

2019 年 11 月 25 日

Gateway 科学探査タスクフォース 最終報告書

深宇宙探査ゲートウェイタスクフォースチーム

目 次

1. 要 旨	2.2-1
1.1 深宇宙探査ゲートウェイにおいて行う科学の助言	2.2-1
1.2 深宇宙探査ゲートウェイを用いた科学探査の助言	2.2-1
1.3 深宇宙探査ゲートウェイに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言	2.2-3
1.4 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言	2.2-5
2. 深宇宙探査ゲートウェイの概要	2.2-7
2.1 目的	2.2-7
2.2 コンフィギュレーション	2.2-7
2.3 打上・組立スケジュール（第一段階）	2.2-8
2.4 軌道	2.2-8
2.5 ISS との比較	2.2-9
2.6 利用に関する Capability	2.2-10
3. 本 TF の設置について	2.2-11
3.1 設置の経緯	2.2-11
3.2 国内外の状況	2.2-11
3.3 目標	2.2-11
3.4 活動方針	2.2-12
3.5 メンバー	2.2-12
4. TF からの提言	2.2-13
4.1 宇宙理学の観点	2.2-13
4.2 宇宙工学の観点	2.2-22
4.3 アストロバイオロジーの観点	2.2-24
4.4 宇宙惑星居住科学の観点	2.2-29
4.5 ロードマップ	2.2-40
5. 補遺	2.2-45
5.1 欧米での Gateway 利用提案テーマ一覧	2.2-45
5.2 Gateway 利用に関する科学コミュニティの将来ビジョン・研究戦略	2.2-48
5.3 科学コミュニティからの Gateway 利用提案テーマ一覧	2.2-50
5.4 将来月探査ワークショップにおける Gateway 関連成果	2.2-52

1. 要旨

国際宇宙専門委員会にて設置された Gateway 科学探査 TF は、90 日間スタディとして深宇宙探査ゲートウェイ計画に関して検討および提言をまとめ、2019 年 2 月中旬を目処に国際宇宙探査専門委員会に提示することを目標としている。TF メンバーは宇宙惑星居住科学、アストロバイオロジー、宇宙理学、宇宙工学分野の専門家で構成され、幅広い視点での検討を進めた。その際に科学コミュニティへの意見収集、シンポジウムやワークショップにおいて参加者との意見交換を行った。その結果、科学コミュニティおよび民間企業は深宇宙探査ゲートウェイ利用について以下の可能性を期待していると考えられた。

- ・ 月近傍・地球環境に左右されないという特徴を活用した新しい観測・実験・実証試験拠点の形成
- ・ 将来の月面における重力・宇宙放射線・太陽光環境を利用した実験を見据えた、ISS そして深宇宙探査ゲートウェイの活用によって広がる新しい研究
- ・ 将来の火星有人探査をも見据えた、科学コミュニティと民間企業などの連携・分担
- ・ 宇宙分野だけでなく幅広い分野を巻き込むことで実現する、科学成果の社会還元

この状況を踏まえて、国際宇宙探査専門委員会からの諮問に対して以下の通り答申する。

1.1 深宇宙探査ゲートウェイにおいて行う科学の助言

宇宙理学

月面数千 km の軌道および月面アクセスを利点とした様々な高度（月面下も含む）での月環境データの取得、長期常時観測の実現、太陽風プロトン起源の水酸基・水分子生成を含む「水の生成・濃集原理」の理解、リモート撮像による地球電磁気圏の大局的な理解、地球環境に左右されない高精度天文観測

宇宙工学

擾乱抑制などの天文観測やアストロバイオロジーを成立させる技術、補給船の高性能・高信頼性を実現するための電気推進系・航法センサを含む諸技術の実証、将来深宇宙探査に向けた月面資源利用、高性能推進系、通信系などの諸技術の獲得

アストロバイオロジー

前生物的有機物合成の解明のために：宇宙環境、原始地球環境での有機物合成過程を模擬する場として利用した実験および人工物をさけた宇宙塵捕集。

生命の誕生進化と本質の理解のために：宇宙環境での微生物生存の測定、人工物をさけた微粒子捕集。知的生命と未来に関わる研究を推進する場とする。

宇宙惑星居住科学

微小（低）重力環境を利用した流体力学・結晶成長・物理化学・材料科学・燃焼・生物科学など学際的研究分野の基礎科学と応用科学（微小重力科学）、工学的手法を駆使した物質循環系・閉鎖生態系の解明・構築とその生命維持システムへの応用（生態工学）、微小（低）重力や宇宙放射線などの深宇宙特有の環境を利用した生物学・深宇宙滞在のための課題を解決する宇宙医学・健康科学・宇宙農学（宇宙生命科学）、人類の宇宙居住を可能にする学際的基礎・応用科学

1.2 深宇宙探査ゲートウェイを用いた科学探査の助言

宇宙理学

地球惑星科学

太陽地球惑星系科学(STP: Solar-Terrestrial Physics)

- ・ プラズマ電磁環境計測 (イオン質量分析、磁場・プラズマ計測、地球磁気圏尾部観測、宇宙電磁波計測、Gateway 環境アセスメント、月面磁気異常領域プラズマ観測、月面ダスト計測、重イオン、負イオン (H-や O-)、中性粒子計測)
- ・ 月表層、地下環境計測 (ローバー搭載 GPR による月表層地下構造・層序の広域探査、着陸機/小型衛星搭載レーダサウンダによる月表層地下構造・層序の広域探査、月表層・浅地下の含水鉱物・水関連物質・有機物の検出)
- ・ 地球惑星磁気圏、大気圏撮像 (地球磁気圏 X 線可視化、UV による太陽系惑星電磁気圏リモートセンシング、月からの地球散逸大気撮像)

固体地球惑星科学

- ・ 月面固体環境計測 (月面衝突閃光観測から探る隕石の衝突頻度と超高速衝突発光物理の解明)
- ・ 隕石、ダスト計測 (微小隕石・彗星ダスト分析並びに外来天体による月への揮発性成分の供給機構の解明)

天文学

- ・ 活動銀河核やブラックホール、重力波、軟ガンマ線観測
- ・ 月表面 Mg、Al、Si、Fe の蛍光 X 線分析による月地殻の形成過程研究
- ・ X 線干渉計 MIXIM
- ・ 宇宙再電離の解明に向けた中性水素の 21 cm 輝線観測
- ・ 宇宙ニュートリノ源の探索

宇宙工学

高性能・高運用性を有する電気推進系、高精細・高信頼性でより安全性が高い接近センサ、など深宇宙探査ゲートウェイへの無人補給船の高性能化・高信頼性化を実現するための諸技術の獲得

アストロバイオロジー

- ・ 諸技術の獲得原始惑星環境・宇宙環境の模擬実験の場としての深宇宙ゲートウェイ利用
- ・ 模擬原始地球の水圏環境における前生物学的実験
- ・ 宇宙塵連続計測と定期サンプルリターンによる、月近傍固体微粒子環境の解明
- ・ 地球生物の宇宙曝露実験に基づく長期宇宙生存可能性の検証
- ・ 人工デブリが全くない地球・月圏での宇宙塵や月起源微粒子の非破壊捕集

宇宙惑星居住科学

ISS で研究されてきた重力の制約が無い物理・化学・生命現象の普遍性を追求し、地球以外の重力天体でも通用する科学知識の獲得を行う。その成果に基づき、基礎科学、応用科学を惑星探査活動の観点から融合・発展し、人類の活動を惑星へと拡大する長期居住に必要な科学技術を構築する。

微小重力科学

- ・ 材料科学： 無容器プロセッシングを用いた高温融液の熱物性計測およびそれを用いた材料プロセス設計
- ・ 流体科学： 面張力が支配的因子となる気泡・液滴・液膜に関連した気液界面現象の解明と熱物質輸送制御
- ・ 燃焼科学： 微小重力利用による燃焼素過程解明と燃焼限界の取得
- ・ 化学工学： 重力変動の影響を受けにくい宇宙環境での持続可能なリサイクルシステムの構築

- ・ コロイド界面科学：微小重力、低重力、可変重力場での物理、化学、生物など分野を横断するコロイド界面科学の再考
- ・ 基礎物理：プラズマおよび低温環境における多体系量子・物理現象の解明

生態工学

- ・ 有人宇宙滞在技術（生命維持・環境抑制制御）としての閉鎖生態系生命維持システム（CELSS）および再生型環境制御システム（ECLSS）構築の研究加速

宇宙生命科学

- ・ 微小重力や月重力（0.165G）への長期曝露が生物の重力応答、発生、成長、生殖、生物間相互作用、生活環、継世代、進化に及ぼす影響の理解
- ・ 深宇宙特有の宇宙放射線や太陽光紫外線の生物影響の理解と計測・遮蔽技術の開発
- ・ 微小・低重力と宇宙放射線・紫外線と心理的ストレスの複合的生物影響の理解と被曝管理
- ・ 心・血管等循環器系の重力変化に対する応答と対抗策
- ・ 筋・骨等運動器系の重力変化に対する応答と対抗策
- ・ 内耳・深部知覚等平衡感覚系とそれを介した調節系の重力変化に対する応答と対抗策
- ・ 船外活動用装置の医学的・人間工学的開発と検証
- ・ 複合的な環境要因に起因するストレス応答と対抗策
- ・ 筋・骨萎縮や酸化ストレス軽減・予防のための機能食材の開発と創薬
- ・ 微生物学的管理目標の設定と有用微生物の利用
- ・ 植物栽培、宇宙植物工場の実証試験
- ・ 月部分（低）重力下における植物栽培の最適化
- ・ 月レゴリスの有機化と利用
- ・ 宇宙植物の栄養分析と宇宙食の開発

1.3 深宇宙探査ゲートウェイに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言

宇宙理学

以下の測器に関する技術開発が必要となる。長期安定観測を実施するためには、観測装置の小型化、省電力化、放射線耐性、低温耐性などの技術を更に成熟させる必要がある。

月周回衛星かぐや搭載機器の技術やノウハウを継承発展

- ・ 電場、磁場計測装置および電磁波計測装置
- ・ イオン・電子エネルギー分析装置、イオン・中性粒子質量分析装置
- ・ ダスト計測装置
- ・ 地球磁気圏 X 線撮像装置・紫外撮像装置

月面および月面下の環境を計測するために必要

- ・ 地中レーダ・電磁探査装置
- ・ 月表層・浅地下物質を計測する赤外分光装置

固体惑星科学分野関連で Gateway 上に必要

- ・ 微小隕石及び彗星ダスト取得・フィルターやエアロゲルなどの収集装置
- ・ 月面衝突閃光（Lunar Impact Flash：LIF）観測用の可視光・多色カメラと熱赤外カメラ

宇宙工学

擾乱抑制技術を含め、他の科学分野と連携し、それらの科学研究において必要とされる諸技術の獲得・実証

アストロバイオロジー

曝露・観測実験のための共通曝露プラットフォームの開発

深宇宙探査ゲートウェイでの実験を実現するうえで共通する技術は深宇宙探査ゲートウェイの環境を利用して宇宙環境で実験装置を運用し、あるいは実験装置を回収し、場合により実験装置を地球に帰還させるという点である。アダプターの設置が計画されているが、比較的大型の装置を想定されている。そこで、共通プラットフォームを開発してアダプターに設置することで、小型の装置の設置、回収、電力供給、信号授受を容易にすることを提言する。

宇宙惑星居住科学

有人月惑星探査・宇宙惑星居住を推進するためには、衣・食・住、エネルギー、通信、その場製造、リサイクル、資源開発など、地球上とはまったく異なる宇宙・惑星環境で、いかに生命及びヒトの活動を維持する環境を創造できるかにある。深宇宙探査ゲートウェイは、そうした持続的な探査活動を支える前哨基地であり、ひいては近未来の有人月面活動・居住に必要な研究開発の場を提供する。

微小重力科学

- ・ その場製造（3Dプリンター）：①月レゴリスの静電浮遊熱物性評価、②レゴリス利用積層造形のための溶融凝固シミュレーション、③宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化
- ・ 熱エネルギー開発：①ランキンサイクルを用いた月面エネルギー供給システム、②月で得られる水素を利用した循環型燃焼装置（熱源）の開発、③パーシャルグラビティ環境での火災安全プロトコルの構築
- ・ 月面資源開発（レゴリス利用）：①プラズマ・レゴリス相互作用による微粒子制御と水素回収、②月レゴリスからの酸素、水素および水の製造技術、③その場資源利用を可能とする鉱物製錬・抽出プロセス
- ・ 水・空気環境浄化：①マランゴニ流を用いた水浄化実験、②匂い環境計測及び光触媒による浄化実験、③自己集積型コロイド光触媒
- ・ 生活安全・リサイクル（非平衡コロイド分散系）：①微小重力環境下および低重力環境下における種々のコロイド分散系の崩壊プロセス・安定性評価、②宇宙惑星居住に必要な食品、日用品などの生活資材の加工、③閉鎖循環型分解・再資源化プロセス
- ・ 光格子時計による共通時間標準（超高精度周波数標準）：①天体観測や月・地球観測の精度向上、②月面ローバー探査測位・精密自動制御、③月地殻変動の測定、④月面重力アノマリー観測の基づく資源探査
- ・ 簡易実験手段（小規模実験プラットフォーム）：①ISSでは容易には達成できない極低温実験、②強力な太陽光および放射線影響評価、③観測機器等実験装置の宇宙環境における評価実証、④将来の宇宙開発に生きる自律的な制御機器の実証

生態工学

- ・ 閉鎖生態系生命維持システム（CELSS）の中核となる宇宙植物工場での食料生産の実証および月面宇宙環境の植物影響解明
- ・ 水を用いた放射線防御および藻類を用いた空気再生、排水処理、食料生産
- ・ 宇宙環境下での再生型環境制御システム（ECLSS）における廃棄物利用の高度化
- ・ 月など地球由来以外から得た物質が生物に及ぼす影響調査

宇宙生命科学

- ・ 植物、線虫、魚類、マウス等のモデル宇宙実験系の開発・改良
- ・ 宇宙環境で機能する植物栽培・動物飼育技術の開発・改良
- ・ ヒトの重力応答障害の対抗策と心理的ストレスの緩和策
- ・ 機能性食材の開発と創薬
- ・ 宇宙放射線・紫外線の計測・予測技術と遮蔽・防護技術の開発
- ・ 生体反応のその場解析装置（イメージングや成分分析や遺伝子発現など）の開発
- ・ 環境制御装置や解析装置やサンプリング装置の AI・自動化と遠隔操作技術
- ・ 新規植物機能の利用・応用技術
- ・ 月レゴリス・資源の利用・応用技術

1.4 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

宇宙理学

STP および惑星固体科学の分野では、(1) Gateway 観測により得られる月プラズマ電磁環境の理学的知見は、太陽系内の大気を持たない惑星/小惑星、衛星と太陽風プラズマの相互作用の理解にとって非常に有益、(2) 今後、月以外の惑星/小惑星や衛星に人類が資源や居住環境を求めて探査を進める際には非常に重要な知識、である。

STP

- ・ プラズマ電磁環境計測の火星など他の天体環境計測への応用
- ・ 月表層、地下環境計測による水資源や水関連物質探査（分布、量、形態）、月極域資源探査やヘラクレスとの連携。将来の火星などの惑星表層探査の予行演習という位置付け
- ・ X 線、紫外線を用いた地球以外の惑星の磁気圏、大気圏撮像、それらの全体構造の俯瞰的理解

惑星固体科学

- ・ 月表面の精密資源探査マップ作成（核ガンマ線イメージング分光カメラ利用）
- ・ HERACLES や他のミッションでのローバーによるサンプルリターンとの連携による外来天体による月への揮発性成分の供給機構の解明

天文学

- ・ 電波干渉計（宇宙 VLBI）
- ・ 月面天文台のパイロット計画

宇宙工学

月資源を推薬として利用した推進システムやその推進薬生成・運搬技術、遠隔操作技術、深宇宙や天体表面に到達するための宇宙航行技術、地上などの遠隔地から深宇宙への高度で柔軟なアクセスを可能にする通信技術・テレグジスタンス技術

アストロバイオロジー

前生物的有機物合成とその曝露実験の結果は、今後検討される月惑星およびその衛星の探査で宇宙由来有機物がどの程度各天体に到着し、残存しているかを推定する上での資料となる。天然の微生物移動（パンスペルミア過程）の検討が惑星保護および生命探査を検討する上での指針作成に重要である。宇宙・月・惑星での居住の検証の場として微小重力下における多孔質体中での水分移動機構の解明の提案がある また深宇宙探査ゲートウェイは将来の火星等からの帰還サンプルの中間分析場所として検討価値がある。そのための惑星保護と地球外生命検出を両立するサンプルリターン技術の開発提案がある。

宇宙惑星居住科学

月面の重力場（0.165G は、0G と 1G を補間する）を利用して ISS で行われた微小重力科学研究の成果を実証・発展させることによって、民間を中心とした SDGs（持続可能な開発目標）、Society 5.0 などのイノベーション戦略と連携し、産官学が協力して日本発の月探査ミッションを推進する。

微小重力科学

- ・ 材料科学： レゴリスなど惑星鉱物資源を原材料とした材料プロセス、その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬、材料加工
- ・ 流体科学： 探査居住モジュール熱制御技術、宇宙機流体制御、微小重力下・低重力下での積層造形（3D プリンター）
- ・ 燃焼科学： 宇宙火災安全確保、月面極域に存在する水素を利用した熱源の開発と利用システム、燃焼による廃棄物の減容処理
- ・ 化学工学： 有人探査に向けた空気再生および水再生など生命維持・リサイクル、水素・酸素・水の循環的利用を可能とする光触媒プロセス、日本の強みである環境技術を微小重力・低重力・可変重力場での単位操作
- ・ コロイド界面科学： 粒子の自己組織化原理の材料プロセス、リサイクル、界面活性剤による界面制御、物理表面の濡れ制御、電場効果のバイオテクノロジー、食品の保存処理、日用品など生活関連技術
- ・ 基礎物理： レゴリスのプラズマ特性評価と材料プロセス、生命と真空・高エネルギー環境との相互作用の解明、光格子時計を用いた月／惑星／宇宙空間における時間・位置測定など各種精密測定
- ・ 共通技術・実験手段： 化学分析、ゲノム、プロテオーム、メタボローム解析、遠隔地での実験の自動化・遠隔操作などテレサイエンスの高度化、有人／無人衛星・月面プラットフォームなど手段の多様化および手段間の連携

生態工学

- ・ 長期有人宇宙滞在技術（生命維持・環境抑制制御）としての閉鎖生態系生命維持システム（CELSS）および再生型環境制御システム（ECLSS）構築

宇宙生命科学

- ・ 深宇宙環境長期曝露に伴う医学的リスクの回避・医療
- ・ 長期滞在するクルーの健康管理、ストレス軽減、メンタル面の改善
- ・ 月面植物工場・制御生態系・宇宙農業の実証・確立
- ・ 生命維持システムの実証・確立
- ・ 月のレゴリスや水などを含む資源開発・利用
- ・ 火星等、さらなる深宇宙への人類の進出
- ・ 月旅行・エコツーリズム
- ・ 月人類社会・文化の形成
- ・ 地球の課題解決と近未来の創造

2. 深宇宙探査ゲートウェイの概要

2.1 目的

2018 年 2 月、米国予算教書において、月の周回軌道に設置される有人拠点として「**深宇宙探査ゲートウェイ**； **Deep Space Gateway**」（以降、**Gateway** と略す）を国際協力、民間との協力により構築していくことが発表された（ISS 参加 5 極の宇宙機関による作業チームが実施してきたコンセプトスタディを踏まえたもの）。Gateway は高出力の電気推進システム、クルーが滞在するための居住モジュール、ロボットアーム、および船外活動機能などが備えられ、地球と月面との通信中継機能により科学的に興味深い月裏側や極域の探査に新しい機会をもたらす計画である。

① 月面・月近傍探査ミッションの支援

- ・ 地球-月通信の中継点、月面探査機の遠隔操作の通信拠点
- ・ 月離着陸機の発着拠点、月面サンプルの地球帰還機への引渡し係留拠点
- ・ 有人月面探査実施の場合の、月面からの緊急退避場所

② 深宇宙環境を利用した科学実験

- ・ 外部に据え付けた機器による月、地球、太陽系の科学観測
- ・ 有人支援による、より詳細な探査活動
- ・ 月面や太陽系からの探査試料の一次選別
- ・ ミッションを行う小型衛星、キューブサットの放出と通信の中継
- ・ 深宇宙環境での有人生理学実験

