

APPENDIX

Contents

Appendix-1: ガス惑星系・氷惑星系・Kuiper-Belt 天体 (KB 天体) 探査 (詳細)	2
Appendix-2: 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)	3
Appendix-3: 戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発(詳細)	6
Appendix-4: 将来探査計画における化学分析・キュレーションの長期展望 (詳細)	11

Appendix-1: ガス惑星系・氷惑星系・Kuiper-Belt 天体 (KB 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衛星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。
 - 太陽系の全容把握と惑星形成論構築に残された最後の鍵：氷惑星探査
 - 科学的意義：2つの氷惑星の調査は過去の Voyager 2 のフライバイのみであり、現状の知見は極めて限定的である。サイズや組成・磁気的環境など多くの点でガス惑星と異なる氷惑星は、それら固有の物理化学過程の理解を通して惑星形成論への本質的な制約を得るために残された最後のピースと言える。
 - 工学的ハードル：氷惑星領域での探査では電力源の確保が本質的な課題である。Cassini や New Horizons では原子力電池を用いたが、我が国では安全性への懸念からその開発と利用は極めて困難である。
- 今後の動向・探査計画
 - 現在進行中の計画
 - JUNO (NASA: New Frontiers program#1, 木星系)：2018年7月主計画終了（衛星の観測は無し）。2021年7月延長計画終了。
 - NEW HORIZONS (NASA: New Frontiers program#2, 冥王星・KB天体)：2019年1月2014MU69フライバイ。2026年計画終了。
 - 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): 2022-25年打上 (TBD)、2025-32年木星到着、木星周回・Europaフライバイ探査。
 - 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）候補の中に本領域への探査計画は含まれていないが、前回の選定(Europa Clipper)時に次点となった下記計画は継続検討中。

- 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。
- 米国：次期 New Frontiers Program#4へ提案された計画のうち本領域対象のもの（2019年冬選定, 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。
 - Dragonfly: Titan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。
 - 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。
 - Saturn PRobe Interior and aTmosphere Explorer (SPRITE): 土星大気プローブ。2034年到着予定。
- 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: 土星大気プローブ。
 - 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。
- 中国：
 - Solar Polar Orbit Telescope (China): 木星フライバイで極軌道に入れる際に木星観測を実施する可能性。打上時期や詳細不明。

Appendix-2: 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、大気鉛直・水平温度分布、雲の有無、アルベド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 100-10 000 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。

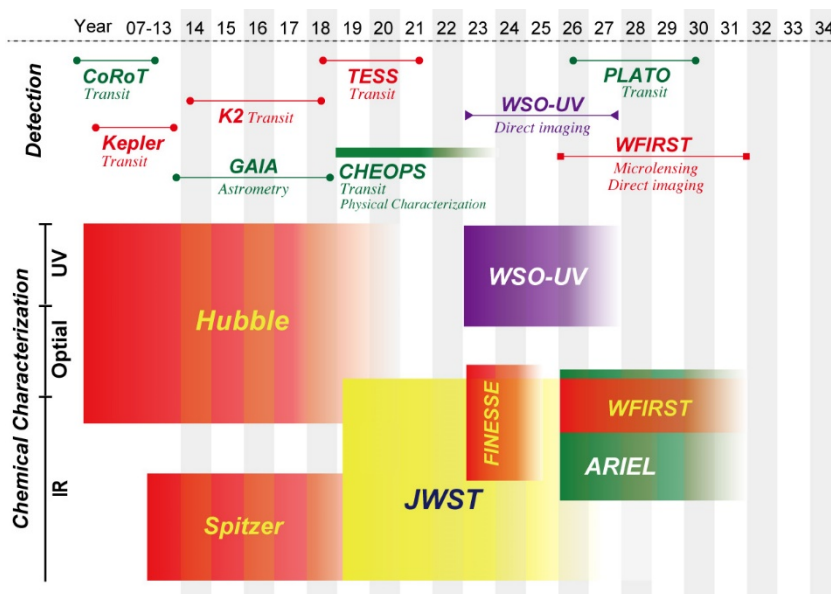


図 A1-1: 系外惑星観測に関連する宇宙望遠鏡計画。検出を目的とした測光観測と、特徴付けを目的として分光観測が分けて示されている。赤はアメリカ主導、緑はヨーロッパ主導のミッションを示す。黄色で示した JWST は欧米共同、紫で示した WSO-UV は日露共同のミッションである。

