



世界の月探査ミッションの動向とKDDIの月面での通信環境構築に向けたロボットによる基地局アンテナ設置実証

KDDI株式会社 先端技術企画本部 エキスパート **矢羽田 大揮**



1. はじめに

近年、世界各国の宇宙機関による月関連のミッションが多く計画されている。例えば、NASA (National Aeronautics and Space Administration: アメリカ航空宇宙局)、JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency: 宇宙航空研究開発機構) などが、国際協調で進めている月探査プログラムであるアルテミス計画や、中国が中心となり計画が進められているILRS (International Lunar Research Station: 国際月面研究基地) が挙げられる。また、2023年9月には、JAXAが打ち上げたSLIM (Smart Lander for Investigating Moon: 小型月着陸実証機) が世界で5番目となる月着陸に成功、越夜も果たすなど、日本国内でも月探査が盛り上がりを見せている。今後、月面でのミッションの増加が見込まれる中、月面で求められる通信要求もリアルタイム映像伝送や大容量データの伝送など、多種多様となることが想定される。本稿では、月面探査の成功の鍵となる月面での通信環境構築の必要性と課題、KDDIとGITAI USA Inc.^[1] が共同で行ったロボットによる無人の基地局アンテナ設置実証について記載する。

2. 世界の月面探査ミッションの動向

米国は、将来の火星探査を見据え、その前段階の位置付けとして、月に人類を再び送り、持続可能な活動を目指す月面探査プログラムであるアルテミス計画を世界各国と協調しながら進めている。アルテミス計画では、1961年から1972年にかけて実施された人類初の有人月面着陸を実現したアポロ計画とは異なり、月軌道上に新たな月周回有人拠点 (ゲートウェイ)、居住可能な月面基地を建設し、持続的な月面探査が行われる予定である。また、これまでの月周回衛星からの観測データの取得により、月極域に水や希少鉱物が存在する可能性が示唆^[2]されており、アルテミス計画における月面探査ミッションでは資源探査による月の起源などを理解する科学的意義及び鉱物採取による経済的価値の創出が期待されている。

アルテミス計画の最初のミッションであるアルテミス1は、2022年11月に行われ、無人のテスト飛行を行い、月面周回飛行に成功した。現在、有人の月周回飛行を予定している

アルテミス2、1972年のアポロ17号以来の有人月面着陸ミッションとなるアルテミス3に向けて、ロケット、着陸船等の探査システム開発が進められている。

日本は、2019年10月にアルテミス計画に参画^[3] ^[4]することを決定し、JAXAがISS (International Space Station: 国際宇宙ステーション)、HTV (H-II Transfer Vehicle: 宇宙ステーション補給機) などで培った技術を生かし、ゲートウェイへの環境制御・生命維持システム、補給機を提供する予定である。また、2024年4月には、日米間で合意した有人と無人による月面探査の実施取決め^[5]により、日本は、宇宙飛行士が宇宙服を着用せずに生活可能で、広域かつ長期的な月面探査が可能となる月面探査車である有人と無人による月面探査を提供することが決まった。これらにより、日本は、日本人宇宙飛行士のゲートウェイ搭乗機会及び日本人宇宙飛行士の2回の月面着陸の機会提供が規定された。また、ISRO (Indian Space Research Organization: インド宇宙研究機関) と協力し、月の南極域の水資源に関するデータの取得を目指すLUPEX (Lunar Polar Exploration: 月極域探査機) ミッションが進められている。JAXAは、将来の月探査に向けて、宇宙開発利用加速化戦略プログラム (スターダストプログラム) の中で、月探査における基盤となる測位・通信システムの総合アーキテクチャ及び月測位衛星システムや月-地球間の超長距離通信システムに関する検討をしており、KDDIも本検討に参画している^[6]。そして、日本が取り組む月面での宇宙科学探査の3つのテーマ (月面3科学) として、「月面からの天体観測 (月面天文台)」、「重要な科学的知見をもたらす月サンプルの選別・採取・地球帰還」、「月震計ネットワークによる月内部構造の把握」が設定されており、JAXAを中心に検討が進められている。

ESA (European Space Agency: 欧州宇宙機関) は、アルテミス計画で利用される宇宙船「Orion」のESM (European Service Module: サービスモジュール)、ゲートウェイのI-HAB (International-Habitat: 国際居住モジュール)、ゲートウェイのESPRIT (European System Providing Refueling Infrastructure and Telecommunication: 燃料補給・観測窓・通信モジュール) を提供する。また、月周回衛星5機で構成されるコンステレーションを活用した月-地球間の高

速通信及び月測位を提供する「Moonlight Lunar Communications and Navigation Services (LCNS)」やESA独自の月輸送手段の確立を目指す「Argonaut」なども発表しており、月探査におけるESAの役割が拡大している。

