国内の大学・研究機関を中心として、コアメンバー約 40 名で検討している。

#### (b.1.6.3) 火星の地下空洞直接探査 [2020~2030 年代]

**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 S4)。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、テザー付きのプロー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：国内の大学・研究機関を中心として、コアメンバー約 40 名で検討している。

#### (b.1.6.4) 長周期トランジット系外惑星探査・超小型衛星計画 [2026 年頃]

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 年間の観測により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 (稼働中) と PLATO が控えている。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 (7.5 cm) の口径でありながら、広視野かつ超小型衛星 (~20 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 S5 に示すような中長周期惑星の惑星、すなわち太陽系に存在するような長周期の冷たいガス惑星をトランジット法で検出する。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/PLATO のような主に地球型惑星の検出にフォーカスした計画と相補的な、低コストの超小型衛星のコンステレーション化によるトランジット惑星の超広視野の常時観測 (図 S6 の領域) へむけた可能性を実証する目的も合わせ持つ。

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 S7 の灰色の点で示すように公転周期が約 1 年以下、すなわち 4 年の観測期間に 3 回以上トランジットするものである。一方、図 S5 に示すように、我々を含む複数のグループによる独自の探査により、観測期間中に 1-2 回しかトランジットを起こさない公転周期が数年以上の惑星も発見されつつある。これらのサンプルは、惑星形成の現場とも言える雪線に近く、かつ図 S7 に示すように木星サイズ

から海王星サイズまで幅広いタイプの惑星を含んでいる。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ため、これらの周期数年の惑星の性質は惑星形成論を検証する観点から非常に重要である。しかし、Kepler 衛星の限られた観測視野（110 平方度）で発見されたこれらの候補天体は、遠方の暗い恒星を公転しているため、視線速度法やアストロメトリによる追観測や、トランジット中の分光によるキャラクタリゼーションを行うことは困難である。本計画では、広視野の探査により多数の明るい恒星を長期間観測し、近傍の追観測可能な長周期惑星を発見することで、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 S7 や図 S8 に示されている太陽系の惑星の位置と比較すると、トランジット法による系外惑星探査では、木星に類似する領域で信頼度の比較的低い惑星候補が検出されつつあるというのが現状である。一方、Kepler 衛星に続く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を一つの目標としている。これらの将来計画の観測期間は Kepler の 4 年に満たないため、木星や Cool Neptune World のような周期数年以上の惑星の発見は困難である。対して本コンセプトでは、地球型惑星を発見するほどの高精度ではないが、広視野かつ長期間の継続観測が可能な超小型惑星の特徴を活かし、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：** 主要な技術として、(i)口径 7.5cm に対し 1000 平方度という高視野を確保し、かつ焦点面全域にわたって 0.5–1 ミクロンの広い波長域で良好な PSF を持つ光学系、(ii)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、(iii)広視野多ピクセル CCD または CMOS の検出系、(iv)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、ポインティングのずれの影響を補正するライトカーブ解析手法が挙げられる。これらのうち、姿勢制御系については Nano Jasmine の開発実績、JASMINE 測光シミュレータ、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に基づく検討を行っている。光学系に関しては製作開始に十分な設計が完成済みである。

**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・工学系研究科、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.1.6.5) 系外惑星の主星に対する紫外線モニタリング [2020 年代]

**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、2018 年 4 月に打ち上げが成功した TESS や 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、2021 年打ち上げ予定の JWST や ESA-M4 の ARIEL (2028 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観測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。同様の目的で NASA の超小型衛星 SPARCS(2021 年打ち上げ予定)、ARTEMIS(2022 年打ち上げ予定)が承認されたが遠紫外線の中でも長波長側のみに対応しており、EUV 輻射推定モデルの入力に用いられる水素ライマン  $\alpha$  線(121.6 nm)には対応しない。ライマン  $\alpha$  線観測用の小型装置としては PROCYON に搭載された LAICA の実績があり、日本が先行している。

**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、雲の特性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性の解明に必須の情報を与える。

**主要キー技術と開発状況：**低温度星では、真空紫外領域における輻射の大半を水素ライマン $\alpha$ 線が担っている。極端紫外領域の輻射は空間吸収のため観測できないが、ライマン $\alpha$ 線強度から推定するモデルが構築されている。ライマン $\alpha$ 線の観測装置はひさき、プロキオンでの実績がある。ARIELがESA M4に採択された後、2018年2月頃よりARIELプロジェクトと協議を進め、PROCYON/LAICA程度の装置で十分な性能が得られることが確認され、また、ARIELシステムでも受入が可能(技術的な問題はない)と判断されている。予算確保、JAXA-ESAの協定締結に向けてJAXAと協議を進めている状況である。

