

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）

APPENDIX

目次

APPENDIX-0: (前書き) 2018年改訂版からの主な変更点.....	2
APPENDIX-1: (a.1.7) 氷天体（氷衛星、Kuiper-Belt天体）探査（詳細）	3
APPENDIX-2: (a.1.8) 系外惑星研究におけるサイエンスおよび海外プロジェクトの動向（詳細） .	4
APPENDIX-3: (b.1.2.2) MACO計画（詳細）	7
APPENDIX-4: (b.2) 戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発（各機器の概要） ...	11
APPENDIX-5: (b.3) 将来SR探査における化学分析とキュレーションの長期展望（詳細）	19

APPENDIX-0: (前書き) 2018年改訂版からの主な変更点

「(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」に関する変更点
国内外の最近の動向を反映する形で改訂した。

「(b.1) 惑星探査プログラム案」に関する変更点

「(b.1.3) 延長計画」の枠を新規に設けて、「(b.1.3.1) はやぶさ 2」、「(b.1.3.2) あかつき」、「(b.1.3.3) ひさき」を追加した。

「(b.1.5) 機器の提供による国外探査計画・小規模計画」に関する変更点

新規項目として、「(1.5.1) 小惑星探査機 Hera／熱赤外カメラ TIRI」、「(1.5.2) NASA Discovery 計画 Moon Diver への小型観測機器プローブ提供」、「(1.5.4) 土星衛星離着陸探査計画 (Dragonfly)」を追加した。

その他の改訂に関して

その他、すべての項目に関して、2018年版から内容が進展した箇所に関しては、その内容を反映させる形で改訂を行った。

APPENDIX-1: (a.1.7) 氷天体（氷衛星、Kuiper-Belt 天体）探査（詳細）

- 各天体の探査の科学的意義・工学的ハードル
 - 地球外生命圏の環境把握へ：氷天体その場探査
 - 科学的意義：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。
 - 工学的ハードル：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
 - 現在進行中の計画
 - Juno (NASA: New Frontiers program#2、木星)：2016年7月木星周回軌道投入。2021年計画終了。
 - New Horizons (NASA: New Frontiers program#1、冥王星・KB天体)：2019年1月Ultima Thuleフライバイ。2030年代計画終了。
 - 準備中の探査計画（予算承認済）
 - JUICE (ESA: L-class program、木星系)：2022年打上、2029年木星到着、2032年ガニメデ周回軌道投入。2033年計画終了。
 - Europa Clipper (NASA: Flagship program#2)：2025年打上、2025-32年木星到着、木星周回・Europaフライバイ探査。
 - Dragonfly (NASA: New Frontiers program#4)：2026年打上、2034年タイタン到着。大気飛行回転翼機・着陸機。気象観測および湖（湖底）と表面の化学観測。
 - 提案された探査計画（予算未承認）
 - 米国：次期 Flagship mission（2020年選定予定）へ提案された計画のうち本領域対象のもの。
 - Icy Giant Explorer: 4種のミッション案を検討。Neptune Orbiter w/ Probe、Uranus Orbiter w/ Probe、Uranus Orbiter w/o Probe、Uranus Flyby w/ Probe、2024-2037のDecadal Surveyを見据える。衛星観測も視野に入る。
 - 米国：次期 New Frontiers Program#5へ提案された計画のうち本領域対象のもの（2021年12月までに選定、2024年打上予定）
 - Flyby of Io with Repeat Encounters (FIRE): Io観測機。打上6年後に到着、多回数（4ヶ月間に10回以上）フライバイ、火山活動観測。
 - Oceanus: Titan周回機。打上後10年で到着、2年間の土星周回後、Titan周回軌道へ。着陸機搭載の可能性有。
 - Enceladus Life Finder (ELF): Enceladus プルーム物質のその場質量分析。
 - Enceladus Life Signatures and Habitability (ELSAH): Enceladus 探査のようだが詳細不明。
 - 欧州：次期 Cosmic Vision M-class #5へ提案された計画のうち本領域対象のもの（2020年冬選定、2029-30年打上予定）
 - Akon: エウロパペネトレータ。
 - Explorer of Enceladus and Titan (E²T): 2036年土星到着。土星周回にて両衛星に複数回フライバイ探査。その場物質分析と表面電波探査。
 - Hera Saturn Entry Probe: 2025年打ち上げ、2033年度制到着。土星大気への降下プローブと周回機による土星大気観測。
 - Joint Europa Mission (JEM): NASAのエウロパランダーの運搬とデータ中継に加え、エウロパ周回中に科学観測を行う。

APPENDIX-2: (a.1.8) 系外惑星研究におけるサイエンスおよび海外プロジェクトの動向（詳細）

Kepler 宇宙望遠鏡等による大規模な系外惑星サーベイ計画によって、これまでに 3000 個以上の系外惑星が発見され、宇宙における惑星系の普遍性が証明された。同時に、太陽系とは構造の大きく異なる惑星系や、スーパーアースのように太陽系には存在しない惑星が無数に発見されるなど、惑星系および惑星の多様性も明らかになった。これにより、太陽系内に閉じていた比較惑星学は太陽系外も含めた比較惑星系学へと発展した。そして、太陽系の構造や太陽系内惑星の個性を俯瞰的に理解しようとする試みがなされている。それだけでなく、系外惑星の発見によってもたらされた惑星移動等の新たな知見が、太陽系形成史の理解にフィードバックされ、グランドタックモデルに代表されるように太陽系形成史に対する新たな描像も生まれた。

近年では、発見された惑星を追観測し、その特性をより詳細に解明しようとする試み（いわゆる特徴付け）が行われている。特徴づけ可能な惑星数はまだ非常に限られているが、惑星の質量や半径、軌道要素などの物理的特徴だけでなく、惑星の内部組成や大気成分、大気の鉛直・水平温度分布、雲の有無、アルbedoなどに関する新たなデータが取られつつある。これらによって、惑星形成に対して化学的な制約が新たに与えられる。それに加えて、極限環境下での大気特性や物理・化学的応答に対する知見も得られる。その中には、強い紫外線に晒された惑星や強還元的大気を持つ惑星など生命が発生した頃の初期地球環境に似た惑星もある。

さらに最近では、Proxima Centauri や TRAPPIST-1 などのように、太陽に比べて小さな恒星（赤色矮星）であるが、その周りに地球と同程度のサイズで同程度の中心星光照射を受ける（いわゆるハビタブルゾーン内にある）惑星が発見されはじめた。しかも、これらの惑星系は太陽系から 10 パーセク程度以内と非常に近くにあるため、上述のような特徴づけが可能である。これまで仮想的な惑星に対する理論研究をベースに進展してきたハビタブル惑星研究が、いよいよ実在の惑星を対象とした実証的な研究となる時代が到来したと言える。

こうした流れの中、系外惑星研究の今後 10-20 年における主要課題として

- (A) 公転周期が約 100 日以下の惑星（いわゆる短周期惑星）の特徴づけ
- (B) 公転周期 100-10⁴ 日程度の惑星（いわゆる中周期惑星）の発見とその特徴づけ、太陽系類似系の存在度の決定
- (C) 主に低温度星まわりのハビタブルゾーン内に存在する地球型惑星の大気成分の同定およびバイオマーカーの検出

が挙げられる。図 A1-1 に計画されている宇宙望遠鏡プロジェクトを示した。さらに、図 A1-2 には、特徴づけのための分光観測を行う計画のターゲット層を示した。

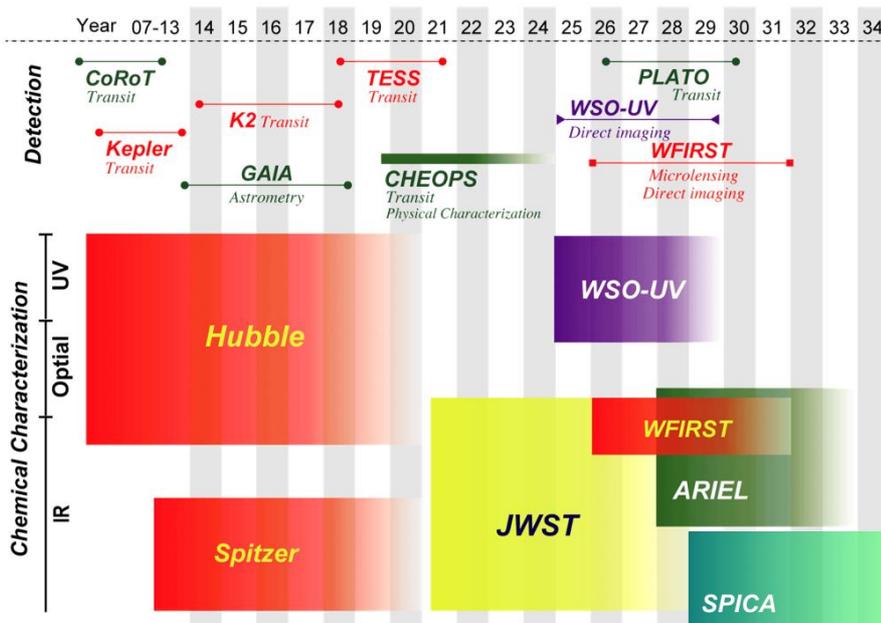


図 A1-1—系外惑星観測に関連する宇宙望遠鏡計画。検出を目的とした測光観測と、特徴付けを目的として分光観測が分けて示されている。赤はアメリカ主導、緑はヨーロッパ主導のミッションを示す。黄色で示した JWST は欧米共同、紫で示した WSO-UV は日露共同のミッションである。

