

# 工業会活動

## 令和2年度次世代宇宙プロジェクト推進委員会報告 (月惑星探査に関する調査報告書)

次世代宇宙プロジェクト推進委員会では、平成15年度より宇宙利用の拡大・発展と我が国の宇宙機器産業の国際競争力強化を目的として、宇宙利用計画や宇宙開発動向の調査と我が国が目指すべき次世代宇宙プロジェクトについて検討を行ってきた。令和2年度の同委員会では、「月惑星探査に関する調査」をテーマとした調査を行い、報告書にまとめたのでその概要を報告する。

月惑星探査については、国際宇宙探査協働グループ（ISECG）を中心に国際協調の枠組みで検討が実施されてきているが、2019年に米国は2024年有人月面着陸、2030年代の有人火星着陸を目指す「アルテミス計画」や、持続的な有人月探査を支える月を周回する有人拠点「ゲートウェイ（Gateway）」を構築する計画を2019年に発表し、世界各国に参画を呼び掛けた。これに応じて、日本も同年10月に同計画への参加を表明し、同計画への参画のあり方や我が国の科学探査を含む国際宇宙探査全体のあり方の検討及び整理を開始した。

このような状況に鑑み、令和2年度の同委員会では、月惑星探査の最新動向を俯瞰することを目的に、ISECGに参加する各宇宙機関における月惑星探査の最新のシナリオやそれらのシナリオに対応する技術や開発事例等の調査を行い、今後、日本が月惑星探査に取り組む上で、優位となる技術分野や解決すべき課題等を整理した。

### 1. 月惑星探査の最新シナリオ

#### (1) 国際宇宙探査計画の全体像

近年の国際宇宙探査はISECG参加機関による国際協働による動きが加速しつつある中、2019年、米国「アルテミス計画」の発表を受け、2020年8月、ISECGの国際宇宙探査追補版もアルテミス計画を踏襲した内容に更新され、最新の国際宇宙探査計画は米国主導のアルテミス計画に沿ったものとなっている（図1）。一方、ISECG参加国であるロシア及び中国はアルテミス計画への積極的な参加は行わず、別途、両国で月面共同探査協定を締結するなど、中露で米国に対抗する動きもみられている。

#### (2) 各国の宇宙探査の最新シナリオ

##### ○ アメリカ航空宇宙局（NASA）

米国は、火星探査を視野に入れつつ、Gatewayの整備を含む月探査計画である「アルテミス計画」を国際協力のもと実施する計画を提案すると共に、その具体化を促進している。2020年4月、NASAは持続的月探査・

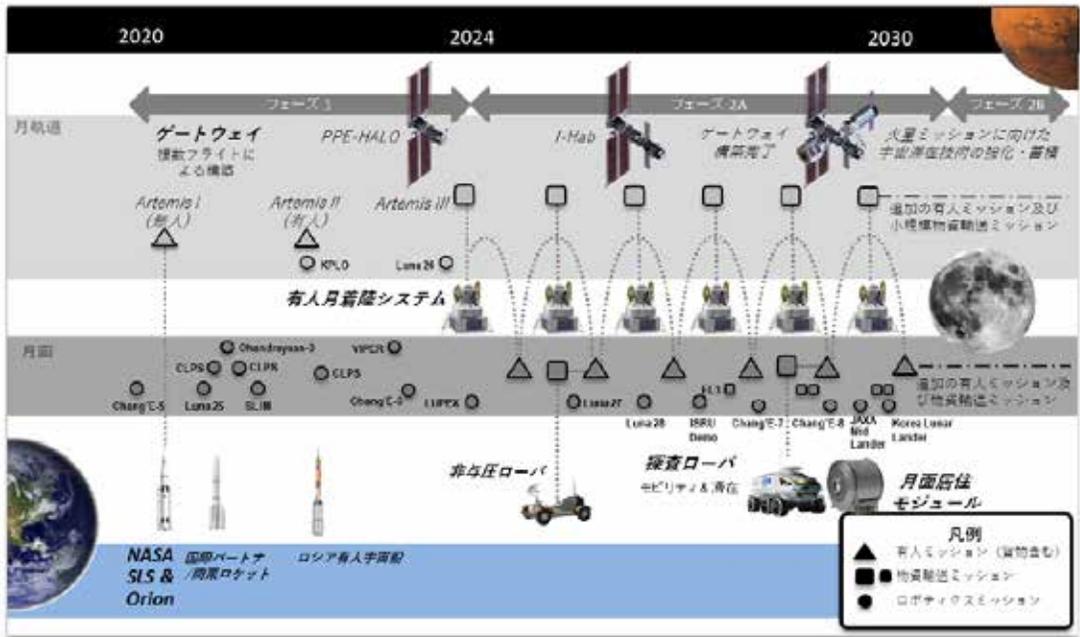


図1 ISECG月面探査シナリオ最新版 (出典資料\*1)

開発計画として“NASA’s Plan for Sustained Lunar Exploration and Development”を発表して、アルテミス計画での新しいロードマップとなる月面基地プランを公表した。有人探査の主要領域として、地球低軌道、月、火星を設定し、技術的に密接な連携を意図すると共に、低軌道の有人運用を民間に移管しながら、国際宇宙ステーション (ISS) を月・火星探査のためのテストベッドとして活用する等、低軌道活動の必要性も明示している。また、2024年の月面着陸以降、有人火星探査ミッションに向けた準備として、持続的な月面活動を実現すべく、月南極域に有人活動拠点Artemis Base Campを建設するとしている。さらにGatewayを活用した火星探査模擬ミッションやその場資源利用 (ISRU : In-Situ Resource Utilization) 技術等の月面革新イニシアティブも促進することが示されている (図2)。

2020年9月に公開された「Artemis Plan “NASA’s Lunar Exploration Program Overview”」

はNASAのアルテミス最新計画であり、主に2024年に有人月面着陸を行うまでのフェーズ1の最新計画が記載されている。フェーズ1には、無人でのフルシステム試験「Artemis I」、月軌道での有人ミッション「Artemis II」、及び有人月着陸ミッション「Artemis III」が含まれている。同計画の主な内容は以下のとおりである。

- 多目的有人宇宙船 (MPCV) 「Orion」の開発完了。
- 大型打上げロケット (SLS) は、コアステージとエンジン4基の最終試験を実施中。燃焼試験完了後、コアステージをケネディ宇宙センターに輸送してOrionと統合する。SLS/Orionを使用して、2021年にArtemis Iを、2023年にArtemis IIを実施予定。
- 2021年から商業月ペイロード輸送サービス「Commercial Lunar Payload Service (CLPS)」を年2回実施予定。