また、東大工・北大工で進められている高軌道超小型衛星システムを利用して、地球水素コロナ外から恒星の水素ライマン $\alpha$ 線強度を測定する計画の検討を進めており5億円以下で実施可能と見積もられている。

**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)、川島由依(SRON)を中心メンバーとして検討を進めている。

#### (b.1.6.6) 超小型衛星による太陽系近傍恒星周りの系外惑星トランジット観測 [2024年頃]

**背景と目的、領域内での位置づけ：**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。系外惑星の性質(大気・表層環境・バイオマーカ)を明らかにするには、分光などの詳細な観測に必要な光量を十分に稼ぐことができる明るい恒星周りの惑星を観測することが有利となる。特に系外惑星大気の情報を得られる現時点で実績ある唯一の方法がトランジット法であるため(トランジット透過分光)、明るい恒星周りのトランジット惑星の観測が求められる。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。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、太陽系近傍の恒星(近いので明るく見える)の系外惑星トランジット観測を実施することを目指す。特に、太陽系近傍恒星系に対して次に挙げる観測を計画している：①他の観測計画(TESSなど)により発見された惑星候補の追観測により、それら惑星候補の同定並びに惑星パラメタの決定や、同一星のさらに長周期の惑星を探索する、②未だトランジット惑星が見つかっておらず他の計画でも主な観測対象となっていない非常に明るい恒星(0~4等級(V等級))の惑星を探索する。

**サイエンス成果が与えるインパクト：**独自の宇宙望遠鏡を開発し占有することにより、本提案以外の計画によって発見された惑星候補をいち早く追観測することが可能となる。衛星観測は、地上観測と違って地球大気の影響や観測緯度経度の制約を受けないため常時安定した追観測を実現する。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。また、未だトランジット惑星が見つかってい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。本提案により発見が期待される明るい恒星周りの惑星は、その後の格段に精度の高い詳細分光観測を可能とし、系外惑星の精査に挑む次世代の大型望遠鏡の恰好の観測対象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。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。2024年頃の実現を目指し、検討グループによる概念設計と並行して、千葉工大が推進する超小型衛星の開発運用(現在、2号機を開発中)を通じた衛星システムの高高度化検討に加え、実際に行う系外惑星観測手法の検証と実績を積むために和歌山県かわべ天文公園口径1m望遠鏡を用いた地上観測を行っている。この地上観測の成果として、恒星HD93148周りのホットジュピターの発見確認に成功し、その成果論文が国際学術雑誌(The Astronomical Journal)から出版された。超小型衛星システムの開発運用および地上望遠鏡による観測・解析の経験を設計に反映することで、本ミッションのフィジビリティの向上が期待できる。

**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、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター、宇宙科学研究所の研究者からなる検討グループによりミッションの設計検討を進めている。

**(b.1.6.7) 近赤外線分光観測による小惑星の含水鉱物探査 (Watery / Hydrated Asteroid Measurements: WHAM) [2020~30年代])**

**背景と目的：**小惑星における含水鉱物の存在を調べることは、太陽系の成り立ち、特に熱的な変遷を知る上で重要である。含水鉱物は液体の水と無水鉱物が反応して生成されるが、水の昇華温度以上でも比較的安定であるため、水の存在を示す重要なトレーサーである。含水鉱物は近赤外線の波長 2.7  $\mu\text{m}$  付近に吸収フィーチャーを持つことが知られているが、地球大気の影響により地上からは原理的に観測することができない。そこで、宇宙望遠鏡による観測が必須となる。2006年に打ち上げられた日本の赤外線天文衛星「あかり」には近赤外線の分光機能が搭載されており、これを用いて小惑星 66 天体の観測に成功した。その結果、多くの C 型小惑星には含水鉱物に起因する顕著な吸収が見られた。しかし、小惑星の含水鉱物量、すなわち水分量と天体サイズや日心距離などの物理量との間の依存性はいまだにわかっていない。近赤外線分光観測は欧米で複数のグループが取り組んでいるものの、現時点では「あかり」の次の宇宙望遠鏡による観測計画は 2021 年打ち上げ予定の JWST 以外にはない。JWST は口径 6.5 m の大型望遠鏡であるが、移動天体の観測には必ずしも最適な運用が行われるとは限らず、観測時間もきわめて限られるため、小惑星は世界全体でも 100~200 天体程度しか観測できない可能性がある。そこで、小惑星帯における広範な水の分布の解明、水を含む小惑星族サーベイによる母天体の内部構造探査の実現を目的として、小惑星観測に特化した宇宙赤外線望遠鏡による含水鉱物探査(Watery / Hydrated Asteroid Measurement; WHAM)を提案する。これは、水の存在に焦点を当てた先進的な小惑星科学分野の創出に貢献するものである。

