

科学成果に向けた アルテミス計画における取り組み

令和2(2020)年9月18日

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所／国際宇宙探査センター

1. アルテミス計画参画における科学の取組み

1. 経緯

- 宇宙科学・科学探査の国際宇宙探査への貢献のあり方及び国際宇宙探査の機会の活用策等、国際宇宙探査における宇宙科学・科学探査の位置付けについては、昨年からは、宇宙科学・探査小委員会においてご議論を頂いてきた。
- 特に、火星や火星以遠の探査まで見据えた、日本としての取組み分野や機会活用、科学的意義については、ISASとコミュニティが協力して整理することが提言された。
- これを受け、2019年12月には、「日本のアルテミス計画参加に向けた理学的・工学的検討」報告書(案)がまとめられ、理工アカデミア・メンバーによるレビューを実施。
- 2020年1月、同報告書及びExecutive Summaryを完成し、内容は、2月の宇宙科学・探査小委員会にて報告された。また、それに対応する方向性についてもご報告した。

2. 取組みの状況

- 上記報告書を踏まえた取組みの状況について、以下の分野を中心に報告する。

(1) Gatewayプログラム

(A) Gatewayプログラムの進捗

(2) Gateway実現に伴い月探査が活発化することを見据えた取組み

(B) 月周回軌道利用促進の施策

(C) NASAのアルテミス計画と呼応する月面探査ミッションの企画検討

(D) 月面データサイエンスの整備

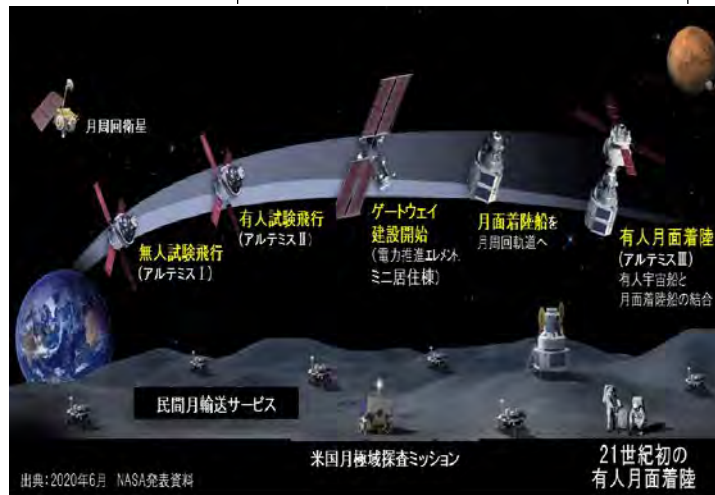
2. 各取組の状況：①Gatewayプログラム

(A) Gatewayプログラムの進捗

- Gatewayは、2023年から建設開始予定。利用開始に向けた国際調整がGateway利用調整パネル(GUCP)にて、進められている。 ※GUCP:ISS参加極を中心とした暫定的な会議体
 - ✓ ISSと異なり、利用容積・リソースは各極共有で、予めの配分は無い。
- Gateway利用の基本的な考え方(テーマ選定の考え方等)について、「文部科学省宇宙開発利用部会 国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会」で議論が進められている。
 - ✓ Gateway特有の環境の活用、月面やISSとの相乗効果、国際的な優位性・波及効果
- 初期のGateway利用については、開発要素の少ない機器の搭載を前提に国際調整が行われている状況。国際的に協調してテーマ公募を行うこととなる見込み。【次頁参照】
- また、利用の本格化に向けて、日本から国際競争力を持った提案を出せるよう、JAXAでは今年度後半(予定)に調査検討を行うべく準備を進めている。

最初のモジュールであるミニ居住棟(HALO)と電気・推進モジュール(PPE)のみの最小限の構成

国際居住棟(I-HAB)やロボットアームの増設後、[Gateway利用が本格化](#)



2024年



2020年代中頃

Gateway本格運用開始

2020年代後半

持続的な月面探査本格化

PPE（船外）

①放射線パッケージ（ESA設置）

- ・将来の有人滞在に備えGateway軌道の放射線被ばく量を計測する。

②太陽物理パッケージ（NASA設置）

- ・太陽風などの宇宙天気を観測する。

HALO（船外/船内）

<船外>

- ・EXPOSE-G(宇宙生物学研究用の試験装置)※¹実験を予定。試料採択は国際的に協調した研究公募※²となる見込み（調整中）。
- ・日本国内では国内コミュニティ向けの公募等を経て、JAXAから試料提案をGateway利用調整パネル（GUCPに提案予定）。