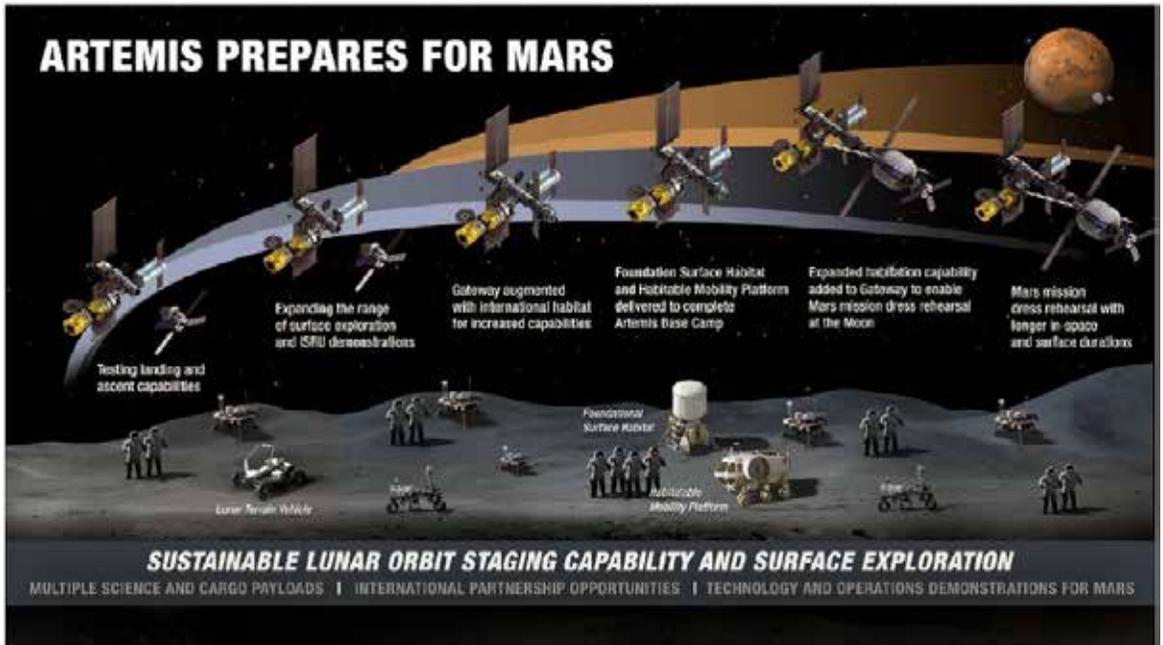


図2 Artemis Base Campの展開（出典資料\*2）

- 2024年にArtemis IIIを実施予定。Orionから有人月着陸システム「Human Landing System (HLS)」に直接搭乗することができるが、HLS搭乗前にGatewayにドッキングする可能性もオプションとして残す。

また、米国は有人探査の主要領域として、地球低軌道、月、火星を設定し「Mars 2020」という火星探査ミッションを実行している。2020年7月には火星探査ローバ「Perseverance」をケープ・カナベラル空軍基地からAtlas Vロケットにより打上げ、2021年2月に火星のクレーター「ジェゼロ」（火星の赤道近く、直径約45km）への着陸に成功した。今後、火星の古代生物の痕跡を探索し、岩石や土壌のサンプルの収集と回収を行う計画となっている。

#### ○ 欧州宇宙機関（ESA）

欧州では2019年11月のESA閣僚級理事会において、ISS／低軌道（有人）、月探査（有人・

無人）、火星探査（無人）を相互に関連する主要領域と位置付け、1）地球低周回軌道の有人活動（ISS計画の継続）、2）地球低周回軌道以遠の有人活動（Gateway計画を中心とした有人月探査計画への参画）、3）無人月探査、4）火星無人探査（Mars Sample Return）の4分野の取り組みが認められた。

2030年までのISS 運用延長方針が示されると共に、ISSの枠組みを通じ、国、宇宙機関及び民間がパートナーシップのもと長期的な持続的可能性を高めていく旨が示された。現在は、ISSにおける商業利用サービス（研究開発目的）の促進や低軌道及び月での商業活動に対する需要喚起等を見据えたビジネス創出の枠組み（BSGN：The Business in Space Growth Network）を構築中である。

ESAはNASAにアルテミス計画への参加の意思を示し、Artemis IミッションのOrionカプセルに結合される欧州サービスモジュール（ESM：European Service Module）を提供した

(発注先はAirbus DS社)。また、科学実験及び物資補給能力を提供するオプションも検討しており、2022年に実施の意思決定を行う計画である。検討には、月近傍輸送機 (CLTV) や現地での科学実験や技術実証を行うペイロードや有人月面探査のための物資などの大型貨物 (1.5~2トン) を輸送できる能力を有した欧州大型補給着陸機 (EL3: ESA's European Large Logistics Lander) が含まれている。

#### ○ ロシア国営宇宙開発企業 (Roscosmos)

ロシア政府は2016年3月に「2016-2025年連邦宇宙計画」を承認し、2030年までに有人月探査を目指すとし、月周回機・着陸機・サンプルリターン機を含む月探査用宇宙機の5機以上の製造を承認している。さらに新世代有人宇宙船の開発も盛り込まれている。

2017年9月には、NASAとRoscosmosは共同声明を発表し、ロシアはGateway計画に関心を表明し、技術的検討に参画することが明らかになった。ただし、2020年10月時点でロシアはアルテミス計画への大規模な参加は控える、との立場をとっている。一方で、2020年7月に、月探査を計画している中国との科学研究基地建設への協力で合意したと発表し、

中国の嫦娥ミッションや国際月面研究基地構想については協力を計画しているとみられる。

この他、火星探査においてはESAと協力し、共同火星探査ミッション「ExoMars 2016」の打上げを実施しており、2020年には「ExoMars 2020」の打上げを計画中であったが、COVID-19の流行により、2022年に延期されている。

#### ○ 中国国家航天局 (CNSA)

中国は、2030年に米国に対抗できる「宇宙強国」になることを目標に掲げている。独自の有人宇宙ステーションの建設を行いつつ、月探査機「嫦娥シリーズ」の打上げやその延長上に月面での国際月面研究基地 (ILRS) の建設を構想、2020年には火星探査機「天問一号」の打上げを行うなど独自の有人宇宙探査計画を進めている。そのための新型有人宇宙船も開発中である。

2004年から独自の月探査計画「嫦娥シリーズ」の開発を進めており、月面探査は中国にとって最重要プロジェクトとして位置づけられている。2013年には月面無人探査機「嫦娥3号 (Chang'e 3)」で月面着陸に成功し、2019年1月には嫦娥4号 (Chang'e 4) ミッションを



図3 月の裏側の月面に着陸した「嫦娥4号」(2019年1月、月面ローバが撮影)  
(出典資料\*3)

成功させ、世界で初めて月の裏側に軟着陸し、玉兔2号 (Yutu-2) ローバを展開した (図3)。

さらに2020年11月、長征5号により、中国初の月面サンプルリターンを目指す「嫦娥5号」の打上げに成功した。嫦娥5号は重量約8トンで、月周回軌道に投入後、必要な部分のみを切り離し月に着陸させた。月面ではロボットアームやドリルなどを使って最大約2mの深さの地中と、地表部分の2種類の土壌を合計で約2kg採取した。さらに月面を離陸した後に、月周回軌道上でドッキング、12月中旬に土壌サンプルを地球まで持ち帰ることに成功している。

中国は、2022年までに独自の宇宙ステーション (CSS : China Space Station) を完成させることを目指している。CSSの基本構造は一つのコアモジュール、二つの実験モジュールから構成されており、各モジュールはいずれも20トン級、合体時の質量は約66トンとなる。CSS事業には、宇宙往還輸送システムと貨物輸送システムも含まれる。CSS建設のため、2年間で12のフライトミッションを予定しており、2021年にコアモジュール「天和」(Tianhe) を長征5号Bで打上げ、以降、実験モジュール「問天」「夢天」、宇宙望遠鏡モジュール「巡天」を順次打上げる予定となっている。

#### ○ 日本 (JAXA)

日本は2019年10月にアルテミス計画への参画を決定し、2020年6月に宇宙基本計画を更新した。Gatewayに有人居住システム提供や補給ミッションで貢献すること、有人月面探査ミッションでは月面での移動手段等でアルテミス計画に貢献するよう国際調整することとし、日本人宇宙飛行士が国際月探査計画で活躍する機会を確保することを目指すとし