**領域内での位置づけ：**小惑星における水の存在の探査は、「太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件としての前生命環境の進化の理解」における「惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動、天体への供給」に合致する内容である。実際に観測することになる含水鉱物は(母)天体内部の水質変成作用によって形成されるものであることから、「地下熱水環境：鉱物-水-有機物反応系」についても大きな知見を与えるものである。さらに、小惑星は地球型惑星への水の供給源の候補として考えられており、これは「生命前駆物質の形成・進化」へ対しても貢献のある分野であると考えられる。

**サイエンス成果が与えるインパクト：**これまでに「はやぶさ」、「はやぶさ 2」、OSIRIS-REx などの小惑星探査が進められており、今後もこの流れが継続されることが期待されるが、これらで探査できる小惑星は数天体に限られる。探査で得られた知見を小惑星帯全体、さらには太陽系全体における位置づけに昇華させるためには、望遠鏡による網羅的な観測と組み合わせることが必須である。小惑星における水の分布は、小惑星の形成と進化の過程をひもとく手がかりが得られるだけでなく、地球の水の起源を考える上でも重要である。さらに、含水鉱物を含む小惑星から水を取り出し生命維持や推進剤に活用することも検討されており、将来の宇宙資源探査の観点からもきわめて大きな意味を持つ。

**主要キー技術と開発状況：**宇宙赤外線望遠鏡、特に小口径、かつ近赤外線の波長域の望遠鏡については、すでに成熟している技術であり、新規開発要素はほとんど含まれない。宇宙望遠鏡を搭載するのは地球周回の中小型衛星を想定しており、工学面でも技術的困難はほとんどないものとする。サイエンスの先鋭化と衛星運用方針の最適化によっては、さらに小規模衛星での実現も視野に入れたい。

**準備検討体制：**本提案は検討を始めて間もないため未成熟な段階であるが、神戸大学、JAXA、東北大学の有志で議論を深めつつある。2019 年度にはサイエンス目的の先鋭化のために複数回の会合を開催した。その内容は日本惑星科学会 2019 年秋期講演会にて発表した。また、JWST 以外の海外の宇宙望遠鏡計画への参画、東京大学が南米・チリの標高 5640m に建設中の東京大学アタカマ天文台 (TAO) を用いた観測計画の策定などを行い、本提案実現に向けたパイロットサーベイを推進している。

## (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している。これらの活動の成果として、海外研究者チームによって NASA, ESA など諸外国の宇宙機関に提案される計画にも日本担当の装置が取り入れられるようになってきており、計画の規模も国際協力によるフラッグシップの探査計画から、NASA Discovery、ESA F-class まで多岐にわたっている。一方、海外計画への観測機器の提供に関し、現状で JAXA が想定している「小規模プロジェクト」には、海外フラッグシップミッションへの参加が条件となる「戦略的海外協同計画」枠と総額 2 億円以下の「小規模計画」枠しかなく、NASA Discovery, ESA F-class 級の計画等で想定される 2 億～10 億円規模にあった予算枠が存在しない。海外機関が数百億円（日本の小型・中型級）で開発を進める探査機へのバスおよび理学機器提供では、日本側の開発費用は数億円程度で最先端の成果が出せるため、費用対効果が非常に高い。このため、対応可能な枠組みの整備が早急に求められる。図 1 に、本文書で触れた惑星科学ミッションと、それに紐づく機器開発項目を示す。各機器の概要は APPENDIX-4 にまとめる。

