

月近傍における通信のための周波数の確保について

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 周波数管理室 市川 まり



1. はじめに

月に再び宇宙飛行士を送り、月面に滞在して持続的な探査活動を行うことを目指す米国主導の計画である「アルテミス計画」等を踏まえ、今後、世界各国において、月探査をはじめとする活動が大きく進展していくことが予想される。しかしながら、「月面上及び月周回軌道（月を周回する軌道であり、月が地球を周回する「月の軌道」とは異なるもの。）と月面間」（以下、月近傍）の通信において、利用可能な周波数帯は非常に限られており、今後の月近傍での活動の進展には対応しきれなくなる懸念があった。このような状況を踏まえ、2023年11月20日～12月15日に開催された、2023年世界無線通信会議（WRC-23）において、次回の2027年世界無線通信会議（WRC-27）の新議題として、月近傍における通信のための周波数の新規分配に関する議題（議題1.15）が採択された。そこで、本稿では、本議題の採択の背景及び経緯、今後の技術検討への取組み等について、ご紹介をさせていただきます。

2. アルテミス計画について

「アルテミス計画」とは、米国が提唱する月面への有人着陸に関するすべてのプログラムの総体であり、2025年以降に月面に人類を送り、その後、ゲートウェイ（月周回有人拠点）計画などを通じて、月に物資を運び、月面拠点を建設し、月での人類の持続的な活動を目指すものとなっている。

「アルテミス計画」に参加するためには、「すべての活動は平和目的のために行われること」などの原則を規定した「アルテミス協定（Artemis Accords）」（「アルテミス合意」とも呼ばれる。）に署名する必要がある。日本は、米国、英国、オーストラリア、カナダ、イタリア、ルクセンブルク、アラブ首長国連邦とともに、2020年10月13日に最初にアルテミス協定に署名を行っているが、最新の状況としては2024年10月25日時点で、47か国が署名済みとなっている。

アルテミス計画では、産業界との連携を重視しており、民間の宇宙航空企業等も参加している。

この「アルテミス計画」の実現に向けて、同計画の参加機関による月ミッションが増大していくことを踏まえ、これらの通信のための周波数の確保が必要となった。

3. LunaNetについて

「アルテミス計画」による月近傍での活動の活発化に対応し、米国航空宇宙局（NASA）、欧州宇宙機関（ESA）及び国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）により、月通信・測位の国際的な標準フレームワークであるLunaNetの開発が進められており、LunaNet Interoperability Specification（LNIS）と呼ばれる標準文書を作成し、公開してきている。

LunaNetでは、月面でインターネットと同様のネットワークと、複数機の月周回測位衛星による月測位システムを提供可能としている。

また、ネットワーキングには従来のIPベースのサービスが含まれる一方で、宇宙通信の特徴である高い遅延と、断続的な接続による中断耐性にも対処できるようになっている。

この月近傍での活動で利用されるLunaNetの構築に向けても、無線通信、測位のための周波数確保が必要となっているところである。

4. JAXAが計画中の主な月ミッションについて

JAXAにおいては、アルテミス計画も踏まえ、表1に記載されているとおり、月極域の水などの資源探査等を目的とした探査機の開発、月面を探査可能なモビリティの開発、月での持続的な探査活動に向けた先行的な要素技術の実証や月面での科学ミッションの実施、月面での持続的な探査活動に必要な様々な物資を輸送・補給するための月面物資補給機の開発等を進めているところであり、今後月