<船内>

- ・微生物学研究※³を国際協力で実施する予定。研究内容は国際的に協調した研究公募※²を通じて決定となる見込み（調整中）。
- ・それ以外の研究領域についても、小規模な研究提案を国際的に協調した研究公募※²を通じて決定となる見込み（調整中）。

その他、レトロ・リフレクタ（月ミッションの多くに搭載実績あり）の搭載をNASAが提案（調整中）。

※¹ EXPOSE実験：これまでスペースシャトル（ESPOSE-E）やISS（EXPOSE-Rシリーズ）にて様々な試料に対し船外曝露試験を実施（ESA開発）。

※² 研究公募：国際的に協調して各国が国内向けに公募を発出し、応募内容をJAXAでとりまとめ、Gateway利用調整パネル（GUCP）に提案し全体協議。公募及び選考方法は検討中。

※³ HALOの他、補給船の船内、HLS、Orionにも搭載検討中。

2. 各取組の状況 ②Gateway実現に伴い月探査の活発化を見据えた取組み(1/4)

(B)月周回軌道利用促進の施策

- 民間及びアカデミアのニーズに応えるべく、以下を目指して、月周回へ超小型衛星を輸送、放出するシステムとして、「月周回軌道利用促進プログラム」(仮称)のシステム検討を実施中。

①月探査・月利用に必要な共通インフラ的サービス(月周回軌道上)の構築

②定期的な機会の提供による、多様かつ継続的な利用者の創出

(民間事業、大学教育、JAXA)

③月周回への輸送サービスパッケージの構築

超小型衛星の搭載機会の提供等により
大学等での人材育成への寄与も目指す

「月周回を中心とする超小型探査機
ミッションに関する情報提供要請」
(2019年11月発出)

学術界・産業界から60件超の提案を受領

(提案のあった主な領域等)

- ミッション共通の基盤インフラ、基盤技術の実証(通信、測位、推進、電源、データ処理等)

- ①輸送系:GTOから月周回・月面までのキックモータ
- ②通信・測位:地上局~GEO中継~月遷移・月周回・月
- ③電源:越夜向け、固体電池
- ④ミッション共通で使えるコンポ・部品:カメラなど

- 月周辺、月面環境の調査:水氷、放射線、ダスト、帯電、重力など
- 先鋭的な科学ミッション(工学系)
- 先鋭的な科学ミッション(理学系)

本年2月5日第36回宇宙科学・探査小委員会で報告。

「月周回軌道利用促進プログラム」(仮称)【検討中】

【目的】

- ✓ 持続的な月探査の実現を目指し、定期的な月周回ミッションの機会を提供するための、月周回軌道への輸送と軌道上プラットフォームの提供

【実施形態】

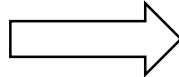
- ✓ 民間企業からサービス調達することを想定。
- ✓ JAXAは、プラットフォームを利用して宇宙探査シナリオの実現に必要なミッションを実施する。
- ✓ プラットフォームの利用(放出機能も含む)は、大学等アカデミア、民間企業等のミッションへの機会提供も目指す
- ✓ 2023年度以降に初回ミッションを目標(その後複数回のミッションを実施した後に、民営自立化を目指す)

- ◆ ロケットおよび月周回投入機で月周回軌道に投入する。
- ◆ 月周回投入機は、軌道上プラットフォームとして超小型探査機(ペイロード)を分離する機能および、ペイロードが搭載されたまま技術実証や観測を行う場合のリソース提供等の機能も有する。

(C) NASAのアルテミス計画と呼応する月面探査ミッションの企画検討

- SLIMで獲得するピンポイント着陸技術に続いて、水資源の利用可能性の観点及び重力天体での表層移動探査技術をも実証する場として、月極域は有望。
- 極域での水氷資源探査計画に搭載する観測機器に関する提案要請(RFP)を実施済、機器の開発仕様の確定に向けて提案採択者との共同研究により概念設計を実施中。
- NASAは、「商業月利用サービス」(CLPS)/月極域探査ローバ(VIPER)並びに継続的な有人極域探査による、月面モビリティを使った広域多地点の観測やサンプルリターンを計画しているところ、ミッション内容や装備する観測機器についても今後NASAと検討・調整を進める予定。