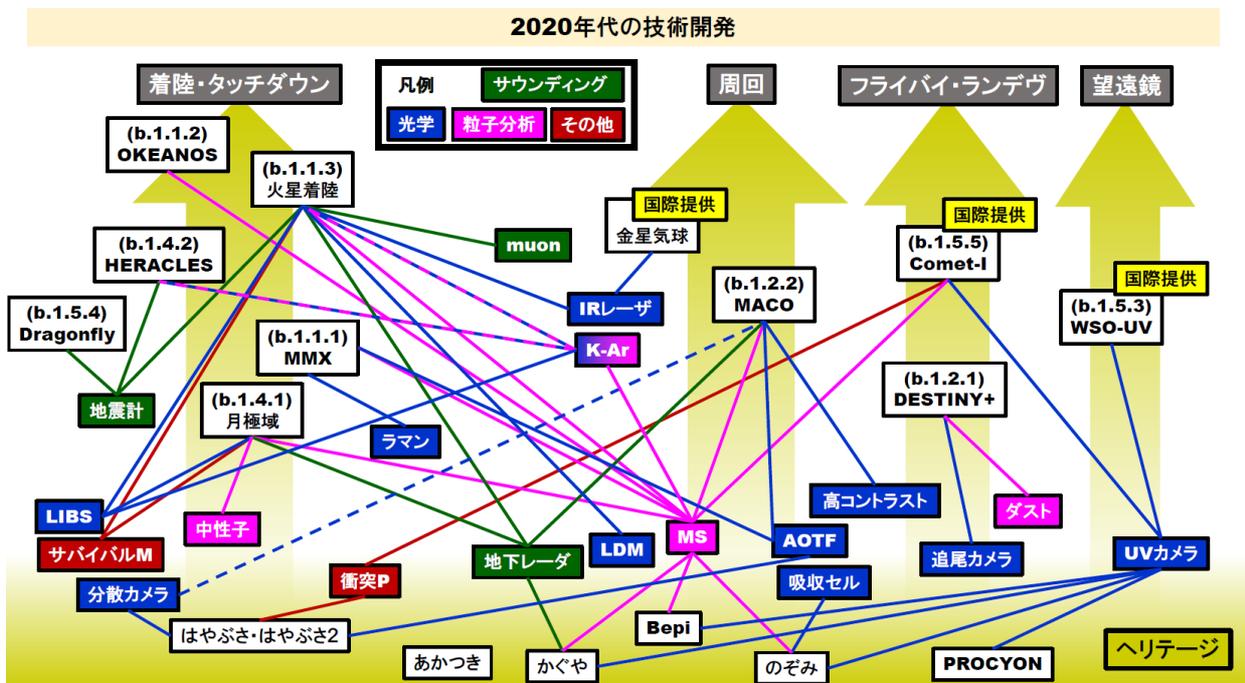


図 1. ミッションと、それに向けた機器開発項目。図中略称の意味は以下の通り。LDM：生命探査顕微鏡（Life Detection Microscope）、UV カメラ：宇宙用真空紫外線観測装置、衝突 P：衝突探査パッケージ、高コン：惑星探査用高コントラスト光学、AOTF：AOTF を用いた小型赤外分光撮像装置、IR レーザ：赤外ファイバを用いた小型レーザ分光器、muon：火星探査用ミュオグラフィ装置、MS：惑星大気・表層物質その場分析のための質量分析器、および HRMS（高分解能質量分析システム）、吸収セル：水素吸収セル、追尾カメラ：天体追尾可視望遠カメラ、分散カメラ：分散観測用小型分離カメラ、ダスト：ダストアナライザー、地震計：短周期+広帯域地震計、および小型アクティブ地震計、サバイバル M：月惑星表面長期その場観測ユニット、地下レーダ：地下探査レーダ（ローバ搭載 GPR）、および地下探査レーダ（周回機搭載レーダサウンダ）、K-Ar：K-Ar 年代計測装置、LIBS：レーザ誘起発光分光装置、ラマン：ラマン分光装置。

### (b.3) 将来サンプラリターン探査における化学分析と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た。また、「はやぶさ」で蓄積した経験を発展させた「はやぶさ2」は、2018年6月27日にC型小惑星リュウグウに到着し、工学・観測・衝突実験・試料採取にわたって確実に我が国の宇宙探査技術を確立したと共に膨大な科学成果を創出し、来たる2020年末以降の帰還試料分析への期待が高まっている。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・地場、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を実施すること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-5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）に対して将来の生命探査等のために天体の状態を保持すること、また地球生物圏（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り、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。また、我が国では2018年11月より「人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律（宇宙活動法）」が施行され、惑星保護に係る規程が定められたことから、わが国に係るすべての太陽系探査ミッションは、公的機関が民間企業に関わらず、惑星保護方針を遵守する必要がある。