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（現在進行中の K-2、2018 年打ち上げ予定の 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, FINESSE (後者2つは提案中) 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、ARIEL や FINESSE は系外惑星専用望遠鏡として提案されており、採択されれば 500-1000 個のトランジット惑星について大気組成をサーベイすることが可能となる。したがって、両ミッションが採択されるか否かが今後の系外惑星研究の世界的動向を左右すると言える。

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、その中での惑星の空間分布・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にしている。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 や WSO-UV には 1-5AU 程度の木星型惑星の反射光の直接撮像が可能になるコロナグラフも搭載予定であり、これらの惑星については大気組成などについての特徴付けも可能になってくるだろう。

課題 (C)—K-2 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 型矮星) 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 型矮星) 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 個ではないかとも言われる。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、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。

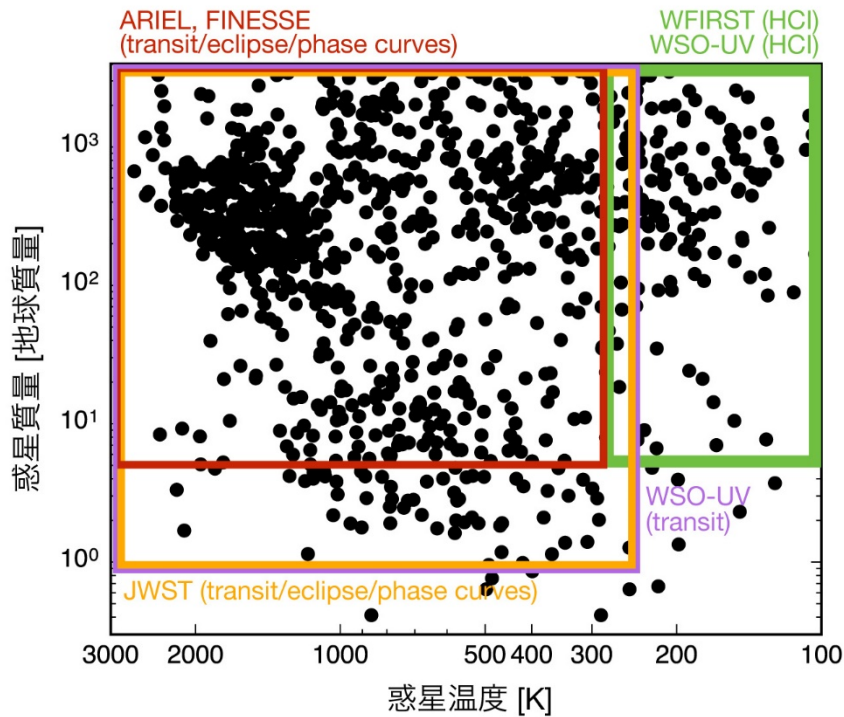


図 A1-2：系外惑星の分光観測を行う将来計画のおよそのターゲット層。個々の天体の観測可能性は、主星の特徴や明るさ等、さまざまな要素に影響される。(HCI = high contrast imaging) 黒点はすでに見つかっている系外惑星で、アルベドを0とした場合の平衡温度を温度としている。

Appendix-3: 戦略的なミッション実現の鍵となる技術開発(詳細)

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

1. 内部構造

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

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

開発した HP³ や、Lunette (月探査) ミッション (Discovery) および SLIM (月探査) などのミッションの搭載候補として米国が開発したプローブ (Pneumatic and Percussive Penetration probe)がある。④ APPROACH。