1. 月極域探査ミッション:観測機器の提案募集と機器選定

- 2020年2月、月極域探査ミッションのための観測機器提案について公募を開始し、産学官より10件の応募を受領。
(宇宙理工学委員会・国際宇宙探査専門委員会からの推薦者を含むJAXA内外の専門家9名で評価を実施した)
- 同4月24日、提案3件を本プリプロジェクトにて採択 
- 海外機関から提供を受ける機器は以下の通り。
 - ④地中レーダ(ISRO) ⑤中性子検出器(NASA)
 - ⑥表層分圧計(ESA)
- 上記の採択機器が必要とするシステム機器として、①②の前段機能となる「⑦熱重量分析計」と「⑧表層温度計」をJAXAが開発しシステムに取り込む。

【採択した提案】

- ① レーザー微量水分・同位体分析装置
(山中千博/大阪大学)※1、※2
- ② 多反射リフレクトロン型TOF質量分析計
(齋藤義文/ISAS)
- ③ 近赤外画像分光装置
(佐伯和人/大阪大学)※2、※3

- ※1 条件付き採択。リソースとの整合を確認した後、搭載可否を判断する計画
- ※2 宇宙探査イノベーションハブの研究成果を活用した提案
- ※3 SLIM搭載機器の派生型

月極域探査ミッション(続き)

2. JAXA開発観測機器の検討状況

- JAXA開発観測機器(①レーザー微量水分・同位体分析装置、②多反射リフレクトロン型TOF質量分析計、③近赤外画像分光装置、⑦熱重量分析計、⑧表層温度計)については概念設計を進めており、本年度後期中に開発する業者の選定を完了し、その後基本設計フェーズに移行する予定である。

3. サイエンスコミュニティとの情報共有(関連事項)

- 「月極域での水資源探査」は、「月への揮発性成分(特に水)の供給過程の理解」という学術テーマとの共通性が高いこと、並びに各搭載機器による科学観測項目を踏まえ、サイエンスコミュニティとの対話を図りながら、探査計画を推進している。
- 月極域の水の利用可能性に関する情報や月極域の水の存在量と具体的な存在形態に関する情報をまとめ、その担い手(資源利用コミュニティ)に対しシームレスに繋げるのと同時に、サイエンスコミュニティからの要望も踏まえてデータ共有を進めることを検討中。
- 学会活動等におけるサイエンスコミュニティとの対話
 - ✓ (本年7月)地球惑星科学連合大会:プロジェクト進捗や観測機器等の検討状況について複数報告済。
 - ✓ (本年10月)宇宙科学技術連合講演会でも、複数の発表を予定。
 - ✓ (検討中)月極域探査に関するオンライン・ワークショップ開催(本年秋頃の実施を計画中)。

【補足②】 月極域探査機の観測要求と観測機器の対応

■ 観測機器公募の提案全10件を評価し、3件(内1件を条件付き)を採択した。

観測要求／機器の特徴 選定機器 赤：採択、青：条件付き採択	(i)月表面の水の存在確認	(ii)掘削せずに地中1-1.5mの水素又は水の存在確認	(iii)採取したレゴリス中の水分子の存在	計測対象と特徴
【JAXA】③近赤外画像分光装置 (大阪大学)	○		○	<ul style="list-style-type: none"> 近赤外波長域の水や水酸基に関する吸収形状を観測し、氷の存在を検出する。 光源を持つため日陰領域での水検出ができ、土壌中の氷の存在形態(地質学的な情報)が判別できる。 最表面に氷や揮発性分子が存在するかどうかを観測し、可視近赤外リモートセンシングデータと比較検討できる。
【JAXA】水資源分析計 (①②⑦の統合機器) ②多反射リフレクトロン型TOF質量分析計 (ISAS) ①レーザー微量水分・同位体分析装置 (大阪大学) ⑦熱重量分析計			○	<ul style="list-style-type: none"> 掘削採取した土壌に対し、⑦を用いて温度と質量の相関を計測し、①②を用いて加熱により発生する揮発性ガスを分析することにより、水濃度や水分子の存在形態、土壌の含水量、水以外の揮発性ガス(メタン、二酸化炭素など)の量が分かる。 土壌の含水量0.5wt%以上であることが識別できるよう、0.1wt%程度の精度で検知する。
【NASA】⑤中性子検出器	○	○		<ul style="list-style-type: none"> 銀河宇宙線と土壌の月物質の衝突によって生成する中性子を観測し、月表層から2m深さまでの月地下にある0.5wt%以上の水相当の水素やその存在形状を検出する。 掘削地点選定のため、移動しながら非接触で観測可能。
【ISRO】④地中レーダ(JAXA要求を取り込んだ共同仕様)		○		<ul style="list-style-type: none"> 地下に放射された電磁波が媒質中の誘電率変化に応じて一部反射することを利用し、受信した電磁波の強度と伝達時間から地下構造を把握する。 分解能約10cm程度で地下の含水部の水平分布を評価でき、また地下の岩塊や断層等の有無を検出できる。 掘削地点選定のため、移動しながら非接触で観測可能。
【ESA】⑥表層分圧計 【JAXA】⑧表層温度計			データ取得環境条件の確認	<ul style="list-style-type: none"> 表層および掘削位置の圧力(分圧)、温度を各観測機器の計測時における環境データとして測定し、観測データの補正や評価等に用いる。
【ISRO】ラマン/X線分光計 (水資源探査以外の観測機器) ※搭載機器全体の許容リソース次第で搭載するかどうかを確定予定。				<ul style="list-style-type: none"> 採取試料の化学組成が分かる。 月表層/採取試料の鉱物組成が分かる。

