

「地上発の電波測距信号のオンボード処理による超小型探査機の軌道決定技術の開発」の成果の概要について

実施体制	主管実施機関	国立大学法人九州工業大学	実施期間	令和2年度～ 令和4年度 (3年間)	実施規模	予算総額 (契約額) <u>74</u> 百万円		
	研究代表者名	教授 趙孟佑				1年目	2年目	3年目
	共同参画機関					25百万円	25百万円	24百万円

背景・全体目標

宇宙機関が使うような特別な地上系に頼らずに大学等の研究者が自力で月探査を行えることを目的とし、月探査を行う超小型探査機に適した軌道決定技術の研究開発を行う。複数の直径数メートルのアンテナから出された測距信号を、探査機側で受信・オンボード処理して、探査機自身で軌道決定する技術を開発する。提案者が培ってきた超小型衛星、特に超小型原子時計の宇宙実証の経験に基づき、市販のソフトウェア無線機、コンピュータボード、原子時計を組み合わせた安価でCubeSatに搭載可能な測距機器OPERA(Onboard Processing of Earth-origin one-way Radio signal)を開発する。2022年に国際宇宙ステーションから放出されるCubeSatを使った概念実証結果と、地上でのエンジニアリングモデル開発に基づき、2024年以降の軌道上実証を目指したフライトモデルを製作し、実証機のシステムと統合する。合わせて、超小型探査機コミュニティを国内大学等を中心として形成する活動を行う。



深宇宙用
大型アンテナ



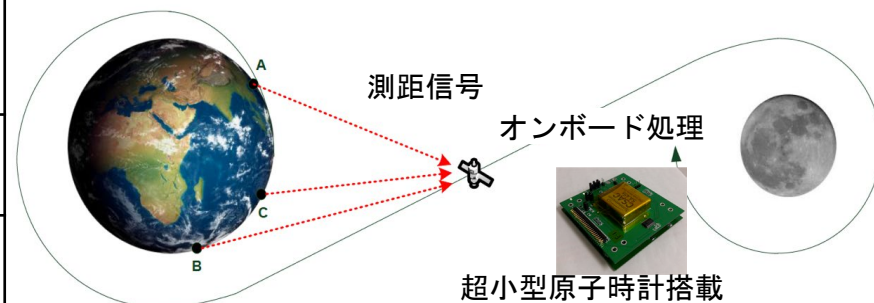
複数の大学の数m級アンテナを時間同期させて運用

全体概要・主な成果

運用時間に制約

大学研究者が自前で運用
複数の探査機が同時に利用可能

実施項目	目標値
実施項目① 軌道上での概念実証	KITSUNE衛星で3回実験を行い、うち一回は軌道上で地上局と衛星間の距離を算出できた。算出された距離の精度はおよそ50kmであった。 地上予備機に搭載された超小型原子時計(CSAC)の時間ずれをGPS信号と比較しながら150時間に亘って計測した。時間ずれは150時間にわたり標準偏差0.32μsで変動すること、地上局からの信号を10分間受信した場合の計測誤差が距離にして130mほどになることがわかった。
実施項目② エンジニアリングモデル開発	測距機器のエンジニアリングモデルを開発し、機能試験・環境試験を経てフライトモデルの開発に移行した。TRL=6に到達
実施項目③ コミュニティ形成	「超小型探査機を用いた月以遠深宇宙探査に関する研究会」を毎年開催し、20年度(オンライン)は165名、21年度(オンライン)は38名、22年度(対面)は60名が参加した。うち、21,22年度の若手研究者の参加は3~4割程度と思われる。
実施項目④ FM製作・システム統合	低軌道実証に向けた測距機器のフライトモデルを製作し、衛星システムとの統合を行った。TRL=8に到達

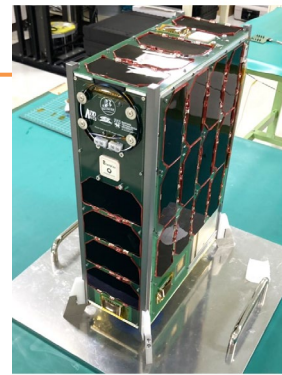


① 「軌道上での概念実証」

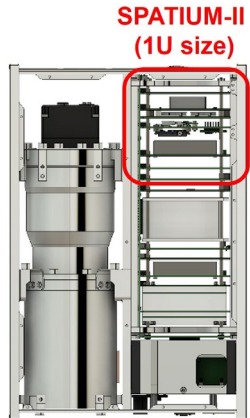
実施内容・成果

2022年3月24日に国際宇宙ステーションから放出された6UのCubeSat (KITSUNE) を使って実験を行った。実際にCubeSatを使って受信された測距信号をオンボード処理し、軌道上で到達時間遅れと衛星-地上局間の距離を算出できるかについて、概念実証を行った。