中国の月探査計画である「嫦娥計画」は、これまで、6回のミッションを行っており、世界3番目となる月面着陸に成功、世界初の月の裏側への着陸及びサンプルリターンを達成するなど、大きな成果を上げている。また、2030年までの有人月面着陸及び2030年後半のILRS建設などの構想も発表しており、月面での長期的滞在や科学研究を国際的な協力の下、進める予定で、米国のアルテミス計画と並び、国際的な月面探査の重要な役割を担うことになる。

インドの月探査計画は「チャンドラヤーン」と呼ばれ、ISRO主導により、これまで3回のミッションが行われている。2023年に打ち上げられたチャンドラヤーン3号は、世界で初めて、月南極域への着陸（月面着陸は世界で4番目）を成功させ、月面観測のほか、将来のサンプルリターンを見越し、月着陸船のエンジンを噴射し、約40センチ上昇し、30～40センチ離れた場所に安全に着陸するホップ実験（hop experiment）も実施し、月面から離陸できることを証明するなど、近年の月面探査において、重要な役割を果たしている。

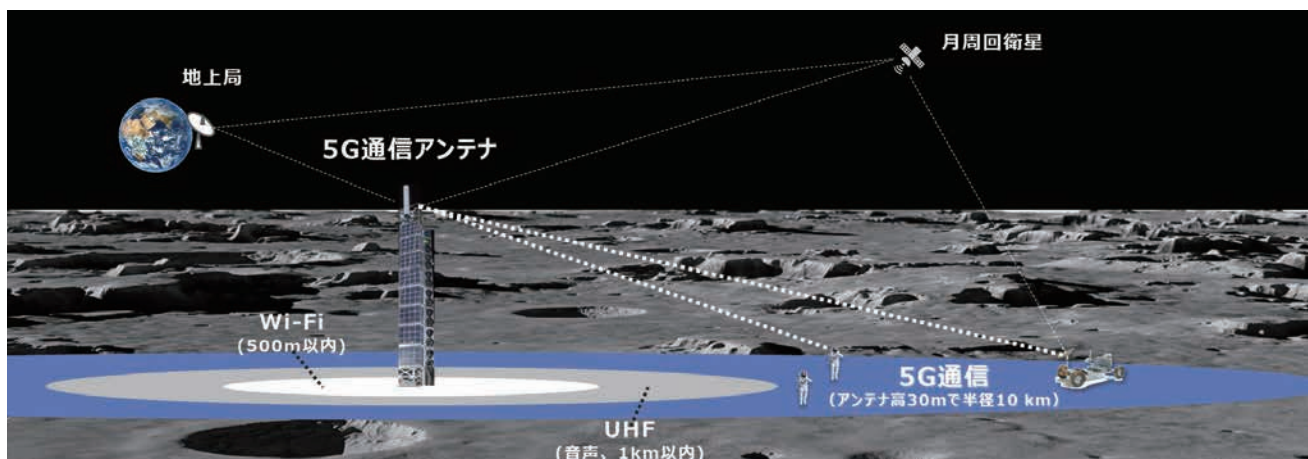
民間企業の月ミッションも増加している。株式会社ispaceは、2022年に日本初の民間主導で月面着陸を試み、惜しくも着陸には失敗したものの、大きな成果を上げた。2024年度中にはMission2も予定しており、成功が期待される。また、米国では、サービス調達による民間企業の活用が盛んに行われており、アルテミス計画において宇宙飛行士を月面に着陸させるHLS（Human Landing System：有人月着陸システム）や月へペイロードの輸送するCLPS（Commercial

Lunar Payload Services：商業月面輸送サービス）などでは複数の民間企業が選定され、サービス提供に向けて開発が行われている。

このように世界各国で月関連ミッションが計画され、各国が国際協調として、複数の通信インフラが整備されることが想定されるため、相互運用性の担保が必要不可欠となる。この規格としてNASAが中心となり検討しているLunaNet^[7]、ISS構成国で作成したICSIS（International Communication System Interoperability Standards）^[8]、IOAG（Interagency Operations Advisory Group：宇宙機関間運用諮問グループ）のThe Future Lunar Communications Architecture^[9]などがある。また、月面上及び月面-月周回軌道間で使用する周波数帯については、現状、RR（Radio Regulations：無線通信規則）に定められておらず、2027年に開催予定のWRC-27（World Radiocommunication Conferences：世界無線通信会議）に向けて新たな周波数帯を規定すべく、各国間で技術評価・調整が進められている。KDDIも日本代表団の一員として関連会合に出席している。