課題 (A)—Kepler の第 1 期ミッションのターゲットは、太陽から 100 パーセク以上と遠く、そのために暗く、追観測による特徴付けに不向きであることが知られている。そこで、次世代サーベイ・ミッション (2018 年に終了した K2、2018 年 4 月に打ち上げられた TESS) では、Kepler ターゲットとは対照的に太陽近傍の明るい恒星に対して系外惑星サーベイを行い、特徴付けに相応しいターゲットを検出することを目的としている。これらのミッションでは、惑星サーベイはトランジット観測によって行われ、各方向に対する観測期間が 1 年以下と短いため、検出されるのは主に短周期惑星となる。

そして、検出された系外惑星の特徴付けに活躍が期待されるのが、CHEOPS、JWST、ARIEL である。CHEOPS は、高精度測光観測により惑星の物理量を精度よく決めるミッションであり、分光性能はない。一方、JWST は可視域 ($> 0.6\mu\text{m}$) から中間赤外域 ($< 28\mu\text{m}$) にわたって分光できる大型宇宙望遠鏡であり、系外惑星大気の特徴付けに大きな期待が寄せられているが、汎用望遠鏡であるため観測時間は限られる。そこで、ESA の M4 ミッションとして採択された 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。ARIEL には、日本の参加が検討されている。一方、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 $12\text{-}18\mu\text{m}$ 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。

課題 (B)—これまでの系外惑星観測は主にトランジット法と視線速度法によって行われてきたが、その観測バイアスのために、これまでの研究対象は主に短周期惑星であった。しかし、太陽系の特殊性あるいは類似な惑星系の普遍性を本当に理解するためには、太陽系類似の惑星系 (同程度の広がりを持ち、その中で惑星の空間分布・質量分布が似ている惑星系) を調べ、太陽系との直接的な比較ができるようになる必要がある。そのために、広いパラメータ領域の惑星を検出していく必要がある。2026 年打ち上げ予定の PLATO は、トランジット法によるサーベイであるが、1AU 以内にある地球程度の惑星まで検出することを目標としている。また、WFIRST が行う重力マイクロレンズ法は、太陽系で言えば木星や土星の公転周期に相当する中周期に感度があり、GAIA が行うアストロメトリ法はより長周期の惑星も検出可能である。したがって、WFIRST や GAIA によるサーベイによって、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。

課題 (C)—K2 や TESS によって検出される系外惑星の中には、少なくとも赤色矮星 (M 型星) のまわりでは、ハビタブルゾーン内に地球サイズ惑星が複数個あるに違いない。また、PLATO は太陽型星 (G 型星) のハビタブルゾーン内の地球サイズ惑星の検出を目指している。そのような生命存在の可能性が期待される惑星については、惑星大気透過光や惑星放射光の分光観測によってより詳細な情報を得ることが極めて重要である。そのような観測は、JWST や、2020 年代に運用開始予定の 30m 級の地上大型望遠鏡で試みられるだろう。しかし、地球型惑星の大気分子のシグナルは弱いので、このような次世代の大型望遠鏡でも、酸素 (O_2) やオゾン (O_3) といったバイオマーカーの検出は難しい観測となる。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、ハッブル宇宙望遠鏡の稼働停止以降の唯一の紫外線望遠鏡であるだけでなく、広がった酸素原子 (O) を検出できる観測として期待される。

上述のように、系外惑星の化学的特徴付けは、2020 年代に大きく飛躍すると期待される。しかし、ハビタブルゾーン内の地球サイズの惑星のバイオマーカー探査といった高精度な観測がこれらの将来観測でどこまでできるかは議論的である。それはターゲット惑星の大気の属性や検出器の運用精度に大きく依存するが、ハビタブル惑星で大気分子を検出できるのは多くても 2-3 個ではないとも言われる。そこで現在 NASA では、2030 年以降に打ち上げる新しい宇宙望遠鏡として現時点で 3 つの可能性を検討中であり、そのどれもがバイオマーカー探査を念頭に置いたものとなっている。そのうちの 2 つとして LUVOIR と HabEx は、K・G・F 型星の周りのハビタブル惑星の反射光による直接撮像を主要なサイエンスゴールとするコンセプトであり、LUVOIR は口径 10m クラスの汎用望遠鏡、HabEx は口径 4-6.5m 程度の望遠鏡として提案されている。一方 OST は中間-遠赤外領域における 10m クラスの汎用大型望遠鏡として計画されており、主に M 型星周りのトランジットハビタブル惑星について、惑星食を利用した熱輻射スペクトル、そして透過光スペクトルを得ることも目標となっている。このいずれが採択されるとしても、2030

年代には、地球に似た惑星（サイズ・温度）の特徴付けに本格的に迫っていくと考えられ、地球の普遍性、特殊性、ひいては生命環境の可能性が徐々に明らかになると期待される。

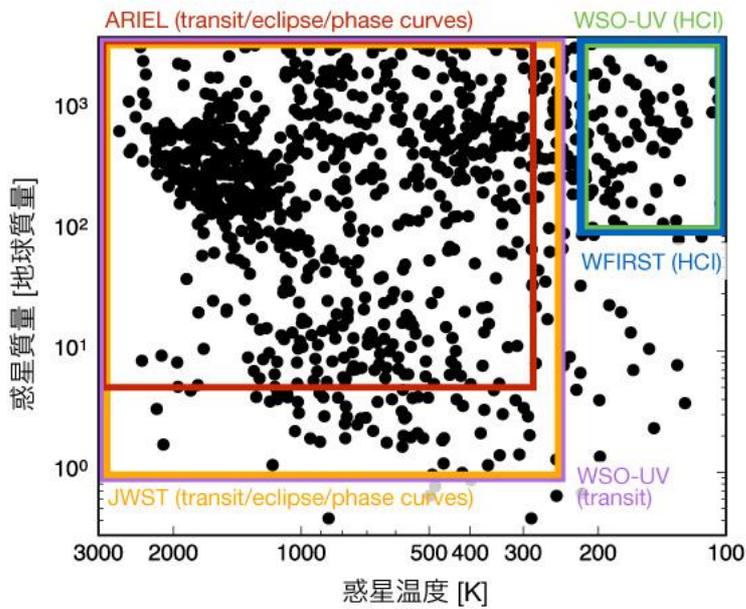


図 A1-2：系外惑星の分光観測を行う将来計画のおよそのターゲット層。個々の天体の観測可能性は、主星の特徴や明るさ等、さまざまな要素に影響される。(HCI = high contrast imaging) 黒点はすでに見つかっている系外惑星で、アルベドを0とした場合の平衡温度を温度としている。

APPENDIX-3: (b.1.2.2) MACO 計画 (詳細)

達成目標、観測項目、モデル科学機器

本文(b.1.2.2)に示したように、本計画は、近年の先行火星探査における新発見も踏まえ、ハビタブル惑星の理解に向けて、火星における宇宙天気・気候・水環境を探ることを目指している。また、国際協働宇宙探査に向けた我が国の戦略的火星探査の重要な一歩として、周回機と着陸技術実証機を組み合わせ、火星の大気や放射線環境の太陽変動への応答を調べるとともに、将来の着陸探査に向けた事前観測と技術実証も目的としている。本文に記した科学目標を達成するため、本計画では以下の3つの達成目標を掲げ、その実現に向け8つの観測項目を設定している。

達成目標：

1. 定地方時観測により、太陽変動への応答関数を観測的に導出し、過去 40 億年の大気散逸の変遷を時系列で推定可能にする[下記の観測項目: B, D, E に対応]
2. 火星オーロラを用いて火星周辺の宇宙環境を可視化し、南北半球の比較により、放射線環境と大気散逸への固有磁場の影響を理解する[観測項目: A, B, C, D]
3. RSL に着目して現在の火星水環境を測定することで、火星の水循環を推定するとともに、将来の着陸探査の事前調査を行う[観測項目: F,G,H]

観測項目：

- A: 火星オーロラ撮像, B: 磁場観測, C: 高エネルギー粒子観測,
 D: 火星軌道での太陽風・太陽放射モニター, E: 電離大気流出観測(撮像・その場),
 F: 浅部地下構造サウンディング, G: 水蒸気分布観測, H: RSL 高解像度撮像、上空気象観測

本計画では、上記の達成目標と観測項目をもとに、ミッション要求を精査し、これらを満たすモデル科学機器群を表 A3-1 に示す。

表 A3-1. MACO 計画のモデル機器と観測項目、開発状況

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

* オプション機器

戦略的火星探査における位置づけ

今後 20 年間の我が国の火星探査の方向性を検討した、JAXA 国際宇宙探査センターの火星タスクフォース報告書では、2030 年代の「火星地下水圏・生命圏探査火星着陸探査 (b.1.1.3)」を今後 20 年のマイルストーンと見据え、2020 年代の「MMX : Martian Moons eXploration」に続く、本格的火星着陸探査に向けた重要なステップとして、本計画を戦略的火星探査シリーズの計画 2 として位置づけている(図 A3-1)。