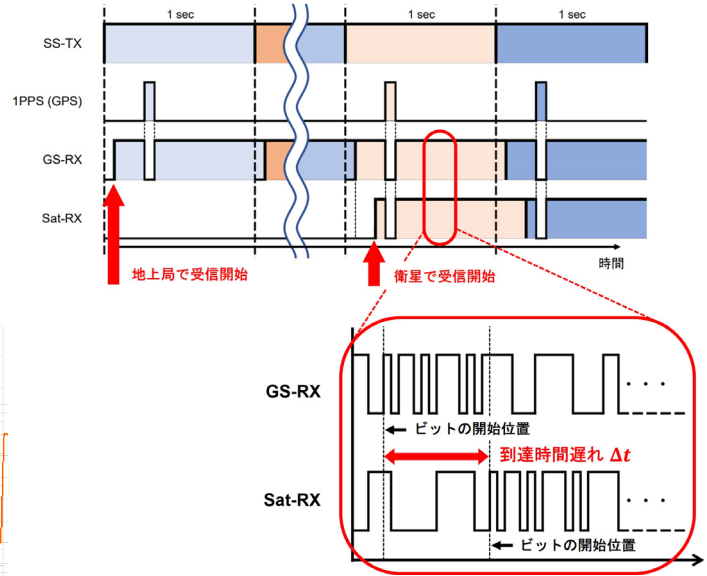
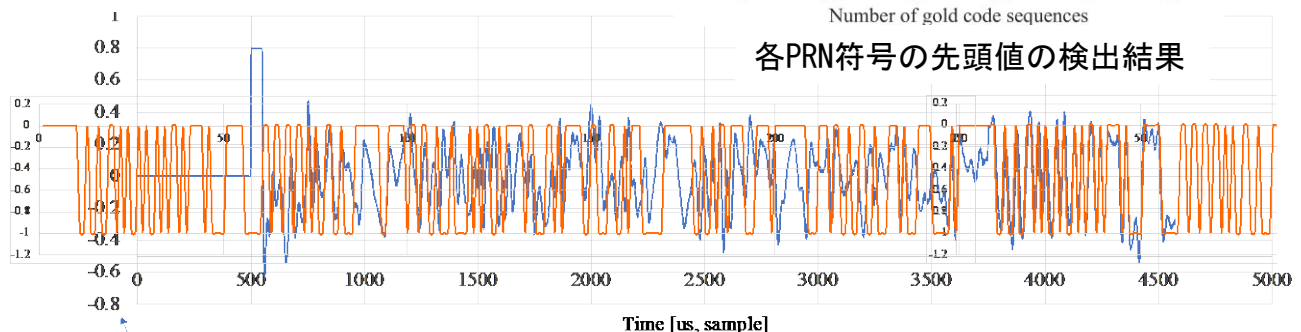
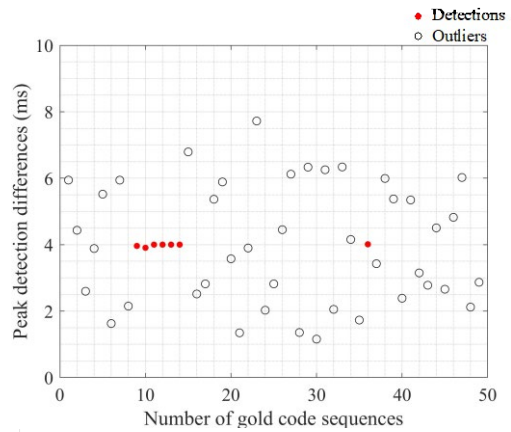
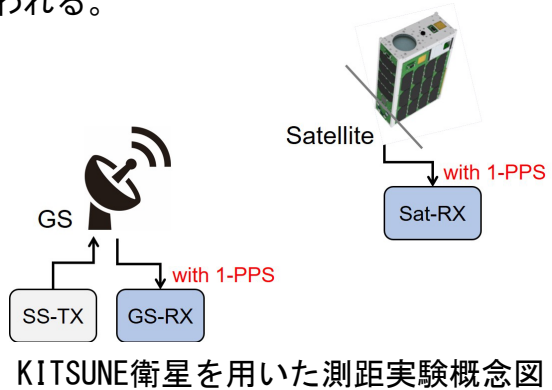
KITSUNE衛星では地上からスペクトラム拡散を行った450MHzのUHF信号(SS信号)を送り、超小型原子時計CSACをクロック源として駆動される衛星搭載のソフトウェア無線機とコンピュータ (Raspberry Pi) にて到達時間遅れを算出する実験を計3回行った。そのうち1回の実験でPRN符号の先頭位置から信号時間差を検出することができ、TLEから算出された衛星と地上局間の距離に対してオンボード処理の結果得られた距離には約50kmの誤差があった。この誤差の原因としては、TLEによる軌道決定の誤差と測距信号に重ね合わせた1PPSタイムスタンプの検出誤差によるものと推測される。