【補足③】 月極域探査ミッションにおける観測シーケンス

1. 疎観測

- ⑤中性子検出器 (NS) はローバ走行中常時観測。
- 疎観測開始位置から③近赤外画像分光装置 (ALIS) により撮像領域を撮像。
- 次の撮像領域までローバ移動、移動と同時に④地中レーダ (GPR) で地下構造観測を実施。
- 次の撮像領域までローバ移動後、停止して③ALISにより撮像領域を撮像
- ③ALISと④GPRによる観測を繰り返す、ウェイポイント領域を探査。
- 充電位置までローバ移動し、掘削する詳細観測地点と移動経路分析を実施。

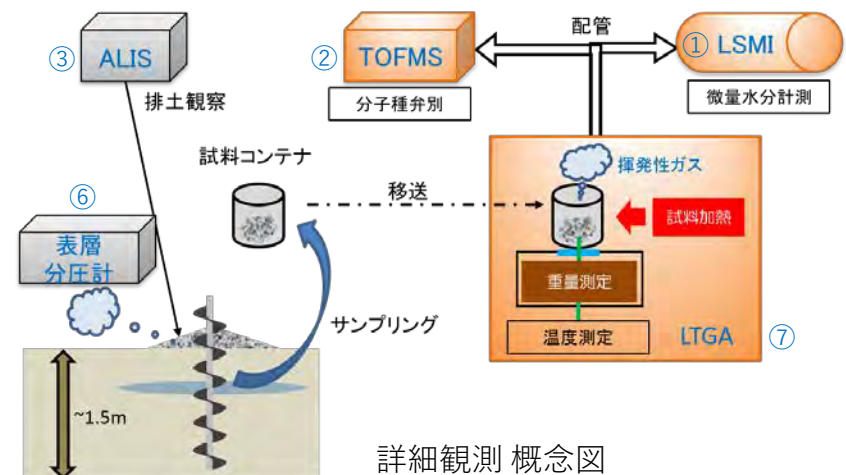


2. 詳細観測

- 掘削地点にローバ移動。
- ③ALISにより掘削地点撮像、同時に⑥表層分圧計と⑧表層温度計で月表面の揮発性成分の分圧および温度を測定する。
- 表層レゴリス試料を採取し、試料コンテナへ移送
- レゴリス試料を充填した試料コンテナを試料加熱位置に移送。
- レゴリス試料を加熱すると同時に、⑦熱重量分析計 (LTGA) で試料コンテナの重量と温度を測定。
- レゴリス試料の加熱により生じた揮発性ガスを②多反射リフレクトロン型TOF質量分析計 (TOFMS) で分析。
- レゴリス試料の加熱により生じた揮発性ガスを①レーザー微量水分・同位体分析装置 (LSMI) で分析。
- 試料加熱終了後、試料コンテナを返送し、レゴリス試料をローバ外へ廃棄。
- ローバの掘削機構により月面を25cm掘削、同時に⑥表層分圧計と⑧表層温度計で月表面の揮発性成分の分圧および温度を測定する。
- 掘削により生じた排土を③ALISで撮像。
- 深さ25cmからレゴリス試料を採取し、試料コンテナへ移送。
- 上記を繰り返す、25cm間隔で1.5mまでの掘削試料を分析 (分析は掘削位置個所につき、最大7回実施)
- 充電位置へローバ移動、もしくは次の掘削地点へ移動。