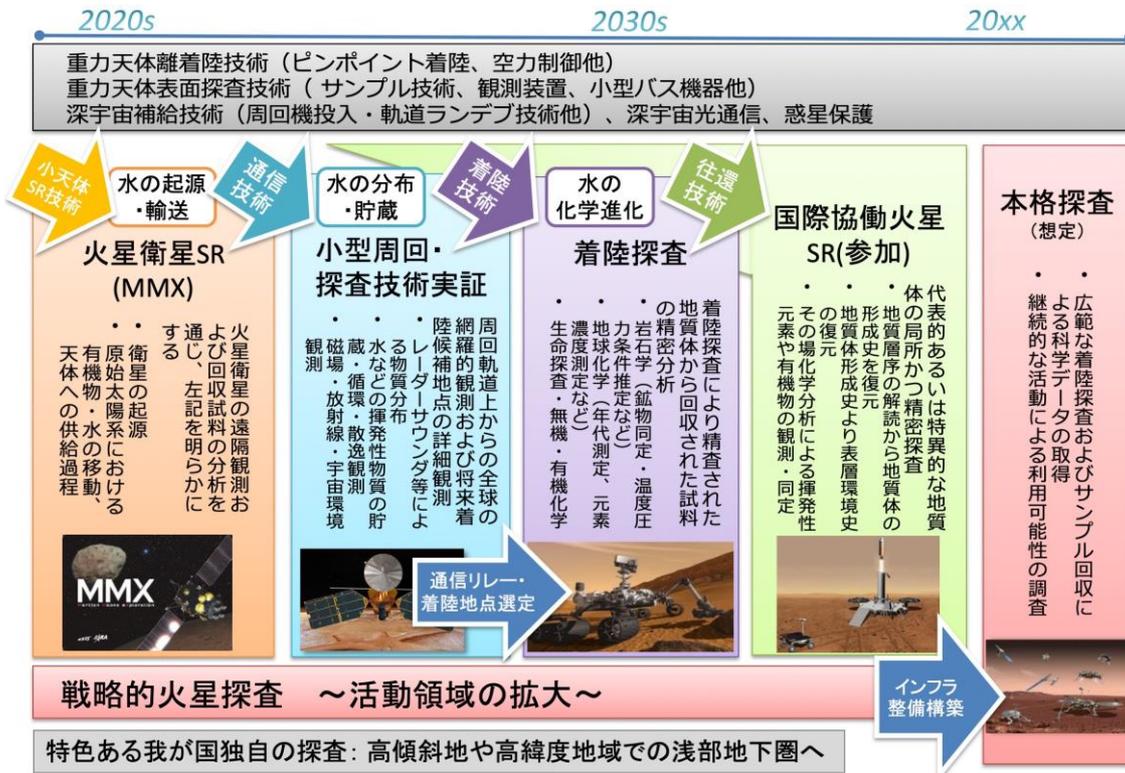


図 A3-1. 戦略的火星探査のロードマップ (出典: JAXA 国際宇宙探査センター火星 TF)

ミッションのアーキテクチャ候補と獲得可能な火星探査技術

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

戦略的火星探査においても、一度にすべての技術を用いるミッションを実行するのはリスクが高く、必要な技術を前駆的なミッションによって段階的に実証することが適切であろう。本計画は、戦略的火星探査において、着陸探査にむけた前駆的なミッションとしての位置づけられており、用いられるアーキテクチャと技術は、着陸探査ミッションで用いられるそれらと本質的に同じものでなければならないことは言うまでもない。また、将来我が国が国際協働有人火星探査へ参加し、そのアーキテクチャの中で主要な役割を担うことを最終的な目標としている観点からは、火星有人アーキテクチャと調和的な技術の獲得を選択的に行うことが望ましい (このアーキテクチャの中では、我が国は、HTV-X を発展させた HTV-M を用いて火星軌道へ貨物を輸送し、エアロキャブチャによって軌道投入し、火星ステーションへランデブすることや、軌道上/火星上での環境制御生命維持サブシステム、中規模の着陸システムとローバ等移動プラットフォームによる探査を担うことを

検討している)。火星後発国の我が国は、このような基本的な戦略を採用しなければ、効率的に（最小コストかつ最短時間で）最終ゴールに近づくことができず、将来の国際協働有人火星探査では限定的な参加に留まることが危惧される。

このような観点から、戦略的火星探査に必要な技術獲得に向けて、本探査計画のミッションのアーキテクチャと技術開発ロードマップを以下に考察する。まず、着陸探査のアーキテクチャがどのような場合においても、ミッションの実現時点において、独自の周回機を有することが極めて有効である（あるいは必須である）ことは言うまでもない。周回機と地上系プラットフォームを同時に実現するミッションは、システムが複雑で規模が巨大（大型ミッションクラス）となることが分かっており、実現することが極めて困難である。したがって、周回機探査を前駆ミッションにおいて実現し、それに続く着陸探査においてこれを利用する、という2段階（あるいはそれ以上）の探査プログラムを想定することが合理的である。火星戦略探査の中でMMXの次に周回機を用いることは、①火星オービタとして火星環境の長期的な科学観察を行うプラットフォームを提供し、②既存の海外の地上系プラットフォームへのデータリレーサービスの提供など国際協力に寄与し、③前駆ミッションに続く着陸ミッションのためのインフラストラクチャー（データリレー/EDL支援機能等）を提供し、また④着陸ミッションの着地点選定に必要なリモートセンシングデータの獲得を可能とするなど、複数の利点を有する。

また、本計画に続く火星着陸探査として移動プラットフォームによる探査を想定した場合、その前駆ミッションとして想定される本計画のアーキテクチャ候補を表A3-2に、各アーキテクチャによって獲得可能な火星表層環境探査の必要技術の内訳を表A3-3に示す。表A3-2の1は、火星着陸探査ミッションのサブスケールモデルとなる定点着陸実証機を用いるものであり、着陸探査に必要なほぼすべての技術を獲得することができる。しかし、実現可能な規模に抑えるためにオービタを含まないアーキテクチャとなっており（NASAのMSLと同じアーキテクチャを用いる）、軌道上プラットフォームを獲得することができず、上記①～④を実現することもできない。また、一度にすべての技術実証を行うことになるため技術的なリスクが高く、規模も小規模に抑えることが困難であると考えられる。表A3-2の2～6は1の欠点を克服するためにオービタを用いるアーキテクチャである。2は化学推進を用いてオービタを投入し、オプション地上系として小型の地上系プラットフォームを投下するものである。システム規模を実行可能な範囲に抑える地上系としては、飛行機、ペネトレータ、あるいは簡易な着陸機を搭載することを想定しており、空力誘導や着陸推進系など、重要なEDL要素技術の実証ができない。3はこの欠点を補うためにEDL実証機を搭載するものであるが、システムの複雑さと規模はEDL実証機の規模（あるいは取り込む技術の数）に応じて増大する。オービタに完全なEDL実証機（1に相当）を搭載したアーキテクチャでは、ほぼすべての技術実証を可能とし軌道上プラットフォームを実現するものの、システム規模とコストは大きくなり、実現は困難と考えられる。

表A3-2の4は、オービタを実現しながらEDL技術の部分実証を行うために、軌道投入にエアロキャプチャを用いるものである。エアロキャプチャは、定点着陸に必要な空力減速や空力誘導による軌道制御を用いてオービタを軌道投入することから、これを用いることで、着陸の最終フェーズを除くEDL技術の部分実証を行うことが可能である。また、エアロキャプチャはこれまで深宇宙探査において実行されたことがないことから、技術的独自性においても優れている。さらには、火星エアロキャプチャオービタは、火星圏輸送を行うHTV-Mの実証ミッションとしての位置づけも担う。このように、軌道上プラットフォームを実現しながら、EDL技術の部分実証を可能とし、将来の火星アーキテクチャへの連続性を有するという点において、エアロキャプチャオービタは本計画のアーキテクチャとして優れたソリューションの一つであると考えられる。しかしエアロキャプチャオービタ単体では火星表層環境へのアクセス手段がないため、地上系プラットフォームに係る技術を火星表層環境において実証できない。この欠点を補うものとして、オプション地上系を付加するもの（表A3-2の5）、あるいはEDL実証機を付加するもの（表A3-2の6）が想定される。火星エアロキャプチャオービタは小型～中型規模の探査機で実現可能であるが、これらの地上系を付加することによって、獲得できる技術が増加する半面、システムの規模とコストは増大することとなる。最も推奨されるアーキテクチャは4または5であるが、5においては地上系として何を選択しどの程度の規模とするかについて、十分な議論が必要であり、火星飛行機などの可能性も含めて、検討が始められている。

表 A3-2. 火星 MACO 計画のミッションアーキテクチャ候補（出典：火星 TF 報告書、一部改訂）

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

表 A3-3. 本計画のアーキテクチャ候補と獲得可能な火星探査技術（出典：火星 TF 報告書、一部改訂）

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

APPENDIX-4: (b.2) 戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発（各機器の概要）

優先するミッションを実現するためには高性能の搭載観測装置が必要である。また、優れた搭載観測装置を自前で持つことにより、国内の技術実証のための太陽系探査ミッション、海外の太陽系科学探査ミッションへの搭載機会を得る可能性も高くなる。そのために、戦略的な搭載機器の研究開発を実施する。ここでは、各機器の概要を示す。

1. 着陸・タッチダウン探査

① 生命探査顕微鏡（LDM : Life Detection Microscope）

【計画の規模】戦略中型、国際宇宙探査、海外ミッションへの参加を目指した装置開発。

【実施時期】2020年代

【学術的価値】地球外生命存在は、天文学コペルニクス的転換に相当する生物学でのダーウィン以来の大課題である。これまで火星や氷衛星において、生命存在可能性環境(液体の水、有機物、生命利用可能エネルギー源、生命構成元素、生命生存可能温度圧力等)が判明し、火星においては生命誕生可能環境が初期に存在したことも判明した。今後、有機物の存在に焦点を当てた探査(MarsExpress, Mars2020)が予定されている。LDMは、生命がいた場合にそれらが持つ可能性の高い性質(有機物でできている、膜に囲まれている、代謝を行っている)を地球生物型に限定しない(例えばDNAを持たない生物)で検出する装置として開発した。また、既存宇宙用顕微鏡画像解像度(10 μ m)の十倍の解像度(1 μ m)と1000倍の検出感度(10⁴細胞/g土壌)で探査することができる。これにより地球の最低微生物密度以下であるかどうかを判定する。