③ 火星探査へ向けた準備（技術実証、デモンストレーション）

- ・ 火星への輸送機の組立と点検
- ・ 深宇宙輸送と居住能力（放射線防護対策を含む）の技術実証
- ・ 自律的なクルー運用手順やわずかな補給環境での運用実証
- ・ 遠隔操作技術の確立
- ・ 宇宙機の維持と燃料補給技術の実証

2.2 コンフィギュレーション

第一段階（～2026 年）の組立フェーズでは、宇宙飛行士は 4 名滞在可能、滞在期間は 10～30 日間程度の予定。将来は、数 100 日程度の長期滞在ができる有人拠点となる予定。

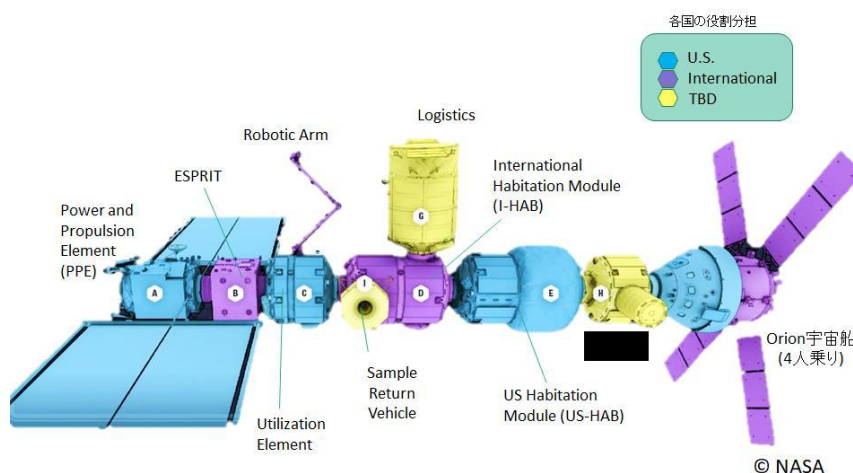


図 2.2-1 Gateway のコンフィギュレーション

2.3 打上・組立スケジュール（第一段階）

現在の構想では、まず2022年に「電力・推進バス」(PPE: Power and Propulsion Bas)と呼ばれるモジュールが打ち上げられる。PPEは太陽電池やスラスターをもっており、電力を作ったり、軌道変更などをしたりすることができる。2025年までに、宇宙飛行士が暮らす居住モジュール(Habitation Module)や、物資を補給するための補給機、ロボットアーム等が打ち上げられる。2026年には、宇宙飛行士が船外活動するためのエアロックが打ち上げられて、Gateway第一段階の完成をみる。

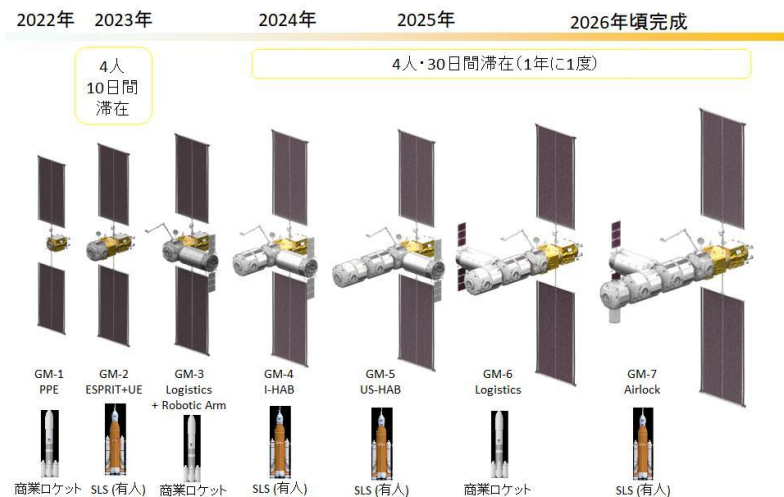


図 2.3-1 Gateway の打上・組立スケジュール

2.4 軌道

GatewayはNear Rectilinear Halo Orbit (NRHO)と呼ばれる軌道で運用することが検討されている。月を南北に回る極端に細い楕円軌道で、その細長さからあたかも直線のように見えることから、“Near Rectilinear (ほとんど直線)”という名称がつけられている。軌道面は常に地球を向いているため、地球との通信が常時確保されること、軌道投入に必要なエネルギーが比較的少なくて済むことなど、運用しやすい条件が整っているとされている。



図 2.4-1 Gateway の軌道

2.5 ISS との比較

ISS の大きさと比較すると、Gateway はより小さいサイズであり(右図参照)、組立フライト回数もISS の 43 回に比べて、7 回で完成するように設計されている。ISS との比較について詳細を下表に記す。



図 2.5-1 ISS と Gateway の大きさの比較

表 2.5-1 ISS と Gateway の仕様

	国際宇宙ステーション (ISS)	Gateway
大きさ	約 108.5m×72.8m (サッカー場)	下図参照
質量	約 420 トン	約 70 トン
組立フライト回数	43 回	7 回
宇宙飛行士滞在日数 (年間)	365 日 (常時)	10～30 日
滞在宇宙飛行士人数	6 人	4 人
食料、消耗品 (年間)	2,190 人日分	40～120 人日分

表 2.5-2 ISS と Gateway の位置づけ

	ISS (地球低軌道)	Gateway (月長楕円極軌道(NRHO)) (*)
①利用目的	● μG環境を使った利用 (宇宙医学、タンパク質結晶等) ● 地球周回軌道を使った利用 (地球観測) 成果の地上への還元	● NRHO軌道の特性を使った利用 (月面観測、月面通信の中継点等) ● 月・月近傍探査の中継点としての利用 (補給、サンプル回収等) ● 地球圏外軌道を使った利用 (地球周辺観測、放射線環境評価等) 宇宙探査への拠点
支える特性の違い	● 輸送コスト: 相対的に低 ● 通信量: 相対的に大 ● 放射線: 相対的に低 ● 軌道滞在: 宇宙飛行士の常時滞在 ● 月以遠への必要増速量: 相対的に大	● 輸送コスト: 相対的に高 ● 通信量: 相対的に小 ● 放射線: 相対的に高 ● 軌道滞在: 無人運転期間が長い ● 月以遠への必要増速量: 相対的に小
②国際協力	5極による国際協力	パートナーシップの更なる拡大の可能性
③技術開発	・ 大型有人宇宙施設の開発・運用に必要な技術の獲得 ・ 探査技術の事前実証	・ 宇宙施設技術の高度化、自動化 (低リソース化、通信遅延対応等) ・ 探査技術の実証・発展

2.6 利用に関する Capability

現時点での Gateway 利用に関する Capability の検討状況の概要は以下の通りである。

- ① 1 回のクルーミッションで打上げ可能な利用機器： 1,000kg 以上
- ② 船内の利用空間： 3m³ 以上
- ③ 船内の利用用保管スペース： 2m³ 以上
- ④ 利用機器への総電力： 4kW 以上
- ⑤ 利用用のデータ保管： 100TB 以上
- ⑥ 利用用船内通信： Time Triggered Ethernet 1,000BT
- ⑦ 利用用のデータダウンリンク： 5.14Tbits/day 以上
- ⑧ 船外にロボットアームが装備され、このロボットアームを用いて、実験機器を Gateway 船外へ設置すること、またサイエンスエアロック経由で実験機器を船内へ回収することが可能。
- ⑨ サイエンスエアロックのサイズ： 直径 800mm、奥行き 800mm
- ⑩ 外部ペイロードインタフェース： 1 つの居住モジュールに 4 つ以上
- ⑪ 実験／利用のために Gateway がポインティングを行うことは想定していない。

3. 本 TF の設置について

3.1 設置の経緯

宇宙理工学合同委員会は、国際協働による宇宙探査を実現しようという国際的な議論の高まりに呼応して、宇宙科学コミュニティと国際宇宙探査に関する情報を共有し、同時に国際宇宙探査計画へ宇宙科学コミュニティの意見を反映させるために、2017 年 9 月に国際宇宙探査専門委員会を設置した。

第 2 回国際宇宙探査フォーラム(ISEF2)の結果を踏まえ、JAXA では新たに月や火星を対象とした国際宇宙探査センターを設置して、月近傍有人拠点や月着陸探査活動の開発の着手に向け、検討とともに科学コミュニティとの連携もさらに本格化させた。それを受けて、国際宇宙探査における科学の検討を深め、科学コミュニティとの連携をより一層深めるために以下の 4 つのタスクフォース（以下、TF）が設置された：（1）月極域探査 TF、（2）Gateway 科学探査 TF、（3）ヘラクレス TF、（4）火星探査 TF。

3.2 国内外の状況

欧米では Gateway 利用の意見収集・検討が本格化している（補遺 5.1 参照）。その一例として、2018 年 2 月に米国で開催された Deep Space Gateway Concept Science Workshop の概要を以下に示す。

- ・ 探査で可能となる、宇宙生命・物理学、太陽系物理学、月・惑星科学、天体物理学、地球観測の各分野に特化したセッションと、分野横断的なセッションの 2 種類のセッションが中心。
- ・ Gateway で可能となる科学、データ取得に必要な機器、Gateway が提供するリソース、Gateway をサンプルリターンや通信の経由地とする構想が議論された。
- ・ 講演数：約 180 件、参加者：約 300 名（政府関係、研究者、産業界、国外）であった。

一方、TF 発足時（2018 年 11 月）における国内科学コミュニティの状況は以下の通りであった。

- ・ 宇宙惑星居住科学（人類の活動領域拡大を目指す科学）分野では、Gateway 利用を含む深宇宙での研究について、TF 発足以前から将来計画やロードマップを独自に策定し、意見収集等主体的に対応していた。
- ・ 宇宙理学・工学分野、アストロバイオロジー分野では、Gateway 利用にて具体的に何を観測・実験するのか決まっておらず、関連科学コミュニティからの意見収集が喫緊の課題であった。

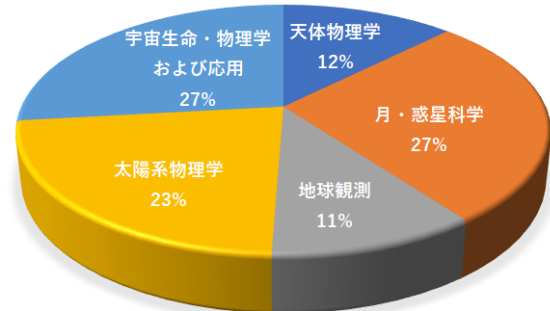


図 3.2-1 Deep Space Gateway Concept Science Workshop における講演件数の割合

3.3 目標

深宇宙探査ゲートウェイ計画に関して、以下の事項に関して検討および提言をまとめ、2019 年 2 月中旬を目処に国際宇宙探査専門委員会に提示する。

1. 深宇宙探査ゲートウェイにおいて行う科学の助言
2. 深宇宙探査ゲートウェイを用いた科学探査の助言
3. 深宇宙探査ゲートウェイに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言
4. 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

3.4 活動方針

2018 年 11 月半ばから開始する 90 日間スタディとして、多岐にわたる分野を対象とした集中的な検討を行う。その際に、科学コミュニティに対する Gateway 利用テーマに関する意見収集と共に、シンポジウムやワークショップ等の機会を利用してより広く意見交換を行い、取り纏めの参考とする。

3.5 メンバー

限られた TF 活動期間内にて、Gateway 利用が想定される科学分野を網羅することは困難である。従って、国際宇宙探査専門委員会、宇宙環境利用専門委員会および ISAS 内での意見を参考に、TF チーム長の判断により TF メンバー構成を表 3.5-1 の通りとした。

表 3.5-1 TF メンバー一覧（敬称略、順不同）

氏名（所属）	専門分野	備考
宇宙理学分野		
白井 英之（神戸大学）	月・惑星科学	- 月極域探査 TF メンバー - 地球電磁気・地球惑星圏学会 会員
河合 誠之（東京工業大学）	宇宙物理学	- 宇宙理学委員会 委員 - 国際宇宙探査専門委員会 委員
宇宙工学分野		
澤井 秀次郎（ISAS）	飛翔システム	- 宇宙工学委員会 委員 - 国際宇宙探査専門委員会 委員
アストロバイオロジー分野		
【副チーム長】 山岸 明彦（東京薬科大学）	生命科学	- 宇宙理学委員会 委員 - 国際宇宙探査専門委員会 委員
宇宙惑星居住科学分野		
石川 正道（理化学研究所）	微小重力科学	宇宙環境利用専門委員会 副委員長
【チーム長】 稲富 裕光（ISAS）	宇宙環境利用科学	- 宇宙工学委員会 委員 - 宇宙環境利用専門委員会 幹事 - 国際宇宙探査専門委員会 委員
北宅 善昭（大阪府立大学）	生態工学	生態工学会 会長
高橋 秀幸（東北大学）	宇宙生命科学	宇宙環境利用専門委員会 委員長

4. TF からの提言

宇宙工学・理学委員会の研究メンバー、宇宙環境利用専門委員会のコミュニティメンバーに対して Gateway 利用テーマに関する意見収集を行い、計 24 名から新規テーマ提案を含む回答を得た（補遺 5.3 参照）。また、宇宙環境利用シンポジウム（2019 年 1 月 24、25 日開催）および将来月探査ワークショップ（同年 1 月 28 日開催）等の機会を利用して、参加者との意見交換を行った（補遺 5.4 参照）。

これらの結果を踏まえ、これまで計 8 回の会合にて取り纏めた提言の詳細を本章に記す。

4.1 宇宙理学の観点

4.1.1 深宇宙探査ゲートウェイにおいて行う科学の助言

Gateway において行う科学の分野としては、宇宙理学の観点からは「地球惑星科学」「天文学」の 2 つがあげられる（科研費の区分に従う）。

4.1.1.1 地球惑星科学

「地球惑星科学」の中でも Gateway に大きく関連するものは、惑星などの固体を研究対象とする「固体地球惑星物理学」分野と、地球や惑星を取り囲む宇宙環境を研究対象とする「超高層物理学」分野である。特に「超高層物理学」に関しては海外では「太陽地球惑星系科学(STP: Solar-Terrestrial Physics)」と呼ばれており、本報告書ではこれに倣い STP と呼ぶことにする。

我が国では、地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)がこの STP 研究を主導しているが、その目標は、

(1) 太陽の影響を受ける多様性に満ちた地球・惑星系の大気圏・電磁気圏を理解し、また太陽がどのように太陽圏の環境を作り出しているかを解明すること。

(2) 太陽圏を宇宙ガスの実験室ととらえ、粒子加速や磁気再結合、無衝突衝撃波などのプラズマ・大気物理現象の素過程を明らかにすること。

であり、これら 2 つの目標の波及効果として(a) 生命圏環境や系外惑星系の理解に貢献、(b)「宇宙天気」などの人類の宇宙進出を支える知識基盤の構築、があげられる。

上の 2 つの目標のうち、Gateway を用いて行う科学としては、(1)に関連して、月環境探査、及び地球磁気圏探査が重要となる。月環境探査については、Gateway の軌道から考えて月に比較的近い宇宙環境での粒子、電磁界、放射線、など様々な科学的データの取得が長期にわたり定常的に実施できる。また、Gateway から月面へのアクセスが可能になる場合、月面環境、特に月面に局所的に存在する磁気異常領域、月極域の水の量と質、月面地下環境、月面帯電や微小粒子（ダスト）挙動、などの詳細な調査が直接可能となる。これらは将来の有人月面活動に向けた重要課題である。一方、月軌道の約 20%は地球磁気圏内にあることを考慮すると、その期間中は、Gateway または月面に設置された機器により、遠隔からの地球磁気圏の撮像など惑星環境のリモート観測が定常的に可能となる。

また、SGEPSS/STP 分野がまとめた RFI 回答においては、月の水の分布を理解する為には太陽風プロトン起源の水酸基・水分子生成を含む「水の生成・濃集原理」の理解が重要であると書かれている。太陽風と月表層の相互作用は複雑であり、これを明らかにするには、Gateway を拠点とした月面上空環境の実測及び月面環境の直接観測によるデータが非常に重要となる。これは、太陽地球系物理学における普遍性を追求するという知的興味からも、水資源の月面上の輸送過程と保護状態を理解するという実用性からも重要であると考えられている。

一方、「固体地球惑星物理学」に関しては、日本惑星科学会が主に関連研究を主導している。日本惑星科学会がまとめた RFI 回答では、今後 20 年程度の太陽系探査の科学目標として、「太陽系における生命生存可能環境の形成と進化の探求」が挙げられている。「惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動、天体への

供給」というテーマに関して言えば、太陽系年代学の基準としての月年代学を再検討し、小惑星・彗星探査の知見と組み合わせることで惑星材料物質の供給過程が明らかとなる。Gateway を拠点として、月表面の物質や月面での宇宙線や小隕石の衝突を定常的に観測することにより、月形成過程や月資源に関する重要な知見が得られると考えられる。

4.1.1.2 天文学

現在の天文学・宇宙物理学は、宇宙の物質・空間の起源と 138 億年の宇宙進化史を明らかにすること、系外惑星の形成過程の解明、そして地球外生命の探査を大きな目標としている。これまで、天文観測については、主に地上に設置された望遠鏡や衛星に搭載された観測機器によって研究に必要なデータを取得し解析を行ってきたが、新たに月周回 Gateway もしくはそこからアクセス可能な月面を観測拠点として捉えた場合、以下のようなメリットが得られる。

天文観測における Gateway 利用の利点として、(1) 地球環境(大気、電離層、磁気圏)からの影響が低い、(2) 地球観測との連携により長距離観測が可能、(3) ISS の代わりとしての実験機会 (ISS との相補性も含む)、(4) 月面天文台へのステップ、(5) 常時長期観測、が主に挙げられる。これらの利点を活かすことにより、月環境ではガンマ線、X 線、紫外線、可視光、赤外線、電波に至る全波長に渡って同時観測が可能である。

- a. ガンマ線観測に関しては、小型検出器を船外に設置し、地球周辺の衛星上のガンマ線バーストモニターとの検出時間差を利用して、到来方向を高精度に決定できる。また、将来的には複数設置すれば全天を観測可能となる。
- b. 紫外線望遠鏡観測については、地球低軌道 (LEO) の水素等の希薄な大気による背景放射や吸収が月周回軌道では存在しないため高感度観測が可能となる。
- c. 電波天文観測についても、地球上および周辺の人工電波が遠いため、地上では不可能な帯域での高感度電波観測が可能になる。
- d. 宇宙線や赤外線、可視光、X 線観測についても、LEO 環境や地球磁気圏からの影響が低く、熱・温度の点で安定した環境下、冷却が必要な望遠鏡や撮像素子を用いた観測が可能になる。

また、Gateway はこれらの天文観測を実施する拠点として現行 ISS の代わり、もしくは相補的な実験機会を与えてくれる。具体的には、常時接続を利用した X 線、 γ 線、可視光等の望遠鏡、モニター装置、短期間の観測装置の技術実証実験 (有人作業による、交換、アップグレード、調整などの可能性) がメリットとしてある。

また、Gateway 観測と地球上観測を組み合わせ、地球 (あるいは LEO) との長い距離を利用した天文観測として、基線長 3-4 km の重力波干渉計が考えられる。

将来的には、月面アクセスを利用し、月面天文台建設による宇宙ニュートリノ観測、X 線干渉計設置が考えられる。

4.1.2 深宇宙探査ゲートを用いた科学探査の助言

4.1.2.1 地球惑星科学

太陽地球惑星系科学(STP)

STP 分野では、地球電磁気圏探査の詳細観測で獲得した知見と探査技術を月惑星探査に活用し、月惑星の極限環境における探査を通して科学・技術の両面においてフィードバックを掛け合いながら発展していくという、地球電磁気圏探査と月惑星探査が両輪をなす探査戦略を基軸としている。このような背景のもと、Gateway を利用した科学探査については、月環境、地球電磁気圏環境、月面環境を対象にして以下に

示すような具体的な提案が行われた。これまで、月周回衛星かぐや観測によって、月面から数十キロ~数百キロの上空におけるプラズマ電磁環境の詳細解析がこれまで精力的に行われた。月は固有磁場を持たないが、局所的な地殻磁場(磁気異常)が点在するため、太陽風プラズマと月面の相互作用による月面プラズマ電磁環境は一様ではないことが明らかにされている。また太陽風自体が時間的に変動することや月の軌道が地球磁気圏を通過することも考慮すると、電磁氣的観点から見た月環境は非常に複雑であり、今後、人類の生存基盤領域として月環境を利活用する上で、その知見は不可欠であり極めて重要である。また学術的には、磁場・大気を持たない天体周辺のプラズマ環境の理解に役立つ。