3. 月面での通信環境の構築と課題

前章で記載した米国が計画しているアルテミス計画では、宇宙飛行士が月面に降り立ち、日本の有人と圧ローバー、米国のLTV（Lunar Terrain Vehicle：有人曝露ローバー）を活用した広範囲な月面探査が行われるほか、将来的には月面基地の建設も想定されており、持続的な活動が予定されている。また、有人探査だけではなく、無人ローバーによる科学探査も数多く予定されている。こうした月面での探査活動においては、4K/8Kのリアルタイム映像伝送や、



■ 図1. 月面におけるモバイル通信環境（イメージ）



月面で取得した大容量の科学データの伝送など、活動拠点域内での大容量通信の提供が必要となる。現状、NASAは、「Moon to Mars Architecture^[10]」のホワイトペーパーの中で、月-地球間の通信として、地上局を活用した直接通信、月周回衛星を活用した中継通信、月面無線通信（UHF、Wi-Fi、セルラー方式等）を想定している。

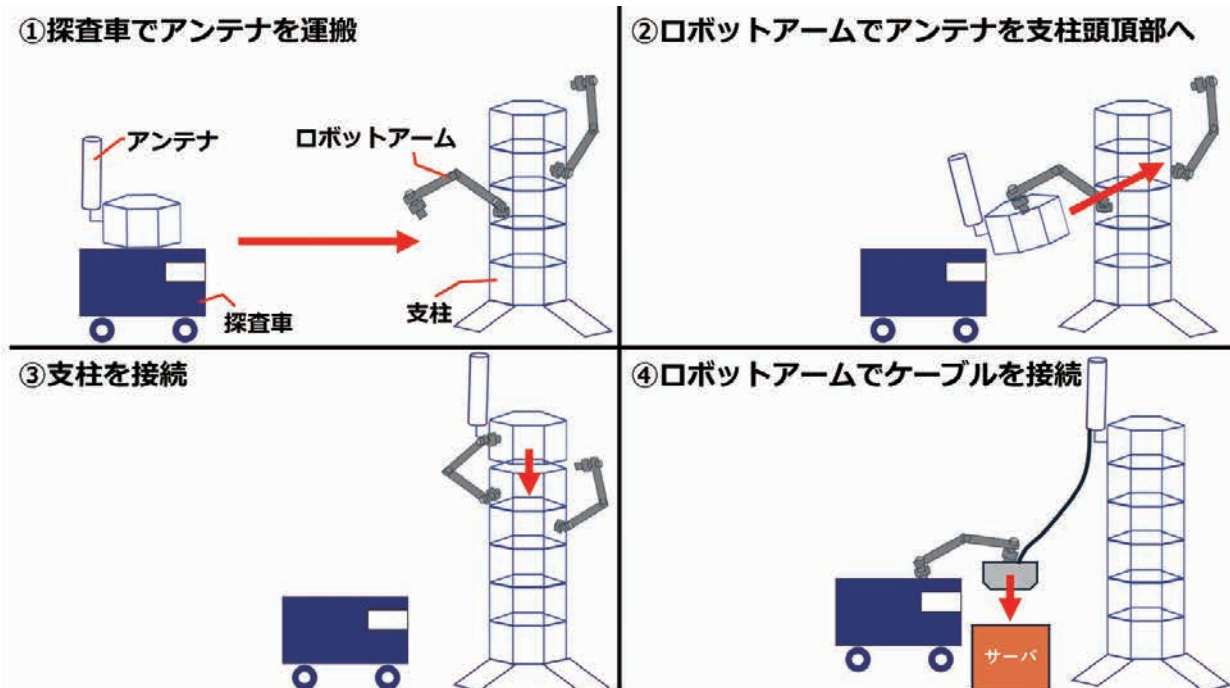
月面無線通信は、有人と圧ローバーの探査範囲が最大半径10kmと広範囲であることから、各規格の通信距離を考慮し、セルラー方式（4G / 5G）を活用することが検討されている（図1）。また、広範囲をカバーするためには、可能な限り高い場所にアンテナを設置する必要がある。アンテナ設置にあたっては、地上の既存技術の活用を前提とするが、月面は放射線量が地球上の200倍、気温がマイナス170℃から110℃まで変化するなど過酷な環境である。また、大小の起伏やクレーター、レゴリスと呼ばれる土壌が存在する等、地上とは大きく異なっており、地上のように重機や人手による基地局設置は安全面や費用面でも現実的ではなく、ロボットによる無人での基地局設置が必要不可欠となる。一方で、地上で利用している基地局の機器は有人設置前提で設計されており、ロボットのみで基地局設置が可能な支柱やアンテナなどを開発するために、既存の支柱やアンテナの構造や工法にかかる課題を明らかにする必要がある。