【実施体制】宇宙研WG

【計画の妥当性・成熟度】WGおよび戦略経費で毎年審査を受けている。2019年度BBM完成予定。

② 赤外ファイバを用いた小型レーザ分光器

【計画の規模】ロシアとの国際共同で計画を推進している。

【実施時期】火星着陸計画で浅地下の水関連物質、有機物、ガス探査を行う(想定時期未定)。また、米露金星探査計画Venera-D気球搭載を検討(2026-2031年)。その他にも搭載検討を広く視野に入れて進めている。

【学術的価値】火星水環境の進化を理解するには従来の宇宙散逸だけでなく地中および物質内の水計測による地下表層への流入を理解する必要があるが、これまでの探査ではガンマ線や電波による間接的傍証にとどまり、実現されてこなかった。ピンホール経由による物質内・地下へもアクセス可能な医療用赤外ファイバ挿入による希ガス・有機物・表層好物高精度計測を実現し、地中水貯蔵量の見積もり・大気-表層の水循環、そして火星における生命生存可能性の理解に大きく貢献する。

【実施体制】理工連携のもと、赤外ファイバを用いた光混合・分波のための数値シミュレーション・実証用素子の製造を片桐が、分光器への実装を中川・平原が、国際連携を笠羽がとりまとめる。これまでファイバの特性試験を実施し、小型試作器による地球大気計測を行ってきた。東北大ハワイ望遠鏡に実装し惑星観測を実現することで評価試験を進める。

【計画の妥当性・成熟度】基盤B・C、および山田化学振興財団の助成を受けて特性試験を実施してきた。2018年度も基盤B・JSPS二国間交流事業で申請済みである。前回からの主な進展としては、カプラについて設計の目処がたった。後期から試作に入る。広帯域化を踏まえた地上観測BBMも設計段階に。冷却環境下における反射率の実験を実施し、得られた結果を数値シミュレーションを用いて評価中。

③ 火星探査用ミュオグラフィ装置

宇宙線起源高エネルギー粒子ミュオンを検出し、その軌跡と数密度から地下数km程度までの地下構造を線密度の意味で推定するもの。密度を直接的に推定できる手法は他になく、火山体および水層などの構造探査に強みがある。日本で初めて実証された技術であり、地球での実例も多数あるため、世界に先駆けて宇宙用の開発ができれば、原理的にも日本発の極めて独自性の高い機器となる。火星環境においても地球と同等に应用可能と考えられるが、他にも火星衛星や小惑星へ適用できる可能性もある。現在小型化、宇宙用としての対応を検討しており、TRLは3。

④ 惑星大気・表層物質その場分析のための質量分析器

【計画の規模】基礎開発は科研費等ベース。搭載品はミッションに依る。

【実施時期】現在推進中・検討中の MMX, 月極域探査, 彗星探査, 将来火星探査などが対象

【実施体制】これまで磁気圏・月周辺プラズマ計測で実績を積んできたメンバーが開発を進めている。

【計画の妥当性・成熟度】MMX 搭載イオン分析器は搭載が決定している。その先の搭載を目指す機器については科研費を獲得して開発を進めている。

【学術的価値】質量分析器を用いた元素・同位体分析は、太陽系初期の物質輸送や惑星の進化を調べる上で鍵となる情報を提供する。このため惑星探査用の質量分析器は海外でも多くの開発・搭載実績があるが、国内で自前の質量分析器を開発する事は、各ミッションに最適化した観測を実現し独自の科学成果を出していくために極めて重要である。

⑤ HRMS (高分解能質量分析システム)

マルチターン飛行時間型質量分析器 (MULTUM) は、彗星探査機 Rosetta に搭載可能な小型・軽量・高質量分解能を実現する質量分析器として大阪大により開発された。HRMS システムは MULTUM をベースとし、OKEANOS ミッションに搭載を前提として大阪大を中心とした開発グループにより試作評価中である (計画の規模、時期については母体である OKEANOS を参照)。トロヤ群小惑星は木星型惑星の移動に伴い捉えられた太陽系外縁部天体である可能性が指摘されており、惑星形成過程の制約や太陽系外縁部天体とメインベルト小惑星の関連性を解明する鍵となる天体である。トロヤ群小惑星の起源や有機物進化を調べるため、木星トロヤ小惑星表面物質中の有機物、含水鉱物、揮発性物質中の水素・炭素・窒素・酸素の同位体比及び組成を測定対象とする。 δD , $\delta^{15}N$ 値の精度は $\pm 100\%$ 、質量分解能は $30,000@m/z\sim 300$ 、質量誤差は <50 ppm の精度を達成見込みである。試料の前処理のためのパイロライザーやガスクロマトグラフィー(GC)、また、宇宙仕様に対応した高速パルス高圧電源・スイッチング回路、高速読み出し処理などの要素技術も開発中である。フランスの宇宙用 GC チームとの共同で、GC と MULTUM の連動試験も実施した。

⑥ 短周期+広帯域地震計

【計画の規模】小型、中型は問わない。国内、海外の固体天体の着陸探査における地球物理観測機器として提供を想定している。ペネトレータや軟着陸機などで地面や地中に設置して観測を行う。

【実施時期】NASA のニューフロンティアプログラム 4 番目の最終候補である土星衛星探査計画「Dragonfly」の離着陸探査機に搭載する地震計パッケージの 1 つとして本地震計の適用を検討している。2019 年 6 月にプログラム採択されたため、米国ジョンホプキンス大学応用物理学研究所(APL)と JAXA 宇宙科学研究所(ISAS)で共同開発を行う事で調整中である。Dragonfly 探査機の打ち上げは 2026 年、タイタン到着は 2034 年の予定である。また、国際共同月探査計画である HERACLES ミッション(2026 年頃)への提供も視野に入れている。

【学術的価値】まず、固体天体における地震動の有無、その活動状況、内部ダイナミクスについての見解を得ることができる。加えて、地震波が伝搬した領域の弾性波速度構造、層構造を解明し、更に、温度・圧力の情報を加えることで、内部の鉱物組成、物質構造も推定可能となる。これらは固体天体の起源を考えるうえで最も基本の情報を与える。

【実施体制】ペネトレータ開発グループの地震観測チームが主体となる。LUNAR-A、SELENE-2、APPROACH 提案、UAV 搭載ペネトレータ開発で、ペネトレータ及び軟着陸機への搭載を想定して開発を実行してきた。

【計画の妥当性・成熟度】短周期地震計はペネトレータ搭載用として開発されたものであり、地上での観測実績を有し、月面環境下での性能評価を実施済みである。また、広帯域地震計は 2015-2017 年の科研費研究ですでに設計を終え、観測試験を実施済みである。さらに、現在、土星衛星タイタンのような極低温環境への適用性を確認するため耐性評価と地動観測試験を行っている。

⑦ Active Seismic Exploration

【計画の規模】本計画は将来探査に提案可能な観測機器を開発することが目的である。加振源で人工的に振動を発生し、それを地震計で受振することで、地表～深度 100m 程度までの地質構造を精度よく調べることを目標としている。現在は、月極域探査の搭載機器候補として同プロジェクトから開発予算を獲得している。また、それ以前は宇宙科学研究所の基礎開発実験費を用いた研究開発を進めており、将来的にも同程度の予算規模を想定している。

月極域探査で開発中の観測機器は Lunar Active Seismic Profiler (LASP) で、超小型加振源と地震計からなるアレイをローバに設置し、地下 1.5m 程度までの S 波速度を精度良く (5m/s 程度の誤差) で推定する。この探査を複数点で実施すれば、3 次元地下構造を推定することができ、含水層の空間分布と含有率を調べることができる。また室内実験で水氷の含有率と S 波速度の関係も調べており、0.5wt% 以下の水氷含有率でも、S 波速度変化として検出できることが明らかになっている。これらの結果から、LASP で得られる S 波速度の精度があれば、0.5wt% の水氷を探査できることが示されている。

【実施時期】 2020 年代

【学術的価値】 本観測機器は地震計と人工加振源を含む地震探査パッケージでありアクティブ探査により重力天体から微小重力天体まで多様な天体の内部構造の探査を可能にする。

【実施体制】 月極域探査の搭載機器候補として採択されており開発チームも活動を開始している。

【計画の妥当性・成熟度】 LASP については、月極域探査計画の搭載機器候補として開発予算を獲得し、BBM の製造を実施した。既に BBM を用いて学生実験でも利用できるほど、システム化が進んでいる。8 月末にこれまでの概念検討、試作品の評価の結果を報告書として提出済みである。

⑧ 月惑星表面長期その場観測ユニット

月・小惑星など、主に大気の無い固体天体の表面に長期間定点設置する観測機器を天体環境から保護して、(主に熱設計・電力設計など技術的な意味で) 長期生存・観測を可能とさせる理学観測用サブシステム。特に月面など自転周期が長く昼夜の温度変動が観測装置の動作温度範囲を逸脱する環境において必須のサブシステムである。内部に搭載する観測装置は主に地震計、熱流量計、磁力計などの地球物理学的な長期観測型の機器を想定するが、これらに限定はされない。SELENE-2 地震計・熱流量計・磁力計・iVLBI 電波源の月面設置のため検討・開発を開始し、現在は基礎開発が終了して PM・FM を製作可能な段階にある。SELENE-2 では審査ののち搭載機器として選定されたが計画が中止となった。この他、火星衛星探査計画・月極域探査計画などで検討・提案を行なった。小川和律、および JAXA に技術と開発成果が蓄積されており、新たな計画に即座に提案できる状況にある。