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 において国際的な合意を形成することによって、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（ソーラーセイル）、さらには火星探査など、惑星保護設計を必要とする複数のプロジェクトを実施する可能性があり、それらの中には多くの要求事項が課せられるカテゴリに属するものもあることから、わが国の惑星保護の基準を制定し、惑星保護の実施体制を整備するとともに、惑星保護に関わる技術を強化する必要がある。

**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、2018年度に「惑星等保護規程」および「惑星等保護プログラム標準」など一連の文書を制定し、惑星保護実施のための組織体系を発足させた。ただし、上記の標準文書等は MMX や月ミッション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）や、これら天体からの帰還ミッションに適用していない。今後、このようなミッションを実施するためには、標準文書の拡張が必要である（具体的には、カテゴリ IV、及び制約付き地球帰還を伴うカテゴリ V への拡張が求められる）。また、これまでメーカーを含め、我が国では惑星保護に係る経験が乏しいことから、新しく制定された標準文書や惑星保護に係る手続きについて、広く周知教育を行う必要もあるだろう。

惑星保護においては主要な4つの技術は

- ① 衝突確率解析・汚染確率解析
- ② 滅菌
- ③ 環境保持（輸送・射場を含む）
- ④ バイオバーデン（存在種・菌数検査）

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、デブリを含む）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、すでにはやぶさ2や PROCYON を始めとするプロジェクトにおいて実行されるなど技術的な蓄積があり、JAXA においては「惑星等保護に関わる衝突確率解析ハンドブック」に取りまとめられている。②は、保護される太陽系天体へ影響を及ぼすミッション（着陸やエアロキャプチャなど）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はこれを実現するための環境（輸送中、射場を含む）を保持する技術であり、④はこれら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、②～④の技術を保持していないため、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急務である。③の環境保持については、惑星保護に対応したクリーンルームの整備に加え、輸送手段や、ロケット打ち上げを行う射場環境の整備を伴うため、大規模かつ総合的な取り組みが必要となる。また④のバイオバーデン技術については、宇宙機の暴露面および全体の残留孢子数を正確に計測し、これを保証するために、設備やデバイスの特性に応じた校正を伴う高度な技術水準と長期的なノウハウ蓄積が必要であり、また COSPAR が規定するバイオダイバーシティ（微生物多様性）への対応のため半永久的なサンプル微生物の極低温保管が必要となるなど、技術継承や人材育成を含めた長期的な取り組みが必要である。

**推奨される将来計画：**惑星科学の目標の一つとして掲げる「戦略的火星探査プログラム」においては、MMX の継承ミッションとして、2020年代後半の周回・探査技術実証と、これに続く2030年代前半の火星総合探査（地下水圏・生命圏の着陸探査）が提案されており、これらを実現するためには、可及的速やかに惑星保護技術の開発に着手し、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。今後、MMX を契機として体系化された JAXA の惑星保護基準と、この基準を遵守する実施方法を、オールジャパンの取り組みによって拡張し、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、2019年度中に「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と最新の COSPAR 惑星保護方針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、新たな標準文書として2020年度末までに制定する。並行して2020年度より、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段階的に行い、バイオバーデンに係る知見や校正データを蓄積し、これに従事する研究者を育成するとともに、標準文書や手続き、惑星保護の技術に係る周知教育を広く行う。過去の検討（火星着陸探査技術実証 WG）によれば、②～④の設備整備と人材育成には少なくとも3カ年を要すると推察されることから、早期の着手が推奨される。2023年度末までに火星着陸探査を実現可能な惑星保護の技術水準を獲得できれば、2026年以降に火星探査技術実証を実現することが可能であろう。さらに継続的に惑星保護技術の高度化に取り組み、火星の特別地域（special region）へのアクセスも可能となるウルトラクリーンレベルの滅菌、管理、バイオバーデン技術を獲得できれば、2030年代前半の火星総合探査（火