た。JAXAの月面移動手段は、有人月面探査を活用することで、有人火星探査ミッションに向けた実証や計画の詳細化が可能となるとしている。

また、2020年7月には文部科学大臣とNASA長官による月探査協力に関する共同宣言 (JEDI : Joint Exploration Declaration of Intent for Lunar Cooperation) に署名を行い、10月には「アルテミス合意 (Artemis Accords)」に萩生田光一・文部科学相と井上 信治・宇宙政策担当大臣が署名を行った。これらの動きを受けて、2021年度の宇宙開発関係分野の予算額は大幅増 (2021年度当初予算額と2020年度第3次補正予算案と合わせて4,496億円、前年度比23.1%増) となった。

2020年12月には、日本政府と米国・NASAの間でGatewayに関する覚書 (MOU) が交わされた。本MOUは、Gatewayの詳細設計、開発、運用及び利用に関する責任を定め、JEDIで確認されたGatewayにおける政府間の法的枠組みが整備されたものとなっている。Gatewayに日本人宇宙飛行士が搭乗することも明記されている。

JAXAでは、宇宙基本計画並びに国際的なロードマップ検討も踏まえ、民間事業者等を含めた多種多様なプレイヤーの参画を想定する「持続的月面活動」の実現に向けて国際宇宙探査シナリオ案を検討し (図4)、2020年3月に「日本の国際宇宙探査シナリオ (案) 2019 (公開版)」を発行した。本シナリオ案は、宇宙基本計画 (月面に関する部分) に則しており、有人活動と科学の両方の目標を設定している。具体的には、目標達成に向け必要なアーキテクチャについて検討・提示しており、後述する4つの重点技術 (「重力天体着陸技術」「重力天体表面探査技術」「有人宇宙滞在技術」「深宇宙補給技術」) も念頭に各分野の技術開発ロードマップをまとめている。

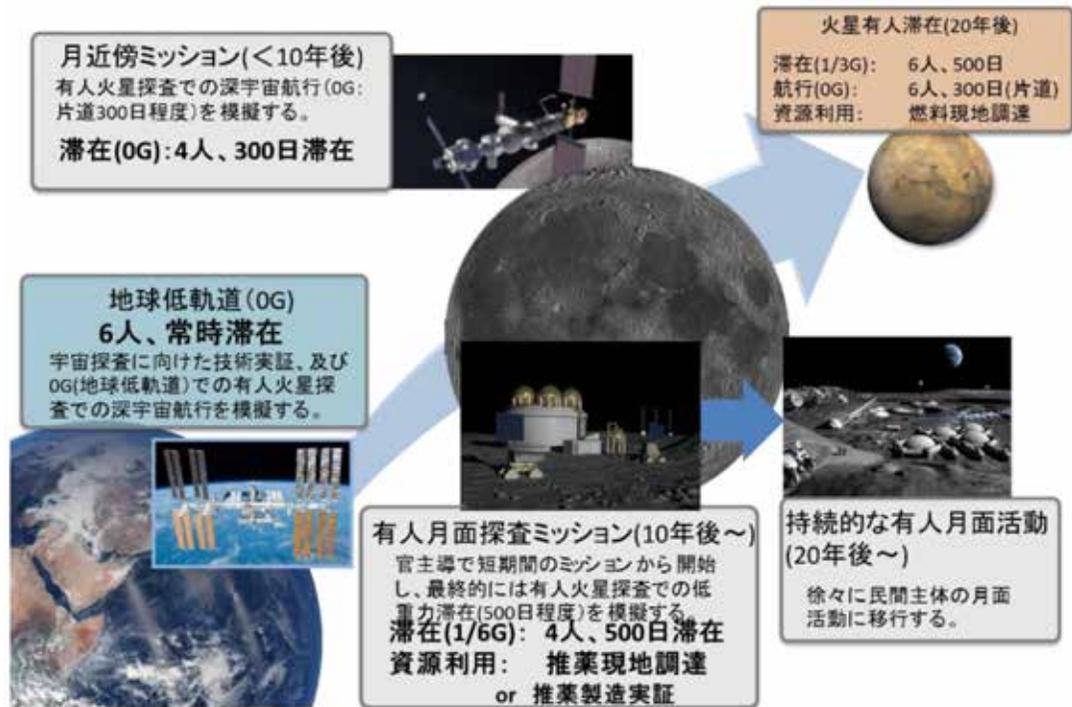


図4 「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2019」について(出典資料\*4)

### (3) ISSを含む地球低軌道の新たな方向性

2018年、ISECGの国際宇宙探査ロードマップ(GER)第3版において、「ISSは宇宙へ人類が進出するための重要な技術を発展させるテストベッド」と位置付けられ、米国でも、2020年4月にNASAが公表した持続的月探査・開発計画「NASA's Plan for Sustained Lunar Exploration and Development」において、「ISS及び新たな商業用設備を探査技術及び新興の商業利用を育成するためのテストベッドとして活用」と記載された。現在の米国におけるISS利用の形態は、1)「研究・技術開発(有人・探査等)―NASA利用枠」、2)「研究・技術開発(科学利用等)―ISS U.S. National Lab.による利用」、3)「非研究開発(商業利用)―NASA利用枠の一部にて実施」の3つに分類される。

NASAは「研究・技術開発(有人・探査等)」の利用を促進するために、2012年からNASA

Research Announcementにより、ISS利用に対する研究機会の公募を行っている。REMIS(Research, Engineering, and Mission Integration Services)では、ISSの研究・エンジニアリングに関する製品・サービス提供(マウス実験、タンパク実験等)を実施する企業16社を選定し、資金投入するとともに、事業化できるよう技術的な支援も行っている。

また、民間企業の参入を促進するために、SAA(Space Act Agreement:有償、無償等の協定)により、NASAがアカデミアや企業と協力して開発や技術移転、利用者の知財保護(利用者の成果占有)を行うことを可能としており、これにより民間業者がNASAのパートナーとして、NASAの設備利用や技術支援を受けること等が可能となる等、柔軟な契約形態を採用している。

さらに、NASAはISS利用促進の取り組みとして、2019年6月に商業利用ポリシーを策

定し、ISSの商業利用を解禁した。持続可能な商業活動に至るまで政府支援の下で民間の利用を支え、民間移行後にNASAが一顧客(One of customers)となるべく商業化を推進していく方針となっている。商業化推進の例としては、商業ポート事業者選定・契約、民間宇宙飛行士ミッション推進に係るSAA(Space Act Agreement)締結、需要喚起に資する利用テーマ選定・資金提供等が挙げられる。ISSの商業利用には、メーカーによる技術や製品の研究開発などの他に、宇宙旅行での滞在やエンターテインメントビジネスでも想定される。NASAはISSに自社モジュールの追加を望む企業からの提案も受け入れており、2020年1月には次世代宇宙探査技術パートナーシップ(NASA's Next Space Technologies for Exploration Partnership)の一環として、米国のベンチャー企業Axiom Space社がISSの商用居住モジュールを構築する企業として選定された。同社は2024年以降に自社の宇宙ステーションを追加で構築し、

ISSの運用終了後には独立して運用することを目指している(図5)。



図5 Axiom Space社の商用モジュールイメージ図(Credit: Axiom Space)(出典資料\*5)

こうした状況の中、米国を中心に民間企業がISSをテストベッドとして、微小重力環境を活かした研究開発や製造、衛星放出や軌道上サービスに関わる要素技術実証、将来的な宇宙旅行や滞在に向けた技術実証、LEO以遠の探査に資する技術実証や人材育成、等の様々な需要喚起および開拓に関わる取り組み