⑨ 地下探査レーダ (ローバ搭載 GPR)

本グループでは、周回機搭載レーダサウンダとローバ搭載 GPR (Ground penetrating radar) で月・火星地下の水・氷探査を行うことを提案しているが、複数ミッションに分けて行われることも想定して、2 項目に分けて、本項目ではローバ搭載 GPR の概要情報を記載する。

ローバに GPR を搭載し、火星や月面 2~100m 程度までの構造を探査する。SELENE-R においては表層深さ 1.5m までに存在する 10cm を超える地下帯水層・氷層・氷塊を検出する。水・氷の分布状況から、循環・集積過程を明らかにする。他のローバ搭載機器で掘削・分析が行われる場合、掘削前に水・氷の存在が期待できるか、掘削を妨げる岩塊がないかの予備調査にも GPR は貢献する。さらに掘削アームにアンテナを取り付けて掘削孔内で受信を行うことができれば

(ボアホールレーダ観測)、地中の誘電率分布を絶対値で決定することができ、レゴリスの空隙に氷が含まれているような難しいケースでも氷有無の判定が可能となる。火星でのローバ搭載 GPR 観測は、ExoMars Rover/WISDOM (2020 年打上・2021 年着陸予定) が先行することになるが、この GPR は観測周波数 0.5~3GHz、偏波 (フルポラリメトリック) で観測を行う。フルポラリメトリック方式は、送受信アンテナ 2 セットを要するが、地中の不均質の特性変化、氷層・氷塊検出に有利であることから、本提案の GPR でも検討している。さらなる重量削減を要するミッション、基幹ローバに加えて予備調査用の小型ローバの展開を考えるようなミッションを想定して、ステップ周波数方式・省重量の機能限定モデルの検討も進めている。

⑩ K-Ar 年代計測装置

- 【計画の規模】 MMX のあとの火星着陸(戦略的中型)、月着陸、HERACLES、今後の国際共同ミッションによる搭載を目指す。
- 【実施時期】 ヘラクレス探査に提案済み。月極域探査などにおいて個々の要素機器を実現させ、将来の月火星着陸探査での年代計測実現を狙う。
- 【学術的価値】 月・火星の地質ユニットの年代計測によって地球生命誕生期の内側太陽系への物質輸送と太陽系力学構造の変化を理解することは、惑星科学に広汎な波及効果を持つ。同様に、月面クレータ年代の推定精度(精度 $\leq 15\%$)の向上は、地球型惑星全般の表面年代推定精度向上および小天体のサイズ分布進化の復元に役立ち、いずれも月科学に留まらない重要性を持つ。
- 【実施体制】 国内では長、亀田を中心に開発。火星着陸技術実証 WG で 2014 年度に検討を実施。2016 年 4 月から 2018 年 6 月まで長が NASA Goddard Space Flight Center に在籍して B.A. Cohen のグループで技術開発。玄武岩試料の年代計測実証論文を出版。(Cho & Cohen 2018)
- 【計画の妥当性・成熟度】 SLIM, 火星着陸技術実証 WG, HERACLES へ提案。BBM を完成し、伊豆大島でのローバ搭載試験を 2016 年度に実施。搭載機器要素である LIBS, 質量分析器, イメージャ、コア抜き装置等は、それぞれの探査提案で個々に実現させ TRL 向上を狙う。

⑪ レーザー誘起発光分光装置 (LIBS)

- 【計画の規模】 月極域探査、HERACLES 探査に提案。いずれも国際共同ミッションを想定する。
- 【実施時期】 月極域探査、HERACLES 探査に提案。将来火星着陸探査での利用も想定。
- 【学術的価値】 着陸地点の地質調査には、露頭の地形を観察するカメラ、露頭を構成する表土や岩盤の化学組成、岩石種・組成・組織及び鉱物分布・粒径・組成を計測する機器が必要となる。LIBS は高い空間分解能($\sim 300 \mu\text{m}$)を持ち、短時間で遠距離物質 (1.0-1.5 m) の化学組成分析を行うことができる。また、レーザーアブレーションにより深さ方向 ($\sim 1 \text{mm}$) の分析が可能であるため、表面を覆うレゴリスや宇宙風化層を取り除いた岩石の化学組成データを取得できる。水素や炭素などの揮発性元素を計測することも可能である。
- 【実施体制】 長・亀田を中心に開発。2016 年度に MMX 搭載を目指した概念検討を実施。2019 年度には月極域探査のための検討費用を受領し、東京大学において BBM を製作して原理実証実験を行った。また、主要コンポーネントである小型レーザーの環境試験を行った。
- 【計画の妥当性・成熟度】 計画の妥当性、成熟度： SLIM, MMX, HERACLES, 月極域探査へ提案。MMX 計画への提案のためメーカー検討を実施。

⑫ Raman spectrometer for MMX (RAX)

- 【計画の規模】 MMX ローバへの搭載を目指して開発中。CNES・DLR との国際共同ミッション。日本ではレーザーをフォボス表面に照射するための光学系と焦点調節機構を担当。
- 【実施時期】 MMX と同時打ち上げ。
- 【学術的価値】 分子間結合種の同定により、有機物・塩・含水鉱物など地質学的・アストロバイオロジー的に重要な物質の組成分析を行うことができる。鉱物組成の情報は、LIBS・APXS 等による元素分析と相補的である。レーザーを用いるため局所分析が可能で、所要時間も数分程度と非常に短時間であり、表面研磨などの試料準備が不要である。
- 【実施体制】 DLR, CNES との共同開発の検討を 2018 年夏から開始。国内では長、湯本(東大)、亀田(立教大)、臼井、大槻 (ISAS) で集光用望遠鏡の焦点調節機構の提供を軸に検討中。
- 【計画の妥当性・成熟度】 MMX ローバ(DLR, CNES)への搭載に向けて開発中。

⑬ 探査車搭載型中性子検出器 (Neutron Detector on Rover)

- 【計画の規模】 探査車搭載型中性子検出器は月極域探査計画における水探査を目的とした観測機器として検討を行っている。
- 【実施時期】 月極域探査計画の打ち上げは現時点で 2020 年代前半を目指している。FM 製作は月極域探査打ち上げの約 1 年前までを目指している。
- 【学術的価値】 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氷の資源利用可能性を評価する」ことにある。探査車搭載型中性子検出器は、月極域探査ローバに搭載することを目的として設計している。探査用ローバが探査領域を走行する際に、掘削を用いずに深さ約 1m までの水氷の濃淡を観測することが可能である。水平方向の空間分解能は数 m 程度で、0.1wt% の水氷の存在量を検出可能である。これにより、掘削して詳細観測するための地

点を調査することが可能であり、かつローバが走行した領域の水氷濃度マップを作成することを目的としている。水氷の月極域への濃集に関する知見は、資源利用の観点のみならず、月地球系への水の輸送や太陽系内の物質移動に関する理解を得ることができ、理学的にも貢献可能な探査であり、探査車搭載型中性子検出器は本探査の重要観測機器である。

【実施体制】中性子検出器の惑星探査実績は豊富にあるが（ルナプロスペクタ、マーズオデッセイ、メッセンジャー、DAWN 等）、日本国内製の搭載実績はない（ただし ISS には実績あり）。惑星核分光法は惑星探査のキー技術であり、かぐや搭載 GRS のチームメンバー（PI：長谷部信行）により検討は継続的に続けられており、SELENE-2、MMX などにもガンマ線・中性子検出器の搭載を提案している。月極域探査計画に最適化した検出器のコンセプト検討を行うために現体制を組織したのは 2017 年 12 月である。

【計画の妥当性・成熟度】本観測機器は、2018 年 11 月に JAXA より募集された「月極域探査のための観測機器の検討提案および搭載希望調査」に応募し、選定された機器である。現在 JAXA 月極域探査ミッション定義チームと契約を結び、概念検討を行っている。

2. 周回探査

① 惑星探査用高コントラストオプティクス

【計画の規模・実施時期】火星宇宙天気・気候・水環境探査検討グループで検討を進めている火星大気流出撮像装置に実装を予定（2024 年頃?）。

【学術的価値】系外惑星観測技術で培った技術を活用し、微細ガウシアンエッジ構造をもつ遮光バツフルを独自に開発。それを実装することで惑星大気宇宙散逸の 2 次元撮像を可能にすることで、太陽風と惑星大気の直接相互作用領域のグローバルな描像を初めて明らかにする。これまでの衛星では捉えることができなかった散逸現場の空間構造を捉えることで、大気散逸機構の太陽風活動依存性を同定することができるというブレークスルーをもたらす。

【実施体制】系外惑星の技術を活かした概念設計・シミュレーション・実証用素子の製造を塩谷が、実証用素子による実証実験の実施と総括を中川・山崎が、科学的意義・探査ミッション全体のとりまとめを関・寺田が行なっている。遮光バツフル素子の実装実験により離隔 1 度で 7 桁を達成しており、本成果を学術誌投稿へ向けて準備中である。

【計画の妥当性・成熟度】H28 搭載機器基礎開発実験費採択。BBM 製作・小型化に向けた追試実験を行い、科研費獲得を目指している。前回からの主な進展としては、散乱・回折光の 2 次元的な広がり进行评估するための追加室内実験およびその再現数値シミュレーションを実施。