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

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

①宇宙探査用ミュオグラフィ。②宇宙線起源高エネルギー粒子ミュオンを検出し、その軌跡と数密度から地下 10km 程度までの線密度を推定する。③地球での実証例は多数あるが、宇宙環境下でのフィジビリティスタディが課題である。現在、小型化および検出手法の改良を検討中。④火星着陸。

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

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

2. 表層

①天体追尾可視望遠カメラ。②駆動鏡により視線方向を 0°から 180°までで変えることのできる可視望遠カメラで、10 $\mu\text{rad}/\text{pixel}$ 以下の高い空間分解能を持ち、天体表層観測を行う。特に、相対速度が速い、軌道傾斜角が大きいなど、ランデブー探査の難しい小天体の天体であっても、このカメラを用いたフライバイ探査により、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での観測が可能である。③2022 年度打ち上げ予定の DESTINY+ ミッションへの搭載を目指し、概念設計を実施している。高速フライバイ撮像を実現するための小惑星追尾機構がこのカメラの鍵であり、小型軽量で指向精度の高い駆動鏡の開発が課題である。④DESTINY+。

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

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

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

①能動型蛍光 X線分光計。②天体の着陸点周辺的主要元素を定量する。高いエネルギー分解能により元素同定能力に優れたシリコンドリフト X線検出器 (SDD) と、X線発生装置 (XRG) を組み合わせた能動型蛍光 X線分光計 (AXS) である。小型軽量かつ省電力で元素分析が可能。放射性同位体を使用せず必要な時に X線を発生することができるため、長期間にわたる地上試験での被爆を極力抑えることができる。③焦電結晶を用いた AXS に関しては、概念設計は終了し、BBM による基礎実験を COOL-X および SDD を使用して早稲田大学、KIGAM、LPL において実施。構造設計については構造要素を決定済。熱設計・制御は熱解析を実施し、熱制御の成立性を確認。試料表面粗さが蛍光 X線分析に与える影響について調査済。これまで焦電結晶を用いて高輝度化に努めてきた。その結果、市販品 COOL-X と比較して、60 倍以上の高輝度化に成功。実験結果をもとに、焦電結晶型 XRG の試作品を作成中。焦電結晶型 XRG の宇宙実験の実績はないが、SDD の宇宙機への搭載実績はある (例 Chang'e-3 で使用)。微量元素の定量化に向けて XRG の高性能化 (バックアップとして CNT をエミッターとした発生装置を検討中)、動作寿命調査 (必要なら長寿命化の検討)、軽元素分析に向けた検出器側の X線窓材 (Si_3N_4) の検討および実用化が課題。④SELENE-R。

①水分子検出・同位体分析装置。②月極域着陸ミッションにおいて、表土中に含まれる水を検出し、さらに、同位体組成をその場分析することにより、水の起源を解明する。水分子による赤外光の吸収を計測する Cavity Ringdown Spectroscopy(CRDS)分析法を用いる。③水分子の強い吸収がある 2.0 μm や 2.7 μm のレーザーを用い、分析手法の原理実証を進めている。宇宙仕様化に向けて、装置の堅牢化や小型化などに取り組んでいる。また、同位体分析に向けて、正確な温度制御が今後の重要課題である。④SELENE-R。

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

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

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

①生命探査顕微鏡。②鉱物、有機物、生物細胞を識別する。蛍光色素を用いて有機物・膜に囲まれた有機物・酵素活性を 1 μm の解像度で 10^4 細胞/g 土壌の感度で検出する。③科学目標を達成する原理実証と、光学部品の宇宙環境耐性試験をほぼ終了している。今年度中にこれを完了し、光学設計を完了する予定である(TRL3)。今後は、試料の装置への供給を前提条件として、細胞の濃縮、染色と顕微鏡観察、画像を 1 μm 解像度 10^4 細胞/g 土壌を検出する BBM を完成させる。④火星着陸。