1. プラズマ電磁環境計測

「Gateway 上観測」

a. 月起源イオン質量分析

かぐや観測により月周辺(高度 100km)には月表面起源イオンの存在が明らかとなった。Gateway 上観測により、太陽風中の電場で十分に加速された月起源イオンを捕らえ、質量分析によりこれらのイオン分布と成因に関する有用な情報を得る。また、流星群の月面衝突による重イオンスパッタリングの Gateway 上計測により、月の希薄大気の生成メカニズムに制約を与える。

b. 太陽風の磁場・プラズマ計測

固有磁場がない月の表面や局所的な磁気異常領域と太陽風プラズマ、磁場との相互作用は、月の低高度ではかぐや衛星観測で調べられてきた。Gateway 観測では、月起源イオン放出や磁気異常による太陽風プラズマ反射、散乱と太陽風プラズマや磁場の相互作用についてより広範囲で計測を行い、それにより月が周囲宇宙空間のどの範囲まで影響を与えているかを明らかにする。また、月の夜側に形成される低プラズマ密度領域(ウェイク)の境界では、電子とイオンの運動の差から生じる電場が存在する。Gateway 観測によりこのウェイクと電場の大規模な構造を明らかにする。

c. 地球磁気圏尾部のプラズマ現象観測

月軌道の約 20%は地球磁気圏であり、月が地球夜側に位置するとサブストーム(地球磁気圏におけるエネルギー蓄積・解放現象でありオーロラ現象を誘発する。)の起点となる地球磁気圏尾部に滞在することになる。これを利用し、Gateway からの粒子や電磁界の計測により、サブストーム関連現象(プラズモイドの発達とその内部構造)の観測を行い、その詳細を解明する。

太陽風プラズマと月面の相互作用観測は上述したが、その対比という形で地球磁気圏プラズマと月面の相互作用について定常観測を行うことができる。地球起源イオンの月面への流入の定量的な評価を含め非常に革新的な観測が可能である。

d. 宇宙電磁波のリモートセンシング

プラズマ波動の電磁波成分は遠距離を伝搬するためその特性を解析することにより電波発生環境変化のリモートセンシングが可能になる。地球オーロラ電波(AKR)、太陽電波(TypeIII 等)観測による太陽地球環境変動研究や、木星電波(ヘクトメートル波)の観測による惑星電磁気圏研究が可能である。特にオーロラ電波は地球の磁気圏活動度の指標となる。

e. Gateway と周辺プラズマ環境の相互作用観測：Gateway 環境アセスメント

Gateway 周囲のプラズマ環境は ISS と異なり劇的に変動(領域変化・突発現象)すると予想される。その変化に伴い Gateway 自身の電位ポテンシャル及びその周辺環境変化も大きく変動する。その変動を電磁場・プラズマ波動観測器でモニターする。

「小型衛星や月面上観測」

f. 月面磁気異常によるプラズマ粒子加速加熱

かぐや観測により、月磁気異常と周囲プラズマ・電磁場の相互作用の結果、プラズマの加熱・加速が起こることが明らかとなった。これらのメカニズムを解明するには、月面に近い低高度での「その場」観測が必須であり、複数の(超)小型衛星を Gateway から月面に下ろす途中で観測を行うことが理想的

である。得られる知見は、天体表面の宇宙風化のメカニズムの理解につながる。

g. 月面ダスト帯電、分布、運動

月表面は太陽光や太陽風プラズマ衝突により帯電し、月表面近くに電場が発生する。これらの電場によって、帯電したダストが浮遊、移動する可能性がある。Gateway から放出された(超)小型衛星で観測を行うことにより、月周辺ダストの分布・運動を理解する。

h. 月起源の重イオン、負イオン (H-や O-)や中性粒子

太陽風の月面衝突により、中性粒子、月起源重イオン、H-や O-などの負イオンが月周辺に放出される。特に、負イオンはこれまで未検出であり、負イオン専用観測装置の搭載によりその存在を初めて示すことができる可能性がある。これらのイオンや中性粒子を(超)小型衛星を用いて測定すれば、月表面組成や月表面状態を遠隔観測することができるほか、太陽風の主成分である水素イオンが月の水(H₂O)の源としてどの程度寄与しているかについての情報を得ることができる。

2. 月表層、地下環境計測

「小型衛星や月面上観測」

a. ローバー搭載 GPR による月表層地下構造・層序の広域探査

月面広域探査において、限られた運用リソース(運用期間、持ち帰れるサンプル総量等)の下で科学成果を最大化するためには、サンプルの掘削・その場分析・採集を行うべき地点を事前に適切に選定することが重要となる。掘削・分析・採集の試行に先立って、GPR (Ground Penetrating Radar)による予備調査を行うことが非常に有用である。GPR 観測により表層レゴリスの微細構造や埋もれた岩塊の分布を取得し適地・不適地を把握する。表層の層序は、観測地域の直近の形成史を議論する上で重要な基礎情報である。この点でも、分析・取得サンプルと合わせて、表層の微細構造を GPR の観測で得ておくことは重要である。

b. 着陸機もしくは小型衛星搭載レーダサウンダによる月表層地下構造・層序の広域探査

月・惑星の地下探査は、ローバー搭載 GPR による地表面からの高分解能観測が行われる段階に移行しつつあるが(月: Chang'E-3,4/LPR, Chang'E-5/LRPR、火星: ExoMars Rover/WISDOM など)、ローバーが走行可能な領域は限られるため、周回機搭載レーダサウンダによる広域探査の必要性・重要性は依然高い。月では SELENE/LRS による全球地下探査が行われたが、HF 帯(4-6MHz)での観測で、分解能は 75m、探査深度は数 km だった。月面でのローバー搭載 GPR の局所的な詳細観測結果を、広域・全球的な地質コンテキストの中で位置づけ・理解していくためにも、ローバー搭載 GPR の分解能レンジ(数 m から数 cm)とオーバーラップしうような全球的な広域観測の実施が望まれる。

c. 月表層・浅地下の含水鉱物・水関連物質・有機物の検出

月資源探査、月表層環境変遷過程の解明を目指し、小型分光器による近赤外分光観測を行い月表層の含水鉱物・水関連物質・有機物を検出する。また、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貴ガス・表層鉱物高精度計測を実現する。

3. 地球惑星磁気圏、大気圏撮像

「Gateway 上もしくは月面」

a. 地球磁気圏 X 線可視化

X 線天文衛星によって、太陽風と地球外圏との電荷受換反応に由来する地球磁気圏からの X 線が近年発見された。本研究では、この X 線を計測することにより、地球磁気圏の昼側境界面(カスプ、シース、衝撃波など)の X 線可視化や、太陽風に対する磁気圏境界面の変動の解明を行う(GeoX プロジェクト)。X 線撮像を行うためには磁気圏外から観測を行う必要がある。近地球では不可能であり、Gateway 軌道である NRHO は理想的である。また月面に可視化装置を設置できれば定常的に長時間の観測が可能となる。

b. UV による太陽系惑星電磁気圏リモートセンシング

これまでの UV による地球磁気圏、惑星磁気圏の撮像観測は成功の一方で、以下のような課題もあった。「かぐや」：地球内部磁気圏の撮像を試みたが、月の低軌道では月本体が視野を遮るために撮像機会が大きく制限された。「ひさき」：地球周回軌道から惑星磁気圏の撮像を試みたが地球コロナの混入があり、特定の波長でしか観測できない。ISS 曝露部：地球の超高層大気のモニターを試みたが、高度が低すぎるため地球全体が見えない。よって、Gateway がとる NRHO からの観測や月面からの定常観測はさらに大きな成果をもたらす。

c. 月からの地球散逸大気撮像

遮光バッフル素子を用いて地球希ガス宇宙散逸の 2 次元撮像を行うことで、太陽風と惑星大気の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。月周回からの定常的な監視により、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、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。

固体地球惑星科学

「Gateway 上もしくは月面」

4. 月面固体環境計測

a. 月面衝突閃光観測から探る隕石の衝突頻度と超高速衝突発光物理の解明

月面衝突閃光(Lunar Impact Flash : LIF)とは、彗星・小惑星起源のメテオロイド隕石が月面に超高速衝突する際に生じる 1/10 秒~1/100 秒程度の短時間の可視・近赤外発光現象である。可視光・多色カメラと熱赤外カメラを用いた LIF 観測から (1) 彗星・小惑星起源メテオロイドの月面超高速衝突時の発光物理 (励起・黒体温度および冷却過程) を明らかにし、熱赤外カメラの波長 10 μ m 帯 (温度 230K 以上) の水平温度分布撮像から LIF イベント後の衝突痕の搜索も行う。また、(2) 地上観測では困難な LIF の長時間モニター観測を実施することで、流星と小惑星を繋ぐ直径 cm~m の (シスルナ空間) 地球・月衝突天体のフラックスと、サイズ分布の解明も期待される。

「Gateway 上」

5. 隕石、ダスト計測

a. 微小隕石・彗星ダスト分析並びに外来天体による月への揮発性成分の供給機構の解明

昨今の月周回衛星観測や月試料分析により月に大量の揮発性成分が存在する可能性が示唆された。その主たる供給源として、外来天体 (炭素質コンドライト及び彗星) の衝突が挙げられる。極微小な彗星ダストによる揮発性成分の供給モデルは検討されていないが、炭素質コンドライトには衝突により供給された水の痕跡が発見されている。一方で、外来天体による供給量の大部分を担う微小隕石や彗星ダスト自体は月試料から見つからない。外来天体由来の揮発性成分の供給・埋蔵量を推定するために、Gateway 上での微小隕石・彗星ダストの収集と微小部分分析による月への揮発性成分の供給機構の解明が必要である。

フィルターやエアロゲルなどの収集機構を Gateway 船外に設置し月へ飛来する前の微小隕石及び彗星ダストを収集する。搭乗する宇宙飛行士と連携し、船外活動 (収集機構の着脱や宇宙塵のピックアップ、分析作業の一部などを担当) の一環として長期的に実施する。

4.1.2.2 天文学

Gateway 利用の利点として、(1) 地球環境 (大気、電離層、磁気圏) からの影響が低い (2) 地球観測との協働により長距離観測が可能、(3) ISS の代わりとしての実験機会 (ISS との相補性も含む)、(4) 月面天文台へのステップ、(5) 常時長期観測、が主に挙げられる。月環境ではガンマ線、X 線、紫外線、可視光、赤外線、電波に至る全波長に渡って同時観測が可能であることから、以下のような具体的な提案がなされている。

「Gateway 上もしくは月周回軌道上」

1. 軟ガンマ線による活動銀河核やブラックホール、重力波対応天体の観測

軟ガンマ線観測の感度向上のネックとなるのは、SAA トラップ陽子による検出器自体の放射化であり、ひとみ衛星軟ガンマ線検出器の場合も、放射化バックグラウンドが精度の限界を決めていた。しかし月には SAA のようなものはないので、放射化の問題はほとんどない。また、宇宙線と地球大気の相互作用による軟ガンマ線や中性子バックグラウンドも無い。一方、一次宇宙線の量は地球周回衛星に比べて多いが、地磁気に起因する位置依存性がなく、Anti-coincidence 機能により軽減させることが期待される。よって、月周回軌道では低く安定したバックグラウンドが期待され、地球周回衛星に比べて感度の良い軟ガンマ線観測が期待される。

2. ガンマ線バーストの観測

2017 年 8 月の重力波と電磁波の同時検出により、ショートガンマ線バーストの観測がさらに脚光を浴びている。そのためには、広い視野を持った軟ガンマ線観測でバーストを検出し、できるだけ精度良く方向を決定することが、可視光をはじめとするフォローアップに重要である。地球周回軌道と月周回軌道にガンマ線バースト検出器を配置し、ガンマ線バーストの到来時刻の差を精密に計測することによって、数分角の精度で方向決定することを目的とする。Gateway は地上とのリアルタイム通信や高精度時計などのインフラを担うことが期待される。

3. 月表面 Mg、Al、Si、Fe の蛍光 X 線分析による月地殻の形成過程研究

月表面における Mg、Al、Si、Fe の蛍光 X 線分析を行うことで、月地殻の形成過程を研究する。可視近赤外の分光などによって、月の地殻の岩石の種類は大まかに分かっているものの、宇宙風化など表層での物質の変質の影響を受けており、その解釈は難しい。そこで宇宙風化の影響を受けない方法として、太陽 X 線を一次 X 線とする月表面での二次蛍光 X 線を X 線撮像分光(フォトンカウンティング)観測を行う。

ただし、Gateway の軌道は近月点が 4000km、遠月点が 75000km という長楕円軌道であり、南極側が遠月点になる見込みである。従って北極側と南極側での解像度が大きく異なることになる。また、常に地球から可視である軌道を取るため、全球のマッピングを行うことができない。従って、全球マッピングを行うためには、月周回衛星が必要となる。

4. X 線干渉計 MIXIM

サブ秒解像度の X 線撮像を実現する。それにより活動銀河核の超巨大ブラックホール周辺のトーラスの構造など今までにない高い解像度を要求する X 線観測研究を可能にし、Chandra 衛星(1999 年打ち上げ；角度分解能 0.5 秒角)の後継ともなる。X 線検出器ユニットを Gateway に設置し、格子ユニットをブーム(～10m)の先に設置すると約 0.1 秒角の像幅が期待出来る。格子ユニット(超軽量)を Free Flyer として 100m の距離で分離制御できれば 0.01 秒角、サブミリ波干渉計 ALMA と同等の角度分解能が得られる。最終的には、検出器ユニットを月面に設置、格子ユニットをスペースドローンにのせて観測するのが理想的である。

「月面(ローバー、月面天文台)」

5. 宇宙再電離の解明に向けた中性水素の 21 cm 輝線観測

宇宙再電離時代からの中性水素の 21 cm 輝線を月面で観測することで再電離について解明する。地球上では大気の影響により低周波電波の観測が難しいが、月の裏側での観測は地球上からの電波の混信やノイズを受けないので高感度の観測が可能である。月面上を動けるローバーの上に観測機を乗せ、月の裏側で 21 cm 輝線を観測する。月周回衛星を経由して観測データを地球まで送信する。

6. 宇宙ニュートリノ源の探索

大気ニュートリノバックグラウンドのない宇宙空間でニュートリノ源を探索する。対象となるのは、IceCube で発見された超高エネルギーニュートリノ源からの低エネルギーニュートリノ、低エネルギー領

域での新たなニュートリノ源などである。検出原理は、ステーションが近月点付近にあるとき、月方向からのミュオンを測定することで、ニュートリノが月で反応して発生したミュオンを観測するというもので、月が宇宙線のバックグラウンドを遮蔽してくれること、月を利用することによりニュートリノ反応部分の体積を稼げることは、スーパーカミオカンデの up-going muon 測定と同様である。ミュオン検出器に特化すれば、スーパーカミオカンデよりずっと簡易な検出器が設計できるので、宇宙空間での運用も現実的である。大気ニュートリノバックグラウンドがないため、点源ではなく、少し広がった源の探索も期待できる。

7. 長波長電波天文学

地球上では電離層があるために観測できない、長波長（定周波数）宇宙電波の観測が月面で可能となる。特に月の裏側では地球起源の電波が遮蔽され、微弱な宇宙電波も観測可能になる。今まで観測されたことのない、新たな宇宙観測の窓となる。

8. 月面重力波望遠鏡

重力波の到来方向は、複数の重力波干渉計での検出時間差から決定され、検出器間の距離に反比例してその精度は向上するが、現在は地球の大きさが限界を決めている。LIGO や KAGRA のような重力波干渉計を月面に設置し、重力波到来方向決定精度を向上させる。これによって、電磁波放射が検出されない重力波事象（例えば連星ブラックホールの合体）に対しても、母銀河の同定の可能性が高まる。

4.1.3 深宇宙探査ゲートに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言

4.1.3.1 地球惑星科学

SGEPSS/STP 分野は、「でんぱ」「きょっこう」「じきけん」「おおぞら」「あけぼの」「Geotail」「れいめい」「あらせ」を始めとする地球電磁気圏探査、及び「さきがけ」「すいせい」「のぞみ」「かぐや」「あかつき」「ひさき」「みお」などの月惑星探査をその黎明期から支えてきた分野である。

これらのミッションに必要な不可欠である様々な科学データ取得用の衛星搭載機器は SGEPSS 会員が主導的に開発しており、これまでに多くの技術的ノウハウが蓄積されているだけでなく、それに基づいた新規開発も日々行われている。それらの観測機器及びそれによって得られる科学データやその解析結果は欧米でも非常に評価が高く、SGEPSS/STP 分野で開発された観測装置は国際共同研究として海外の地球惑星科学ミッションにも数多く搭載されている。

4.1.2 で述べた Gateway 利用の月環境探査及び地球磁気圏探査の提案で必要となる観測装置の例を以下に記す。なお、月極域探査ミッションおよびヘラクレスミッションのタスクフォースにおいても同様の観測装置が提案されている。また、Gateway 上に装置を設置する場合、本報告書作成段階では、Gateway で利用可能な設置環境（質量、電力、サイズなど）と提案観測装置の諸元とのすり合わせの議論にまで至っていない。今後、搭載機器に関する具体的な提案募集の際には、Gateway 環境条件を勘案した上で各提案者が装置仕様の詳細を検討する。

まず、STP 関連のプラズマ環境計測については、先の 4.1.2 で述べた提案ミッションを実施するために、月周回衛星かぐや搭載機器の技術やノウハウを継承発展させる形で、以下に列挙する観測装置を Gateway 曝露部または小型衛星に搭載する必要がある。

- ・ 月面からの電場の高度分布を計測する電場計測装置、および電磁波計測装置
- ・ 磁気異常などにおける磁場分布を計測する磁場計測装置
- ・ 低～高エネルギー粒子を計測するイオン・電子エネルギー分析装置
- ・ 浮遊ダストの分布や運動を観測するダスト計測装置
- ・ 水関連分子の供給や輸送を観測するイオン・中性粒子質量分析装置
- ・ 地球磁気圏 X 線撮像装置・紫外撮像装置

月面アクセスが可能な場合は、これらの計測装置を月面に設置し、安定的に長時間に渡り環境モニターを行う。

また、月面および月面下の環境を計測するためには、以下の装置が必要となる。

- ・ 月面地下構造を予備調査する地中レーダ・電磁探査装置
- ・ 月表層・浅地下物質を計測する赤外分光装置

一方、固体惑星科学分野関連では、Gateway 上に

- ・ 微小隕石及び彗星ダスト取得・フィルターやエアロゲルなどの収集装置
- ・ 月面衝突閃光(Lunar Impact Flash : LIF)観測用の可視光・多色カメラと熱赤外カメラ

を設置することが必要となる。

月近傍環境の理解を考える場合、月からの空間的な広がりだけでなく、時間スケールも重要な要素である。太陽活動は、突発的なフレア発生や11年周期に見られるように、短期長期の時間スケールで常に変動しており、その影響を受けて、月近傍環境もダイナミックな応答をする。この時間的な環境変動を理解するには月近傍環境データの長期間の取得が不可欠であり、月周回軌道を取る Gateway は絶好の環境モニター拠点である。これを長期に渡り安定的に実施するためには、観測装置の小型化、省電力化、放射線耐性、低温耐性などの技術を更に成熟させる必要がある。

4.1.3.2 天文学

具体的な提案のある以下の装置については、基本的技術は完成しており、月周辺・月面の環境条件への適応などが課題となる。

- ・ 全天軟ガンマ線サーベイ観測装置 (80-500keV 帯域：軟ガンマ線、コンプトンカメラ利用)
- ・ 方向決定用超小型ガンマ線バーストモニター装置：CubeSat 搭載可能な数 kg の重量 (CsI シンチレータ+SiPM)
- ・ 月面観測用 X 線望遠鏡システム (1km レベルの蛍光 X 線マッピングが可能)
- ・ 全球マッピングのための Gateway の月周回衛星化
- ・ 天文観測データ転送装置
- ・ 衛星搭載用ミューオン検出器、X線検出器

次の X 線干渉計の技術は、まだ地上における原理実証の段階にある。

- ・ X 線干渉計 MIXIM (X 線検出器ユニットを Gateway 上、格子ユニットをブーム(~10m)の先に設置 (約 0.1 秒角の像幅)、格子ユニットを 100m の距離に設置できれば 0.01 秒角、サブミリ波干渉計 ALMA と同等の角度分解能。