② AOTF を用いた小型赤外分光撮像装置

【計画の規模】仏との国際共同・CNES-JAXA 協定のもと開発を進めている。

【実施時期】火星衛星サンプルリターンミッション MMX に搭載を予定（2024 年）

【学術的価値】火星衛星の起源論を決着させるとともに火星圏の生命居住可能環境形成過程を明らかにするため、近赤外分光観測を行い、衛星表面の含水鉱物・水関連物質・有機物を検出する。

【実施体制】はやぶさ 2 搭載器・ExoMars 搭載器のヘリテージを活かし開発を進めている。ExoMars 搭載用 AOTF を用いた鉱物計測評価試験を実施した他、熱設計・運用計画・SNR 検討を進めている。今年には BBM による FM タイプ AOTF 評価試験を実施し、キーとなる装置関数や温度計測精度を議論した。

【計画の妥当性・成熟度】今年度末～次年度には機器のフェーズ A レビューが終了し、基本設計着手となる予定。仏側予算以外にも、試験・旅費に充当するための経費を新学術領域研究（公募研究）にて採用されている。前回からの主な進展としては、MMX 搭載機の BBM が完成。MMX 搭載用に製造した AOTF 評価試験を実施、予定どおりの性能を確認。10 月に CNES Phase-A 審査予定。

③ 水素吸収セル

我々は、2020 年以降に観測を目指す複数の国際共同衛星ミッションへの機器搭載を想定し、水素吸収セルの開発を進めている。惑星近傍の水素原子が共鳴散乱で発する Lyman- α 線の発光強度と温度の空間分布の観測から、水素原子の散逸率や太陽活動度との依存性を解明する。また、重水素セルも併用することで同位体比を導出し、地球の水の起源や太陽系の成り立ちを理

解するために必要な情報を導出する。本観測装置は、現在 NASA/Explorer 計画に応募中の SIHLA ミッションの Lyman- α 線観測機器として最終候補の 2 つに残っており、NASA から検討予算が配分されることが決定している。現在の水素吸収セルは 1998 年に打ち上げられた火星探査衛星「のぞみ」に搭載されたセルをベースとして性能を向上させたものである。研究組織は当時の開発を主導していたメンバーと若手研究者から構成されている。すでに国内外の放射光施設を用いたセル吸収プロファイルの高分解能計測を頻繁に行い、精密な性能評価を実施するなど精力的に活動を続けている。吸収セルの開発を題材にした資金として、取得済みの開発研究費が 2 件、民間財団を含めて申請中のものが 2 件ある。

④ 地下探査レーダ（周回機搭載レーダサウンダ）

本グループでは、周回機搭載レーダサウンダとローバ搭載 GPR(Ground Penetrating Radar)で月・火星地下の水・氷探査を行うことを提案しているが、複数ミッションに分けて行われることも想定して、2 項目に分けて、本項目では周回機搭載レーダサウンダの概要情報を記載する。

ローバによる探査が可能な領域は限られるため、着陸探査に先立って、周回機で広域探査を行い、水・氷にアクセスできる可能性の高い着陸地点を選定する。火星の傾斜地では、分光観測から、地下帯水層・氷層の露頭であることが示唆されている場所があるが(McEwin et al., 2013; Dundas et al., 2018), 傾斜地の探査はローバでは難しい。その周辺を周回機で探査することによって、アクセス可能な深さにその帯水層・氷層が続いた平坦地を見いだせる可能性がある。周回機には、分解能数 m の UHF 帯レーダサウンダを搭載して、従来のレーダサウンダ (MEX/MARSIS, 分解能 150m; MRO/SHARAD, 分解能 15m) が検知できなかった火星表層の水・氷有無を広域探査し、着陸候補地点を絞り込む。従来の周回機搭載地下レーダでは行われていないが偏波 (フルポラリメトリック) 方式は、送受信アンテナ 2 セットを要するが、地中の不均質の特性変化、氷層・氷塊検出に有利であることから、本提案のレーダサウンダでも検討している。

3. フライバイ・ランデヴ探査

① 衝突探査パッケージ

衝突探査は、本物の天体における宇宙衝突実験であるとともに天体の内部状況を探る手段でもあって、単なるリモセン観測とは一線を画す探査手法である。「衝突探査パッケージ」は小天体における衝突探査を実現すべく衝突装置および関連観測機器群 (別途記載の分散観測用小型分離カメラ等) からなり、先例として「はやぶさ 2」搭載の小型搭載型衝突装置 (SCI) と分離カメラ (DCAM3) がある。現在、はやぶさ 2 搭載 SCI と DCAM3 の開発メンバーを中心に次世代衝突探査計画について検討を継続しており、キューブサットによる衝突装置についても千葉工大のチームにより検討されている。これまで、はやぶさ 2 の他にも、ESA Fcalss mission への応募など、様々な機会をとらえて衝突探査パッケージを提案している。今後も、はやぶさ 2 によって得られた日本の「衝突探査先進国」としての優位性を生かすべく衝突探査パッケージを検討提案するものである。

② 天体追尾可視望遠カメラ

本装置は、小天体の高速フライバイ観測のためのカメラである。駆動鏡により視線方向を変えて天体を追尾しながら、最接近時も含めて幅広い太陽位相角に渡って高空間分解能観測が可能であり、これまでのフライバイ撮像より多くの情報を含む質の高い画像を取得できる。2022 年打ち上げ予定の DESTINY+へ TCAP (Telescopic Camera for Phaethon) として搭載予定であり、将来の小天体探査ミッションなどへの搭載も念頭に置いて開発を進めている。DESTINY+での基本的な小惑星追尾撮像技術の獲得と、それをベースとした改良により、地球接近小惑星や彗星など相対速度が大きく軌道傾斜角の大きい小天体のフライバイ観測ミッションにおける強力なツールとなり、本装置の使用により小天体への接近観測機会が大幅に増えると期待される。TCAP の開発は千葉工大、宇宙研などを中心に進めている。概念検討を実施し、試作による検証試験も開始しており、これまでに DESTINY+ミッション定義審査および ISAS 所内プロジェクト準備審査といった審査会において、TCAP の検討状況についても審査され、評価されている。

③ 分散観測用小型分離カメラ

天体軌道上にある探査機から複数の超小型ユニット(大きさ 10 cm 程度)を分離し、分散的に観測を行う理学観測用サブシステム。観測内容は探査計画ごとに最適化されるが、主として分離後の軌道上での可視光カメラ撮像、天体衝突時の加速度応答による地盤強度計測、天体着地後の地表面の詳細なカメラ撮像などを行う。着陸機やローバなどが接近できない複雑地形などの危険な領域に侵入して詳細観測を実施することができ、別途記載する「衝突探査パッケージ」の一部として衝突実験の近傍観測などを行うことも可能である。また複数地点に投入することにより地表面特性の地域的偏りを明らかにでき、将来的には弾性波などの多点同時観測を担うシステムとしても期待する。同シリーズ機器は過去、DCAM1,2 として IKAROS、DCAM3 として Hayabusa2 に搭載され、その後も複数の探査計画において検討・提案されており、新たな計画に即座に機器提案が可能な段階にある。現在は小川和律、和田浩二、澤田弘崇らを中心として体制が維持されており、継続的に検討・開発を実施している。

④ ダストアナライザー

本装置は、軌道上のダスト粒子をその場で行う観測装置である。この装置は2つのセンサーで構成されている。一つは、ダスト粒子の到来方向および速度を測定するトラジェクトリセンサー、もう一つはトラジェクトリセンサーを通過したダスト粒子がセンサー底面に衝突して発生するプラズマを飛行時間型(TOF)質量分析を行う質量分析装置である。このダストアナライザーは 2022 年打上げ予定の小型科学探査プログラムの探査計画である DESTINY+へ DDA (DESTINY+ Dust Analyzer) として搭載予定であり、ふたご座流星群母天体である活動的小惑星 Phaethon を高速フライバイ時に Phaethon 近傍のダストのその場分析や Phaethon 到達までのクルージング中の惑星間ダスト・星間ダストの観測を目的としている。ダストアナライザーは、Phaethon のように相対速度の大きい天体について、フライバイ時に天体近傍のダスト粒子の化学組成をその場分析することで、天体の物質科学情報を得るための有効かつ重要な手段である。本観測装置により、着陸、ランデブー、サンプルリターンができない天体への物質科学データの獲得手段及びフライバイ探査の科学的価値の向上が期待される。

DDA の開発は、ドイツとの国際協力の下、Stuttgart 大学及び千葉工大が中心となって進めている。ハードウェア開発だけでなく地上校正、観測装置の清浄度管理なども質量分析装置の開発として重要な課題となっている。今年度初めまでに概念検討を実施し、試作による要素検証試験も開始しており、これまでにドイツ側での Phase-A 終了審査を経て Phase-B が開始されている。

4. 望遠鏡

① 宇宙用真空紫外線観測装置

・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 H₂O を海として保持しているか否かである。惑星上に海を保持できる主星周りの領域は「ハビタブルゾーン」と呼ばれる。ハビタブルゾーンは便宜上、主星光照射量をもとに定義されることがあるが、実際には、雲の分布や惑星の自転などに関する不確定性から、主星光照射量のみでは惑星

上に海が存在しうるかどうかは決められない。一方、惑星半径に対する観測精度の限界のため、地球型の比較的希薄な大気や海が存在を可視光トランジット観測から確認することもできない。そこで、紫外線トランジット観測で遠方まで広がる外圏大気を捉えることによって観測限界が緩和され、生命保有惑星に特徴的な要素を検出できる、というのが本計画の画期的な着眼点である。なお、近傍星では、太陽型 FGK 星に比べて低温の M 型星が圧倒的多数を占める。また、主星が低温であるため、ハビタブルゾーンが主星に近く、トランジットの検出確率も高い。そのため、本計画では特に、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 LUV0IR (2038 年打ち上げ) の中間報告書に掲載される予定となっている。