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

3. 表層・大気

①中性ガス・イオン質量分析器。②惑星大気およびガス化した固体物質をその場で入射口から取り込み、質量スペクトルを得る。必要な質量分解能(惑星大気用では数 10 - >3,000 程度、始原天体表面

観測用では数 10000 程度を想定)に応じたいくつかの分析原理を選択可能なよう、並行して開発を進めている。測定対象の元素組成、同位体比から太陽系・惑星系の起源および進化に制約を与える。
③太陽系プラズマ観測において飛翔体搭載実績のある技術と、地上実験で用いられる高分解能 ($M/\Delta M > 10^5$) 技術の両輪をベースに、新たな設計・試作を実施している。取り組んでいる技術的課題には、質量分析オプティクス開発 (マルチターン飛行時間型質量分析器 MULTUM・リフレクトロン・四重極型・セクタ型など)、イオン化用電子銃開発、高圧電源開発、ガス化用レーザー照射機構の開発、誘導電荷検出器の開発などがある。④MMX、のぞみ後継機、ソーラー電力セイルランダ。

4. 大気

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

①惑星探査用高コントラストオプティクス。②惑星希ガス宇宙散逸・氷衛星地下海噴出ガスの 2 次元撮像を初めて実現するため、惑星本体からの光を抑える高コントラスト (離角 1 度で 7 桁以上) 遮光バッフルを新たに開発する。③系外惑星観測技術で培った技術を活用し、微細ガウシアンエッジ構造をもつ遮光バッフルの概念設計・シミュレーション・実証用素子の製造を進め、離角 1 度で 8 桁を達成している。今後は、徹底的な迷光対策、ビーム・検出器の最適化、入射角・波長に対する依存性の検証を突き詰め、ブレッドボードの製作および装置全体の小型化を図る。④のぞみ後継機。

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

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

①テラヘルツ分光器。②0.1-数 THz 帯のヘテロダイナミック分光観測により、高度 0-120 km 程度の CO・H₂O・HO_x 種、これらの同位体などの時空間変化を捉え、大気の化学とダイナミクス (風や輸送など) のリンクに迫る。③ハーシェル(ESA)、IceCube や EOS Aura MLS(NASA)、ISS/SMILES (超伝導サブミリ波リム放射サウンダ/JAXA) などの搭載・運用実績がある。これらを利用・踏襲し、さらなる軽量化・省電力化の検討を進めている。課題として、軽量・省電力のシステム(アンテナ、受信機、分光計、観測/制御/データ処理の CPU 部)の検討が挙げられる。④火星周回大気探査、のぞみ後継機。

①水素吸収セル。②惑星水素コロナ (ライマン α) の発光強度、温度、重水素水素比を測定する。当面の目標は火星コロナ発光強度と温度の分布から水素散逸率と太陽活動度の関係を明らかにする。

水素コロナの観測は遠方から行う必要があるため、のぞみ後継機ではなく超小型探査機等別の機会を検討している。③「のぞみ」に搭載された。新型水素吸収セルは「のぞみ」セルの3倍以上の吸収効率を実現している。実用化の最終段階として、セル形状の最適化及びフィラメントの耐久試験に取り組んでいる。課題は、吸収性能の安定性の向上、機上校正方法の検討である。④将来火星大気探査。

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

5. 惑星間空間

①赤外線観測装置。②地球近傍から木星軌道までの黄道光観測を行い、惑星間ダストの数密度、組成、アルベド等の太陽系動径方向の依存性を明らかにする。これにより、黄道光の起源（小惑星、彗星等）の解明を目指す。口径約10 cmのオフセット・グレゴリアン式可視・赤外線望遠鏡であり、観測波長は0.4-1.7 μmを予定している。③全アルミニウム望遠鏡とリニアバリアブルフィルタ(LVF)は、Cosmic Infrared Background Experiment (CIBER-2) 搭載機器をベースとして、光学系、熱構造を新たに設計している。望遠鏡を190 K以下、検出器を130 K以下に、パッシブに冷却する必要がある、これにより長波長側の検出感度が支配される。ソーラー電力セイル探査機に搭載した場合のイオンエンジンからの熱的干渉への対策を検討している。④ソーラー電力セイル。