観測運用に必要な以下の基盤技術は、Gateway のために新たに開発を必要とする

- ・ 天文観測データ転送装置、特に月周辺から地球への低遅延、高スループットのデータ転送
- ・ GPS のない Gateway、あるいは月面での正確な時計と位置参照装置
- ・ 全球マッピングのための Gateway の月周回衛星化
- ・ Gateway から適当な距離で追従する小型宇宙機

4.1.4 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

4.1.4.1 地球惑星科学

「かぐや」による月周回探査で獲得した太陽風と月の相互作用に関する月面近傍 (数 10 キロ~数 100 キロ) 領域での理解に、Gateway からの探査による大局的な領域 (数 1 0 0 0 キロ) での理解を組み合わせることにより、太陽系における月近傍環境の総合的な理解が可能となり、Gateway 拠点環境利用のみならず、将来の有人月面活動において非常に重要な知見を取得することができる。

これらの知見に対し、月極域資源探査やヘラクレスミッションから得られる、月面での電子運動スケールを分解する局地的理解（m～数 km スケール）および月面下環境の（マイナス数メートル領域）の理解を追加することにより、月面における将来の資源探査や人類の居住環境に資する知見も得られることが期待できる。

1. プラズマ電磁環境計測

Gateway および月面での観測により得られる月プラズマ電磁環境の理学的知見は、太陽系内の大気を持たない惑星/小惑星、衛星と太陽風プラズマの相互作用の理解にとって非常に有益であり、今後、月以外の惑星/小惑星や衛星に人類が資源や居住環境を求めて探査を進める際には、非常に重要な知識となることは間違いない。また、月の磁気異常と太陽風プラズマの相互作用の理解についても、弱磁場を持つ天体と太陽風との相互作用を考える上で、非常に重要な知見となる。これまで、惑星固体科学の分野では、その表層環境について太陽風プラズマ入射や惑星表面の帯電、光電子放出などの電磁気的な影響についてはあまり考慮されていなかった。今回の Gateway 利用の月プラズマ環境計測により、太陽風プラズマ入射や月表面からの光電子放出による月面帯電がレゴリスやダスト環境にどのように影響するかを明らかにすることができる。月面の宇宙風化現象についても太陽風プロトン入射の影響について定量的に議論ができると考えられる。水星磁気圏探査ミッション BepiColombo や火星衛星サンプルリターンミッション MMX などに代表されるような将来の太陽系天体探査においても太陽風と天体表層との電磁気的な相互作用が非常に重要となることに鑑みると、今回の Gateway 利用による月プラズマ電磁環境観測およびその定量的理解の進化は非常に大きな意義があり重要であると考ええる。

2. 月表層、地下環境計測

月の水資源を探査するためには、月表層および地下構造環境を探査し、水関連の物質やその原料の分布、量、形態を把握することが非常に重要となる。月極域資源探査ミッション、ヘラクレスミッションと連携して5.1.2で述べたような探査を行うことにより、月の水資源に関する情報を取得することが重要となる。また、ローバー搭載 GPR や小型衛星搭載レーダサウンダによる月表層地下構造・層序の広域探査は、将来の火星などの惑星探査における予行演習をいう位置付けとも考えられ、そのノウハウ等は、将来の惑星資源探査に大きく寄与できる。

3. 地球惑星磁気圏、大気圏撮像

Gateway 利用による X 線や紫外線を用いた地球電磁気圏、大気圏の撮像技術、ノウハウを発展させ、火星など、地球以外の惑星探査ミッションにおける磁気圏や大気圏撮像に応用することにより、それらの全体構造を俯瞰的に理解することができるようになる。

4. 月面固体環境計測

月表面の精密資源探査マップ作製が非常に興味深い。宇宙線が月などの岩石天体との衝突で表面に発生する核ガンマ線を観測し、核ガンマ線の元素識別能力を生かし岩石惑星・衛星の表面を数 km 平方単位で元素分析を行い、天体表面全域において数 km 四方単位での精密な資源分布地図の作成を、核ガンマ線イメージング分光カメラを用いて一気に行う。

5. 隕石、ダスト計測

微小隕石・彗星ダスト分析並びに外来天体による月への揮発性成分の供給機構の解明に関しては、HERACLES や他のミッションでのローバーによるサンプルリターンと連携することが考えられる。Gateway で収集した試料から月への供給量を制約し、サンプルリターンにより回収した月各地の表層土壌と露出した角礫岩から埋蔵量を推定する。

4.1.4.2 天文学

天文観測ミッション建設・運用基地

地球（あるいは LEO）との長い距離を利用した天文観測として、電波干渉計（宇宙 VLBI）と、地上に

作られている LIGO 等と同規模（基線長 3-4 km）の重力波干渉計が考えられる。Gateway に設置するのは困難であろうが、そのような大きなミッションの建設、あるいは運用・通信中継基地として活用することが考えられる。また、月面天文台のパイロット計画も考えられる。

4.2 宇宙工学の観点

4.2.1 深宇宙探査ゲートウェイにおいて行う科学の助言

我が国が Gateway において行う科学として、宇宙工学の観点では、1) 宇宙理学やアストロバイオロジーといった他分野を成り立たせるための技術の獲得、2) 補給船関連技術の獲得、3) 将来探査に向けた技術の実証、といった切り口が考えられる。Gateway を成立させるためには、これらに加えて、有人技術を含めたシステム技術が必要であるが、これについては、科学の視点を越えた議論が出てくるため、本項においては考慮しないこととした。

4.2.2 深宇宙探査ゲートに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言

宇宙工学の場合、他分野と異なり「深宇宙探査ゲートを用いた科学探査の助言」と「深宇宙探査ゲートに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言」はほぼ一致すると考えられるため、ここでは統合して記述することとした。

4.2.2.1 他分野を成り立たせるための技術の実証

宇宙理学やアストロバイオロジーが Gateway において十分な科学成果を得るためには、たとえば、高品質の微小重力環境を創出するための擾乱制御がひとつのキーとなる。また、天文台を実現するための冷凍機技術やセンサ技術、ポインティング技術なども視野に入ってくる。これらの技術は Gateway に限定されたものではなく、天文衛星等の他の宇宙機と共通する技術であるが、今後、Gateway において特殊な技術要求が生じる場合には、それをトリガーとして、ニーズに合わせた技術の実証をしていくこととなる。

4.2.2.2 補給船関連技術の獲得

Gateway の運用には補給船が必須となると想定できる。この補給船については、国際宇宙ステーション (ISS) における HTV のような参加形態で無人補給機を担当することは当然ながら想定できる。補給船については、今後の議論の中で民間主導での開発が合理的であると結論づけられる可能性もあるが、そのような場合であっても、たとえば、電気推進エンジンや LIDAR 技術などで新規技術を開発・実証することを通して宇宙工学研究が貢献できる余地は大きい。

電気推進エンジンについては、既存技術の延長線として、

- ・ 推進補充による再使用型電気推進モジュールの実現
- ・ 高電圧作動による比推力向上
- ・ 複数台クラスタ化による高推力化

が有望であり、このうち第 2・3 項については JAXA ETS-9 のホールスラスト開発成果を有効に活用できる。

LIDAR 技術については、補給船が Gateway への接近時に使用するセンサとして Flash LIDAR を実現することで、より信頼性の高い自律的なシステムとなることが期待される。Gateway への補給船の自律的なランデブーおよびドッキングにおける距離および相対姿勢の測定には 3 次元距離画像が必要であり、時刻同時に優れた距離画像が得られる Flash LIDAR は重要である。現在、HTV-X 従センサとして開発が進められている Flash LIDAR の開発を基礎に、高精細化、アイセーフ波長化、耐放射線性強化するなど充実して加速すべきであり、これが実現した場合には月面への着陸時の地形掌握、障害物回避にも応用できる。

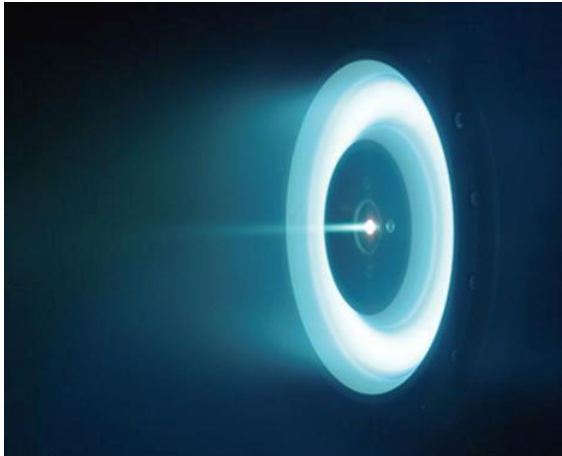


図 4.2.2.2-1 ETS-9 向けに開発中のホールスラスター

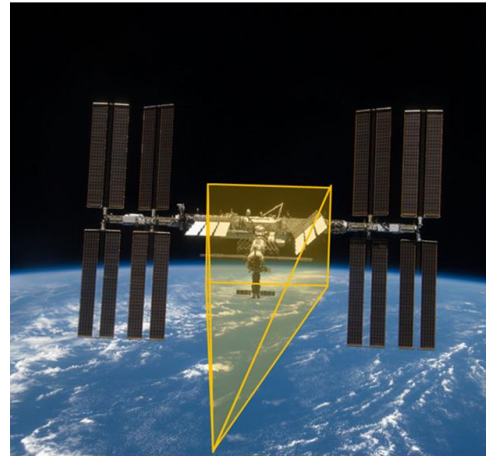


図 4.2.2.2-2 Gateway への自律接近における Flash LIDAR の使用（イメージ）

4.2.3 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

将来の月惑星探査を見据えて、Gateway を用いて将来技術の実証をすることは宇宙工学分野にとって重要である。Gateway を実証の場として活用できる宇宙工学分野は多岐に亘るが、月面へのアクセス性が良いと想定されることも考え合わせると、以下に例示する諸技術の研究が候補となる。

1. 月面レゴリスを使用したレーザー推進系
2. レールガンによる月資源の軌道への運搬
3. 重力天体着陸技術
4. 遠隔操作技術
5. IP プロトコルをベースとした深宇宙通信
6. Gateway から月着陸軌道などに超小型機を放出する機構
7. 惑星間航行技術

1. 月面レゴリスを使用したレーザー推進系

月面の資源利用のひとつの案として、月面に存在する物質を推進剤として使用した推進系の実現がひとつの候補となる。月面資源利用としては、極域の水氷の利用も有力であるが、その存在量が確定的でないことや、存在する場合でも推薬精製プラントの稼働・注液設備の整備やそれらの継続的な保守、また、精製物が極低温推薬となる場合には、その長期保管といった課題も考えられる。これらの解決は工学技術としても挑戦しがいのあるテーマであるが、この他に、月面に普遍的に存在するレゴリスを利用し、それにレーザービームを照射しアブレーションすることによって推進力を得ることも考えられる。レーザー推進技術は日本が世界に先んじている技術であるため、日本発・日本独自の技術を実証することは大きな意義がある。

2. レールガンによる月資源の軌道への運搬

レゴリスにしろ、水氷から精製された推薬にしろ、月面物質を推薬として利用するには、その推薬を充填する場所までの移送が必要である。月面との間を離着陸する探査機への推薬充填であれば、地上の射場設備のようににおける打上ロケットへの推薬充填と同様の設備を月面に整備すればよく、その場合、推薬は月面から月面への移送となる。しかしながら、将来的には、Gateway 付近に滞在するものの、月面そのもののへのアクセスが不要な探査機で月面物質を推薬に利用したい、という要求も出てくる可能性がある。そのようなケースに応えるためには、たとえば、レールガンによる月資源の軌道への運搬技術の研究が望ま

れる。なお、月面に推薬充填設備を整備する場合でも、レールガンなどの軌道運搬手段を構築する場合でも、その保守は高度に自動化すべきである。これは、短期・中期的には、宇宙飛行士を月面に滞在させるためには相対的に大きなリソースが必要となるためである。地上の推薬充填設備と異なり、月面上の設備については、少なくとも当面、保守点検や推薬成分検査、充填作業などをほぼ無人で自動的に行う合理性があり、ここで獲得した自動化技術を地上設備にフィードバックすることも考えられる。

3. 重力天体着陸技術

月などの重力天体への着陸技術については、先述の Flash LIDAR やドップラーLIDAR に代表されるようなセンサ技術の研究がある。たとえば、ドップラーレーダとして SLIM で使用する C 帯マイクロ波を高周波化・LIDAR 化することによってより高い精度を実現できる。無人補給船と Gateway の間の相対関係計測をベースに LIDAR 技術を発展させることで、ポスト SLIM に向けて、より高度な着陸技術の獲得が期待できる。

4. 遠隔操作技術

また、将来の本格的な月惑星の無人探査や有人探査につなげるために、到達が困難で危険な領域でも人間に代わって作業可能で、地上の科学者の思い通りに動かす事ができるテレグジスタンスロボット技術が、日本が国際プレゼンスを示し、国際探査で世界に貢献できる切り札と言える。まずは月のような数秒の時間遅れで地上から操作できる代理科学者（テレグジスタンスロボット）技術を確立し、月面上の計測装置や分析装置を地上の科学者が操作する事で、これまでできなかった高度で複雑な「その場探査」が可能になり、科学探査の分野で日本が世界をリードする事が可能になると考えられる。

5. IP プロトコルをベースとした深宇宙通信

今後の宇宙探査においては、低コスト化と高い信頼性のために COTS 品や汎用的な技術を活かすことが重要となる。通信においても、現在、深宇宙通信の IP 化の研究が進められている。独自の通信プロトコルではなく、既存のプロトコル（IP プロトコル）をベースとすると、大幅なコストダウンが期待される。たとえば、多数の深宇宙探査機やローバーを同時運用するような場合には、専用の通信プロトコルと比べて高い通信性能が期待できる可能性がある。

6. Gateway から超小型機を月面などに向けて放出する機構

2003 年の CubeSat 打上を皮切りに、超小型衛星開発は国内外で加速してきた。低コスト短期開発を可能とするため、挑戦的なミッションを積極的に行っていくことができ、高頻度な技術実証が可能である。同様に超小型探査機はチャレンジングで高度なミッションへと向けた布石となる。そのため、Gateway からの超小型機放出を行うことは、月惑星探査への効果は大きいと期待できる。特に、月面に向けて超小型機を放出する機構により、月面の意図したところへの着陸が可能になれば、より挑戦的な月面探査が可能となる。ただし放出といえども月面にエンカウンターするには大きな減速が必要である。そのため、たとえば OMOTENASHI で獲得する技術の応用が考えられる。

7. 惑星間航行技術

Gateway 周りで宇宙機を航行させることで、ラグランジュ点を利用した深宇宙港を利用する探査機の飛行実証をさせることができる。たとえば、ラグランジュ点を出発し、一旦惑星間へ脱出させ、1~1.4 年後にラグランジュ点に再係留させる実証航行などが考えられる。

4.3 アストロバイオロジーの観点

4.3.1 深宇宙探査ゲートウェイにおいて行う科学の助言

アストロバイオロジー分野では、生命の起源、進化、伝播および未来を明らかにして、これまで地球生物に限られた生物学から宇宙一般の生物学への発展を通じて、生命およびその未来に関わる一般性を探る

うとしている。そのために、A. 宇宙の起源と未来、B. 惑星形成と生命生存可能領域、C. 前生物的有機物合成、D. 生命の誕生進化と本質の理解、E. 知的生命と未来の解明の5つを研究の大目標としている（補遺 5.2.2 図参照）。これらの研究を、観測、宇宙探査および地上での研究によりアプローチする。この中で、Gateway においては特に、C. 前生物的有機物合成、D. 生命の誕生進化と本質の理解、E. 知的生命と未来の三つに関わる研究を推進する場とすることを助言する。

4.3.1.1 前生物的有機物合成

地球上の生物細胞は約 70%の水と約 30%の有機物でできている。生物は自分自身の有機物合成系をもち、細胞構成有機物を自分で合成することができる。しかし生命誕生の前には非生物的に合成された有機物が地球に蓄積したはずである。前生物的有機物合成の場としては、宇宙空間と地球上での合成の両方の可能性があり、その両側面からの研究が進んでいる。宇宙空間、とりわけ分子雲中で有機物が合成されることは、電波天文学および地上での模擬環境実験から明らかになっている。それらが彗星や隕石によって地球にもたらされた事実は、彗星でのグリシンの検出、隕石（炭素質コンドライト）から 70 種のアミノ酸を含む多数の有機物の検出から明らかになっている。しかし、これらによってもたらされる有機物量はそれほど多くない。一方、現在でも年間数万トン地表にまで到達する宇宙塵が多く、有機物をもたらされた可能性が考えられている。こうした有機物の宇宙空間での合成、宇宙空間から地球にもたらされるまでに起きる変性、地球に突入する場合に起きる消失等の過程を検討することが重要な研究課題となっている。

Gateway はこうした研究を進める上で、二つの有利な点を持っている。

1. Gateway は、ISS と比較しても高度の真空と高い宇宙線、強い紫外線環境をもつので、宇宙環境、太陽系内外の大気の希薄な惑星表面、酸素を持たなかった原始地球環境での有機物合成過程を模擬する場として有利である。
2. ISS に置いて、宇宙塵を捕集する実験「たんぼぼ計画」が現在進行中であるが、ISS 軌道ではすでに人工物「宇宙デブリ」によりかなり汚染されている。Gateway は人工物をさけた宇宙塵捕集に適した環境と言える。

4.3.1.2 生命の誕生進化と本質の理解

生命の誕生の場として多くの研究者は生命は地球上で誕生したと想定している。しかし、地球上に生命誕生の証拠は残されていない。また、初期地球環境よりも初期火星環境の方が生命誕生に適していたという主張も見られる。今から 1 世紀以上前、Arrhenius は「生命は惑星間空間に充満し、惑星間を移動する」という仮説、パンスペルミア仮説を提唱した。この仮説の検証は、生命を持つ惑星から隕石の衝突過程で微生物が脱出する過程で生存可能か、惑星間を移動する間に生存可能か、到達した惑星に進入する際に生存可能かという 3 つのプロセスに分けて進められている。日本に於いても、ISS 日本実験棟曝露部において、微生物を曝露して生存を検証し、エアロゲルを用いて微粒子を捕集し、そのなかの地球由来微生物を探查する実験「たんぼぼ計画」が進行している。

Gateway はこうした研究を進める上で、二つの有利な点を持っている。

1. Gateway は、ISS と比較しても高度の真空と高い宇宙線、強い紫外線環境をもつので、宇宙環境での微生物の生存を測定する場として有利である。
2. ISS に置いて、微粒子を捕集する実験「たんぼぼ計画」が現在進行中であるが、ISS 軌道ではすでに人工物「宇宙デブリ」によりかなり汚染されている。Gateway は人工物をさけた微粒子捕集に適した環境と言える。

4.3.1.3 知的生命と未来

人類は近い未来に宇宙での居住、月や惑星（火星）での居住を目指している。これは国際宇宙探査計画

での大きな目標となっている。この目標を達成するためには、宇宙移動技術などとともに、宇宙で自給するための基礎研究を行う必要がある。科学的側面よりも技術的側面が強いので後の項で記述する。

4.3.2 深宇宙探査ゲートを用いた科学探査の助言

4.3.2.1 前生物学的有機物合成

Gateway は 4.3.1 で述べた研究を進める上で、二つの有利な点を持っている。それぞれに対する科学探査に関して助言する。

1. Gateway は、ISS と比較しても高度の真空と高い宇宙線、強い紫外線環境をもつので、宇宙環境、太陽系内外の大気の希薄な惑星表面、酸素を持たなかった原始地球環境での有機物合成反応を模擬する場として有利である。ここで、行う実験の例としては次のようなものがある。

A. 原始惑星環境・宇宙環境の模擬実験の場としての Gateway 利用

現在の地球場では、大気やオゾン層、磁気圏などにより、宇宙からの紫外線や放射線などが遮られた有機物・生物にとって保護された環境である。これまで ISS 曝露部を用いた模擬実験が行なわれてきたが、ISS の軌道では、原子状酸素が豊富であったり、地球磁気圏内であったり、宇宙環境の模擬実験の場としては十分でない。近い将来に利用可能な原始惑星環境・宇宙環境の模擬実験の最適な場として、Gateway の利用が考えられる。

アストロバイオロジー実験「たんぽぽ」、QCC 実験で固体あるいは薄膜試料がおこなわれており、これらの曝露実験装置がそのまま、あるいは多少の変更のもとに利用可能である。