- ・ 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。

APPENDIX-5: (b.3) 将来 SR 探査における化学分析とキュレーションの長期展望（詳細）

1. サンプラー仕様

表 A5-1 で、はやぶさ 2 と将来探査との間におけるサンプラー仕様要求を比較した。試料採取方式の多様化・改良、試料格納量改善、および固体以外の物質への対応については、サンプラーの大型化、および天体性質（レゴリス、礫、岩盤、氷、液体、ガス）に適したサンプリング機構（弾丸、粘着物、コアリング、凍結、ガスボトル等）の設計・開発が必要である。試料形状については、岩石組織情報を保存可能な中・大型岩石試料採取機構（マニピュレータ等）が求められる。地質情報を保存するためには、複数地点からのサンプリングおよびコアリングとこれに対応した保存機構（試料間分離機構）の開発が必要である。試料への人工物および地球物質による汚染については汚染コントロール・モニタにより対策を講じるが、対象天体や科学目標に応じた対策の検討が重要である。新たな汚染軽減策としてはサンプリング現場（対象天体上）での少量分割梱包機構やマニピュレータによる分取・分配機構の搭載が考えられる。気密性対策としてははやぶさ 2 ではメタルシール機構を搭載する。

帰還サンプルに含まれる揮発性成分の存在度・同位体分析においては、サンプリング時から分析時までの間に試料が経験した環境変化を最小限にする、あるいはその変化を把握できるようにしておくことが重要である。そのためには、温度・圧力のコントロールが極めて重要になるため、高気密で温度コントロール可能な帰還カプセル及びサンプルコンテナの開発が必要となる。また、揮発性成分はありとあらゆる人工物や地球天然物に含まれており、かつその拡散速度は重元素に比べて大きく汚染の影響を受けやすい。したがって、衛星部品の製造、組み立てから打ち上げに始まり、帰還カプセルの回収、カプセルからの試料回収キュレーション、その後の分析者への配布、分析におよぶすべての工程での汚染管理が必須となる。これらを達成するにはかなりの労力を伴い、かつ不完全である場合が多いと予想される。その対策の一つとしては、宇宙空間でのサンプリング時に少量分取・封入を行い、封入状態のまま分析者へ配布するシステムの構築が考えられる。

以上のようなサイエンス要求に適合した回収環境を達成するためのサンプリングシステムの構築には工学と理学との密接な連携が重要である。

表 A5-1: はやぶさ 2 と将来探査との間のサンプラー仕様要求比較

保管機構の仕様要求	はやぶさ 2	将来探査
試料量	100mg(最少)~数百 mg	10g-1kg (目標天体とサイエンスにより決定)
形状	固体、気体	固体、気体 (液体は凍結試料として回収?)
温度・圧力	< 80°C、< 1 気圧	< -0°C (クライオサンプラー)
試料間の分離	3 部屋 for >300 um 粒子	地質情報を反映したサンプリング (複数天体表面およびコアリング) に対応した回収試料の分離保管
気密性 (メタルシール)	< 10 ⁻⁶ cm ³ STP/sec/cm ²	< 10 ⁻⁶ cm ³ STP/sec/cm ²
汚染対策	汚染コントロール (材料物質選定・管理、洗浄)、汚染モニタ	汚染コントロール (材料物質選定・管理、洗浄)、汚染モニタ
キュレーション、化学分析との連携	コンテナ内気体の回収、真空中での試料分取、固体試料の回収作業効率を考慮した構造設計	サンプリング現場での少量分割梱包

2. キュレーション

キュレーション分野については、今後サンプルリターンのサイエンス要求を達成する為の課題 (b3 参照) に対して、キュレーションはその入り口にあたるサンプラー仕様と、出口にあたる各種帰還試料分析との間で連帯することが重要である。将来ミッションとして帰還試料の物理状態は従来のミッションにあった固体に加えて、気体・液体試料や高圧試料およびそれらの複合試料が想定され、それぞれに対応する技術の検討・開発を要する。たとえば、彗星物質サンプルリターン探査では、氷、揮発性成分、圧力から解放される事により形態が変化する可能性がある高圧物質など、常温では変質しやすい試料の受入れ・保管のための低温キュレーション施設が必要である。現在、従来設備における対応状況の可否を帰還試料形態別にまとめたものを表 A5-2 に示す。

ただし、表 A5-2 で達成されている (○印) 項目も、ミッションが達成を目指すサイエンス要求に応じて更なる検討を要する(例えば鉄質小惑星帰還試料に対する親鉄元素汚染低減への対応など)。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(惑星検疫カテゴリー5(制限)相当、例えば火星及び火星衛星試料帰還)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。

表 A5-2: 帰還試料形態別の技術検討・開発状況のまとめ

帰還試料形態	固体	固体(<0°C)	液体	気体	高圧(>1 MPa)
(1)取出し・回収	○	×	×	△	×
(2)初期記載	○	×	×	△	×
(3)保管	○	×	×	×	×
(4)分割・配布	○	×	×	×	×

3. 元素・同位体分析

試料全岩の元素・同位体組成は、天体の地質活動や物理化学的環境、また物質進化過程を理解するため非常に重要である。試料全岩の元素・同位体分析には一般に多量(数 mg 以上)の試料が必要である。これまでのサンプルリターンにおける全岩試料分析の位置づけは不十分であったため、将来のサンプルリターンにおいてはより一層重点を置くべき分析手法である(表 A5-3)。試料全岩の酸素同位体比は探査天体を特徴づけるだけでなく、太陽系物質の酸素同位体比がいかにかに決定されたかという宇宙化学における最重要問題に直結する。また、Ti, Cr, Mo, Ru などの同位体異常は、太陽系内における同位体比不均一性のメカニズムを解明し、探査天体の材料物質を考察する手がかりとなる。一方、ミクロンスケールの微小領域における元素・同位体分析は彗星や D 型小惑星など始原的な(それゆえ細粒かつ化学的に非平衡な)天体の試料の分析に特に有効である。次世代サイエンスの具体例として、1) 水星の酸素・亜鉛・水銀・チタン・クロムの同位体比測定による太陽系の同位体比不均一性メカニズム・天体の材料物質および揮発性元素の挙動の解明、2) D 型小惑星や彗星物質全岩および難揮発性包有物やコンドルールの酸素同位体比、Al-Mg 年代、プレソーラー粒子や有機物の軽元素同位体比分析による太陽系始原物質の形成・分布・移動の解明、3) 火星・氷天体の表面・内部試料の酸素同位体比、微量元素存在度測定による天体形成史、地質活動、物理化学的環境(温度、酸化還元状態)の解明、4) メインベルト彗星中の氷の水素・炭素・窒素・酸素同位体比分析、および岩石部分の酸素・チタン・クロム同位体比分析、プレソーラー粒子や有機物の軽元素同位体比分析による天体の形成場所やメインベルト小惑星との関係の解明、等が挙げられる。

表 A5-3: 元素・同位体組成のサイエンスと分析手法

サイエンス	項目	1-1000 mg (1 mm 以上)	1-1000 µg (数 100 µm)	1 µg 未満 (100 µm 未満)
揮発性/難揮発性元素存在量比と隕石グループとの対応づけ、火成岩・鉄隕石類似物質の同定、結晶分化作用	全岩元素組成	中性子放射化分析(NAA), TIMS, ICP-MS	NAA, レーザーアブレーション(LA)-ICP-MS	
	全岩酸素同位体組成	レーザーフッ素化		
	Hg, Zn etc. 同位体組成	TIMS, ICP-MS		
太陽系同位体比不均一性メカニズム、天体の材料物質の解明	Ti, Cr, Mo, Ru etc. 同位体異常	TIMS, ICP-MS		
天体の形成年代	Pb-Pb, Hf-W, Al-Mg, Mn-Cr 年代など	TIMS, ICP-MS	LA-ICP-MS, 二次イオン質量分析(SIMS)	SIMS
母天体変成作用の温度推定	ケイ酸塩鉱物・炭酸塩の酸素同位体組成		SIMS	SIMS
太陽風照射量・組成分析			SIMS, レーザー共鳴イオン化質量分析(RIMS), SNMS	SIMS, RIMS, SNMS
太陽系始原物質の起源と分布	プレソーラー粒子の酸素同位体異常、有機物の水素や窒素同位体異常			NanoSIMS, RIMS, スパッタ中性粒子質量分析(SNMS)

4. 岩石鉱物分析

岩石鉱物分析では、分析する試料がどのような岩石・鉱物組織、粒径を有し、どのような種類の鉱物（鉱物モード比を含む）で構成されているかを明らかにする。構成鉱物については、化学組成と結晶構造を正確に明らかにし、組織情報と組み合わせることにより（表 A5-4）、探査対象天体を問わず、その試料が形成された際の環境（温度、圧力、酸素雰囲気など）を明らかにすることができる。また、残留磁化を調べることで、試料がこれまでに経験した最高温度や探査対象天体の過去の磁場環境に関する情報を得ることができる。貴重な帰還試料から最大限の情報を得るためには最初に放射光 X 線などによる非破壊分析を行ない、その後に電子線などを用いた破壊分析を行うという手順が望ましい。最近では、プラズマ FIB-SEM 技術が開発され、従来より大面積の試料薄片加工および構造観察が可能になることが期待される。また、リモートセンシングや着陸探査等との連携も重要である。異なる進化を経た小惑星を体系的に理解し太陽系形成過程の全貌を解明するために、はやぶさ、はやぶさ2がそれぞれ S 型、C 型小惑星を目指し、MMX が D 型小惑星の可能性のある火星衛星を探査予定であることから、次に E 型小惑星を探査する意義は大きい。また、近年の観測で彗星の多様性が明らかになっており、NASA では彗星塵サンプルリターン（スターダスト計画）に続く彗星地下物質サンプルリターンが検討されている。したがって、次世代サイエンスの具体例として、1) E 型小惑星、エンスタタイトコンドライト隕石、オーブライトとの岩石鉱物学的対応づけによる地球の材料物質の解明、2) 彗星に含まれる CAI やコンドルールの組成・分布の多様性と初期太陽系形成過程の解明、等が挙げられる。