KITSUNE Flight Model (6U size)



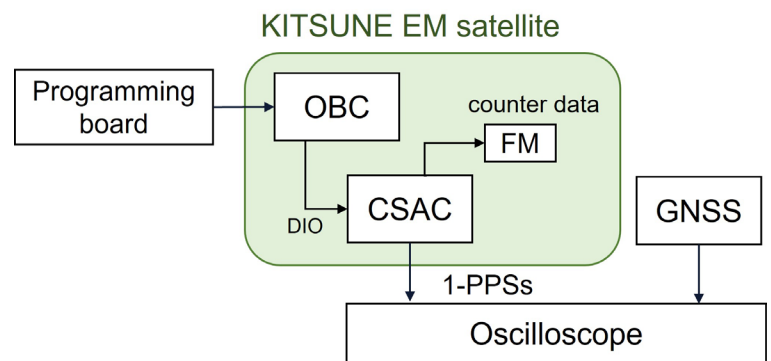
KITSUNE衛星フライトモデルと測距機器の衛星内搭載位置



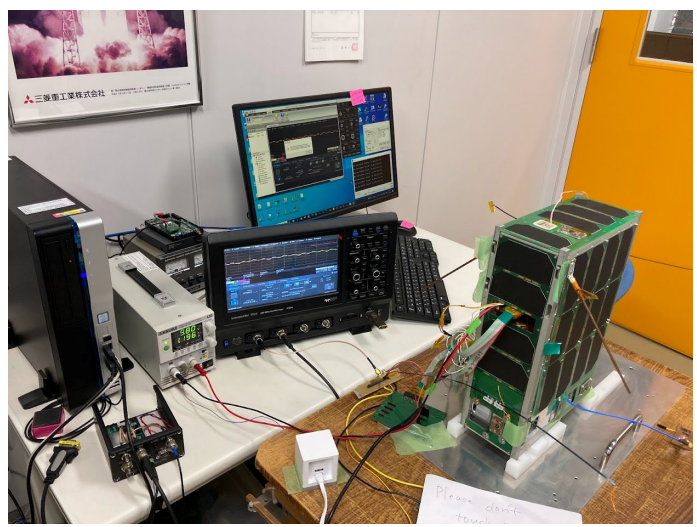
① 「軌道上での概念実証」

実施内容・成果

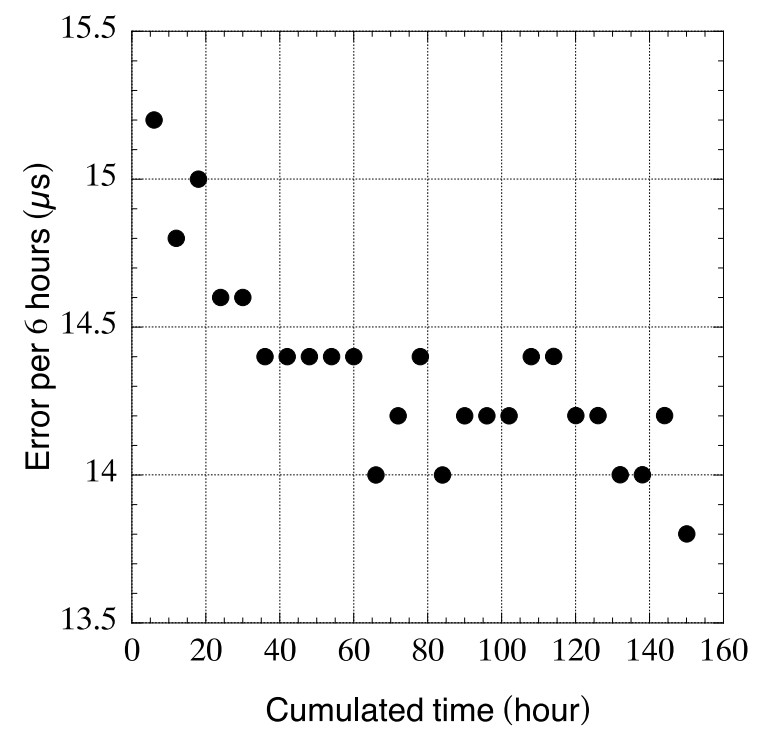
KITSUNE衛星の地上予備機に搭載された超小型原子時計(CSAC; Chip Scale Atomic Clock)のずれをGNSS信号を基準として150時間に亘って計測した。基準周波数が正確に10MHzになっていないため、6時間あたり約15 μ sの誤差が累積されるが、その誤差の幅は標準偏差にして0.32 μ sに留まる。OPERAの運用として、地上局からの信号を10分間受信したとするとその間の時間の誤差は420nsとなる。距離にして130mほどであり、目標とする5kmの精度で軌道決定を行うには問題がない。