表1. JAXAが計画中の主な月ミッション

ミッション	ミッション概要	打上げ予定時期及び 予定運用期間
月極域探査機（LUPEX）	月極域の水などの資源探査及び重力天体上での表面探査技術の獲得を目的としたインド宇宙研究機関（ISRO）との共同ミッション。 月の水資源が将来の持続的な宇宙探査活動に利用可能か判断するために、水の量と質等に関するデータを集めることが目的。	打上げ: 2026年以降 運用期間: 3.5か月以上
有人と圧ローバー	宇宙飛行士が乗り込み、ローバー内で生活しながら、月面を探査可能なモビリティ。 月の地質・資源の調査などをより広い範囲で行うことが可能。	打上げ: 2031年目標 運用期間: 10年
月探査促進ミッション	月での持続的な探査活動に向けた先行的な要素技術（月測位技術（LNSS）、月極域高精度着陸技術）の実証や月面での科学ミッションを行う。 宇宙戦略基金を活用する方針で調整中。	打上げ: 2028年以降 運用期間: TBD
月面物資補給機	有人と圧ローバーや居住施設等、月面での持続的な探査活動に必要な様々な物資を輸送・補給するミッション。	打上げ: 2030年代半ば以降 運用期間: TBD

近傍において活発な活動を行っていく上で、必要となる技術の獲得に資するものと期待されている。

5. ITU-RとWRCについて

国際連合の電気通信に関する専門機関である国際電気通信連合 (ITU) の無線通信部門 (ITU-R) では、①無線通信規則 (RR) の改正、②衛星周波数及び軌道の国際調整、通告及び登録手続、③周波数の利用・保護等に関する勧告・報告の作成、改訂等を所管している。

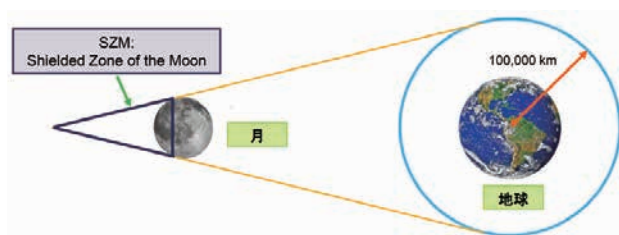
RRは、①周波数の分配 (どの周波数帯をどの業務に分配するかを規定。)、②衛星周波数及び軌道の国際調整、通告及び登録手続など、無線通信に関する国際的な規則を定めている。RRは、3~4年に1回開催される世界無線通信会議 (WRC: World Radiocommunication Conference) にて改正されることとなっており、直近ではWRC-23が開催されており、次回はWRC-27が開催予定となっている。

6. 月近傍における通信に使用可能な周波数について

一方、月近傍における通信に使用可能な周波数に関して、WRC-23に向け、ITU無線通信局長より入力された「Report of the Director on the Activities of the Radiocommunication Sector」の「3.1.9.2 Use of radiocommunication services on the Moon or on the vicinity of the Moon」にて、「地球と月の間または月近傍で無線通信業務を使用する際には、宇宙研究業務または宇宙運用業務 (宇宙機の運用の場合) 向けの周波数分配のみを利用するべきである。」とのITU無線通信局長の助言が提示された。

7. 月における電波天文の保護について

無線通信規則第22条のSection Vには、月の遮蔽領域 (SZM: Shielded Zone of the Moon) が「地球の中心より100,000km以内の距離での電波発射から遮蔽される月の表面の領域とこれに隣接する空間により構成される。」と定義されており (図を参照)、電波天文観測及び受動業務



■ 図. 月の遮蔽領域 (SZM) の定義

の他の利用者に有害な干渉をもたらす電波発射は、一部 (①能動センサを使う宇宙研究業務に分配されている周波数帯、②月の遮蔽領域内での無線通信及び宇宙研究通信と同様に宇宙研究を支援するために必要となる宇宙運用業務、能動センサを使う地球探査衛星業務及び宇宙機搭載局を使った無線評定業務に分配された周波数帯) を除く全周波数帯で禁止することが規定されている。SZMは、地球から見た月の裏側であり、地球からの電波が届かないため、電波天文の観測に非常に適しているためである。