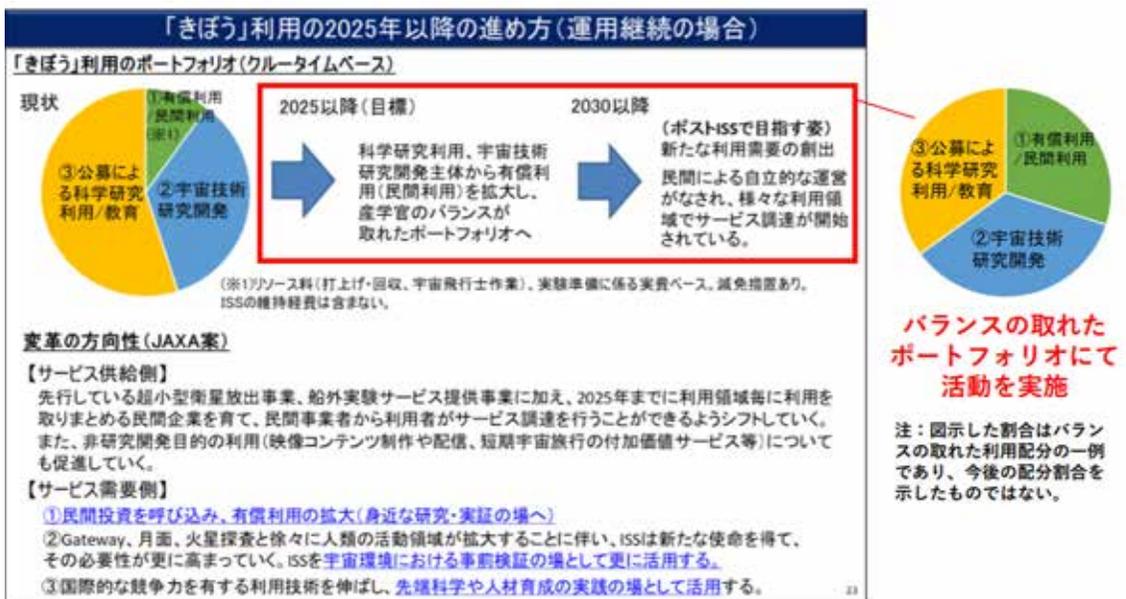


図6 JAXAが示す「きぼう」利用の2025年以降の進め方(出典資料\*6)

を行っている。

日本では、これまで日本実験棟「きぼう」が国・JAXAによって運用されていることが前提となっており、新宇宙探査技術の獲得・蓄積や「きぼう」を実験プラットフォームとして利用するものが主となっていた。一方で、有償による民間利用も進展しており、例えば、創薬ベンチャーとの戦略的なパートナーシップ契約による新薬設計への貢献、衛星間や地上との超高速データ通信に向けた小型衛星搭載用の光通信機器の早期実証、「きぼう」で技術実証された膜展開式軌道離脱装置の民間企業による衛星での実証など、2019年度の有償利用契約件数は2015年度と比較して5倍以上となっている。図6にJAXAが示す「きぼう」利用の2025年以降の進め方を示す。

#### (4) 民間パートナーや民間企業能力活用に向けた取り組み

近年では、宇宙探査は宇宙機関のみで進めるものではなく、台頭しつつある民間企業の能力を活用することが大いに期待されている。NASAでは、アルテミス計画を遂行するために民間の力を最大限活用することを目指しており、下記に示すような民間からのサービス調達を行う方策をとっている。

##### ○ Gateway補給物資輸送サービス (GLS)

NASAはISSへの商業補給輸送サービスプログラムの成功をベースとし、民間パートナーの補給能力を活用しつつ、有人火星探査に向けた技術開発や運用経験の蓄積を行うことを目的として、Gatewayへの補給サービスを行うプログラム (GLS: Gateway Logistics Services) を開始し、2020年3月にGLSを行う初の米国商業プロバイダとしてSpaceX社を選定した。SpaceX社によるGateway補給物資輸送船 (Dragon XL) は、ISSへの商業補給サ-

ビス (CRS) や商業クルー輸送開発 (CCDev) に供する宇宙船Dragonをもとに、Gateway向けに改良版のDragon XLを開発することとなっており、合計の契約額は最大70億ドルとなっている。

##### ○ NASAアルテミス有人月着陸システム (HLS)

NASAは、アルテミス計画で2024年の有人月面着陸を目指す中、要となる有人月着陸システムを民間企業からサービス調達すべく (NextSTEP H: Human Landing System)、2019年9月に公募を開始した。2020年4月、NASAはアルテミス計画で使用するHLS (Human Landing System) 設計・開発を行う米企業3社 (Blue Origin社、Dynetics社、Space X社) を選定した。3社は2021年2月までに着陸システムのコンセプトを洗練させ、NASAはその中から2024年に計画している初回月面着陸ミッションを担当する企業を評価、実証ミッションを実施する予定となっている。最大2社が選定される予定で、選定企業は打上げに向けて開発を継続する。

##### ○ NASAの商業月面輸送サービス (CLPS)

NASAは、民間から月面向けのペイロードを調達するため、2017年12月に商業月面輸送サービス (CLPS: Commercial Lunar Payload Services) プログラムを発表した。CLPSプログラムに採択された企業はNASAが作業発注を公開した際に、ペイロード組立及び運用、地球からの打上げ及び月面への着陸を含め、ペイロード輸送を提案、入札することができる。2018年11月、NASAは本プログラムに採択された9企業を発表し、10年間で契約の総額が約26億ドルになるとしている。無人月探査を計画している民間企業の多くはNASAのCLPS契約への参画を行い、そこからの資金

を元に活動の拡張を計画しているところである。表1にこれらのCLPS契約を通じて、月面探査活動の計画を行っている民間企業のミッションを示す。

(5) 民間企業の取り組み

月探査を計画している民間企業の多くはNASAのCLPS契約への参画による資金提供を元に活動の拡張を計画している。その中で目立った活躍を行っているAstrobotic Technology (Astrobotic社)、Spacebit社、ispaceの取り組みを以下に示す。

○ Astrobotic社の取り組み

Astrobotic社は2008年に設立された米国ピッツバーグに拠点を置く宇宙ベンチャー企業で、惑星着陸機、ローバなどを開発、2007年にスタートした月面探査レースGLXP (Google Lunar X Prize) に参加しており、月面着陸機「Griffin」と月面車「Red Rover」を開発している。

2018年11月CLPSの最初の選定企業9社に選ばれ、CLPSプログラムに参加し、同年5月にCLPSの最初のミッションを受注し2021年7月には同社の月着陸船「Peregrine」で月に科学機器のペイロード(11機器)を輸送予定となっている。

表1 現在計画されている民間の無人月面探査ミッション

ミッション名	開発機関/企業	国	目標年	ミッション	質量、寸法	探査機種類
Baresheet	Space IL	以	2019/2/	月面着陸	180kg(着陸後)	ランダー
月面着陸に挑んだが、降下中にメインエンジンが停止したと見られ、月面に激突してクラッシュした模様						
Peregrine	Astrobotic	米	2021	月面着陸	770kg(ペイロード重量:90kg) 2.5m(幅)×1.9m(高)	ランダー
CLPSの最初のミッション。						
Iris	CMU (Astrobotic)	米	2021	科学調査	1.8kg トースターサイズ	ローバ
カーネギーメロン大学(CMU)とAstrobotic社の共同開発。4つの車輪つき、2台のビデオカメラ搭載。CLPS契約のAstrobotic社の月着陸船Peregrineで送られる。						
YAOKI	Dymon社	日	2021		0.6kg、2輪型 15cm×15cm×10cm(高)	ローバ
CLPS契約のAstrobotic社の月着陸船Peregrineで送られる。車輪とカメラを組み合わせたシンプルな設計						
ASAGUMO	Spacebit	英	2021		1.3kg 4足歩行	ローバ
CLPS契約によりAstrobotic社の月着陸船Peregrineで送られる。将来的に、月面の地下にあると推測される溶岩チューブ内の探査を目指しており、岩が多い地形に適した移動方法として、四足歩行を採用						
Nova-C	Intuitive Machines	米	2021	月面着陸	ペイロード重量:100kg	ランダー
CLPSの2番目のミッション						
—	Spacebit	英	2021		車輪付きローバ	ローバ
CLPS契約によりIntuitive Machines社の月着陸船Nova-Cで送られる。ASAGUMOの母船としても活用される。						
Masten-XL1	Masten Space Systems	米	2022	月面着陸	ペイロード重量:100kg	ランダー
CLPSの3番目のミッション						
MoonRanger	Astrobotic CMU	米	2022	月南極の水氷探査。月面3Dマップ作製	18kg スーツケース大	ローバ
CLPS契約のMasten Space Systemsの月着陸船XL-1で送られる。高速移動が可能で1日に1000mの移動が可能。						
Griffin	Astrobotic	米	2023	月面着陸	ペイロード重量:475kg 4.5m(幅)×2.0m(高)	ランダー
CLPSの4番目のミッション。NASAのVIPERローバを搭載する。						
HAKUTO-R	ispace	日	2022/2023		ランダー重量:340kg (ペイロード重量:30kg) 2.6m(幅)×2.3m(高)	ランダー ローバ
独自のランダーとローバにより2022年に月面着陸と2023年に月面探査の2回のミッションを計画中。Falcon 9で打上げ予定。						

