

テラヘルツ波を用いた月面の広域な水エネルギー資源探査 基本計画書

1. 背景と目的

近年、民間における小型・超小型衛星による新たなビジネス活動が活発化している。2019年打上げの小型衛星数は約389基であり、2020年代は平均で年間1000基の小型衛星打上げ数となるという予測もある。これらの大きなゲームチェンジを伴う宇宙産業の変革の中、技術革新などを背景に新たな地球近傍宇宙活動の登場が期待されている。2019年10月、我が国は米国提案による国際宇宙探査（アルテミス計画）に参画することを決定した。本計画は、月での持続的な活動を目指すなどの点で従来の宇宙科学・探査とは全く性格が異なるものであり、今後、月あるいは火星までの領域が人類の活動の舞台となっていくことを踏まえ、将来の経済活動や外交・安全保障を含めた幅広い観点から取り組んでいく必要がある。こうした状況の下、月面というフロンティアにおいて、我が国が国際的な競争力を有し持続的な経済活動を目指すことは極めて重要である。月面活動において、人類の生命維持やロケット、工場などの燃料として水資源の活用が期待されており、月面の水資源探査は極めて重要な役割を果たすと考えられる。

月面水資源の広域探査サーベイの有効な手法の一つに、テラヘルツ波を用いた月周回軌道衛星による受動リモートセンシング（以下リモセン）がある。テラヘルツ波は全電磁波領域の中で氷や水に最も敏感な周波数帯であり、高い検出感度を有している。また、ミリ波と比較しセンサの小型軽量化が可能であるため、超小型衛星への搭載が実現可能であり、加えて、小アンテナ口径で高水平分解能を持つ広域サーベイの実現が期待される。さらに、将来的な通信分野への適用も期待される。

我が国は、ミリ波やテラヘルツ波の受動観測による広域サーベイにおいて国際的な実績を有している。地球リモートセンシングでは2002年からの実績を持つ AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) シリーズがあり、AMSR-Eでは低い周波数（6.9GHz～89GHz）を用いて、全球の氷面積分布や土壌水分含有量等を推定している。テラヘルツ波に関しては2009年に国際宇宙ステーションに搭載された超伝導サブミリ波サウンダ (JEM/SMILES) があり、0.65THz帯を用いて成層圏オゾン層破壊物質などの測定を高感度を実施した。

テラヘルツ波センサ搭載の超小型衛星の統合開発は、今後激化する宇宙産業において、我が国の革新的イニシアティブを促進する。また、激甚災害予測のための地球観測などの新たなセンシングのほか、Beyond 5Gにおける様々なプラットフォームへの搭載や周波数の拡大、宇宙テラヘルツ通信利活用などにも期待されている。

本研究開発は、テラヘルツ波センサによる月面の広域な地表面水資源探査サーベイの効率的な実施を実現するために、観測した輝度温度から氷・水・土壌水分含有量の推定を可能にするためのデータベースを構築するとともに、耐宇宙環境を備えた多周波数チャンネルのテラヘルツ波センサを開発する。また、最適な資源探査実施のために軌道上において衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術を開発し、これらの技術を統合することで、宇宙での運用が可能なシステムを開発し、月面の水資源探査が実現可能であることを検証するための研究開発を実施する。

2. 政策的位置付け

○宇宙産業ビジョン 2030

「デブリ除去技術、小型 SAR（合成開口レーダー）やテラヘルツセンサ、測位技術、衛星通信用技術、宇宙太陽光発電など、我が国の強みや重要技術を戦略的に強化していくことも重要である。」との記載がある。

○宇宙基本計画（令和 2 年 6 月 30 日 閣議決定）

「地球大気の組成等をより詳細に観測・分析可能なテラヘルツセンサの実現に向けて、テラヘルツ波の伝搬モデルの構築やセンシング技術など基盤技術等の研究開発を推進するとともに、これら技術の活用について関係府省等において検討を進める。（総務省等）」との記載がある。

3. 目 標

（1）政策目標（アウトカム目標）

国際的に進められている月の開発利用に関し、我が国が ICT 分野において戦略的かつ優位に推進していくため、テラヘルツ波を利用した月面の水資源探査技術を確立し、広域な水資源探査サーベイを実現することで、月での宇宙科学・探査や経済活動などの持続的な活動へ貢献する。

また、これらにより、将来的な地球規模の激甚災害把握のための水蒸気観測や、惑星における詳細な宇宙資源探査サーベイ及びテラヘルツ大容量通信の宇宙利用の促進に寄与する。