また、ITU-R勧告 RA.479-5により、SZMでの電波天文の観測のために2GHz以下については、電波天文業務以外での使用を差し控えることが推奨されている。

8. 各地域機関のWRCにおける役割について

アジア・太平洋電気通信共同体 (APT)、アラブ周波数管理グループ (ASMG)、アフリカ電気通信連合 (ATU)、欧州郵便・電気通信主管庁会議 (CEPT)、米大陸諸国間電気通信委員会 (CITEL) 及び (旧ソビエト連邦構成国による) 合同通信地域連邦 (RCC) の6つの地域機関が、それぞれWRCに向けた準備会合を開催し、WRCの各議題について、地域としての見解及び提案を取りまとめているが、WRCの次回会合の議題決定についても、WRC期間中にこれら地域機関間で議論がなされることとなっており、より多くの地域機関からの賛同が得られたものが次回のWRCの議題となる傾向となっている。

9. WRC-23における議論について

WRC-23前に、米国からの提案により、CITELからWRC-23に対して、月近傍における通信のための周波数を確保するべく、宇宙研究業務 (宇宙から宇宙) への周波数の新規分配に関する新議題を提案したことを受け、NASAからJAXAに支援要請があった。

この支援要請を受け、総務省と相談の上、CITEL提案を支持し、本議題をWRC-27の新議題とすべく対応することとし、WRC-23では、APT内で本CITEL提案に賛同可能となるよう、JAXAとオーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) で協力の上、中国、インド、韓国、ニュージーランド、カンボジア、インドネシア、シンガポール、タイ、ベトナムに対し、支援要請を行った。

その結果、中国、インド、タイ、ベトナムから支持を得たほか、その他の国も積極的に支持はしないものの、反対はしないとの回答があり、WRC-23期間中に行われたAPTの



会合でも反対はなかったため、APTとして本議題を支持することとなった。

一方で、WRC-23では、WRC-27の新議題の候補につき、議題の内容を規定するWRC決議に関する議論が行われたが、本議題での主な論点は、①新議題の対象周波数帯、②WRC-31以降の検討内容の記載、となっていた。

新議題の対象周波数帯については、2GHz以下を対象周波数帯とすることに対し、フランス等より電波天文業務の保護を理由に反対があったことから、2GHz以下の周波数帯の利用はSZMを除くとともに、対象周波数帯からは電波天文に分配されている周波数帯が除外された。

WRC-31以降の検討内容の記載については、CITEL（特に米国）は、月ミッションへの民間企業の将来的な参入の増大を念頭に置き、宇宙研究業務（宇宙から宇宙）の範囲での周波数の新規分配以外に、無線通信規則上での規制の枠組みを確立することを目的として、WRC-31以降のWRCにて、周波数分配または周波数特定の修正、その他の適切な規制変更を行うことを決議に記載するよう提案していたものの、民間企業の月ミッションへの参入に消極的であると思われる中国及びロシアの反対により、該当部分の記載は削除された。

10. WRC-23の結果について

WRC-23の結果、WRC決議680（WRC-23）「月面上及び月周回軌道と月面間の通信の将来の発展のための宇宙研究業務（宇宙から宇宙）への可能な新規または修正された周波数の分配を含む周波数に関連した事項に関する検討」が採択され、WRC-27議題1.15として議題化された。

WRC決議680に記載された対象周波数帯は、390-406.1MHz、420-430MHz、440-450MHz（SZM外に限定）、2400-2690MHz、3500-3800MHz、5150-5570MHz、5570-5725MHz、5775-5925MHz、7190-7235MHz、8450-8500MHz及び25.25-28.35GHzとなっており、これまで、宇宙研究業務（宇宙から宇宙）に分配されていた周波数帯は、410-420MHz、2025-2110MHz及び2200-2290MHzの合計185MHzしかなかったところ、上記の周波数帯がすべて宇宙研究業務（宇宙から宇宙）に分配された場合には、大幅な周波数帯の増大が見込まれることとなる。

11. ITU-R WP7Bでの検討について

WRC-23の結果を基に、2024年3月のWP7Bにて、WRC-27議題1.15に関する責任WPであるWP7Bから寄与WPで

あるWP3J、WP4A、WP4C、WP5A、WP5B、WP5C、WP5D、WP7A、WP7C及びWP7Dに対し、共用・両立性検討に必要となる情報提供を求めるとリエゾン文書が作成された。