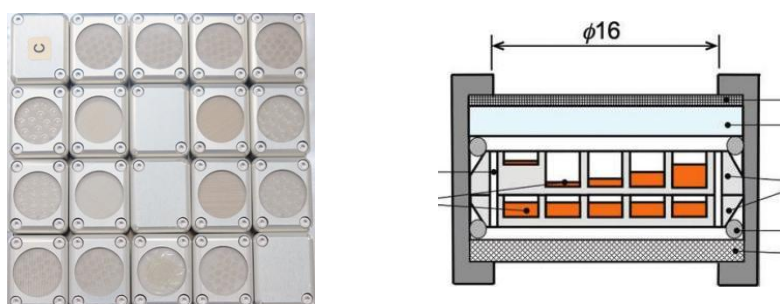


図 4.3.2-1 たんぽぽ型曝露パネル： 10 x 10 x 2 cm で 20 個の曝露ユニットよりなる。

B. 模擬原始地球の水圏環境における前生物学的実験

初期生命が育まれた原始地球では、紫外線や宇宙線を遮るバリアーに乏しく、照射される強力な放射線が有機物の合成と分解を促進し、生命システム構築に必要な低分子化合物を供給したと考えられる。この生命誕生の決め手となったのは、「水の存在」と「水による循環系」であると考えられている。そこで、模擬水圏の実験が可能な循環型溶液セルを開発し、複合放射線である宇宙線や短波長紫外線が大量に照射できる実験環境として、現在の地球磁気圏の影響がない Gateway を利用する。

ISS「きぼう」曝露部での利用を想定した液体循環セルの開発が進行している。形状記憶合金のバネを利用し、地球周回時の温度変化を利用して試料溶液が循環する。Gateway では電力による温度制御を行う。モーターなどで水循環させるよりも小型化が可能である

2. ISS に置いて、宇宙塵を補修する実験「たんぽぽ計画」が現在進行中であるが、ISS 軌道ではすでに人工物「宇宙デブリ」によりかなり汚染されている。そこで Gateway は人工物をさけた宇宙塵捕集に適した環境と言える。これを利用した提案としていかなのようなものがある。

A. 宇宙塵連続計測と定期サンプルリターンによる、月近傍固体微粒子環境の解明

1) Gateway モジュール外壁に PVDF センサを組み込んだ「スマート MLI」を装着することで、月近傍の固体微粒子環境の連続計測を行う。2) 曝露モジュールに「エアロゲル捕集パネル」を定期的に搭載・回収することで、人工デブリが全くない地球・月圏での宇宙塵や月起源微粒子の非破壊捕集を実現する。地球大気起源の酸素イオンは「地球風」として月面土壤に貫入していることが判明しているが、地球起源エアロゾルが地球重力圏内のどこまで遠方に到達しているかは不明であり、本研究は地球生命圏の限界の物的証拠を探ることになる。

1) PVDF ダストセンサは IKAROS で宇宙実績あり。スマート MLI は日米特許申請済で、エクレウス搭載 FM は開発済。

2) たんぽぽ型エアロゲル捕集パネルは、たんぽぽで宇宙曝露・地球回収の実績ある。エアロゲルは 0.01g/cm^3 で世界最低密度を誇り、高速衝突微粒子の破壊を最低限に抑えて捕集することができる。

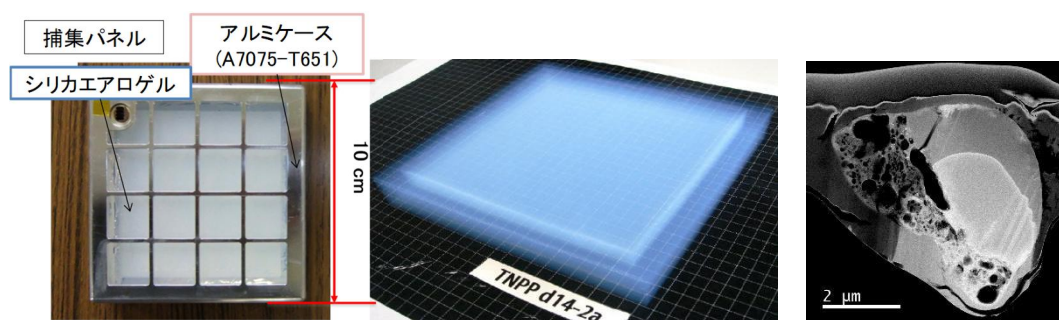


図 4.3.2-2 ISS「きぼう」曝露部で運用中のたんぽぽ捕集パネル：(左)内の二層式シリカエアロゲル(中)、捕集部密度 10mg/cm^3 では、10 ミクロン未満の小惑星起源の宇宙塵の捕集に成功している(右)。

4.3.2.2 生命の誕生進化と本質の理解

Gateway は生命の誕生進化と本質の理解のための研究を進める上で、二つの有利な点を持っている。

1. Gateway は、ISS と比較しても高度の真空と高い宇宙線、強い紫外線環境をもつので、宇宙環境での微生物の生存を測定する場として有利である。これを利用した提案として下記が可能である。

A. 地球生物の宇宙曝露実験に基づく長期宇宙生存可能性の検証

これまで ISS 曝露部で、パンスペルミア仮説の可能性検証のために微生物宇宙曝露実験が行われている。しかし、ISS 周回軌道はヴァンアレン帯の内側であり、特に生物の生存に影響する放射線に関してヴァンアレン帯の外側とは大きく環境が異なる。そこで、天体間の移動時の環境を模擬するために、Gateway で構想されているヴァンアレン帯外の月周回楕円軌道を周回する宇宙ステーションの外部を利用する。アストロバイオロジー実験「たんぽぽ」の装置「曝露パネル」(図 4.3.2-1)がそのまま利用可能である。

2. ISS に置いて、微粒子を捕集する実験「たんぽぽ計画」が現在進行中であるが、ISS 軌道ではすでに人工物「宇宙デブリ」によりかなり汚染されている。Gateway は人工物をさけた微粒子捕集に適した環境と言える。

A. 曝露モジュールに「エアロゲル捕集パネル」を定期的に搭載・回収することで、人工デブリが全くない地球・月圏での宇宙塵や月起源微粒子の非破壊捕集を実現する。たんぽぽ型エアロゲル捕集パネル(図 4.3.2-2)は、たんぽぽで宇宙曝露・地球由来微粒子回収の実績がある。

4.3.3 深宇宙探査ゲートに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言

A. 曝露・観測実験のための共通曝露プラットフォームの開発

これらの実験を実現するうえで共通する技術は Gateway の環境を利用して宇宙環境で実験装置を運用し、あるいは実験装置を回収し、場合により実験装置を地球に帰還させるという点である。地球からの物資の定期的運搬と地球への定期的帰還が Gateway の重要な特徴と言える。Gateway には各モジュールに装置を設置するアダプターの設置が計画されているが、これは比較的大型の装置設置が想定されている。そこで、共通プラットフォームを開発してアダプターに設置することで、小型の装置の設置、回収、電力供給、信号授受を容易にすることを提言する。

これまで、ISS では日本実験棟曝露部に設置する無電力無信号のプラットフォームとして ExHAM (Exposure Handrail Attachment Mechanism) が開発され「たんぽぽ計画」をはじめとする多くの実験に利用されてきた。この装置は、多数の実験装置を表面に設置することで、多数の装置を同時にエアロックとロボットアームを用いた曝露実験を開始、回収、を実現してきた。このコンセプトを発展させさらに電源と信号を供給することで実験の汎用性を高める。実験装置としてこれまで ExHAM で標準化された大きさ (10 cm x 10 cm x 2 cm¹、および 10 cm x 20 cm x 2 cm¹) とともにキューブサットで利用されるサイズ (10 cm x 10 cm x 10 cm¹、および 10 cm x 20 cm x 10 cm¹) を利用可能とする。また、ロボットアームでの把持部が ExHAM では宇宙面に設計されているのに対し、ロボットアームでの把持部を側面に設計することで宇宙面の利用面積を増加させる。

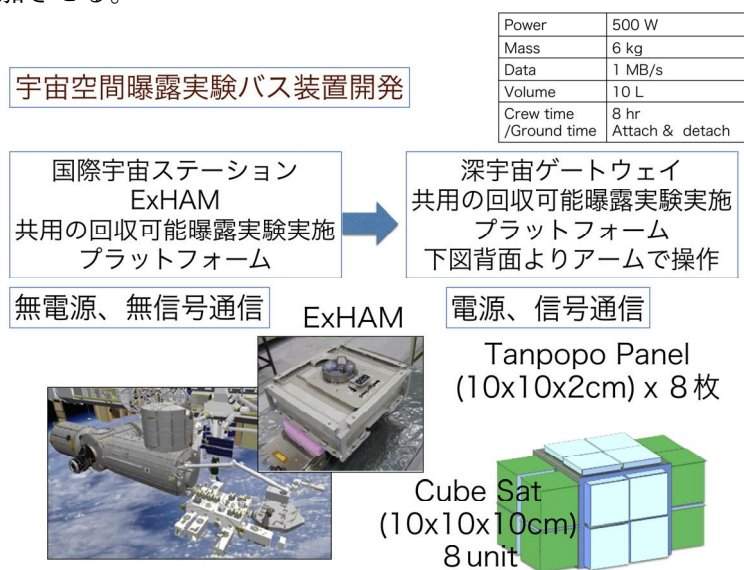


図 4.3.2-2 曝露・観測実験のための共通曝露プラットフォーム

4.3.4 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

4.3.4.1 前生物的有機物合成

4.3.2 で提案した前生物的有機物合成とその曝露実験の結果は、今後検討される月惑星およびその衛星の探査で宇宙由来有機物がどの程度到着し、残存しているかを推定する上での資料となる。また、タイタンやエンケラドス等の有機物が発見されている。これらの有機物の分子構造は不明である。そこで衛星での有機物合成反応の模擬実証を通して、有機物分子構造探査の指針を得ることができる。

4.3.4.2 生命の誕生進化と本質の理解

宇宙での生命のあり方を考える上では、地球外生命の有無を確認することが必須である。今後、火星および氷衛星での生命探査が探査項目の一つとして検討されるはずである。その際、その環境で誕生して進化した生命である可能性とともに、地球から移動した微生物である可能性もある。その可能性の高さを評価することが、生命探査の方法を検討する上で重要な指針となる。そこで、パンスペルミア仮説の検証をとおして、その実現可能性を評価することによって、その指針を得ることができる。

また惑星保護の観点からも天然の微生物移動（パンスペルミア過程）の検討が重要である。すなわち、地球由来の微生物を探査対象惑星に持ち込んだ時の影響を評価するうえでも、また地球外から微生物を地球に持ち込む可能性を評価するうえでも、天然の微生物移動（パンスペルミア過程）の程度を評価することによって、影響の評価をより正確に行うことが可能となる。

4.3.4.3 将来の月惑星探査に関わる技術開発

1) 将来の月惑星探査では、宇宙・月・惑星での居住が重要な目標となっている。長期居住を実現するうえでの栽培、水処理等での水循環を 0～1 G の間で実現することが重要である。その検証の場として Gateway は有利である。そのための次の提案がある。

A. 微小重力下における多孔質体中での水分移動機構の解明

Yendler ら(1996)は宇宙ステーションミール内で実施した多孔質体（直径 1.5mm ガラスビーズ）中における 20 分間の水分浸潤実験で浸潤速度が、1G 条件下で重力の影響が無いと考えられる水平浸潤速度よりも低下したことを報告している。これは、表面張力が低下したか、粘性係数が上昇したか、接触角が低下したために起こったと考えられる。この実験以外に微小重力下での実験は全て航空機利用による 20 秒程度の浸潤実験しかなく、特に粒子の細かい月や火星のレゴリス中でのゆっくりした水分移動に関して解析する。植物栽培等の基礎知見として重要である。

2) Gateway は将来の火星等からの帰還サンプルの中間分析場所として検討の価値がある。そのための提案がある。

B. 惑星保護と地球外生命検出を両立するサンプルリターン技術の開発

火星への無人または有人での生命探査で想定されるサンプリング方法を、生命が存在しない月の岩石やレゴリスを対象に行う。その試料を Gateway 内および地球の隔離施設内で分析を行い、地球からの Gateway までの資材の運搬や、Gateway 内での準備、探査機による月からのサンプリング時のフォワードコンタミネーションを評価する。同じサンプリング法を火星の生命探査に適用することで、火星から生命が検出された場合にフォワードコンタミネーションでないことを証明する上での唯一無二のネガティブコントロールになりうる。

4.4 宇宙惑星居住科学の観点

4.4.1 深宇宙探査ゲートウェイにおいて行う科学の助言

月周回軌道に建設される Gateway は、月や火星への有人探査・居住を目標にする当該研究領域において極めて大きな役割を果たすと期待される。Gateway は地球低軌道とは異なる低重力場と宇宙放射線・太陽光の環境を提供し、有人深宇宙探査における生物学的課題を解決するための研究や、それをプラットフォームとした深宇宙探査に必須で、それによって月面居住を可能にする研究を展開することが可能になる。

宇宙惑星居住科学は、広く自然科学の基礎科学から応用科学、さらには人間科学・社会科学に及ぶ英知を結集して推進されるべきものであるが、本タスクフォース活動ではその中でもこれまで ISS を利用した科学研究を目指し推進してきた微小重力科学、生態工学、宇宙生命科学にフォーカスすることとした。

微小重力科学

宇宙や実験施設などで得られる微小重力環境を利用した流体力学、結晶成長、物理化学、材料科学、燃焼、生物科学など学際的研究分野の基礎科学およびその応用を展開する。

生態工学

工学的手法を駆使して、物質循環の仕組みを解明し、人類と共存できる生態系を維持していくためにはどのような行動指針を持たなければならないかを追求する。また、将来の有人宇宙活動や月面・火星基地などにおける生命維持につかわれるであろう、小規模な閉鎖生態系も研究の対象としている。宇宙基地をテストベッドとして得られた知見は地上における完全循環型社会の創造へも貢献しうる。

宇宙生命科学

微小（低）重力や宇宙放射線などの宇宙特有の環境を利用して新たな生物学的知見を見出し、人類の有人宇宙探査・宇宙惑星居住に必要な課題を解決するとともに、それらの成果を地球人類社会に還元する。そのために、Gateway では、深宇宙（月近傍）環境の生物影響を解明し、健全な長期宇宙滞在を可能にするための応用研究と技術開発を展開する。

4.4.2 深宇宙探査ゲートウェイを用いた科学探査の助言

有人月惑星探査・宇宙惑星居住を推進する上で第1に要求されるのは、地球上とはまったく異なる重力環境と宇宙放射線・太陽光環境、閉鎖環境で、生命体をいかに健全に保つかという課題の解決である。この問題を解決するためには、Gateway における当該領域の基礎・応用研究が不可欠である。また、月惑星に特有の環境下で生命を維持する基本の一つは食糧の供給である。将来的な月面有人活動を可能にするには、循環再生型生命維持システムが不可欠となり、その中で植物栽培は必須となり、そのための特殊環境下での効率的な植物育成法と環境制御法が重要になる。Gateway は、そうした近未来の有人月面活動・居住に必要な研究開発の場を提供する。以下に宇宙・惑星における人類の居住に必要な要素・構成項目・技術課題の一覧を示す。

表 4.4.2-1 宇宙・惑星における人類の居住に必要な要素・構成項目・技術課題

居住要素	構成項目	技術課題
衣	- 放射線防御・環境適応装備 - 健康管理・医療機器	- 放射線防御素材 - バイタルデータ取得
食	- 植物栽培 - 食品加工・保存	- バイオテクノロジー、植物工場技術 - 食品加工・保存
住	- 居住施設・設備 - 温湿度空気環境制御器 - 生命維持システム	- 各種部材製造 - 快適環境制御技術 - 空気再生、水浄化、脱臭技術
エネルギー	- 熱源：混合気・噴霧燃焼器 - 発電：太陽光発電、熱電発電 - 排熱：高効率大型熱交換器	- 安定燃焼、火災安全 - 発電デバイス高効率化 - 大容量・長距離熱輸送、ヒートパイプ
通信	- 大容量・高速通信 - 測位	- 光通信、量子通信 - 小型衛星利用空間位置・時間計測

製造	・ 3D プリンター（その場製造） ・ 加熱炉、焼結炉	・ 自動製造プロセス、サプライチェーン ・ 溶融凝固シミュレーション、小型省エネ炉
リサイクル	・ 廃棄物減容処理 ・ 汚水浄化 ・ 二酸化炭素回収利用	・ 焼却炉、資源回収 ・ 光触媒浄化技術 ・ 触媒反応プロセス
資源開発	・ レゴリス利用 ・ 水素、酸素分離 ・ 金属製錬・精錬、資源抽出	・ レゴリス熱物性計測、溶融凝固特性 ・ 電気化学反応、気液分離操作 ・ 酸化還元、泡沫分離プロセス

4.4.2.1 微小重力科学

月面の重力場（0.165G）は、0G と 1G を補間する重力場であることから、ISS で行われた微小重力科学研究の成果の実証・発展を可能とする。加えて、極低温、低磁場、太陽放射線、レゴリス（平均粒径 $70\mu\text{m}$ の鉱物微粒子）など月固有の環境特性を活用することによって、地球環境では遂行が困難な科学研究および深宇宙探査に必要となる技術開発を推進する。

1. 材料科学

（科学研究）無容器プロセッシングを用いた高温融液の熱物性計測およびそれを用いた材料プロセス設計

（応用研究）月レゴリスの静電浮遊熱物性評価、その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬プロセス、宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化

2. 流体科学

（科学研究）表面張力が支配的因子となる気泡・液滴・液膜に関連した気液界面現象の解明と熱物質輸送制御

（応用研究）レゴリス利用積層造形のための溶融凝固シミュレーション、ランキンサイクルを用いた月面エネルギー供給システム

3. 燃焼科学

（科学研究）微小重力利用による燃焼素過程解明と燃焼限界の取得

（応用研究）パーシャルグラビティ環境での火災安全プロトコルの構築、月で得られる水素を利用した循環型燃焼装置（熱源）の開発

4. 化学工学

（科学研究）重力変動の影響を受けにくい宇宙環境での持続可能なりサイクルシステムの構築

（応用研究）月レゴリスからの酸素、水素および水の製造技術、マランゴニを用いた水浄化実験、匂い環境計測及び光触媒による浄化実験

5. コロイド界面科学

（科学研究）微小重力、低重力、可変重力場での物理、化学、生物など分野を横断するコロイド界面科学の再考

（応用研究）自己集積型コロイド光触媒材料、非平衡コロイド分散系のダイナミックス実験

6. 基礎物理

（科学研究）プラズマおよび低温環境における多体系量子・物理現象の解明

（応用研究）プラズマレゴリス相互作用による微粒子制御と水素回収、地球・宇宙空間を含めた超高精度周波数標準の構築

4.4.2.2 生態工学

1. 月面全自動無人植物工場の Gateway からの遠隔管理実証および月面宇宙環境の植物影響評価実験

- a. 閉鎖生態系生命維持システム（CELSS）の中核となる宇宙植物工場での食料生産の実証および月面宇宙環境の植物影響説明

月面極域に全自動無人宇宙植物工場試験装置を設置する。Gateway 内で、生育状況、環境制御状況をモニタリングし、状況に応じて、Gateway から環境制御を行う。IT による遠隔管理農業技術を先鋭化し、完全リモート栽培管理を行う。月面での電力は太陽電池とする。

植物工場試験装置は、地球上で完全に組み立ててから、月面に輸送する。カロリー源、機能性野菜として有望なサツマイモの単節をアルギン酸マイクロカプセルに封入した人工種子を開発する。月面設置後に Gateway からの指令で、サツマイモ人工種子に給水し、発芽、育成を開始する。収穫物（可食部を含む全植物体）は Gateway に搬送し解析後、詳細科学解析用サンプルを地球に搬送する。初期生育速度を高めるため、サツマイモの単節（栄養体）を用い、月面設置後に発芽、発根を開始し、収穫までの少なくとも 1 サイクルを完結させる宇宙実験成果は、長期有人宇宙活動における生命維持を担保する技術の基礎知見として重要である。

2. 宇宙環境（放射線、紫外線、無重力）を利用した実験

- a. 水を用いた放射線防御および藻類を用いた空気再生、排水処理、食料生産

強烈な放射線を防御するため、構造体の壁に水を貯蔵し水タンクとして使用する。宇宙環境での新規技術開発の例として、そこで藻類などを培養し、宇宙での海、湖沼などを模擬した水域生態系を創り、空気再生、排水処理、食料生産などを行う。