CSACの時間ずれの計測実験の概念図



CSACの時間ずれの計測実験の様様

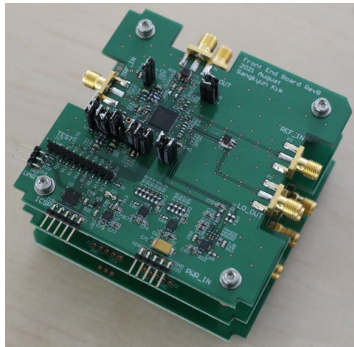


CSACの時間ずれの計測結果

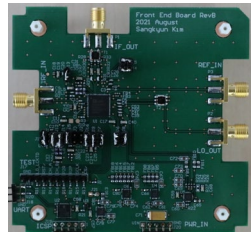
② 「エンジニアリングモデルの開発」

実施内容・成果

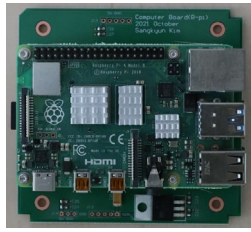
軌道上実証のための宇宙機とのインターフェースに適合したEM(Engineering Model)を製作し、EMが予想される軌道上環境に耐えることを確認することを目標として環境試験を実施した。環境試験の結果から、EMが予想される軌道上環境に耐える事を確認する事ができた。OPERAは、マイクロ波信号をダウンコンバートするフロントエンドボード、測距信号をA/D変換する信号処理ボード、測距信号を解析して時間遅れを検出するコンピュータボードの3枚の基板からなり、3枚の基板を合わせて10cmx10cmx5cmの体積に収まっている。EMIに対して環境試験(振動試験、熱サイクル試験)を行い、問題なく動作することを確認した。また、HIL(Hardware-in-the-loop)試験シミュレータを用い、測距信号の時間遅れの検出とドップラーシフトの検出ができることを確認した。



エンジニアリングモデル組み立て状態



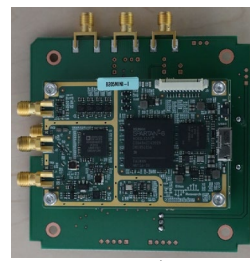
フロントエンドボード (2.2GHz->100MHzへダウンコンバート)



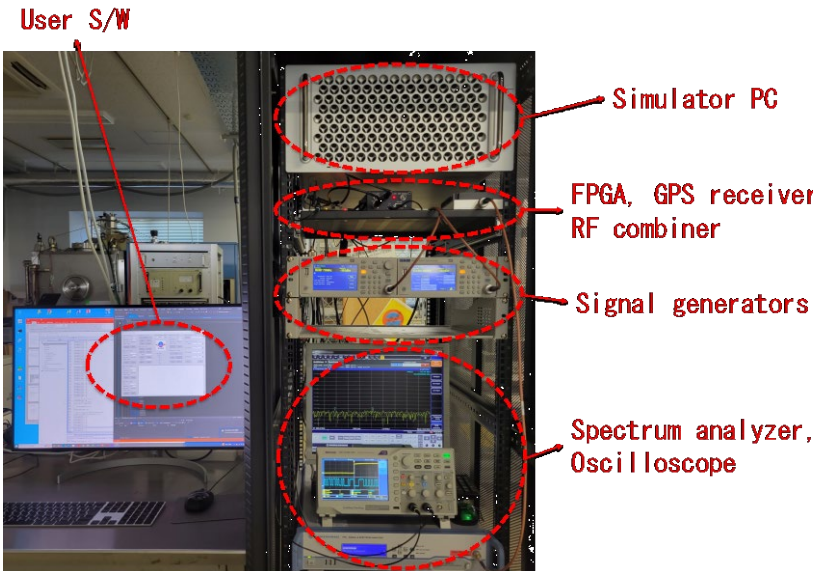
コンピュータボード (Raspberry-PI 4)