## ○ Spacebit社の取り組み

Spacebit社は2014年に設立された英国ロンドンに拠点を置く宇宙ベンチャー企業で、宇宙関連のデータ分析ツールや、AIと最先端マイクロロボティクスなどの活用を含む、ロボットによる宇宙探査関連の開発に加え、将来的には多数の探査機を月面に輸送・配置し、収集データを地球へ送信することを計画している。収集データとして想定しているのは、具体的には溶岩チューブの内部の3D形状などのデータである。

2019年9月Astrobotic社がCLPS契約を行っているPeregrineミッション（2021年打上げ予定）用に、月探査用歩行型ロボット「ASAGUMO」の第一号を納品する合意書を締結、同年12月、日本のダイモン社と相互に連携して月面探査を実施する事で合意、2020年10月、2021年の第四半期に月面に輸送される予定のIntuitive MachinesがCLPS契約を行っている着陸船「Nova-C」に車輪付きローバを搭載する契約を獲得している。

## ○ ispaceの取り組み

株式会社ispaceは日本で月面資源開発ビジネスを手掛けるベンチャー企業である。

2010年9月に設立され、現在は日本、ルクセンブルク、アメリカの3拠点で活動を実施。2020年8月までに累計135.5億円の資金調達を実施し、現在は民間による「月面着陸」と「月面探査」の2つのミッションを行うプログラム「HAKUTO-R」に取り組んでおり、SpaceX社のFalcon 9ロケットで2022年と2023年に打ち上げ予定となっている。ispaceはまた、NASA向けの月面着陸機輸送サービス（CLPS）を提供するため、米国を拠点とする宇宙専門組織のDraper研究所と提携している。

ispaceは2022年に月面着陸ミッション（Mission1）、2023年に月面探査ミッション（Mission2）を予定している。2024年以降のMission3-9ではランダーの月面着陸とローバーでの月面走行を実現するとしている（図7）。

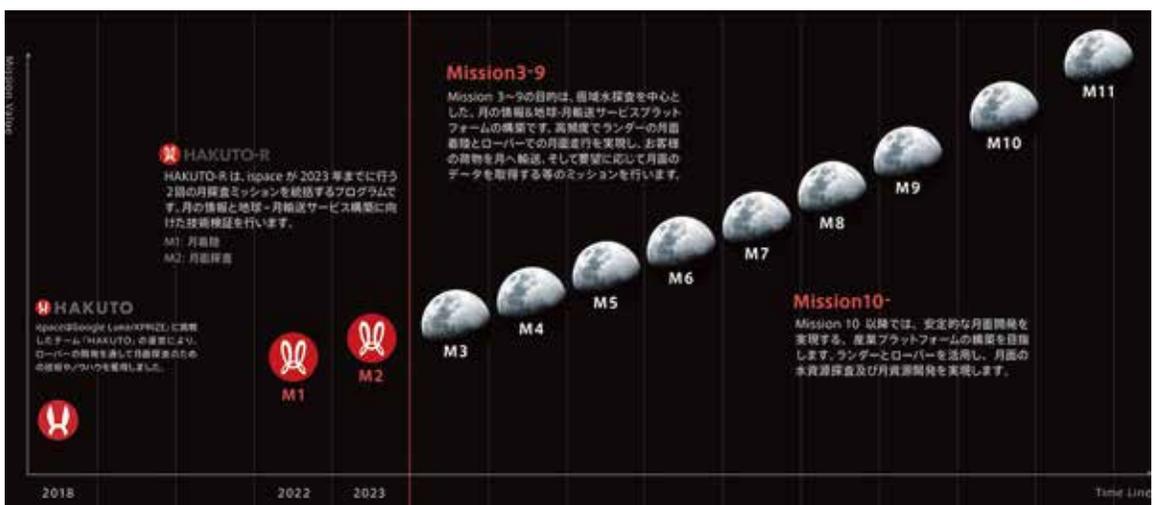


図7 ispaceのミッション計画図（Credit：ispace）（出典資料\*7）



図8 過去10年間と今後10年間の宇宙探査ミッション数の比較 (出典資料\*8)

(6) 2020年～2030年の宇宙探査の見通し

欧州のEuroconsult社が公表する過去10年間と今後10年間の宇宙探査ミッションの比較を示すと、過去10年間に実施されたミッションが52件であったのに対し、今後10年間には約130件のミッションが実施されると予想されている。うち月探査ミッションが40%を占める(図8)。宇宙探査分野への世界政府の投資額は2019年に約200億ドルに達し、さらに2029年までに300億米ドルに増加すると予測されている。その中で月探査は今後10年間の政府投資額の増加率が最大の予測となっている(図9)。

2. 月惑星探査の最新シナリオに対応する技術動向

(1) 月惑星探査の最新シナリオに対応する技術と開発動向・適用事例等

月惑星探査の最新シナリオに対応する技術については、「日本の国際宇宙探査シナリオ(案)2019(公開版)」に示されている。本書はISECGの国際宇宙探査ロードマップ(GER)第3版のシナリオをベースにしているが、2019年に米国が表明した2024年までに有人月

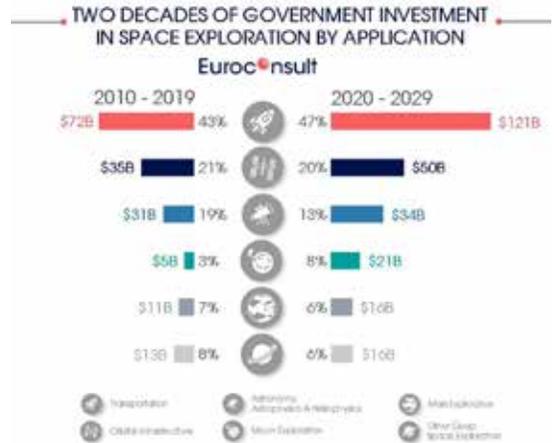


図9 宇宙探査分野への過去10年間と今後10年間の政府投資額の比較 (出典資料\*8)

着陸を行う計画に対応していないため、本書に記載の内容に日本を含む各国の最新の研究開発状況や適用事例等の最新情報を加え整理した。

○ 着陸・離陸技術

着陸技術は、着陸する天体・場所、着陸機の規模、着陸精度要求などに応じて、必要となる技術が異なる。図10に典型的な月着陸のシーケンスと必要となる技術を示す。なお火星探査の際は、大気を利用した減速や空気力を利用した誘導飛行(空力誘導)を利用して、周回軌道の投入や目標とする着陸地点への到達する際に必要となる推進系の推進剤重量を大幅低減することが可能となる。この他、今後の探査では、サンプルリターンや有人ミッションなど、天体から地球へ帰還することも必要であり、その際には離陸技術が重要となる。