- b. 廃棄物利用の高度化

物理化学的手法では廃棄物が出る。宇宙環境において、生態工学的、物理化学的手法による廃棄物の再利用技術を開発する。宇宙環境での新規技術開発の例として、植物非可食部→紙や什器材料； CO₂の炭素分→トナー、吸着剤、構造材； 排泄物→湿式酸化による燃焼処理→肥料； 食品パッケージなど輸送時の包装・梱包材→構造材、放射線防御材、排液→無担体電気透析による脱塩・濃縮・精製などがある。

3. 宇宙環境・材料（レゴリスなど）を利用した実験

- a. 月面など地球由来以外の物質が生物に及ぼす影響調査

当初は、地球から持参した水や空気をリサイクルするが、将来は月面にある物質などを利用する。その場合、地球由来以外の物質が摂取されるようになる。そこで、宇宙由来の物質が体内に取り入れられた時の影響に関して科学する。重水、同位体化合物などを含む宇宙特有物質の生物に及ぼす影響を明らかにする。

4.4.2.3 宇宙生命科学

Gateway における生命科学研究では、ISS 宇宙実験で確立した実験系と技術の活用、ISS 宇宙実験で得られた成果の検証と応用、そして ISS では得られない月周回軌道・月面（深宇宙）の特有環境・資源の利用を基本に、有人深宇宙探査・宇宙惑星居住に必要な生命・健康維持にかかわる課題を解決する。

1. 宇宙重力生物学

ヒトを含めて、地球上の生物は、恒常的に存在する 1G 環境に適応し、また重力を生体情報として生体制御に利用できるように進化を遂げた。これまでの地球低軌道上での宇宙実験は、動植物の重力応答の様式やメカニズムを検証し、また、それによって新規の生物学的知見を得ることに成功した。深宇宙では、とくに月重力（0.165G）への生物応答を重力感覚生物学的にはじめて明らかにし、その長期

曝露が生物の発生、成長、生殖、生物間相互作用、生活環、継世代、進化に及ぼす影響を理解する。

- ・ 微小重力・部分重力下での植物の生活環と遺伝子発現の変動
- ・ 微小重力・部分重力が行動、運動、筋萎縮・骨代謝、循環器系に及ぼす影響
- ・ 宇宙環境に曝露された生体の point of no return と継世代

2. 宇宙放射線・紫外線生物学

宇宙放射線や太陽光紫外線が DNA 損傷や染色体異常を誘発することが、これまでの宇宙実験の成果として得られている。ただし、これまでの有人宇宙活動のほとんどは、地球磁場に守られた低軌道にある宇宙船で行われてきた。しかし、月近傍においては、地球磁場による荷電粒子の遮蔽効果や地球のような膨大な大気による遮蔽効果がなくなり、宇宙放射線ならびに紫外線に直接曝露されるだけでなく、月面との衝突に起因する 2 次粒子による線量寄与も増大する。また、ISS に比べて、有人滞在の長期化も積算線量を増大させる。したがって、ガン化を含む重篤な放射線障害を誘発する可能性があり、詳細な生物影響や修復能力を理解するだけでなく、そのための計測や予測や遮蔽に関する技術開発を可能にする。

- ・ 宇宙放射線・紫外線の生物影響
- ・ 生体リスク評価のための放射線線量計測・予測
- ・ 放射線防護、遮蔽、被曝管理
- ・ 宇宙飛行士によるコホート・症例対照研究

3. 微小・低重力と宇宙放射線・紫外線の複合的生物影響

微小・低重力と宇宙放射線・紫外線の生物影響は、これまでに個別の環境要因の影響として解析されてきたが、必ずしも分離できているわけでもなく、その宇宙実験の結果や最近の地上研究では、両者の複合作用が注目されている。Gateway では月近傍の特有の宇宙放射線・紫外線環境と重力環境の組み合わせが可能となり、この課題を解決して新たな生物応答メカニズムの理解と科学研究領域の開拓をもたらす。また、心理的ストレスが宇宙放射線・紫外線応答に及ぼす影響も解析する。

- ・ 微小・部分重力と宇宙放射線・太陽光紫外線の複合影響
- ・ 心理ストレスと宇宙放射線の複合生物影響

4. 宇宙医学・健康科学

- ① 心・血管等循環器系の重力変化に対する応答と対抗策： 微小重力環境曝露では血液を含む細胞外液量の減少と心筋の萎縮が認められる。とくに心筋萎縮についてはその詳細は不明であり、また積極的な対抗策もとられていない。骨格筋萎縮同様、心筋萎縮の機構解明と下半身陰圧負荷をはじめとした循環器系への対抗策とその評価を行う。
- ② 筋・骨等運動器系の重力変化に対する応答と対抗策： 微小重力環境曝露では抗重力筋の萎縮と骨の脱灰が認められる。単なる廃用性萎縮とは異なり、その進行の速さと回復の遅さに鑑みて積極的に筋萎縮、脱灰を進行させている。現在、軌道上での運動と内服にて有効な対抗策がとられているが、それが月重力では同等なのか、軽減されるのか、その動向と対抗策を明らかにする。
- ③ 内耳・深部知覚等平衡感覚系とそれを介した調節系の重力変化に対する応答と対抗策： 微小重力環境曝露では内耳前庭系、とくに耳石器への入力消失する。また、平衡感覚系のひとつである深部知覚への入力も変化する。これらを介した運動調節系、循環調節系が、微小重力環境に順応したのち地上に帰還すると日常生活に支障を来すため、対抗策が必要である。前庭系電気刺激あるいはタッピングといった物理的刺激による対抗策を考案し、その有効性を検証する。
- ④ 有人活動を行うための船外活動： 与圧ローバーによる移動・作業が主体となることは想定し得るが、精密作業や不測の事態、緊急事態に対応するためには人体によりフィットし、予備呼

吸不要な宇宙服が必要である。これを医学的要求にもとづいて設計・開発・検証する。また、ローバーとのインターフェイスにおいては開発者と協力し、人間工学的見地から有用性の向上とその検証を行う。

- ⑤ 宇宙放射線・紫外線障害への対抗策： 月近傍の宇宙放射線・紫外線ならびに低重力の複合影響の研究成果を基盤に、被曝予測技術および防護法を開発する。
- ⑥ 深宇宙有人探査・宇宙居住のための障害・ストレス対抗策： 有人有探査や宇宙居住では、ストレス緩和策ならびに障害対抗策が重要である。そのための宇宙食の開発など、ストレス緩和策の検討と実証を行う。また、宇宙環境が誘導する筋萎縮や骨粗鬆症、放射線による酸化ストレスを予防できる機能性食材の開発や創薬、そして有用微生物を利用した健康増進を実現する。
 - ・ 船外活動用装置の医学的・人間工学的開発と検証
 - ・ 筋・骨等運動器系、循環器系の重力変化に対する応答と対抗策
 - ・ 平衡感覚系とそれを介した調節系の重力変化に対する応答と対抗策
 - ・ 複合的な環境要因に起因するストレス応答と対抗策
 - ・ 筋・骨萎縮や酸化ストレス軽減・予防のための機能食材の開発と創薬
 - ・ 微生物学的管理目標の設定と有用微生物の利用

5. 宇宙農学

- ① 植物栽培、宇宙植物工場の実証試験
深宇宙における持続的生命維持の基本のひとつは、植物栽培による食の提供（機能性食材を含む）、環境浄化、癒やしである。それを可能にする植物栽培法、環境制御法、栽培装置の開発を行う。
- ② 月部分（低）重力下における植物栽培の最適化
植物は重力を利用して成長を制御し、ストレス回避や生産効率を高める。月低重力が植物の成長に及ぼす影響を明らかにしたうえで、低重力下で植物の生産効率を最大化するための新規成長制御法ならびに有用微生物活用法を開発・実証する。
- ③ 月レゴリスの有機化と利用
月レゴリスを植物栽培のための土壌・肥料源として利用するための有機化と加工技術を開発する。
- ④ 宇宙植物の栄養分析と宇宙食の開発
深宇宙・月面で栽培される植物の栄養分析、そのための分析技術の開発、それらの成果に基づいた宇宙食の加工・開発を行う。
 - ・ 植物栽培技術の実証（栽培システムの確立）
 - ・ 重力応答性・ストレス応答性遺伝子発現を利用した生育診断と宇宙農業用の新植物の開発
 - ・ 植物育成のための新規成長制御法・新植物の開発、微生物利用
 - ・ 閉鎖生態系における生物間相互作用の解明と利用
 - ・ 微小・低重力下での食料植物栽培環境の最適制御技術開発
 - ・ 閉鎖生態系生命維持のための物質循環系の確立
 - ・ ストレス軽減のための機能性植物の栽培
 - ・ ストレス軽減・健康維持のための宇宙食の開発
 - ・ 月レゴリスの有機化と利用
 - ・ 実験装置の遠隔・自動操作技術の開発

4.4.3 深宇宙探査ゲートウェイに関わる先導する工学・確立すべき技術の提言

4.4.3.1 微小重力科学

1. その場製造（3D プリンター）

① 月レゴリスの静電浮遊熱物性評価

月レゴリスのその場資源利用においては、レゴリスを溶融して必要となる元素を取り出す、そのまま固化もしくは焼結して材料として使用する（例、3D プリンター）ことが想定される。こうしたプロセスにおいては溶融レゴリスの物性を正確に把握することが必要となる。ISS には静電浮遊炉 (ELF) が搭載されており、高融点を持つ物質の溶融及び高温融体の物性計測が可能である。これを用いて月レゴリスの液体状態の物性測定、及び液体から固体への相変化など、材料処理に必要な高温での材料特性に関する評価を行う。

② レゴリス利用積層造形のための溶融凝固シミュレーション

深宇宙探査においては、必要な素材、部品を迅速に供給するオンデマンドのサプライチェーンを構築することが必要となる。近年の3次元積層造形技術の急速な発達により、設計情報に基づいて高融点の材料を溶融凝固し部品をその場にて製造することが可能となった。その技術を宇宙探査に応用するためには、重力加速度の差異を考慮した造形技術の確立が必要となる。重力依存性の大きい各種素材の溶融凝固のシミュレーション技術を確認することにより、宇宙環境での製造プロセスのシミュレーションを可能とする。

③ 宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化

金属粉末の積層造形は、今後の有人宇宙探査で必要となる「その場製造」のための重要なツールとなる。ここでは、金属積層造形物の品質や製造の可否に係わる、溶融池形状や熱物質輸送に及ぼす重力加速度の影響を検証し、このプロセスによる月面や微小重力環境でのその場製造プロセスの技術確立と最適化を行う。

2. 熱エネルギー開発

① ランキンサイクルを用いた月面エネルギー供給システム

月面は寒冷の温度差が甚だしく、太陽光が利用できない条件でのエネルギー供給源の確保が必須である。低温度差発電システムとして地上で適用されているバイナリ発電の原理を適用し、月面表面と地中の低い温度差において、冷媒によるランキンサイクル（蒸発と凝縮の熱サイクル）のシステム設計を可能とする。そのために、月環境を想定した冷媒のパーシャル重力下における沸騰、凝縮伝熱特性を取得し、シミュレーション技術の構築を図る。

② 月で得られる水素を利用した循環型燃焼装置（熱源）の開発

地球から輸送した水、あるいは月極域の水を電気分解して得られる水素と酸素を燃料および酸化剤として利用し、夜間の熱源や高温熱源などとして利用する閉ループ式の燃焼器開発を行う。純酸素を酸化剤として使用すると金属の酸化が激しいため、アルゴンなどの不活性ガスで酸素を希釈して用いる。燃焼生成物は水のみなので、熱交換で冷却された既燃ガスから液化した水を容易に分離することができ、不活性ガスは閉ループ循環することにより高い資源効率性と運用性を追求する。

③ パーシャルグラビティ環境での火災安全プロトコルの構築

長時間有人ミッションにおいて火災安全性の確保は最優先事項の一つである。火災現象に対して重力が本質的な影響を与えることから、短時間微小重力場、ISS を利用して種々の物質・材料燃焼性に関する研究やその燃焼限界に対する予測手法の検討が進められている。これらの知見を基に、月面や火星での活動を想定したパーシャルグラビティ環境での物質燃焼性の推定法および火災安全プロトコルを確立する。

3. 月面資源開発（レゴリス利用）

① プラズマ・レゴリス相互作用による微粒子制御と水素回収

月面にて想定されるプラズマ条件（電子密度 10^6 m^{-3} ）における微粒子の挙動を解析する。粒子挙動の解析により、月面でのレゴリスの宇宙機等表面への付着を防ぐ制御法、資源として利用するための

操作技術を確立する。また、プラズマ・レゴリスの表面相互作用のメカニズム検討により、レゴリスより水素を分離・回収するプロセスの効率化を図る。

② 月レゴリスからの酸素、水素および水の製造技術

酸素製造：月レゴリスを溶解させ、酸素製造を行う。そのために、高温融体の融点、粘性など基礎物性の取得を浮遊炉により行う。高温で使用可能な不溶性酸素発生陽極の開発を行い、不溶性陽極と固体陰極を組み合わせた電解装置で、模擬レゴリスからの酸素回収を実証する。

水素製造：レゴリスからの水素乖離の基礎的データを得るために、H プラズマ雰囲気中にて月模擬土壌に吸収させ、その後にサンプルを昇温、H を乖離させることにより、レゴリスのガス吸収機構を実験的に明らかにする。

水製造：水素－酸素燃料電池反応による水合成、及び有人活動により発生した CO₂ とレゴリス由来の水素を原料としてメタンと水を得る反応（サバチエ反応）の技術実証を行う。

③ その場資源利用を可能とする鉱物製錬・抽出プロセス

月面鉱物から金属などの鉱物資源を抽出することを目的として、パーシャルグラビティ下での泡沫分離装置の最適化を行う。さらに、分離された物質の固化、精錬を可能とするために、フローティング・ゾーン法を含むゾーン・メルティング（ZM）法を用いた惑星環境での連続プロセスの技術構築を進める。

4. 水・空気環境浄化

① マランゴニ流を用いた水浄化実験

膜ろ過の前処理にマランゴニ対流現象を応用することにより、低重力場で機能する蒸留処理装置を開発する。この装置では、地上の蒸留装置で使われるラシヒリングをマイクロ流路に置き換え、重力の代わりに表面張力勾配を駆動力として液体と気体の分離を可能とする。これにより膜に対する負荷を大幅に低減し、膜交換頻度を最小化することが可能となる。

② 匂い環境計測及び光触媒による浄化実験

民生用小型匂いセンサの宇宙船内（ISS など）で動作検証を行うとともに、船内の空気をサンプルとして匂い計測を実施し、有人宇宙環境での匂いに関する環境評価の基礎データを取得する。これにより、船内光触媒脱臭技術の標準化を行う。また、光センサを用いた空気浄化装置の軌道上での動作検証を実施した後、実際に船内の空気をサンプルの浄化を実施し、有人宇宙環境の匂い環境改善の実証実験を行う。

③ 自己集積型コロイド光触媒

月レゴリスまたはそのモデル物質から、チタニア等の金属酸化物の粒子を合成し、Gateway において自己集積技術により規則構造を作製する。作製した材料は高性能光触媒として機能することから、宇宙の強力な紫外光を利用した酸素発生・有機物変換プロセスに活用する。

5. 生活安全・リサイクル（非平衡コロイド分散系）

非平衡状態のコロイド分散系は産業上欠かせない物質現象の 1 つであり、品質保証の観点からそれらを如何に準安定な状態として維持するかは常に重要な課題となる。非平衡コロイド分散系のダイナミックス実験を通して、微小重力環境下および低重力環境下における種々のコロイド分散系の崩壊プロセスを探索することで安定性を評価し、宇宙惑星居住に必要とされる食品、日用品などの生活資材の加工、閉鎖循環型分解・再資源化プロセスに応用する。

6. 光格子時計による共通時間標準（超高精度周波数標準）

Gateway に超高精度周波数標準時計（18 桁の精度をもつ光格子時計）を搭載し、子時計となる光格子時計と宇宙空間を光リンクすることにより時計周波数比較することを可能とする。この光格子時計ネットワークを惑星探査ミッションと連携して運用することにより、天体観測や月・地球観測の精度向上、月面ローバー探査測位・精密自動制御、月地殻変動の測定、月面重力アノマリー観測の基づく

資源探査など、深宇宙探査における共通時間標準を提供する。

7. 簡易実験手段（小規模実験プラットフォーム）

Gateway をベースとした深宇宙探査では、ISS では実施が困難であった環境条件下での科学および技術実証のニーズが格段に増大し、簡易に実施できる実験プラットフォームの必要性に迫られることになる。例えば、小型衛星の日陰側の放射冷却を活用して ISS では容易には達成できない極低温実験、強力な太陽光および放射線影響評価、観測機器等実験装置の宇宙環境における評価実証、将来の宇宙開発に生きる自律的な制御機器の実証などである。このような実験ニーズに応える小規模実験プラットフォームの運用は、わが国の宇宙技術の国際競争力を高める実績作りにおいて戦略的実験機会の創出を可能とするものである。

4.4.3.2 生態工学

1. 月面全自動無人植物工場の Gateway からの遠隔管理実証および月面宇宙環境の植物影響評価実験

a. CELSS の中核となる宇宙植物工場での食料生産の実証および月面宇宙環境の植物影響解明

宇宙植物工場でのカロリー源となる食料生産は世界初となる。以下の関連機関との協働が考えられる：（1）Scientific Commission F-4 of Committee on Space Research (COSPAR) の関係機関、（2）Eden ISS Project（ドイツ航空宇宙センター(DLR)）の関係機関。

2. 宇宙環境（放射線、紫外線、無重力）を利用した実験

a. 水を用いた放射線防御および藻類を用いた空気再生、排水処理、食料生産

日本は地上用として藻類培養の実績、物質収支が測定可能な状況である。コンパクトかつ物質収支の測定可能な藻類培養装置は諸外国に比べて進んでいる。

b. 廃棄物利用の高度化

日本は環境技術、ゴミの分別、回収、リサイクル技術が進んでいる。装置のコンパクト化、省エネ化に関する技術のポテンシャルは諸外国に比べて進んでいる。

3. 宇宙環境・材料（レゴリスなど）を利用した実験

日本において、レゴリスからの酸素抽出など基礎研究、そして月極域の水の探査の準備が進められている装置のコンパクト化、省エネ化に関する技術のポテンシャルは諸外国に比べて進んでいる。

4.4.3.3 宇宙生命科学

これまでのスペースシャトルや ISS など、地球低軌道上における宇宙生命科学実験において、我が国はそのための科学コミュニティの強化と宇宙実験の支援体制の確立、戦略的な宇宙実験の実施と運用によって、世界的に注目される研究成果を成し遂げてきた。また、その確立された基盤と成果は、人類の Gateway における新たな段階への発展と挑戦に大きく貢献するものである。また、Gateway および月面における生命科学研究においては、これまでに ISS 用に研究開発した技術と新たに必要とされる技術の研究開発を相補的にすすめることができる。とくに、以下のような宇宙生命科学の成果と技術開発の例は、深宇宙環境を利用した生命科学につながる日本の当該領域の強みと特徴になっている。

1. 植物、線虫、魚類、マウス等のモデル宇宙実験系

これまでの細胞や小型生物を、分子・ゲノム科学技術の発達に応じて、モデル実験系として確立し、とくに細胞や植物や線虫を用いた宇宙実験はそれらの重力応答の新規のメカニズムを発見することに貢献した。また近年、日本は小型魚類やマウスの宇宙長期飼育を可能にし、とくに微小重力が筋萎縮や骨代謝に及ぼす影響の分子・遺伝子工学的研究を先導している。これらモデル実験系による成果の深宇宙環境での検証と比較は、新たな生物学的知見と応用技術をもたらす。それぞれの生物供試体用に、または汎用型として開発実績のあるサンプル回収装置やその場解析装置は Gateway 実験でも有用で、そ

れを基盤にして小型且つ遠隔・自動制御の可能な各種解析装置（生体イメージング、成分分析等）を開発することが強く望まれる。

2. CBEF、魚類・マウス飼育装置等の技術開発

ISS「きぼう」与圧部で使われる細胞生物学実験装置（CBEF）は人工重力付加装置を備え、各種動物実験用供試体を装着でき、その環境制御能力も含めて、高機能性を発揮して宇宙実験に貢献してきた。CBEF にはマウス飼育装置も装着でき、現在、その飼育装置の大型化がすすめられている。また日本は、メダカやゼブラフィッシュの小型魚類の飼育装置開発とそれを用いた宇宙実験でも世界を先導し、その成果が注目されている。これら CBEF や供試体は、深宇宙での生命科学実験の基盤であり、その発展的改良によって、低コストで効率的な技術開発が可能である。