星地下水圏・生命圏の着陸探査)においては、RSL や地下水氷床へのアクセスも可能となり、世界初・世界最高水準の科学的成果が期待されるであろう。

### (c) 惑星探査を支える人材の育成 (惑星探査コンソーシアム)

ミッションプランの立案においては、太陽系科学を俯瞰しその展望に裏打ちされた科学的課題を抽出し、実現可能な形に練り上げていく必要がある。しかるに、太陽系科学が覆う分野は広大であり、用いられる手法は多岐にわたるため、これには太陽系科学のみならず宇宙工学を含んだ様々な分野の専門家と知見の集積による密な議論を必要とする。個々のミッションプランは、太陽系科学上の位置づけや宇宙工学の技術的展開あるいは予算的制約に応じた恒常的な改良改定が必要であり、また実施環境の変化に即応するべくミッションの融合分離なども含んだプランの多重化もしておく必要がある。宇宙科学コミュニティでの議論により選択されたミッションプラン群の実現にむけての時系列をまとめたものが工程表であるが、これもまた上記に応じて不断の改定を必要とする。さらに、近年新しく始動した「国際宇宙探査」における科学ミッションを、太陽系科学として意義がありコミュニティが責任持ってこれを担っていくためには、以上のような太陽系科学におけるミッションプランの立案と実現に向けての議論試行のサイクルを大幅に短縮しかつ量的に拡充し、「国際宇宙探査」計画の進展に対して臨機応変に対応し、そこから最大限の科学を抽出する体制を確立しておかなければならない。残念ながら現状の太陽系科学コミュニティにおいては、この一連の流れに責任をもって恒常的に動かす研究者やこれを支える技術者が圧倒的に不足していると言わなければならない。

太陽系科学コミュニティでは、このような情勢に対し、根本的な対応、すなわち若手人材の育成から着手することを提案するべく「惑星探査コンソーシアム」を設立準備中である。「宇宙科学探査」の多様化の推進や政策主導型の「国際宇宙探査」における太陽系科学の有意義な実現のためには、複数大学を研究開発のために拠点化し、太陽系科学の知識の上に、多様な分野の多様なミッション機器の開発やデータ処理・シミュレーションを通じての次世代のミッションを提案していくことのできる基礎研究とこれに従事する人材の涵養が必須であると言える。ここでは、探査計画・ロードマップの立案・調整機能、小型/超小型探査機の自律的運用、機器開発戦略・体制の検討・人材育成を主導するコンソーシアムについて概説する。

2019年に東京大学の宇宙理学・宇宙工学のコミュニティメンバーが協力して、大学・大学院における教育のための宇宙人材育成強化プログラムが提案された。この提案とコンソーシアムの役割分担を明確にするため、惑星探査コンソーシアムにおける人材育成は学位取得後の高度人材育成に特化し、小型/超小型探査機の運用とデータ解析、搭載機器開発、シミュレーションコード開発・データアーカイブ構築の実践を通して若手研究者の育成に貢献する。

#### 惑星探査コンソーシアム

JAXA や宇宙関連企業との連携により大学等の研究教育機関間の有機的ネットワークを構築し、惑星探査のミッションプランの改定、さらに惑星科学分野における研究開発の推進ならびに惑星探査を支える多様な高度人材の養成を促進し、かつ、そのような人材の育成に関与しつつ探査ミッション立案や様々な検討にそのエフォートの多くを費やすことのできる太陽系科学分野の研究者数を拡充する。

#### 背景・必要性：

- ・ 世界は太陽系探査時代を迎えてはいるが、太陽系探査により時間を使うことのできる日本の太陽系科学者の人口は多いとはいえない。主に米ソ欧の探査結果を基に太陽系の理解を進める上で活躍してきたこれまでの研究者群(数)に加えて、探査ミッション立案を我が国として主体的に推進することに従事できるあらたな研究者群(数)が必須である。
- ・ 現在、「宇宙科学探査」では、DESTINY<sup>+</sup>、JUICE、さらに、「国際宇宙探査」では、SLIM、MMX、月極域探査など複数のミッションが同時に立ち上がりつつあり、それに続く中型ミッションとして火星周回・着陸ミッション(MACO)などの検討が進んでいる。これらのミッションを支える人材の育成と研究開発拠点の充実喫緊の課題である。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 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。

#### 組織と運営：

- ・ 惑星探査コンソーシアムは、コンソーシアム会員の互選と、JAXA 国際宇宙探査センターからの推薦、宇宙研の代表、学会の代表からなる運営委員会により運営されるものとする。運営委員会は年に1~2回のタウンホールミーティングを開催して、コミュニティの意見を集約する。