表 A5-4: 岩石鉱物のサイエンスと分析手法

サイエンス	項目	1-1000 mg (1 mm 以上)	1-1000 μg (数 100 μm)	1 μg 未満 (100 μm 未満)
岩石天体の起源と進化、天体環境の決定	組織観察	大視野 X 線トモグラフィ (CT) 研磨薄片観察	放射光 X 線 CT	
同上	鉱物組成	紫外可視赤外反射分光、電子線マイクロプローブ (EPMA)	放射光蛍光 X 線分析 (SR-XRF) (累帯構造など)	顕微ラマン分光
同上	元素組成		SR-XRF	集束イオンビーム (FIB) 加工後、透過型電子顕微鏡 (TEM), STEM
同上	化学組成 (鉄の価数など)	固体核磁気共鳴分光 (NMR)	SR-XAFS, XANES	SR-XAFS (XANES)
同上	結晶構造	結晶方位分布 (SEM-EBSD)	放射光 X 線回折 (SR-XRD)	SR-XRD, FIB 後、TEM (電子線回折)
同上	残留磁化	超伝導量子干渉素子 (SQUID)	光電子顕微鏡 (PEEM)	電子線ホログラフィ TEM、光電子顕微鏡 (PEEM)
天体内部構造の推定	磁性	超伝導量子干渉素子 (SQUID)	光電子顕微鏡 (PEEM)	光電子顕微鏡 (PEEM)

5. 揮発性成分分析

揮発性成分 (H, C, N, O, S など軽元素化合物、希ガス) の元素・同位体組成は太陽系や生命の起源と進化、惑星大気及び宇宙空間への散逸イベントといった物質移動・混合に関する情報をもたらす。特に水は宇宙・惑星空間において普遍に存在し、その特色ある物理・化学的挙動のため、多くの惑星物質進化に関与している。そのため、水の存在量、状態、分布、同位体比、化学組成 (溶解元素組成、Eh, pH 等) に関する惑星物質の全岩および局所分析が重要である。氷天体表層は昇華や天体衝突だけでなく、太陽風や銀河宇宙線 (GCR) にさらされており、岩石天体同様の放射線損傷に

よる非晶質化が起こる非晶質氷の揮発性元素保持力は結晶性のものより高く、氷天体表層氷中の揮発性元素存在度は昇華・非晶質化・太陽風インプラネーション・GCR 照射による生成などの影響を複合的に反映している。氷に流動性がない場合、表面ほど太陽風や GCR 起源の同位体が蓄積するが、流動性がある場合は、揮発性元素の損失および同位体異常の均質化・希釈が起こると予想される。彗星や木星衛星などの氷天体の氷の起源を議論する際、太陽風や GCR 照射による同位体組成の変化の寄与率を検証することができる。次世代サイエンスの具体例として、1) 彗星や木星衛星など氷天体表層・深部氷中の揮発性元素・同位体組成分析による氷天体の形成年代とその表層物質の変質および流動性の評価、太陽系内天体大移動の解明、2) 天体地下水中の希ガス同位体比分析によるエンケラドス地下海の理解や古代火星環境の復元、などが挙げられる(表 A5-5)。また、惑星大気サンプルリターンの場合、リモート観測探査や現場分析等との連携により発展することが期待できる。

表 A5-5: 揮発性成分のサイエンスと試料量・サイズ毎の分析手法

サイエンス	項目	1-1000 mg (1 mm 以上)	1-1000 μg (数 100 μm)	1 μg 未満 (100 μm 未満)
小天体の宇宙風化年代・衝突年代決定、氷天体形成年代、表層作用、流動性評価、惑星古環境復元、天体内部海の形成史解明	軽元素・希ガス同位体組成 岩石氷比、氷の物性	軽元素質量分析計, 希ガス質量分析計 固体 NMR, 中性子	RIMS, SNMS	RIMS, SNMS TEM
太陽系始原水の起源	水(氷)の水素・酸素同位体組成		SIMS	SIMS, NanoSIMS
惑星大気進化、太陽系始原物質の起源と分布	軽元素同位体組成, 希ガス同位体組成	キャビティリングダウン吸収分光法		

6. 有機物分析

初期太陽系の歴史において、星間分子雲での光化学反応で最初に生じた有機分子は、その後原始惑星系円盤や微惑星での熱反応、光反応、水-岩石相互作用により分解と合成を繰り返し、始原小天体の化学的多様性を生み出した。有機物は反応性が高いことから初期太陽系での様々な物理化学プロセスを敏感に記録し、特に低温条件下での物質進化の解明に優れる。また、始原小天体有機物の組成から、地球へ供給された生命材料の組成に制約を与えることが期待されている。これまでに始原的な炭素質コンドライト隕石から数百種の有機分子が同定定量されているが、我々が隕石中から未だ同定していない有機分子は 50000 種にのぼる。また酸不溶性有機物の元素・官能基組成は明らかにされているもののその詳細な分子構造モデル(立体構造を含む)については推測の域を出ない。これらの問題を網羅解明してこそ、宇宙有機物の起源と形成過程に真の答えを見出すことが可能となる。

一方で、(小天体以外の)様々な天体に存在する有機物の組成と分布は、惑星環境の形成と進化およびその天体のハビタビリティの理解に重要な情報を提供する。そのため、化学分析手法は同じでも、先に述べた小天体有機物の起源と進化とはサイエンスが大きく異なるという意識が必要である。たとえば、高圧環境で生成しやすいオリゴペプチドや脂肪族炭化水素などの重合体、大気圏へのエネルギー照射で生成しやすい有機エアロゾル粒子、水圏に特徴的な有機金属錯体など、各環境に特化した生成物が新たなターゲットとなる可能性が高い。また、近年 NASA が火星表層で検出したメタンや固体有機物の起源が注目されているように、生物起源・非生物起源の識別が明確な分子指標・同位体指標を活用することが求められる。

次世代サイエンスの具体例として、1) 大量採取した小惑星・彗星地下物質中の個別分子の分子内同位体比分析による起源と形成過程の決定、およびエナンチオマー過剰率の決定、2) 大量採取した小惑星・彗星地下物質中の固体有機物の分子構造単位レベルでの多元素同位体分析による形成環境(分子雲、円盤、母天体)の識別、3) 火星深部や氷天体内部海に存在する有機ポリマーの組

成（重合度）から読み解く高压惑星環境、4）氷天体内部海に存在する有機金属錯体の組成と分布による惑星熱水環境の物質循環プロセス、5）タイタン大気圏の高度別に採取した有機エアロゾルのナノレベル構造およびフリーラジカル濃度と惑星気候変動の解明、などが挙げられる（表 A5-6）。

表 A5-6: 有機物のサイエンスと試料量・サイズ毎の分析手法

サイエンス	項目	1-1000 mg (1 mm 以上)	1-1000 μ g (数 100 μ m)	1 μ g 未満 (100 μ m 未満)
天体の一般性	元素組成	ミュオン	CHNO 元素分析装置 (燃焼式)	SEM-EDS
有機物・水・鉱物相互作用の不均一性、天体環境条件の評価	官能基組成	NMR, 顕微ラマン分光 (μ -Raman)	顕微赤外分光 (μ -FTIR), μ -Raman, 放射光 X 線吸収分光 (STXM-XANES, TXM)	STXM-XANES, TXM, AFM-FTIR, AFM-Raman
固体有機物の構造と形成過程	分子組成	NMR, 熱分解 GCMS, 選択的化学分解	μ -FTIR, μ -Raman, STXM-XANES, ToF-SIMS, MALDI-ToFMS	STXM-XANES, ToF-SIMS, MALDI-ToFMS, TEM-EELS
超微量有機分子の形成過程、天体環境条件の評価、前生物的化学進化の解明	分子組成	ガスクロマトグラフィー質量分析 (GCMS), 液体クロマトグラフィー質量分析 (LCMS), 2 次元 GCxGC	Nano-LCMS, 脱離エレクトロスプレーイオン化 (DESI) 質量分析	Nano-LCMS, DESI, FTICRMS
宇宙におけるホモキラリテの起源と地球生命起源との関係性	光学分割分析	円二色性分散計, GCMS, LCMS, 2 次元 GCxGC	2 次元高速液体クロマトグラフィー (2D-HPLC)	2D-HPLC
有機分子の起源と形成過程、由来天体の炭素の起源	同位体組成	ガスクロマトグラフ燃焼同位体比質量分析 (GC-C-IRMS)	元素分析計-同位体比質量分析計 (EA-IRMS)	
光化学反応度評価、その年代推定	フリーラジカル濃度、分子組成	電子スピン共鳴 (ESR)		
太陽系始原物質の起源と分布	局所同位体組成		SIMS	SIMS, NanoSIMS
太陽系始原物質の起源、天体環境条件の評価、機能的有機物の前生物的化学進化の解明	組織	SEM	SEM, TEM, SR- μ -XCT	TEM, STEM, SR- μ -XCT