また、WRC-23前に、月近傍での通信に関するルール等の検討のため、通信の運用コンセプトとして、①利用ケース、②月面上及び月軌道と月面間の通信のそれぞれに関する(i)技術及び運用の能力、(ii)追加周波数帯の範囲の評価、(iii)技術特性、(iv)電波伝搬等の情報を取りまとめた「ITU-R新報告草案 SA. [LUNAR.COMMS] に向けた作業文書」を作成していたが、同WP7Bで、これを基に、WRC-27議題1.15の共用・両立性検討に資するべく、米国を中心に、①利用ケース、②月面上の通信用の無線局、③月面と月周回軌道との通信用の無線局、④月のデータ中継衛星システム、に関し、具体的なパラメータ、電波伝搬等を取りまとめ、「ITU-R新報告草案 SA. [LUNAR.SRS STATIONS CHAR] に向けた作業文書」が作成され、2024年9月のWP7Bにおいては、日本寄与文書も反映して修正の上、ITU-R新報告草案に向けた作業文書からITU-R新報告草案に文書が格上げされた。

一方で、同WP7Bでは、米国の寄与文書により、WRC-27議題1.15に関する共用・両立性検討の結果を取りまとめる「ITU-R新報告草案 SA. [LUNAR 1.15 STUDIES] に向けた作業文書」が提案され、今後WP7Bで実施する共用・両立性検討の結果を反映し、WRC-27に向けてITU-R新報告が作成される予定である。

12. 共用・両立性検討の対象業務

先述したとおり、議題1.15に関する共用・両立性検討の結果を取りまとめる文書である「ITU-R新報告草案 SA. [LUNAR 1.15 STUDIES] に向けた作業文書」には、議題1.15に関する共用・両立性検討の対象となっている業務が明記されているが、これらの業務は表2のとおりであり、かなりの数の業務が対象となっていることから、今後のWP7Bにおける効率的な共用・両立性検討が必要となるものと考えられる。

13. SFCG及びLMSGについて

SFCG（Space Frequency Coordination Group）は、宇宙機関をメンバーとして、各宇宙機関のミッションの周波数調整、SFCGメンバー機関が遵守すべき周波数に関するルールの策定を行っている。

■表2. 議題1.15に関する共用・両立性検討の対象業務

対象業務	分配されている周波数帯
固定業務	390.0-399.9MHz, 400.15-401MHz, 420-430MHz, 440-450MHz, 2400-2690MHz, 3500-3800MHz, 5250-5350MHz, 5650-5725MHz, 5775-5850MHz, 5850-5925MHz, 7190-7235MHz, 8450-8500MHz, 25.25-27GHz, 27-27.5GHz, 27.5-28.35GHz
固定業務 (二次分配)	401-406MHz (二次業務であるが、WP5Cにより検討対象。)
固定業務 (HAPSに特定)	25.25-27.5 GHz
移動業務	390.0-399.9MHz, 400.15-401MHz, 2400-2500MHz, 5650-5725MHz, 5775-5850MHz, 7190-7235MHz, 25.25-27.5 GHz, 27.5-28.35GHz
移動業務 (航空移動業務は除く。)	420-430 MHz, 440-450MHz, 2500-2690MHz, 3500-3800MHz, 3600-3800MHz, 5150-5250MHz, 5250-5350MHz, 5470-5570MHz, 5670-5725MHz, 8450-8500MHz
移動業務 (IMTに特定)	2500-2690MHz, 3500-3600MHz, 3600-3700MHz, 3700-3800MHz
移動業務 (HIBSに特定)	2500-2690MHz
航空移動業務	5150 -5250MHz
無線評定業務	420-430MHz, 440-450MHz, 2450-2500MHz, 5250-5350MHz, 5350-5470MHz, 5470-5570MHz, 5570-5650MHz, 5650-5725MHz, 5775-5850MHz
固定衛星業務 (宇宙から地球)	2 500-2635MHz, 2 535-2655MHz, 2655-2690MHz, 3500-3800MHz, 5150-5216MHz
固定衛星業務 (地球から宇宙)	2655-2690MHz, 5150-5250MHz, 5775-5850MHz, 5850-5925MHz, 27-27.5GHz, 27.5-28.35GHz
移動衛星業務 (宇宙から地球)	400.15-401.00MHz, 2483.5-2500 MHz, 2500-2520 MHz
移動衛星業務 (地球から宇宙)	399.9-400.05MHz, 406.00-406.10MHz, 2655-2670MHz, 2670-2690MHz
無線測位衛星業務 (宇宙から地球)	2 483.5-2 500 MHz
放送衛星業務	2520-2655MHz, 2520-2535MHz, 2535-2655MHz, 2655-2670MHz
衛星間業務	25.25-27.5GHz, 27.5-28.35GHz
無線航行業務	5250-5350MHz, 5460-5470 MHz
海上無線航行業務	5470-5570MHz
航空無線航行業務	2700-2900MHz, 5150-5250MHz, 5350-5460MHz, 5470-5650MHz
宇宙研究業務 (宇宙から地球)	8450-8500MHz
宇宙研究業務 (地球から宇宙)	7190-7235MHz
宇宙研究業務 (軌道)	5250-5255MHz, 5255-5350MHz, 5350-5460MHz, 5460-5570MHz