#### 専門委員会：

- ・ 運営委員会の下に4つの専門委員会を設置し、中心となる研究拠点が活動をリードする。
  - (i) ロードマップ策定専門委員会
  - (ii) 小型/超小型探査機運用・解析センター専門委員会
  - (iii) 搭載機器開発専門委員会
  - (iv) シミュレーションコード開発・データアーカイブ構築専門委員会
- ・ 今後の日本では、「宇宙科学探査」だけでなく、「国際宇宙探査」を支えさらに有人探査を視野に入れた幅広い基礎研究と開発が必要である。そのために、研究開発の拠点大学を選定し、実践教育を通して次世代ミッションの核と惑星探査を担う人材の涵養を行う。
- ・ 研究開発拠点では、小型/超小型探査機の運用、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する。
- ・ この研究開発拠点は、有人月惑星探査に向けた環境・資源データを取得する研究から、基礎的な科学データの取得まで様々な課題に対応するための拠点が展開されることが望ましい。その結果、政策主導型の「国際宇宙探査」にも積極的に対応可能である。
- ・ さらに、この研究開発拠点は、JAXA と共に SSERVI(Solar System Exploration Virtual Institute)の日本ブランチを担う組織として機能し、NASA と連携して「国際宇宙探査」を推進することを目指す。

(i) ロードマップ策定専門委員会：

JAXA とコミュニティの連携を担当する事務局機能を持つ拠点を置き、JAXA 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。コミュニティ連携の拠点事務局は、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。宇宙理学コミュニティ内の議論に閉じず、宇宙工学、資源工学、宇宙居住科学、宇宙生物学、宇宙農学、産業界など広範な関連分野との調整・連携を促進する。

(ii) 小型/超小型探査機運用・解析センター：

「かぐや」における「おうな」、「おきな」、「はやぶさ 2」における MASCOT、プロキオン、DESTINY+の経験と実績、そして設備と装置を再活用して、大学・研究機関連携による小型/超小型運用・解析センターを立ち上げる。共通インフラとしてコミュニティにサービスを提供する。運用資金獲得のために宇宙科学技術推進経費に応募する。

(iii) 搭載機器開発専門委員会：

宇宙研が主導する宇宙科学探査に搭載される機器の開発流儀(審査プロセスと開発資金配分)は変更せずに、惑星探査コンソーシアムは小型/超小型探査機向け搭載機器開発に特化して支援を行う。コミュニティ内での役割分担、分業を促進させる。特に新規参入、異分野からの参画、学際的企画には経験ある研究グループとの連携を促して積極的に支援する。機器開発の経験値を上げる事で、ボトムアップ型の宇宙科学探査に主体的に提案することができる研究グループを質・量ともに増加させる。

(iv) シミュレーションコード開発・データアーカイブ構築専門委員会：

シミュレーション研究はもはや太陽系探査の計画立案からデータ解析にいたるまで欠かせないツールである。専門委員会のリードにより専門家集団を有機的に連携し、探査の支援を行う。データアーカイブを維持するためには、恒常的な保守とアップデートが必要である。こちらも専門委員会がリードして、国際的利用を促進させる。

高度人材育成：

- ・ 若手研究者・技術者の人材育成を着実に進めるためには、多くの若手が配置される研究開発拠点に、若手を研究グループの一員として指導・育成していくシステムが必要である。各専門委員会をリードする研究拠点は宇宙工学、資源工学、宇宙居住科学、宇宙生物学、宇宙農学、産業界などと積極的に共同研究を実施し、人的交流を行う。

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きた。
- ・ 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した。
- ・ 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。さらに、マスタープラン 2020 に提案する準備を行っている。
- ・ 有志により、定常会合を持ち、情報交換と組織設計を進めている。
- ・ 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。さらに、JAXA 国際宇宙探査センター、文部科学省研究開発局宇宙開発利用課宇宙利用推進室、日本航空宇宙工業会などに惑星探査コンソーシアムの実現に向けて働きかけている。

(d) 工程表 (ロードマップ)

本工程表 (図 2) では、太陽系における生命生存環境の理解に向け、通底する探査科学目標への貢献という観点から、各探査 (案) の位置づけを整理した。各探査名の記された年代的な位置は、打ち上げ年ではなく、主要な科学成果の獲得を見込む年代を示す。それぞれの準備期間・運用期間は表 S6 に示す。探査の科学目標は、生命生存環境の「形成」と「持続性」に二分される。「形成」に関しては、惑星原物質を低温の未変質状態で保存している天体の探査 OKEANOS、また岩石天体の初期分化過程と地球・月系への物質供給の情報を記録している月の極域探査と HERACLES (SR 探査) を、今後 20 年の重要なマイルストーンとする。また「持続性」に関しては、火星着陸 (地下水圏・生命圏探査) をマイルストーンとし、それにむけた布石として着陸技術実証も兼ねた、火星宇宙天気・気候・水環境周回探査 (MACO) を位置付ける。これらは、先行する Bepi-Colombo、SLIM、MMX、DESTINY<sup>+</sup>、国外ミッションへの参加、またこれまでに我が国が有意性を培ってきた月惑星ミッションの科学技術の発展形として位置付けられる。これらの探査の推進を通じ、コンセプト検討段階の探査案の実現化を図るとともに、太陽系における生命生存環境の形成と持続性の理解を飛躍的に高め、宇宙に開かれた惑星生命観の創成と人類の活動領域の宇宙への拡大に貢献することを目指す。