（2）研究開発目標（アウトプット目標）

月表面を構成する物質の物性推定に必要となる月面テラヘルツ波物性データベース、及び観測データからの物性を推定することを可能にする月面における散乱等を考慮したテラヘルツ電磁波伝搬モデルを含む解析アルゴリズムを開発し、月面の輝度温度分布を高精度（テラヘルツ波センサのシステム雑音温度 5000K 以下）に観測し、月面の水・氷含有量の推定分布の取得を可能とする多チャンネルテラヘルツ波センサを開発する。月周回軌道上での効率的な探査を実現するために必要な衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術を開発する。超小型衛星に搭載可能な小型軽量なセンサ部とデータ処理部は合わせて 10kg 程度以下とする。

また、これらの技術を統合し、宇宙での運用が可能なシステムを開発することで、高い空間分解能（10km 以下）かつ広域サーベイにより月面の水循環の実態を把握し、効率の良い資源獲得の指針が得られることを検証する。

4. 研究開発内容

（1）多チャンネルテラヘルツ波センサ搭載の超小型衛星システムの開発

① 概要

テラヘルツ波センサによる宇宙資源探査の効率的な実施を実現するために、物性データベース開発、電磁波伝搬モデルを含む解析アルゴリズム開発、多チャンネルテラヘルツ波センサ開発、軌道上において衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術開発、統合開発を行う。それぞれに耐宇宙環境性能があるかを評価し、月周回軌道上での運用が可能なシステムを開発する。

② 技術課題

ア) 小型軽量な多チャンネルテラヘルツ波センサ開発

テラヘルツセンシングによる月面水資源探査の効率的な実施のため、月面構成物のテラヘルツ波物性データベースの作成及び解析アルゴリズムの開発、月資源探査に最適な多チャンネルテラヘルツ波センサを開発する。

a) 月面テラヘルツ波物性データベースの構築

テラヘルツ波測定で得られる放射輝度温度から誘電率を導出し、その誘電率から氷や鉱物などの推定を可能にするための物性測定を行う実験室実験システムを考案する。このシステムを用いた測定により月面構成物に対するテラヘルツ物性データベースを構築する。

b) 月面における散乱等を考慮したテラヘルツ電磁波伝搬モデルを含む解析アルゴリズムの開発

a)のデータベースにより、テラヘルツ放射輝度温度から、氷・水・土壌水分含有量等の月面構成物の推定を可能にする解析アルゴリズムの研究開発を行う。また、吸収・放射・地表面散乱を考慮に入れた月表面測定のためのテラヘルツ電磁波伝搬モデルの開発を行う。

c) 多チャンネルテラヘルツ波センサの開発

a)のデータベースを踏まえ、b)の電磁波伝搬モデルを用いた解析により、テラヘルツ帯における最適な周波数チャンネルの組み合わせを決定し、各周波数における月面からの放射輝度温度を高精度（システム雑音温度5000K以下）で測定可能かつ小型軽量で複数周波数の観測が可能なセンサを開発する。

イ) 軌道上において衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術

月周回軌道では、地球周回軌道のように高頻度での通信が困難であることから、測定強度データ及び測定条件などの情報をデータハンドリング部にて一時保存し、軌道上においてア) b) で開発した解析アルゴリズム等を利用したデータ処理等を実施し、それに準じたバス部へのコマンド送信及び測定データ送信を行える小型軽量なデータハンドリング部のデジタル処理技術を開発する。

ウ) 統合開発

ア)、イ) で開発した技術を統合して超小型衛星に搭載するため、月周回軌道での運用が可能な超小型衛星バスシステムの概念検討・ブレッドボードモデル (BBM) ・エンジニアリングモデル (EM) ・プロトフライトモデル (PFM) の開発を実施し、月での長期間実証が可能であることを検証する。

③ 到達目標

ア) 小型軽量な多チャンネルテラヘルツ波センサ開発

a) テラヘルツ波物性データベースの構築

月表面組成を再現する構成物に対してテラヘルツ帯における誘電率などの物性が測定可能なシステムの設計を行い、それぞれの入射角において偏波を用いた条件下での実験室実験により構成物のテラヘルツ波物性を取得する。

- b) 月面における散乱等を考慮したテラヘルツ電磁波伝搬モデルを含む解析アルゴリズムの開発

物性パラメータを用いた観測データ解析アルゴリズムの開発を行い、観測した放射輝度から地表面の誘電率の導出、及びそれらを用いた氷・水・土壌水分含有量等の構成物の推定を可能にするとともに、センサ開発において設計最適化のフィードバックを行う。

- c) 多チャンネルテラヘルツ波センサの開発

周波数チャンネル組み合わせが 5 パターン以上の中から、システム雑音温度 5000K 以下、水平観測分解能 10km 以下の性能を有する、宇宙実証可能な小型軽量の多チャンネルテラヘルツ波センサを開発する。また、月表面の輝度温度観測のための較正系を備えたものとする。