①ダスト観測装置。②地球近傍から木星軌道までのダストの in-situ 観測を行い、ダスト分布の太陽距離依存性、惑星がダスト分布に与える影響を明らかにする。PVDF (Polyvinylidene Fluoride) センサによる軽量型ダスト検出器である。③ソーラー電力セイル小型実証機 IKAROS に搭載された ALADDIN (大面積惑星間塵検出アレイ) をベースとして、コネクタの長寿命化、検出器のダイナミックレンジ拡大を行っている。低速・低フラックスダストの検出のための高感度化が課題であり、センサ部の大型化・多チャンネル化による対応を行うとともに衝突実験による検証を行っている。④ソーラー電力セイル。

Appendix-4: 将来探査計画における化学分析・キュレーションの長期展望（詳細）

1. サンプラー仕様

表 A3-1 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・保管量、および物質状態には、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）の設計が重要である。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）を開発する。汚染や気密性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。汚染対策にはサンプリング現場での少量分割梱包機構やマニピュレータによる分取・分配機構を搭載する。気密性対策にはメタルシール機構を搭載する。B-7は試料状態および形状（岩石片、微粒子、ガス）とサイエンス要求に適合した回収環境を達成するための機構・形状の採用が必要となる。このようなシステムの構築には工学と理学との密接な連携が非常に重要である。

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。

表 A3-1: 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	10 g	10 g – 1 kg (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)	<1E ⁻⁶ cm ³ STP/sec/cm ²	<1E ⁻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る。よって、上記(1)-(4)において、固体以外の物理状態の帰還試料や低温物質 (H₂O, CO₂ 氷等) に対応する技術の検討・開発が必要である。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表を下記に示す。ただし、表 A3-2 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、火星及び火星衛星試料帰還) 場合、帰還試料の封じ込め技術の検討・開発が求められる。ただし、表 A3-2 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 A3-2: 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 A3-3）。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、等が挙げられる。

表 A3-3: 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 (100 μm – 1 mm)	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, 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	SIMS
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

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 A3-4）、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。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による用いた破壊分析を行うという手順が望ましい。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。異なる進化段階の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いることから、NASA の彗星塵サンプルリターン（スターダスト計画）に続く彗星物質サンプルリターンが望まれる。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 A3-4: 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 (100 μm - 1 mm)	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)
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 (溶存元素組成、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・太陽風インプラントレーション・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 A3-5)。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 A3-5: 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 (100 μm - 1 mm)	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	共鳴イオン化質量分析計 (RIMS), スパッタ中性粒子質量分析装置 (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

有機物は星間分子雲での光化学反応で生じ、原始惑星系円盤や微惑星での熱、光、水—岩石相互作用により分解と合成を繰り返し、太陽系における化学的多様性を生み出した。有機物は反応性が高く、その組成から初期太陽系や天体環境での様々な物理化学プロセス、特に低温条件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や大気の組成に制約を与え、様々な惑星環境に存在する有機物の組成と分布から生命起源に至る前生物的化学進化のスナップショットが得られる。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、我々が未だ同定していない隕石中有機分子は 50000 種にのぼると言われている。また、酸不溶性の不定形高分子（固体有機物）の元素・官能基組成は明らかにされているが、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。これらの問題を徹底解明してこそ、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できる。次世代サイエンスの具体例として、1) 大量採取した彗星地下物質中のアミノ酸、カルボン酸、核酸塩基等の分子内同位体比分析による起源と形成過程の決定、2) 大量採取した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水（セレス、エンケラドスなど）に存在する有機物の組成と分布から読み解く高圧惑星環境、4) 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解析と惑星気候変動の解明、などが挙げられ（表 A3-6）。

表 A3-6: 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 (100 μm – 1 mm)	1-1000 μg (数 100 μm)	1 μg 未満 (100 μm 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, nano-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)	

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、機能性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