疎観測 概念図



詳細観測 概念図

2. 各取組の状況 ②Gateway実現に伴い月探査の活発化を見据えた取組み(4/4)

(D) 月面データサイエンスの整備

- データサイエンス分野の研究者との共同研究を進め、新しい惑星探査技術を開発を目指した以下の取組みを推進中。技術の応用先を探している他分野の研究者との連携により、新しい視点からの成果創出を目指す。
- 特に、惑星探査を題材とするビッグデータ分野との連携のポテンシャルも高いため、これを拡大し宇宙科学コミュニティでの普及を検討中。

① 月極域探査ローバの経路探索アルゴリズム開発

- 日照・通信の時間変化と傾斜、障害物解析結果を考慮し、探査経路を自動設計。

② 進化計算による着陸地点組み合わせ最適化(東工大との共同研究)

- 月南極付近で複数の地点で日照を確保・電力無線伝送できれば、長期間の探査が可能。
- 地点間の距離が遠すぎず通信可視性を保つという制約の強い問題に有用な新たな進化計算による探索。

③ AIを利用したボルダー自動検出(会津大との共同研究)

- 着陸地点の障害物検知・観測対象探索のため必要なボルダー検出では、最高解像度の画像で広範囲に渡る手作業には限界があり、自動検出アルゴリズムの開発が不可欠。

④ AIを利用した月面影領域の自動検出(産総研との共同研究)

- 月極域におけるスペクトルマップ作成には影を取り除く必要があり、AIを使った影除去により高速・高精度な極域地図作製が可能。

⑤ 相互マッチングによる月極域DEMの高精度化

- 着陸地点検討には高精度な地形モデルが必要だが軌道誤差に起因するノイズが多いため、軌道間相互マッチングにより軌道誤差を修正。

参 考

【参考①】ISSとGatewayの利用規模の違い

1) 全体概要比較

※ リソース：軌道上で使用されるスペース、電力、通信、クルータイム等のこと

	ISS	Gateway (NASA検討中)
居住空間	9モジュール	2モジュール (HALO, I-HAB)
物資補給フライト	8フライト程度/年	1フライト/年
宇宙飛行士の滞在	常時滞在	年に10~30日程度滞在 (残りは無人)
国際協力の考え方	各国の貢献比率に応じてリソースを配分	各国への予めのリソース配分はない 必要な作業に対するリソースを都度調整



2) 利用に関する概要比較

	ISS (「きぼう」の場合)	Gateway (調整中の内容)
利用リソース	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 貢献比率に応じて日本に配分されたりリソースを使用 ➤ 利用に使用されるクルータイムはISS全体 (露側含む) で3500時間/年程度 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 利用に割り当てられる限られたリソースを参加極間で共有し、共同ミッションとして計画調整したうえで利用 ➤ 利用に使用できるクルータイムは~90時間/年 (~3時間程度/日)を想定 ※JAXA推定による
利用エリアの考え方	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 「きぼう」の一部を、日本の利用エリアとする。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 利用エリアを各国で共用。(各国専用の利用エリアは無い。)
利用設備環境	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 日本の利用エリアは、JAXAが実験インタフェースや設備 (実験装置) を整備 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 現時点でGateway運用側による設備 (実験装置等) の整備予定なし
利用実験操作	<ul style="list-style-type: none"> ➤ クルーによる操作を前提にできる 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ クルー不在中は遠隔操作が必要

【参考②】 ISSとGatewayの利用比較—実験設備環境—

実験設備環境	ISS (米日欧合計)	Gateway(概念検討中)
<p>利用空間 (船内)</p> 	<p>大型ラック(数百kg規模) ; 33台分</p>  <p>(うち日本の権利はきぼう内のラック5台分)</p>	<p>ドロワ(数十kg規模) : 16個分 (概ね、ISSでの大型ラック2台分に相当)</p>  <p>(各極への権利配分は定めない)</p>
<p>利用空間 (船外)</p>	<p>ペイロード取付(数百kg規模)が22カ所</p>  <p>(うち、日本の権利はきぼう船外の5台分)</p>	<p>ペイロード取付(数十kg規模)が7カ所</p>  <p>(各極への権利配分は定めない)</p>

※現時点で参加極間で共有しているものであり、Gateway開発の進展によって変更される可能性がある。