世界の着陸探査の実績としては、米国、ロシア、中国が無人での着陸、ロシア、中国が無人での離陸、米国が有人での着陸・離陸を成功させている。火星探査については、米国のみが着陸を成功させているが、未だ離陸は

行っていない。また中国が2020年に打上げた探査機でも2021年に着陸に挑戦する予定となっている（後日追記：2021年5月14日着陸成功）。欧州はExoMars2016で着離技術実証を行う予定である。さらに民間では、NASAのCLPSミッションにおいて無人着陸機とBlue Origin社、Dynetics社、Space X社の有人着陸機の開発が行われているところである。

一方で、日本では「はやぶさ」において同技術についての実績があるが、重力天体に着陸した実績はない。今後SLIMでは重力天体の着陸技術を実証予定となっている。

### ○ サンプルリターン技術

サンプルリターンでは、対象天体への接地もしくは着陸（近接による採取も含む）を行い、サンプルを採取し離脱後に地球まで帰還する。過去より無人探査機でサンプルを採取する手法として様々な方式が検討されてきており、重力天体表面でのサンプル採取はロー

バに搭載されたマニピュレータによる採取が代表的であるが、ローバによるサンプルリターンミッションは世界でも過去に例がなく、その場観測するためのマニピュレーション技術のみとなっている。微小重力天体に関しては、重力天体とは条件が異なり、着陸せずともタッチ&ゴー方式（はやぶさ方式）や、ホバリングによって表面からある高度を保った状態でも採取できるため様々な方式が提案されている。

有人サンプルリターンとしては米国のアポロシリーズがあるが、無人でサンプルリターンを実現した事例は旧ソ連のルナシリーズ3件、米国のジェネシス、スターダスト、日本のはやぶさと例が少なかったが、2020年11月には中国が月面サンプルリターンに初めて成功し、同年12月には日本もはやぶさ2による地球近傍小惑星「リュウグウ」への着陸およびサンプルリターンに成功した。

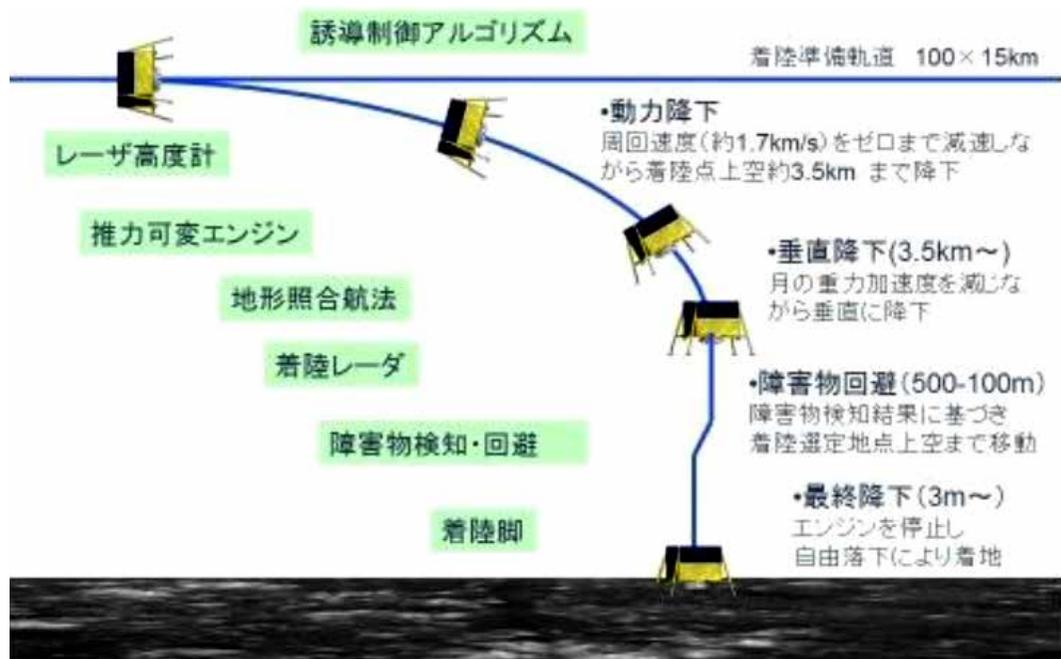


図10 月着陸シーケンスと必要となる技術（出典資料\*4）

## ○ 探査技術（電力）

発電については、月・火星とも太陽からの距離が比較的近く、太陽電池で実用的な発電量を確保できるが、重力があるため従来の無重力を前提としたパドルやその展開機構を直接流用することはできないため、重力の存在を加味した太陽電池の構造を実現する必要がある。

蓄電については、月面では中・低緯度はもちろん極域であっても、太陽電池による発電が期待できない夜間に電力を供給する電源システムが必要となる。電源候補としてはLIB（Lithium Ion Battery）、RFC（Regenerative Fuel Cell）、RPS（Radioisotope Power Source）、FPS（Fission Power Systems）が挙げられるが、有人拠点の実現には日陰の長さや日照強度によらず高い出力密度が得られるFPSが必要とされている。

蓄電デバイスについてはLIBとRFCがメインであるが、近年では電解液が無く、安全性が高いこと、温度耐性が高いことから全固体LIBが注目されている。現時点のエネルギー密度は液LIBと比較してかなり低いが、電気自動車等に向けて研究開発投資が進められており、2025年頃には液LIBと同等のエネルギー密度にまで高められ宇宙用途としても多く用いられるものと考えられる。

## ○ 探査技術（表面移動技術）

表面移動技術は、着陸後の人や物の移動機能を提供するとともに、各種作業を実施するための作業プラットフォームとしての基本機能を提供し、非宇宙産業（自動車、建設、資源探査／利用、物流、ロボット業界等）の参入が期待され、地上技術との相乗効果も期待できる。ローバ、作業車両は多くの国が重要課題として進めており、国際的に激戦分野である。月・火星のローバでは米・ロ・中に実

績があり、後続では欧州、インド等で取り組みが進んでいる。有人ローバは米のアポロの月面車（LRV）のみである。またローバの検討は地上研究としては盛んに行われている。

JAXAでは2023年にインド宇宙研究機関（ISRO）と共同で実施する計画の月極域探査ミッション（LUPEX）において重力天体表面探査技術の獲得を目指している。さらに月面有人ローバとしては、JAXAとトヨタ自動車が2019年度から燃料電池車両技術を用いた月面でのモビリティ「ルナ・クルーザー（LUNAR CRUISER）」を開発している。

その他民間でも規模が小さいものが多いものの、宇宙探査ローバに関する計画が示されているところである。

## ○ 探査技術（分散協調探査）

宇宙探査においては、いくつかの探査ロボットが月惑星の表面探査を実施しているが、1台のロボットでは探査範囲が限られているのが現状である。1台のロボットで移動探査を行う場合には線と線を結ぶ探査とならざるをえず、生命探査など面的な探査を行うのにはギャップがある。そこで小型探査機を複数配置して、分散協調型探査を行うことが、今後の新しい探査方式の1つとなっている。分散協調探査を実現するための重要技術として、知的センサを有する複数の小型探査機が広い領域を均等に分散し、お互い協調しながら効率的な探査を行う分散協調技術や月・火星表面の中央丘峰、クレーター内、縦孔底、洞窟、極域等のいままでの探査ロボットでは不可能な未踏峰探査を行う革新的移動技術等が必要であるとしている。