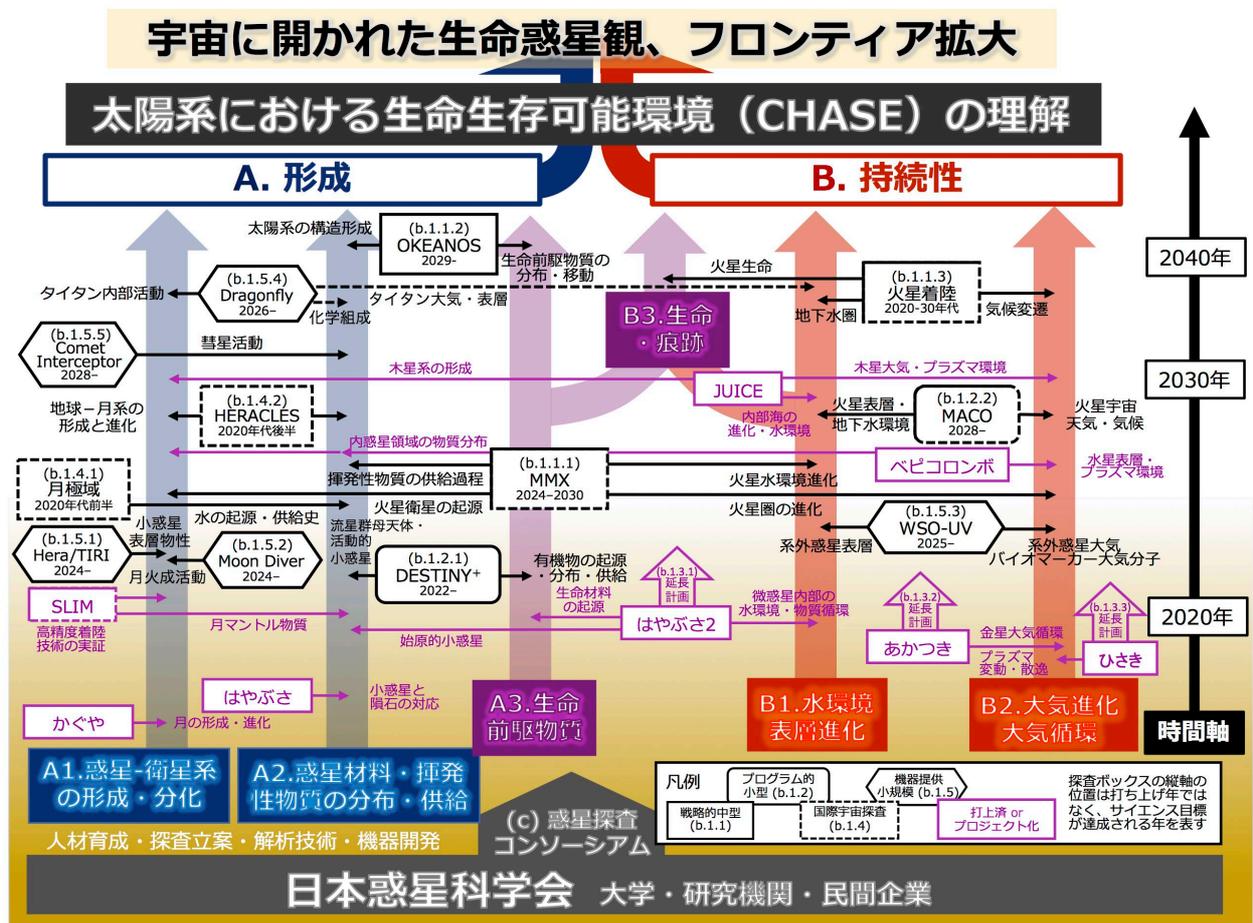


図 2. 太陽系・系外探査プログラムの工程表