3. 宇宙放射線・紫外線の生物影響

これまでに宇宙放射線が DNA 損傷や染色体異常を誘発することが多くの宇宙実験で証明され、日本は当該領域研究を先導してきた。また、太陽光紫外線による植物の損傷と修復のメカニズム研究でも、日本は先導的な立場にある。これらは、たとえば宇宙滞在が宇宙飛行士のガン発生率をたかめる可能性を示す結果として懸念されているが、地球低軌道上で活動する宇宙飛行士のガン発生率が特別高いことを示す科学的データはとられていない。しかし、宇宙放射線に直接さらされる深宇宙に長期滞在することになったとき、その被曝線量等は果たして安全・安心な範囲に維持できるのかどうか、有効な対抗策を得ることができるのかどうかを明らかにしておく必要がある。そのために宇宙放射線環境の正確な物理計測と宇宙放射線変動予測を可能にする技術開発を行い、様々な線質・線量率の放射線生物影響を解明する必要がある。さらに日本の研究者は、地上実験で宇宙放射線・紫外線と疑似微小重力の組み合わせ環境をつくりだすユニークな実験装置を開発し、それらの複合影響を見いだしている。微小・低重力と宇宙放射線と太陽光放射線（紫外線）と高二酸化炭素・高酸素等の複合生物影響の解明、そのための解析手法技術の開発が重要になる。これらの研究開発と並行して十分な遮蔽技術を開発することは必須であろう。

4. 行動・筋萎縮・骨代謝等の生体変化

これまでの日本の宇宙実験は、魚や小動物が微小重力下では特有の行動・運動を行い、また、微小重力下で筋・骨が萎縮するメカニズムや、そのための重力・微小重力感知機構に関する研究を先導してきた。例えば、微小重力下では、筋タンパク質分解の中心的役割を果たす Cbl-b の変動や酸化ストレスが誘導されることが明らかになった。この成果は、栄養学・薬学的研究に発展し、Cbl-b や酸化ストレスを抑制する機能性食材の研究や創薬研究につながっている。これらの研究と成果は、深宇宙におけるヒトの長期滞在を可能にする生命・健康維持法の技術開発に直結する。さらに、微小重力下にヒトが居住すると、筋骨格系機能、骨代謝機能に加えて、平衡機能、身体感覚機能、心血管機能、自律神経機能、内分泌機能、造血機能、免疫機能に不都合が起こってくることがわかっている。これらのメカニズム研究には、各種の疑似微小重力実験装置（クリノスタット）や遠心機が開発されている。

5. 新規植物機能の利用と植物栽培技術

スペースシャトル並びに ISS で実施された日本の植物実験から、植物の抗重力反応や重力形態形成に関する新たな概念やメカニズム、また、地球上では重力応答によってマスクされている植物機能（水分屈性や自発的形態形成）が微小重力下で顕著に発現することも発見され、それらの分子機構を解明する研究がすすんでいる。これらの研究成果から、異なる重力環境における植物育成のための新たな成長制御技術や遺伝子・情報工学的な応用技術が確立される可能性が高くなっている。また、日本は ISS 実験で、モデル生物のシロイヌナズナを用いて、超小型の植物育成装置で種子発芽から種子形成までの生活環（Seed to Seed 実験）を完結することに成功している。これらの研究成果の背景には、日本独自の CBEF 搭載型植物実験装置（Plant Experiment Unit: PEU）の開発があり、Gateway の実験に向けて、小型化は勿論、遠隔・自動制御機能の装着や穀類や薬用植物の栽培のための大型化を進める上でも、その基盤ができています。深宇宙有人探査・宇宙居住における生命・環境維持に必要な植物生産は、最終的には植物工場

の宇宙版を確立することであり、それを閉鎖制御生態系に取り込んだ生態工学的研究も含めて（本報告書の生態工学を参照）、当該領域における日本の技術は世界最先端である。月居住のための植物栽培では、月の水・レゴリス利用と関連した工学研究や栽培された植物の加工・利用法に関する研究開発も必要になる。

4.4.4 将来の月惑星探査につながる科学探査の提言

人類の活動領域拡大を目指す宇宙惑星居住科学は、ISS がある地球低軌道から Gateway、月面、そして火星へと活動の場を拡げようとしており、このことは太陽系科学の進め方にこれまでなかった選択肢を提供するだろう。宇宙惑星居住科学における今後の研究シナリオは以下の通りである。

- ・ 月面の重力場（0.165G は、0G と 1G を補間する）を利用して ISS で行われた微小重力科学研究の成果を実証・発展させる。
- ・ 重力惑星環境での生物生存性、閉鎖型生命維持技術など、宇宙空間にてヒトが持続的に生存し、探査活動を可能とするための科学研究、技術開発、実証を実施する。
- ・ 我が国の小型月着陸実証機計画およびその後継機を見据えた、Gateway・月探査計画と整合する月環境利用ミッションを提案する。
- ・ 民間を中心とした SDGs（持続可能な開発目標）、Society 5.0 などのイノベーション戦略と連携し、産官学が協力して日本発の月探査ミッションを推進する。
- ・ 月には大気がなく、重力も小さいことから、地球からの輸送と比べ大幅なコスト低減が可能となることから、将来の深宇宙探査活動に向けて月の資源開発・利用による惑星探査の経済性を追求する。

以下に研究シナリオを実現するための研究案を示す。

4.4.4.1 微小重力科学

1. 材料科学

- ・ レゴリスなど惑星鉱物資源を原材料とした材料プロセス
- ・ その場資源利用を可能とする鉱物製錬・精錬、材料加工

2. 流体科学

- ・ 探査居住モジュール熱制御技術、宇宙機流体制御
- ・ 微小重力、低重力下での積層造形（3D プリンター）

3. 燃焼科学

- ・ 宇宙火災安全確保
- ・ 月面極域に存在する水素を利用した熱源の開発と利用システム
- ・ 燃焼による廃棄物の減容処理

4. 化学工学

- ・ 有人探査に向けた空気再生および水再生など生命維持・リサイクル
- ・ 水素、酸素、水の循環的利用を可能とする光触媒プロセス
- ・ 日本の強みである環境技術を微小重力、低重力、可変重力場での単位操作

5. コロイド界面科学

- ・ 粒子の自己組織化原理の材料プロセス、リサイクル
- ・ 界面活性剤による界面制御、物理表面の濡れ制御、電場効果のバイオテクノロジー
- ・ 食品の保存処理、日用品など生活関連技術

6. 基礎物理

- ・ レゴリスのプラズマ特性評価と材料プロセス
- ・ 生命と真空宇・高エネルギー環境との相互作用の解明
- ・ 光格子時計を用いた月／惑星／宇宙空間における時間・位置測定など各種精密測定

7. 共通技術・実験手段

- ・ 化学分析、ゲノム、プロテオーム、メタボローム解析
- ・ 遠隔地での実験の自動化、遠隔操作などテレサイエンス高度化
- ・ 有人／無人衛星、月面プラットフォームなど手段の多様化、手段間の連携

4.4.4.2 生態工学

1. 長期有人宇宙活動支援する CELSS 構築のための宇宙環境下での実証研究
2. 宇宙農場の構築
3. ECLSS の構築
4. 極域・洞窟内部など月面各所におけるレゴリスの成分分析および酸素・希少金属・ヘリウム 3 などの分離精製技術の確立と人口生態系への影響評価

4.4.4.3 宇宙生命科学

1. 深宇宙環境長期曝露に伴う医学的リスクの回避・医療
2. 長期滞在するクルーの健康管理、ストレス軽減、メンタル面の改善
3. 宇宙放射線・紫外線に対する防護技術と応用法の確立
4. 月面植物工場・制御生態系・宇宙農業の実証・確立
5. 生命維持システムの実証・確立
6. 月のレゴリスや水などを含む資源開発・利用
7. 火星等、さらなる深宇宙への人類の進出
8. 月旅行・エコツーリズム
9. 月人類社会・文化の形成
10. 地球の課題解決と近未来の創造

4.5 ロードマップ

4.4 節までの内容を、研究項目毎に「緊急に重要な項目」「長期的に重要な項目」「うまく行けば重要だが成功の可否判断が難しい項目」に分類し、課題実現に向けたロードマップを示す。特に、「緊急に重要な項目」については、さらに Gateway 利用の「Phase 1 で実施可能と思われる項目」「Phase 2 で実施可能と思われる項目」「実施可能性の判別が出来ない項目」に分類した。

4.5.1 宇宙理学

1. 緊急に重要な項目

「Phase 1 で実施可能と思われる項目」

- ・ プラズマ電磁環境計測および地球惑星磁気圏、大気圏撮像：かぐや搭載機器の技術やノウハウを継承発展させ、以下の計測装置を Gateway 曝露部または小型衛星に搭載する。
 - 月面からの電場の高度分布を計測する電場計測装置、および電磁場計測装置
 - 磁気異常などにおける磁場分布を計測する磁場計測装置
 - 低～高エネルギー粒子を計測するイオン・電子エネルギー分析装置
 - 浮遊ダストの分布や運動を観測するダスト計測装置

- 水関連分子の供給や輸送を観測するイオン・中性粒子質量分析装置
- 地球磁気圏 X 線撮像装置・紫外撮像装置

具体的な計測、解析は以下の通りである。月起源イオン質量分析、太陽風の磁場・プラズマ、地球磁気圏尾部のプラズマ現象、宇宙電磁波のリモートセンシング、Gateway と周辺プラズマ環境の相互作用（Gateway 環境アセスメント）。

- ・ 微小隕石・彗星ダスト分析並びに外来天体よる月への揮発性成供給機構の解明：外来天体による供給量の大部分を担う微小隕石や彗星ダスト自体は月試料から見つかっていない。Gateway 上での微小隕石・彗星ダスト収集と微小部分分析による月への揮発性成供給機構の解明が必要。

「Phase 2 で実施可能と思われる項目」

- ・ 月面での太陽風プラズマ環境の観測：Phase 1 で上げた計測装置を月面に設置し、安定的に長時間に渡り環境モニターを行う。具体的な計測、解析は以下の通りである。月面磁気異常によるプラズマ粒子加速加熱、月面ダスト帯電、分布、運動、月起源の重イオン、負イオン（H-や O-）や中性粒子。
- ・ 月表層、地下環境計測：月表層の水の起源を知り、外部からの水の供給過程や太陽系内における水など揮発性成分の移動に関する知見を得るために、物理探査（ローバー搭載 GPR や小型衛星搭載レーダサウンダによる月表層地下構造・層序の広域探査、地震波計測など）、掘削（ボーリング）探査、赤外分光装置による月面および月面下の環境を計測する。その場観測による表面試料の同位体測定や貴ガス分析のための加熱、質量分析による解析。

「実施可能性の判別が出来ない項目」

2. 長期的に重要な項目

- ・ 月面定点プラズマ観測（月面定点での長期プラズマ観測により宇宙天気的确立と地球磁気圏のダイナミックな変動の理解）
- ・ 軟ガンマ線による活動銀河核やブラックホール、重力波対応天体の観測（LEO に比べて低い放射化、安定したバックグラウンドの活用）
- ・ Gateway から超小型機を月面に向けて放出する機構（チャレンジングで高度なミッションへと向けた布石）
- ・ 宇宙再電離の解明に向けた 21 cm 輝線観測（地球上では大気の影響により難しい低周波電波観測を月の裏側で実現）
- ・ 天文観測ミッション建設・運用基地

3. うまく行けば重要だが成功の可否判断が難しい項目

- ・ 着陸機もしくは小型衛星搭載レーダサウンダによる月表層地下構造・層序の広域探査
- ・ 月面衝突閃光観測から探る隕石の衝突頻度と超高速発光物理の解明（EQUULEUS に提案済み、月震観測に重要）
- ・ X 線干渉計 MIXIM（高解像度の X 線撮像によりそれにより活動銀河核の超巨大ブラックホール周辺のトラス構造などの観測研究が可能になる。X 線干渉計の技術は、まだ地上における原理実証段階）。
- ・ 月表面の精密資源探査マップ作製。核ガンマ線イメージング分光カメラを用いて宇宙線衝突で表面に発生する核ガンマ線を観測し、元素分析により天体表面全域において精密な資源分布地図の作成を行う。

4.5.2 宇宙工学

1. 緊急に重要な項目

「Phase 1で実施可能と思われる項目」

- ・ 将来の月惑星探査につながる技術の一部。例：重力天体着陸技術、遠隔操作技術、惑星間航行技術。

2. 長期的に重要な項目

- ・ 他分野を成り立たせるための技術。例：擾乱制御、天文台関連技術（冷凍機、センサ、ポインティングなど）。
- ・ 補強船関連技術。例：電気推進エンジン、LIDAR 技術。
- ・ 将来の月惑星探査につながる技術の一部。例：Gateway からの月着陸軌道などに超小型機を放出する機構。

3. うまく行けば重要だが成功の可否判断が難しい項目

- ・ 将来の月惑星探査につながる技術の一部。例：月面レゴリスを使用したレーザー推進系、レールガンによる月資源の軌道への運搬、IP プロトコルをベースとした深宇宙通信

4.5.3 アストロバイオロジー

1. 緊急に重要な項目

「Phase 1で実施可能と思われる項目」

- ・ 宇宙塵連続計測による月近傍固体微粒子環境の解明

「Phase 2で実施可能と思われる項目」

- ・ ExHAM を介する曝露実験
- ・ 曝露・観測実験のための共通曝露プラットフォームの開発(ExHAM-G)
- ・ 微小重力下におけるレゴリス中での水分移動機構の解明

2. 長期的に重要な項目

- ・ 惑星保護と地球外生命検出を両立するサンプルリターン技術の開発

3. うまく行けば重要だが成功の可否判断が難しい項目

- ・ 前生物学的有機物合成：模擬原始地球の水圏環境における前生物学的実験

4.5.4 宇宙惑星居住科学

4.5.4.1 微小重力科学

1. 緊急に重要な項目

「Phase 1で実施可能と思われる項目」

- ・ 簡易実験手段（小規模実験プラットフォーム）：①ISS では容易には達成できない極低温実験、②強力な太陽光および放射線影響評価、③観測機器等実験装置の宇宙環境における評価実証、④将来の宇宙開発に生きる自律的な制御機器の実証

「Phase 2で実施可能と思われる項目」

- ・ その場製造（3D プリンター）：①月レゴリスの静電浮遊熱物性評価（ISS 利用ベース）、②レゴリス利用積層造形のための溶融凝固シミュレーション、③宇宙その場製造を目指した金属積層造形プロセスの最適化

「実施可能性の判別が出来ない項目」

- ・ 熱エネルギー開発：①ランキンサイクルを用いた月面エネルギー供給システム、②月で得られる水素を利用した循環型燃焼装置（熱源）の開発、③パーシャルグラビティ環境での火災安全プロトコルの構築

2. 長期的に重要な項目

- ・ 水・空気環境浄化：①マランゴニ流を用いた水浄化実験、②匂い環境計測及び光触媒による浄化実験、③自己集積型コロイド光触媒
- ・ 月面資源開発（レゴリス利用）：①プラズマ・レゴリス相互作用による微粒子制御と水素回収、②月レゴリスからの酸素、水素および水の製造技術、③その場資源利用を可能とする鉱物製錬・抽出プロセス
- ・ 生活安全・リサイクル（非平衡コロイド分散系）：①微小重力環境下および低重力環境下における種々のコロイド分散系の崩壊プロセス・安定性評価、②宇宙惑星居住に必要とされる食品、日用品などの生活資材の加工、③閉鎖循環型分解・再資源化プロセス

3. うまく行けば重要だが成功の可否判断が難しい項目

- ・ 光格子時計による共通時間標準（超高精度周波数標準）：①天体観測や月・地球観測の精度向上、②月面ローバー探査測位・精密自動制御、③月地殻変動の測定、④月面重力アノマリー観測の基づく資源探査

4.5.4.2 生態工学

1. 緊急に重要な項目

「Phase 2 で実施可能と思われる項目」

- ・ 宇宙環境（放射線、紫外線、低重力）から生体を防御、あるいは宇宙環境を利用する実
- ・ 環境制御・生命維持技術（ECLSS）の構築

2. 長期的に重要な項目

- ・ 宇宙農場の構築
- ・ 極域・洞窟内部など月面各所におけるレゴリスの成分分析および酸素・希少金属・ヘリウム3などの分離精製技術の確立と人工生態系への影響評価
- ・ 月面全自動無人植物工場の Gateway からの遠隔管理実証および月面宇宙環境の植物影響評価実験
- ・ 宇宙環境（放射線、紫外線、低重力）から生体を防御、あるいは宇宙環境を利用する実
- ・ 月面物質の摂取影響実験、宇宙環境下での廃棄物の再生有効利用実験
- ・ 植物栽培技術の実証（栽培システムの確立）
- ・ 重力応答遺伝子の探索と月・火星での植物栽培への応用
- ・ 植物育成のための新規成長制御法・新植物の開発、微生物利用
- ・ 閉鎖生態系における生物間相互作用の解明と利用
- ・ 機能性食材の LED による宇宙植物工場の実証試験
- ・ 植物栽培とその栄養成分分析
- ・ 微小・低重力下での食料植物栽培環境の最適制御技術開発
- ・ 閉鎖生態系生命維持のための物質循環系の確立およびコンパクト化・省エネ化
- ・ 月レゴリスの有機化と利用
- ・ 植物実験装置の遠隔・自動操作技術の開発

3. うまく行けば重要だが成功の可否判断が難しい項目

特になし

4.5.4.3 宇宙生命科学

1. 緊急に重要な項目

「Phase 1で実施可能と思われる項目」

- ・ 深宇宙環境の生物影響：①部分・低重力への長期曝露の生物影響、②深宇宙特有の宇宙放射線や太陽光紫外線の線量計測・生物影響、③微小・低重力と宇宙放射線・太陽光紫外線と心理的ストレスの複合的生物影響、④深宇宙滞在による精神的ストレスの評価
- ・ 深宇宙における生命・健康維持：①放射線防護・遮蔽技術開発とリスク評価・被曝管理、②植物を利用した心理的ストレス軽減のための実証実験、③機能性食材による筋・骨萎縮や酸化ストレスの軽減・予防、④微生物学的管理目標の設定、⑤ストレス軽減・健康維持のための宇宙食の開発
- ・ 実験装置：①Gateway 用動植物実験系の確立と実験装置の開発、②環境制御装置やその場解析装置やサンプリング装置の AI・自動化と遠隔操作のための要素技術の開発・実証

「Phase 2で実施可能と思われる項目」

- ・ 深宇宙環境の生物影響：①深宇宙環境が生物の生活環・継世代に及ぼす影響の理解、②微小重力・部分重力下での植物の遺伝子発現変動の解析と遺伝子発現操作による効率的植物栽培、③深宇宙環境・閉鎖生態系における生物間相互作用の解明と利用、④宇宙環境に曝露された生体の point of no return の解明
- ・ 深宇宙における生命・健康維持：①微小・低重力と宇宙放射線・紫外線への長期曝露の生体影響（DNA 損傷、ガン化、筋・骨等運動器系、循環器系、平衡感覚系とそれを介した調節系）への対抗策とその実証

「実施可能性の判別が出来ない項目」

- ・ 宇宙医学：①宇宙放射線宇宙飛行士によるコホート・症例対照研究、②船外活動用装置の医学的・人間工学的開発と検証

2. 長期的に重要な項目

- ・ 深宇宙環境の生物影響：①深宇宙環境が生物の適応・進化に及ぼす影響の理解
- ・ 生命維持技術：①装置の大型化と各要素技術の開発、②宇宙植物工場、③物質循環系、④その場資源利用、⑤持続的生命維持・物質循環系の構築（要素技術の統合）と制御、⑥有用微生物の利用・管理、⑦システムの小型化、AI・自動化、遠隔操作
- ・ 宇宙農場：①重力応答性・ストレス応答性遺伝子発現を利用した植物の生育診断と宇宙農業用の新植物の開発、②植物育成のための新規成長制御技術の開発、③月部分（低）重力下における植物栽培の最適化、④宇宙植物工場の実証、⑤栄養学・癒やしの観点から必要な生物種とその効率的栽培・飼育法、栄養分析、加工法、宇宙食の開発
- ・ 宇宙医療・健康管理：①深宇宙環境長期滞在に伴う医学的リスクの回避・医療、精神的ストレス軽減