## ○ 滞在技術（ECLSS）

ECLSS（Environmental Control and Life Support System）（環境制御・生命維持システ

ム)は、あらゆる有人宇宙活動の根幹となる人の生命を安全に維持するための技術であり、極めて高い信頼性が要求される。また、特に火星などの長期探査ミッションでは、補給が困難となるため、信頼性のみならず、高い再生率、消耗品不要など、高効率化したシステムが必要となる。

現在のISSでは水再生装置などにより補給量削減の試みがなされているが、システムの信頼性が低いため稼働率が低く、高信頼性・高効率なECLSS技術が切望されている。火星などの長期探査ミッションにおいて、水・酸素補給や消耗品が不要で、かつ高い信頼性を有する完全再生型ECLSSを確立するためには、水・酸素補給ゼロ、消耗品ゼロ、高信頼性を実現していく必要がある。そのためには、再生率90%以上(尿85%以上、凝縮水ほぼ100%)の水再生、廃棄物処理による水回収、空気再生における水追加生成(CH<sub>4</sub>分解によるCO<sub>2</sub>の分解100%化)の技術が必要とされる。

水補給量低減については、ISS計画参加の各機関が技術開発を進めている。既にISSで水再生処理を実用化しているNASAが先行しており、現時点で水の補給割合は約15%である。NASAは今後現在の技術をベースに改良を進め、最終的にはCH<sub>4</sub>のアセチレン化(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)により、CO<sub>2</sub>を75%まで分解する計画であり、最終的には水の補給割合を1~2%にまで低減できる見通しである。JAXAは、現時点ではまだ水再生・空気再生の技術確立段階であるものの、最終的にはCH<sub>4</sub>分解により、CO<sub>2</sub>を100%分解し、C(炭素)のみを廃棄する計画であり、水補給はゼロまで低減できる見通しである。

#### ○ 滞在技術(健康管理)

健康管理技術とは、宇宙飛行士に起こりう

る身体的・精神的な悪影響を防ぐように努め、影響の有無を確認し、悪影響が起こった場合はそれに対処することができるようにする技術のことである。ISS計画においては、ISS搭乗宇宙飛行士の健康管理運用は、各参加宇宙機関で統合運用を行うとされているが、当該運用で使用される健康管理用の機器や薬品、手法などは原則としてNASAとRoscosmosが提供している。将来の有人宇宙探査における宇宙飛行士健康管理運用もISSと同様に国際協調で実施されることが想定されるが、その際に用いる機器や薬品・手法などの一部を提供できるようになることが望ましいとされる。

#### ○ ランデブ・ドッキング技術

ランデブ・ドッキング技術とは、宇宙空間に存在する目標物体に接近、結合、分離、離脱などを行う技術の総称であり、宇宙活動にとって必要不可欠な技術である。今後の宇宙探査ではランデブ・ドッキング技術を要する様々なミッション(深宇宙居住モジュールへの物資補給、ECLSSモジュール輸送、有人支援サンプルリターン/有人月面探査、火星衛星サンプルリターン、火星周回居住モジュールへの物資補給、有人/無人火星探査)が想定されており、ランデブターゲットの協力/非協力性や、ランデブ運用を行う空間のダイナミクス、地球との可視性・通信遅延の有無に、柔軟に対応可能なランデブ技術が求められる。今後想定される深宇宙/火星周回居住モジュールや火星衛星とのランデブミッションにおいては、ダイナミクス環境の違いや通信制約等に対応するため、安全で堅牢な深宇宙航法や誘導制御技術等の獲得が必要となっている。

深宇宙航法技術に関しては、米国のASC社がFlash式の3次元距離画像センサ(3D

LIDAR) を実用化し、スペースX社の宇宙機DragonのランデブドッキングセンサとしてDragon-Eyeを供給した他、NASAの開発した小惑星サンプルリターン探査機OSIRIS-RExの着陸直前の近距離用センサとして、さらに耐放射線性を向上し高感度化を図ったGolden-Eyeが搭載されている。

誘導制御技術に関しては、これまでダイナミクス環境に対応した誘導制御アルゴリズムは確立されていなかったが、2020年12月、中国が月周回軌道において、月探査機「嫦娥5号」の上昇モジュールと軌道モジュールと帰還モジュールの結合体とのランデブ・ドッキングに成功している。

その他ISSにおいては、米国とロシアがそれぞれ独自のドッキングシステム（衝撃型）を有しており、NASAのスペースシャトル、ロシアのProgressとSoyuz宇宙船がそれぞれのドッキングシステムを採用してドッキングを行った。また、ESAのATV宇宙船はロシアのドッキングポートへのドッキングを行うため、ロシア式のドッキングシステムに対応したドッキング技術を獲得している。日本はETS-VIIにより、独自のドッキング機構に対する相対6自由度制御および低衝撃型ドッキングの技術を確立しているが、現在のISSドッキング機構や、開発中の国際標準ドッキング機構のような衝撃型ドッキングについては実用的な運用実績を持たない。

現在、ISSに参加する5機関で、ドッキングシステムの国際標準化が進められており、米国のISS民間有人輸送船は、この標準化ドッキングシステムを採用して運用を行う予定となっている。

## ○ 通信技術

宇宙探査における通信の特徴は、遠距離に伴う高遅延、高伝搬損失、ネットワークのルー

トが宇宙機や天体の軌道運動により流動的に変化する点等が挙げられる。このような宇宙探査の通信における特徴を踏まえ、必要性能や実用化が望まれる新たな技術としては、大容量のリアルタイム通信の実現、地球-月あるいは惑星間との中継技術、高ロバスト通信技術、地上局技術、惑星間インターネット技術（国際的な標準規格への対応等）、測位技術が挙げられる。

宇宙探査をはじめとして、宇宙に関わる通信技術はNASAにてリードされており、その開発のロードマップはNASA SCA N (Space Communication and Navigation) にて作成されたTechnology Roadmapに示されている。

大容量通信については、光通信に関する開発項目の識別、開発計画が示されており、挑戦的な目標という位置づけで100Gbpsに近づくことが示されている。

## (2) 日本が優位と考えられる技術と課題

日本が優位と考えられる技術については、文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会の下に設置された「国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会」で検討されている。2015年7月に同委員会において文部科学省としての考え方を「第2次とりまとめ ～宇宙探査新時代の幕開けと我が国の挑戦～」として発表し、日本がこれまでにISS計画を通じて得た技術や宇宙科学探査の知見を活かして獲得・蓄積してきた4つの重点技術（「重力天体着陸技術」「重力天体表面探査技術」「有人宇宙滞在技術」「深宇宙補給技術」）が特定されている。

2017年12月には「国際宇宙探査の在り方～新たな国際協調体制に向けて～」がまとめられており、4つの重点技術の早期実証にJAXAを中心として取り組むことが示されている（表2）。

表2 日本が優位性を発揮できる技術や波及効果の大きい技術 (出典資料\*9)