活動内容は、相互に関心を持つ周波数管理に関する事項、特にITU無線通信規則で定義された業務のうち、宇宙研究、宇宙運用、地球探査衛星、気象衛星、衛星間通信、無線測位衛星、宇宙機ミッションに係る範囲の電波天文、レーダ天文業務についての議論及び調整であり、年1回会合を開催している。

SFCGの活動で合意された内容は、決議、勧告、報告等のケースによって適切な形式で文書化されることとなっている。

一方、LMSG (Lunar Martian Spectrum Group) は、SFCGの中でも月または火星近傍で運用するミッションで使用する周波数に関する議論を行う場であり、SFCGの会合開催期間中にLMSGの会合が開催されるとともに、それ以外にオンラインでも会合が開催され、解決すべき課題等について意見交換を実施している。また、月または火星近傍で運用するミッションで使用する周波数に関して、ルールの策定も行い、これらをSFCG勧告等に取りまとめている。

14. 民間の月ミッションの周波数に関する課題

アルテミス計画の進展等も踏まえ、月における活動の活発化に伴い、将来的には民間企業による商用の月ミッションの運用、通信サービス提供等の月面での商業活動なども行われていくことが想定されている中、これらの活動に必要なとされる周波数の確保が今後の課題であると考えられる。

先述したとおり、ITU無線通信局長よりWRC-23に入力された報告書によると、地球と月の間または月近傍で無線通信業務を使用する際には、宇宙研究業務または宇宙運用業務 (宇宙機の運用の場合) 向けの周波数分配のみを利用すべきとのことであったが、宇宙研究業務用の周波数は、基本的には「研究」目的のみに使用可能であり、商用目的に使用することが難しいと考えられている。また、宇宙運用業務に分配された周波数帯は、非常に帯域が少ないため、将来的な月面上での商業活動の活発化への対応が困難であると思われる。

一方で、前述したITU無線通信局長の報告書では、将来のWRCにおいて、月近傍で運用される衛星ネットワークが、宇宙研究業務、宇宙運用業務以外の無線通信の業務を使用することの妥当性に関する指針を提示することが期待されている。そのため、民間企業による商用の月ミッション、月面での商業活動に向けては、次回以降のWRCにおける対応が必要であると考えられる。

15. おわりに

上記のとおり、月近傍における活動の活発化に伴い、必要な周波数を確保することが不可欠となっている中、WRC-27の議題1.15によりこれを達成することが期待されている。

そのため、JAXAとしてもWP7Bにおける本議題に関する技術検討に可能な限り協力を行い、WRC-27の議題1.15に貢献していきたいと考えている。