- イ) 軌道上において衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術

多周波搭載テラヘルツ波センサにより観測した輝度温度データを低次レベルから高次レベルまで状況に応じて自在に選別してデータ処理と衛星制御を行えることが可能な機能を持つソフトウェアを開発するとともに、月周回環境での運用に対する各種耐性を備えている部品を選定し、宇宙での運用が可能なデジタル処理部を製作し、耐宇宙環境性能が確保できていることを検証する。また、ア) で開発するセンサ部と合わせて 10kg 程度以下となること。

- ウ) 統合開発

月周回可能な超小型衛星として、概念検討により決定したサイズ・重量・消費電力を満たすバス部及び受信機部にア) で開発したセンサ部、イ) で開発したデータ処理部を統合実装し、耐久性や耐故障性などを確認することで、月周回軌道上での長期間運用が可能であることを検証する。

5. 研究開発期間

令和 3 年度から令和 7 年度までの 5 年間

6. その他 特記事項

(1) 特記事項

提案者は、下記課題のいずれか又は複数の課題に提案することができる。

課題 (3) の受託者は課題 (3) 及び本研究開発課題全体 (課題 (1) 及び (2)) のとりまとめを行うものとする。

課題 (1) 小型軽量の多チャンネルテラヘルツ波センサ開発

課題 (2) 軌道上において衛星とセンサを統一的に制御する衛星デジタル処理技術

課題 (3) 統合開発

(2) 提案および研究開発に当たっての留意点

- (ア) 提案に当たっては、基本計画書に記されているアウトプット目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めるとともに、目標を達成するための研究方法、実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制及び達成度を客観的に評価するための実験方法について、具体的に提案書に記載すること。また、アウトカム目標の達成に向けた適切な研究成果（アウトプット等）の取扱方策（研究開発課題の分野の特性をふまえたオープン・クローズ戦略を含む）について提案すること。また、本研究開発成果を確実に展開し、アウトカム目標を達成するため、事業化目標年度、事業化に至るまでの実効的な取組計画（事業化及び標準化活動、体制、資金等）についても具体的に提案書に記載すること。
- (イ) 目標を達成するための具体的な研究方法、実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。複数機関による共同研究を提案する際には、分担する技術間の連携を明確にし、インターフェースを確保すること。
- (ウ) 研究開発の実施に当たっては、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言を頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者等を含んだ研究開発運営委員会等を開催する等、外部の学識経験者、有識者等を参画させること。なお、本件について不明点がある場合は、本研究開発の担当課室まで問い合わせること。
- (エ) 本研究開発は総務省施策の一環として取り組むものであることから、総務省が受託者に対して指示する、研究開発に関する情報及び研究開発成果の開示、関係研究開発プロジェクトとのミーティングへの出席、シンポジウム等での研究発表、共同実証実験への参加等に可能な限り応じること。
- (オ) 本研究開発は内閣府の宇宙開発利用加速化プログラム（スターダストプログラム）におけるプロジェクトである「月面におけるエネルギー関連技術開発」の一つとして取り組むものであることから、当該プロジェクトにおける他事業との連携を図ること。なお、本件について不明点がある場合は、本研究開発の担当課室まで問い合わせること。

(3) 人材の確保・育成への配慮

- (ア) 研究開発によって十分な成果が創出されるためには、優れた人材の確保が必要である。このため、本研究開発の実施に際し、人事、施設、予算等のあらゆる面で、優れた人材が確保される環境整備に関して具体的に提案書に記載すること。
- (イ) 若手の人材育成の観点から行う部外研究員受け入れや招へい制度、インターンシップ制度等による人員の活用を推奨する。また、可能な限り本研究開発の概要を学会誌の解説論文で公表するなどの将来の人材育成に向けた啓発活動についても十分に配慮すること。これらの取組予定の有無や計画について提案書において提案すること。

(4) 研究開発成果の情報発信

- (ア) 本研究開発で確立した技術の普及啓発活動を実施すると共に、実用に向けて必要と思われる研究開発課題への取組も実施し、その活動計画・方策については具体的に提案書に記載すること。
- (イ) 研究開発成果については、原則として、総務省としてインターネット等により発信を行うとともに、マスコミを通じた研究開発成果の発表、講演会での発表等により、広く一般国民へ研究開発成果を分かりやすく伝える予定であることから、当該提案書には、研究成果に関する分かりやすい説明資料や図表等の素材、英訳文書等を作成し、研究成果報告書の一部として報告する旨の活動が含まれていること。さらに、総務省が別途指定する成果発表会等の場において研究開発の進捗状況や成果について説明等を行う旨を提案書に記載すること。
- (ウ) 本研究開発終了後に成果を論文発表、プレス発表、製品化、Web サイト掲載等を行う際には「本技術は、総務省の「テラヘルツ波を用いた月面の広域な水エネルギー資源探査」による委託を受けて実施した研究開発による成果です。」という内容の注記を発表資料等に都度付すこととする旨を提案書に明記すること。