技術	意義・必要性	優位性	非宇宙分野での統合・地上技術への波及効果	他国との比較
深宇宙補給技術 (ランデブ・ドッキング技術等)	ランデブ・ドッキング (RVD) 技術は、月近傍地点での燃料補給や月面着陸設備の注進など、将来の探査アーキテクチャで必須の共通技術要素であり、国際標準に合致した安価なシステムの開発で、海外展開も期待できる。	HTVの開発・運用で獲得した技術を発展させ活用することが可能。	●RVD画像センサ技術→(地上)自動運転車・自動建設機械、ドローンなど	ランデブ技術 日本は、HTVで実績有。米・露・欧・中と同等レベル。 ドッキング技術 日本は、有人ドッキング方式を現在研究中。米・露・欧・中は実績有。
有人宇宙滞在技術 (環境制御技術等)	宇宙空間において、人の生命を安全に維持するキーテクノロジーであり、有人宇宙活動における根幹的・共通的な技術。特に水・空気の高再生率は運用コスト削減の鍵。	「きぼう」の開発・運用を通じて獲得した技術や、地上における環境浄化技術等を発展させ活用することが可能。	●環境制御技術→(地上)環境浄化技術 ●省・節減、免疫低下等への対策技術、放射線防護、遠隔医療 → (地上)高齢者医療、国民の健康向上・福祉、介護問題解決など	・米・露・中はISS等で軌道上実績有。 ・欧は、空気再生技術を実証予定。 ・日本は、来年以降順次ISSで軌道上実証予定 (独自方式で大幅なリソース削減を実現)
重力天体着陸技術 (高精度航法技術等)	重力天体の探査に必須であり、特に特定の位置へのピンポイントでの着陸技術は、競争性の高い領域への着陸に必須の技術。	「はやぶさ」で獲得した地形照合航法技術や、SLIMで実証するピンポイント着陸技術等を発展させ活用することが可能。	●高精度航法→(地上)自動車の急降物検知・回避技術 ●着地技術→(地上)自動車・航空機などの衝撃吸収技術	・米・露・中は実績有。 ・日本は、はやぶさでの実績有。SLIM(2021年度)で重力天体の着陸技術実証予定 ・欧は、露との共同で着陸ミッションを予定。
重力天体表面探査技術 (表面移動技術、掘削技術、水分析技術、等)	表面移動技術は、重力天体の継続的かつ広域な探査活動を行うために必須。掘削・水分析探査技術は、将来の宇宙探査の切り札を大きく左右する月資源(特に水)探査を行うために必須。	宇宙探査イノベーションハブで開発が進められているものも含め、我が国が世界をリードする非宇宙分野の技術(建設技術、資源抽出技術、センシング技術、ロボット技術、自動運転技術等)を発展させ活用することが可能。	●表面掘削→(地上)建設機械の自動走行・自動操作技術、自律型ロボット・遠隔型ロボット ●その場分析→(地上)質量分析計等 ●月面走行→(地上)自動車の路面把握・障害物検知、自動運転、悪路・未舗装道路走行技術	・米・露、中は実績有。ただし、露は1980年以前の実績。 ・欧は実績はないが、露との共同ミッションでドリルや水分析装置を提供予定。 ・日本は軌道上実証に向け、研究中。

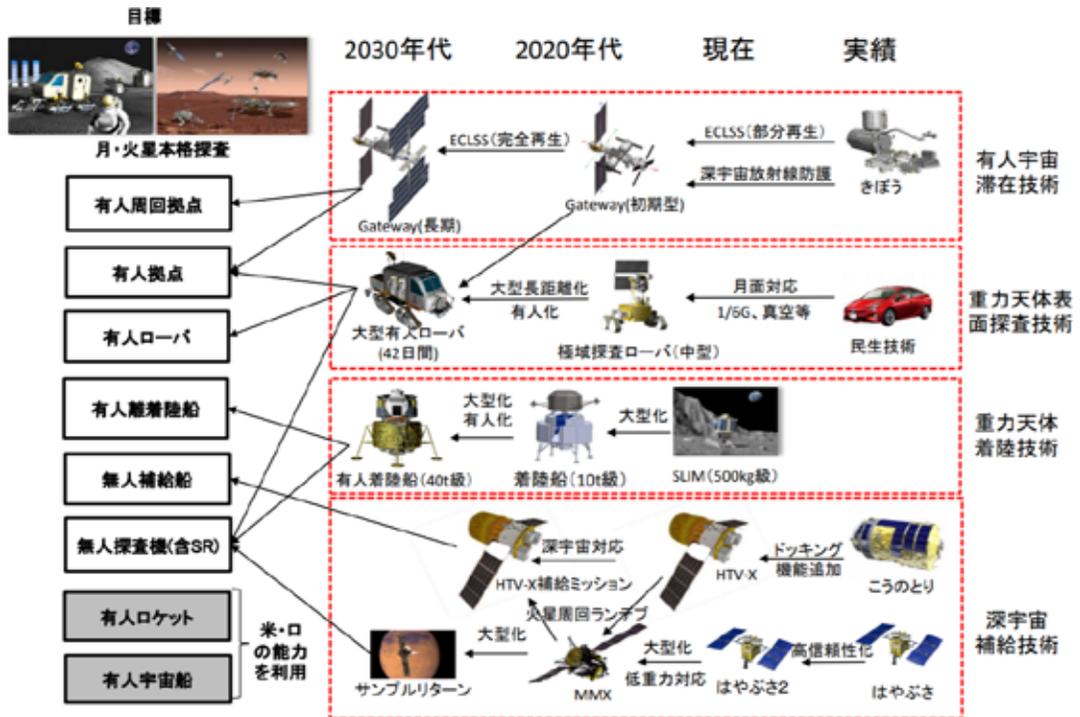


図11 月・火星本格探査を支える技術のバックキャスト (出典資料\*10)

これらの重点技術に対する課題については、2020年8月に「国際協力による月探査計画への参画に向けて」で検討されている。具体的には、国際宇宙探査の目標を月・火星の本格探査、そのために必要なミッションを「有人周回拠点」「有人拠点」「有人ローバ」「有人離着陸船」「無人補給船」「無人探査機」として、これらのミッションを達成するために2030年代、2020年代における技術課題が何か、実績と現在の状況はどうであるかについて重点技術毎に示されている（図11）。引き続き、これらの技術課題に対する検討を行い、4つの重点技術の獲得に繋げることが重要と考えられる。

以上が本報告書の概要である。今回の調査によって、月惑星探査の新たな方向性として、米国を先行としてISSを含む低軌道利用の商業活動に対する需要喚起やビジネス創出の動きが加速していることがわかった。一方で、現在ロシアはISSから脱退し独自の宇宙ステーションを建設する意向を示し、中国は2022年の独自の宇宙ステーション完成を目指して開発や打上げを進めている状況にあることから、令和3年度の次世代宇宙プロジェクト推進委員会では、引き続き「月惑星探査に関する調査」をテーマとして、各宇宙機関におけるISS・低軌道利用の最新動向に関して深掘り調査を行う予定である。また、今年度開催する同委員会では、令和2年度及び令和3年度の調査報告に加えて、参加者からの月惑星探査に関する多数の情報提供や率直な意見交換も図りたいと考えている。

当会員企業の皆様には、同委員会への積極的な参加をお願いできれば幸いである。

#### 出典資料

- \*1. 国際宇宙探査協働グループISECG, “国際宇宙探査ロードマップ 追補版最新月面探査シナリオ”, 2020年8月
- \*2. “NASA’s Plan for Sustained Lunar Exploration and Development”
- \*3. China National Space Administration/China News Service/VCG via Getty Images
- \*4. JAXA国際宇宙探査センター 宇宙探査システム技術ユニット, “日本の国際宇宙探査シナリオ（案）2019（公開版）”
- \*5. <https://www.axiomspace.com/axiom-station>
- \*6. 「ISSを含む地球低軌道活動の在り方について（その1）」JAXA、2020年9月（宇宙開発利用部会、ISS・国際宇宙探査小委員会資料37-3-2）
- \*7. <https://ispace-inc.com/jpn/project/>
- \*8. “Prospects for Space Exploration 2020 Edition”, Euroconsult
- \*9. 「国際宇宙探査の在り方 ～新たな国際協調体制に向けて～」2017年12月、文部科学省宇宙開発利用部会ISS・国際宇宙探査小委員会
- \*10. 「国際協力による月探査計画への参画に向けて参考資料」2020年8月（宇宙開発利用部会、ISS・国際宇宙探査小委員会資料50-3-2）

〔(一社)日本航空宇宙工業会 技術部（宇宙担当）部長 古川 力〕