3. うまく行けば重要だが成功の可否判断が難しい項目

- ・ 生命・健康維持：①低重力・宇宙放射線の生体影響の軽減・予防のための創薬、②植物栽培や生命維持システムへの月レゴリス・水の利用

5. 補遺

5.1 欧米での Gateway 利用提案テーマ一覧

5.1.1 米国での Gateway 利用提案テーマ

2018 年 2 月に米国で開催された Deep Space Gateway Concept Science Workshop での提案テーマを表 5.1.1-1 の通り整理した。

(参考資料: <https://www.hou.usra.edu/meetings/deepspace2018/program.pdf>)

表 5.1.1-1 米国での Gateway 利用提案テーマ (1)

分野	テーマ	分野	テーマ
宇宙生命・物理学	1. Gateway での放射線環境 宇宙放射線・プラズマ科学、曝露環境モニタリング、中性子線環境計測、次世代高速中性子検出器 2. 放射線の遺伝子影響 DNA 損傷と修復、好極限環境微生物の適応特性、生命種・形態の生存試験 3. 放射線のヒト・細胞・薬物への影響 薬剤安定性、組織再生、エピジェネティクス、放射線・無重力複合影響、マトリョーシカ被曝実験、植物をモデル生物とした生理影響研究、生命科学ペイロードへの要求事項 4. 宇宙飛行士への影響 健康とパフォーマンス維持、健康バイオマーカー、食物の長期安定性、居住快適性、網膜正常性評価	太陽系物理学	1. ダストプラズマ・微粒子 太陽ダストダイナミクス、長期間曝露プラットフォーム、太陽風サンプル捕集、宇宙ダスト分析、惑星間ダスト捕集 2. 宇宙天気 観測アーキテクチャー、ラングミュアプローブによる放電環境モニタリング、予報のための科学機器 3. 外部曝露機器 コロナ観測、X線・γ線観測、太陽風診断、太陽内部過程の電波イメージング分光、グローバル磁場圏イメージング、軟X線観測、地球-月からの物質流出観測 4. キューブサット・スモールサット ラジオ波観測、画像撮影、地球磁気圏調査
月極域資源探査	1. 近地球対象物科学 隕石フラックス観測、隕石衝突発光検出、月及びアステロイド資源利用、水など揮発物質ダイナミクス、永久影照明による揮発成分検出、マイクロ波輻射計による熱フラックス計測 2. 小惑星資源利用 小惑星環境再現・材料プロセッシング用可変重力遠心機、再利用型サンプルリターン船、移動体追跡技術 3. 試料評価 サンプルリターン、大量サンプル収集、惑星保護、宇宙物質グローブボックス、資源評価のための物質操作プロトコル 4. 表面探査機器 月全球熱流マッピング、ダストの静電輸送測定、磁場測定、人の月面アクセスを容易にするエアロック	横断技術	1. 外部曝露試験 長期材料・デバイス評価 2. 外部曝露機器／地球 全球火山活動・エアロゾルモニター、地球輻射収支モニター、深宇宙地球気象観測所、地球大気・生態系リモートセンシング 3. キューブサット ミッション設計、Gateway からの放出、カメラ画像解析 4. テレロボティクス 有人探査支援のための人・ロボットアーキテクチャー、VR テレプレゼンス、ローバーと宇宙飛行士との協調探査、待ち時間なし高速レーザー通信 5. 将来展望 プログラム型自己複製宇宙バイオ生産工場、宇宙廃棄物再利用システム、テザー利用低重力発生装置、人工重力利用

5.1.2 欧州での Gateway 利用提案テーマ

2017 年 8 月～10 月に実施された ESA Deep Space Gateway call for ideas における提案テーマを表 5.1.2-1、5.1.2-2 の通り整理した。

(参考資料： <http://exploration.esa.int/moon/59830-research-opportunities-on-the-deep-space-gateway---responses-to-the-call-for-ideas/>)

表 5.1.2-1 欧州での Gateway 利用提案テーマ (1)

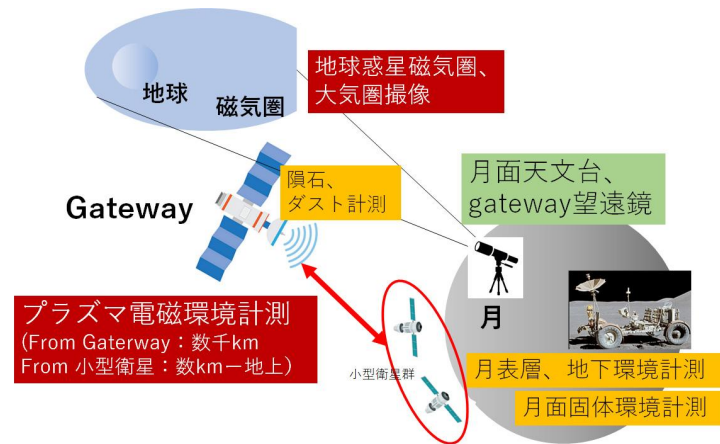
分野	テーマ	分野	テーマ
生命科学	1. 月環境及び放射線に対する生物応答 2. 長期多世代生物科学研究用生物プラットフォーム 3. 微生物発酵ベースの宇宙バイオテクノロジー 4. 再利用可能細胞培養及び器官培養実験室 5. 植物の長期放射線被曝実験 6. 異なった重力環境における持続的灌漑操作 7. 月レゴリスを用いた植物ベースの生命維持 8. 果物成長と発芽に及ぼす低重力と磁場影響 9. パーソナル(ウェアラブル)放射線防御システム 10. 宇宙飛行士バイタルデータ検出とモニタリング 11. 深宇宙環境曝露に伴う炎症マーカー 12. 病態生理学的対策のための統合着用デバイス 13. NIR レーザー治療システム開発 14. 救急治療用ポータブルソフトウェアシステム 15. 携帯型超音波診断装置	太陽系物理学	1. 月表面の可視－赤外偏向スペクトルマッピング 2. 月面揮発成分の宇宙環境における散逸 3. 月スウォール(未知の高アルベド現象)調査 4. 移動型揮発成分分析プラットフォーム 5. 月面揮発成分(水)補修トラップ 6. 月の古レゴリス堆積物のサンプリング 7. 地球由来気体成分の UV 観測 8. 水探査のためのインパクト実験 9. サーフィスペニトレーターを用いた科学 10. 月地震観測ネットワーク 11. 月面発光現象観測 12. 隕石モニター 13. 遠赤外・マイクロ波リモートセンシング 14. 太陽放射線研究施設

表 5.1.2-2 欧州での Gateway 利用提案テーマ (2)

分野	テーマ	分野	テーマ
物理科学	1. 深宇宙放射線環境の自律的観測 2. 耐放射線メモリー設計 3. 空気水リサイクル用高効率ナノメンブレン 4. 月土壤中の水検出 5. 電気推進剤容量の計量システム 6. 人工光合成による水素・酸素生産 7. 微小粒子サンプリング 8. 宇宙ダスト物性評価 9. 月土壌の建築材利用のための地域別物理－機械特性評価	技術	1. 宇宙船コート材長期曝露試験 2. 低重力下 3D 積層造形 (3D プリンティング製造) 3. 月面上でのダスト／レゴリスのマイクロ波焼結 4. ロボット操作地球外物質の生物試験／滅菌 5. 居住・製造施設兼用ユニバーサルモジュール 6. 膨脹型着陸装置技術 7. 宇宙ゴミ観測用能動型フェーズドアレイアンテナ 8. 輸送機と Gateway をつなぐ宇宙タグ船 9. 宇宙ロボット支援の様相検討 10. Gateway から地球大気への自動廃棄物処理船 11. クルー支援／Gateway 検査用自律的宇宙ドローン 12. オンデマンド小型衛星自動製造 13. テレプレゼンス技術活用人－ロボット協調探査 14. 将来ミッションに向けた新技術運用試験

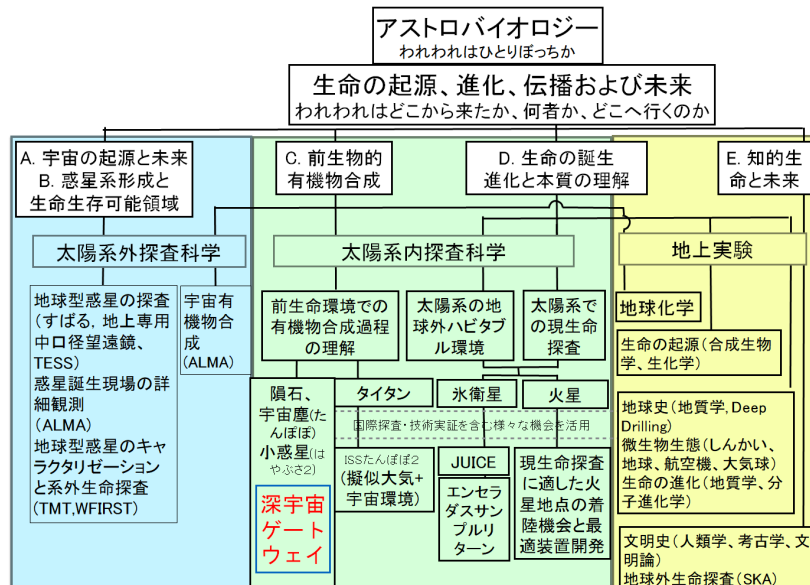
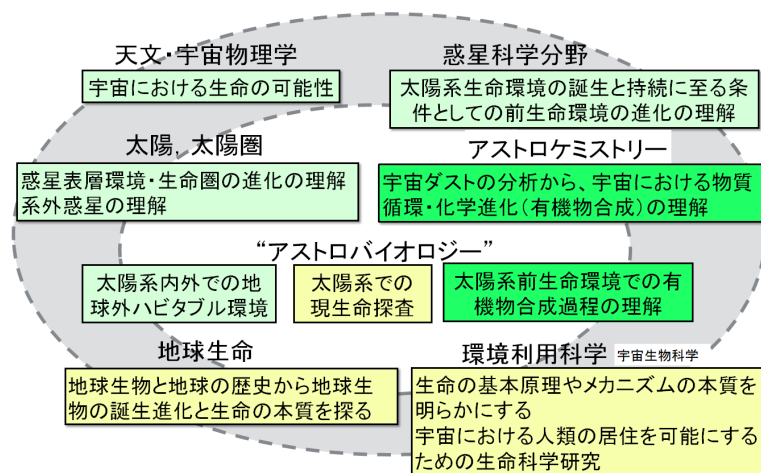
5.2 Gateway 利用に関する科学コミュニティの将来ビジョン・研究戦略

8.2.1 宇宙理学

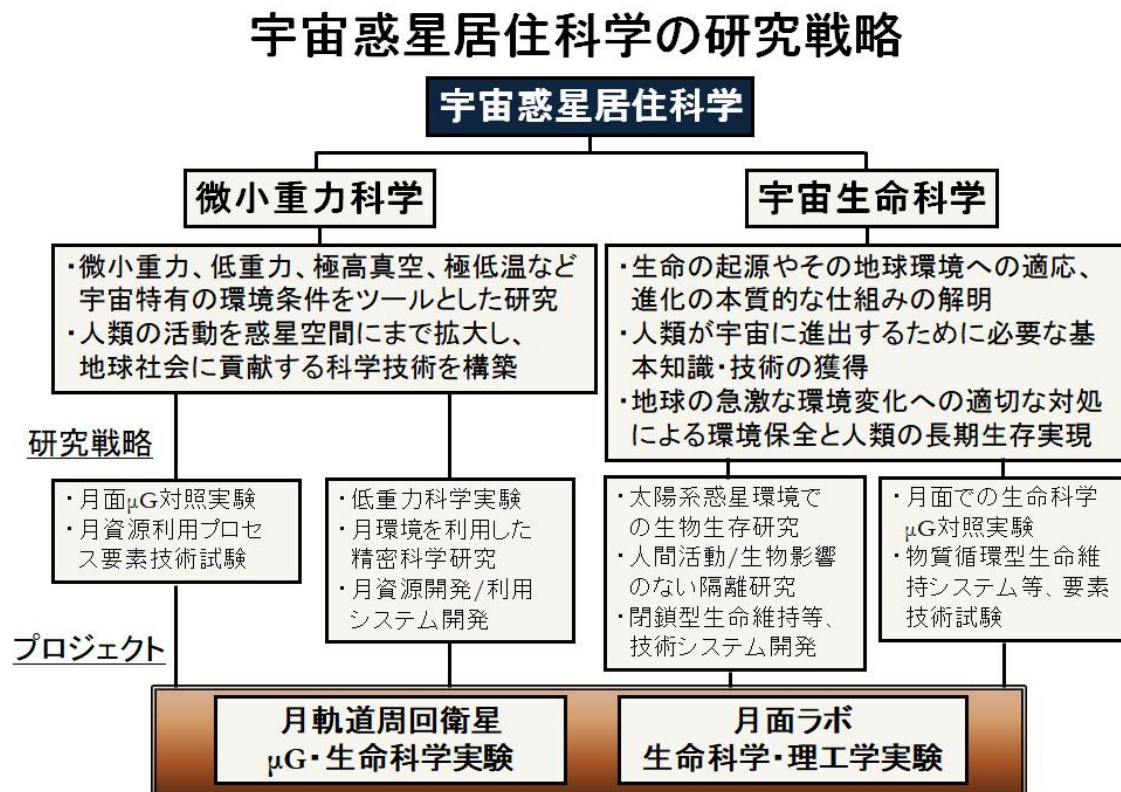


5.2.2 アストロバイオロジー

関連全分野が一体となった総合アプローチと一点突破の集中



5.2.3 宇宙惑星居住科学



5.3 科学コミュニティからの Gateway 利用提案テーマ一覧

5.3.1 宇宙理学の観点

目標	研究テーマ
プラズマ電磁環境計測	・ 月プラズマに関する観測 ・ 電磁場・プラズマ波動観測でみる月-地球系 60Re の物理
月表層、地下環境計測	・ ロバー搭載 GPR による月表層地下構造・層序の広域探査 ・ 着陸機もしくは小型衛星搭載レーダサウンダによる月表層地下構造・層序の広域探査 ・ 月表層・浅地下の含水鉱物・水関連物質・有機物の検出
地球惑星磁気圏、大気圏撮像	・ 地球磁気圏 X 線可視化、太陽系における UV リモートセンシング、月から地球散逸大気をみる
月面固体環境計測	・ 月面衝突閃光観測から探るシスルナ空間への彗星・小惑星起源メテオロイドの衝突頻度と超高速衝突発光物理の解明
隕石、ダスト計測	・ Gateway で収集された微小隕石・彗星ダストの微小部分分析並びに外来天体による月への揮発性成分の供給機構の解明
軟ガンマ線観測	・ 全天軟ガンマ線サーベイ観測装置 ・ 方向決定用超小型ガンマ線バーストモニター装置
月面観測	・ 蛍光 X 線観測による月地殻の形成過程研究 ・ 月面を走る 21cm 輝線観測装置
月面天文台	・ 宇宙ニュートリノ観測、X 線干渉計 MIXIM

5.3.2 宇宙工学の観点

目標	研究テーマ
COTS 品や汎用技術の利用による低コスト化と高信頼性の確保	・ IP プロトコルをベースとした深宇宙通信
月面上の資源を推進剤とした輸送系	・ 月面レゴリスを利用したレーザー推進系
超小型機による月惑星探査	・ Gateway 予定軌道での軌道運動の評価 ・ Gateway からの超小型機放出
極の水資源に拘泥しない探査	・ 4 本脚による着陸技術の獲得 ・ 遠隔操作技術
月表面へのアクセス技術	・ Flash LIDAR、ドップラー LIDAR の実証
Gateway への無人物資輸送	・ 大出力電気推進系の実証
電波 VLBI	・ Gateway 軌道上の複数基と地球・月のラグランジュ点で無線干渉計を構築
将来の本格宇宙探査に向けた技術蓄積	・ 太陽・地球系のラグランジュ点での深宇宙港運用模擬、惑星間航行技術の実証 ・ レールガンによる月面資源の軌道への運搬

5.3.3 アストロバイオロジーの観点

目標	研究テーマ
宇宙環境（放射線、紫外線、無重力）を利用した実験	- 地球生物の宇宙曝露実験に基づく長期宇宙生存可能性の検証 - 原始惑星環境・宇宙環境の模擬実験の場としての Gateway 利用 - 微小重力下における多孔質体中での水分移動機構の解明 - 模擬原始地球の水圏環境における前生物学的実験
微粒子（宇宙塵）捕集実験	宇宙塵連続計測と定期サンプルリターンによる月近傍固体微粒子環境の解明
観測実験	彗星・小惑星起源メテオロイド含有有機物の月面生存環境の評価
宇宙技術開発	惑星保護と地球外生命検出を両立するサンプルリターン技術の開発

5.3.4 宇宙惑星居住科学の観点

分野	研究テーマ
宇宙重力生物学	- 微小重力・低重力下での植物の生活環と遺伝子発現の変動 - 微小重力・低重力が行動、運動、筋萎縮・骨代謝、循環器系に及ぼす影響 - 宇宙環境に曝露された生体の point of no return - 微小重力・低重力下での生物の継世代と進化
宇宙放射線生物学	- 宇宙放射線・紫外線の生物影響 - 微小・低重力と宇宙放射線・紫外線の複合影響 - 深宇宙放射線下での植物の生活環 - 心理ストレスと宇宙放射線の複合生物影響 - 生体リスク評価のための放射線線量計測・予測 - 放射線防護、遮蔽、被曝管理 - 宇宙飛行士によるコホート・症例対照研究
生態工学	- 月面全自動無人植物工場の Gateway からの遠隔管理実証および月面宇宙環境の植物影響評価実験 - 宇宙環境（放射線、紫外線、低重力）を防御あるいは利用する実験 - 月面物質の摂取影響実験、宇宙環境下での廃棄物の再生有効利用実験
宇宙農学	- 植物栽培技術の実証（栽培システムの確立） - 重力応答遺伝子の探索と月・火星での植物栽培への応用 - 植物育成のための新規成長制御法・新植物の開発、微生物利用 - 閉鎖生態系における生物間相互作用の解明と利用 - 機能性食材の LED による宇宙植物工場の実証試験 - 植物栽培とその栄養成分分析 - 微小・低重力下での食料植物栽培環境の最適制御技術開発 - 閉鎖生態系生命維持のための物質循環系の確立 - 月レゴリスの有機化と利用 - 実験装置の遠隔・自動操作技術の開発

宇宙医学・健康科学	・ 船外活動用装置の医学的・人間工学的開発と検証 ・ 筋骨等運動器系、循環器系の重力変化に対する応答と対抗策 ・ 平衡感覚系とそれを介した調節系の重力変化に対する応答と対抗策 ・ 複合的な環境要因に起因するストレス応答と対抗策 ・ 筋骨萎縮や酸化ストレス軽減・予防のための機能食材の開発 ・ 宇宙飛行士のストレス緩和のための宇宙食の開発と実証 ・ 宇宙飛行士の味覚・嗅覚の変化に伴う生理的变化 ・ 微生物学的管理目標の設定と有用微生物の利用
技術開発	・ 月面資源探査・開発 ・ 熱エネルギー開発 ・ その場製造 ・ 生活安全・リサイクル ・ 水・空気環境浄化 ・ 光格子時計

5.4 将来月探査ワークショップにおける Gateway 関連成果

2019 年 1 月 28 開催の将来月探査ワークショップ（主催：JAXA 国際宇宙探査センター、宇宙理工学委員会国際宇宙探査専門委員会、宇宙惑星居住科学連合、日本惑星科学会）にて、検討中の Gateway と HERACLES に関して JAXA における検討状況報告とタスクフォースの中間報告を行った。また Gateway・HERACLES などのインフラを利用した将来月・火星探査に対するビジョンについての総合討論をパネルディスカッション形式で行った。

特に、Gateway 関連の成果は以下の通り。

- ・ Gateway 計画について月・惑星科学の他にも宇宙生命科学など様々な科学コミュニティによる研究検討がなされていることが共有された。
- ・ 参加者から、ISS「きぼう」のヘリテージをできるだけ Gateway に生かし、日本の強み・特徴を活かした実験・観測機会を獲得してほしいとの要望があった。
- ・ Gateway を用いた具体的実験・観測テーマの募集については、今後科学コミュニティから更に意見を集約して検討する方針であることを共有した。
- ・ パネルディスカッションでは、Gateway というインフラの活用や HERACLES 計画により推進される月科学にとどまらず、将来の火星有人探査まで視野に入れた議論が活発に行われた。また、民間企業などの連携・分担、科学成果の社会還元などについての意見交換が行われた。
- ・ 今後も同様の WS を継続することで、国際宇宙探査シナリオ、国際分担、技術検討状況等の情報共有について継続してほしいとの要望があった。