4. 月面模擬環境での地上実証

前章の課題を解決するために、ISSでロボットの自律作業を成功させた実績のあるGITAIと地上でのモバイルネットワーク構築の知見があるKDDIが、基地局を無人設置するための手法の検討及び無人設置可能な機器の開発を目指し、共同で2023年12月に米国にてロボットで基地局アンテナを設置する実証を実施した^[11]。

本実証では、月面で無人によるアンテナ設置が可能なアンテナの構造・工法に関する課題を明らかにするために、地上のアンテナをGITAIのロボットが取り扱えるのか検討、最適な形状・手順についてトレードオフし、その結果を基にモックアップを作成の上、実証を行った。なお、本実証では、無人によるアンテナ設置及びケーブル接続にフォーカスし、アンテナとコネクタの形状・大きさを対象とした。

実証では、月面模擬環境にあらかじめ設置していた5メートルの支柱まで、探査車（GITAIローバー）がアンテナを運搬し、2台のGITAIアーム型ロボットが、アンテナを支柱頭頂部まで持ち上げ、支柱に接続、GITAIローバーに接続されている別のGITAIアーム型ロボットが、アンテナのケーブルを接続し、通電を確認した。その後、GITAIアーム型ロボットにて、ケーブル及び支柱頭頂部のアンテナの取り外しを行った（図2）。アンテナの設置及び取り外し双方とも成功した。



■図2. ロボットによるアンテナ設置イメージ

5. おわりに (今後の課題)

今後、アルテミス計画をはじめとして多くの月面ミッションが予定されており、これらのミッションにおいては、広範囲に高速大容量通信が求められることが予想される。一方、月面に無線通信環境を構築することには、月面特有の環境に起因した多くの課題が考えられ、地上で行われている人手による設置は困難である。本実証では、無人でのアンテナ設置の可能性を検証するため、ロボットで設置可能なアンテナの構造・工法について検討し、地上にて実証を実施した。今後の課題として、本実証で検証した工法を基に実際の月面環境での使用や輸送に耐え得る詳細な、支柱・アンテナの構造・工法を確立・検証するとともに、アンテナモジュールの小型化・省スペース化などによる輸送コストの削減や機能のトレードオフなどを行い、最終的な仕様を検討する必要があると考えている。

KDDIは、KDDI VISION 2030『「つなぐチカラ」を進化させ、誰もが思いを実現できる社会をつくる。』の実現を目指し、月面モバイルネットワークの構築を通して人類の新たな活動領域を開拓する宇宙機関や民間企業の支援に向けて取り組んでおり、本実証の成果と、地上でのモバイルネットワークインフラの構築に関する知見を最大限活用し、お客さまへ高品質な通信サービスを提供することで、アルテミス計画に貢献していくことを考えている。

参考文献

- [1] GITAI USA Inc. (<https://gitai.tech/>)
- [2] Study Reveals Map of Moon's Water Near Its South

- Pole (<https://www.nasa.gov/solar-system/study-reveals-map-of-moons-water-near-its-south-pole/>)
- [3] 民生用月周回有人拠点のための協力に関する日本国政府とアメリカ合衆国航空宇宙局 (NASA) との間の了解覚書 (https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/press24_000084.html)
- [4] 月周回有人拠点「ゲートウェイ」のための協力に関する文部科学省と米航空宇宙局の実施取決め (https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/space/jigyou/detail/1347482_00011.htm)
- [5] 「与圧ローバによる月面探査に関する文部科学省と米航空宇宙局の実施取決め」への署名 (<https://humans-in-space.jaxa.jp/news/detail/003923.html>)
- [6] JAXA『「月面活動に向けた測位・通信技術開発」に関する検討』の委託先に選定 (<https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2022/01/11/5802.html>)
- [7] LunaNet Interoperability Specification (<https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/lunaret-interoperability-specification/>)
- [8] ICSIS (https://internationaldeepspacestandards.com/wp-content/uploads/2024/02/communication_reva_final_9-2020.pdf)
- [9] The Future Lunar Communications Architecture (<https://www.ioag.org/Public%20Documents/Lunar%20communications%20architecture%20study%20report%20FINAL%20v1.3.pdf>)
- [10] Moon to Mars Architecture (<https://www.nasa.gov/moontomarsarchitecture/>)
- [11] 月面での通信環境構築に向け、ロボットによる基地局アンテナ設置に成功 (https://newsroom.kddi.com/news/detail/kddi_pr-1148.html)

国際航海を行う船舶局に必須の書類 好評発売中！



-New!-
船舶局局名録
2024年版



-New!-
海上移動業務及び
海上移動衛星業務で使用する便覧
2024年版



海岸局局名録
2023年版

お問い合わせ: hanbaitosho@ituaj.jp