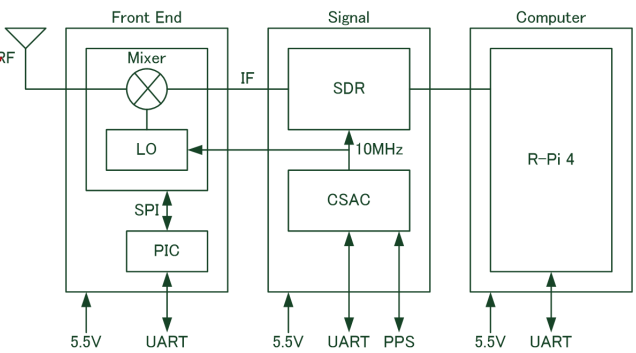
信号処理ボード表 (CSACクロック)



信号処理ボード表 (SDR)



HIL試験シミュレータ



OPERAのブロック図



振動試験の様子

② 「エンジニアリングモデルの開発」

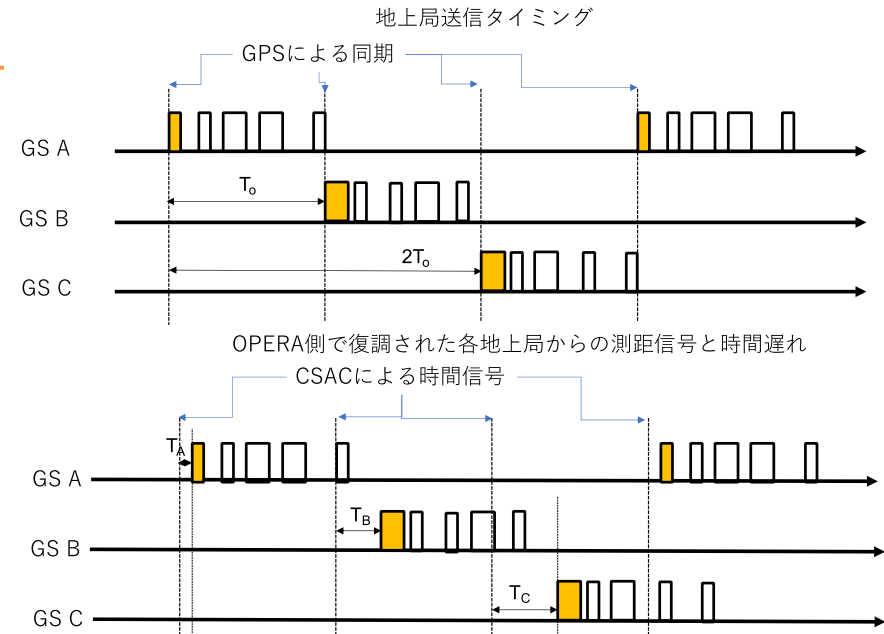
実施内容・成果

探査機の軌道を決定するには、各地上局から時間をずらして送られてきたPRN符号の先頭部分を検知し、各地上局から送られてくる信号の時間差を検出する。またドップラーシフトも同様に検出する。

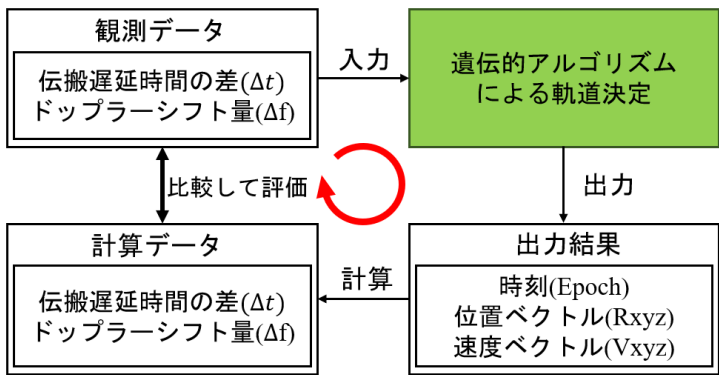
ある時間(エポック)における探査機の初期位置、3成分空間座標、3成分速度の7つの未知数を遺伝的アルゴリズムを用いて導出する。

HIL試験シミュレータを用いて3つの地上局を模擬し、宇宙機が月に向かう軌道にあると仮定して、実際に時間差をつけてOPERAに測距信号を送った。OPERA側で検出した時間差とドップラーシフトに基づいて、遺伝的アルゴリズムにより軌道決定を行った。

軌道決定の誤差はドップラーシフトの検出感度に大きく影響され、数Hz程度の感度でドップラーシフトを検出することで、位置誤差を5km程度に抑えることができることがわかった。



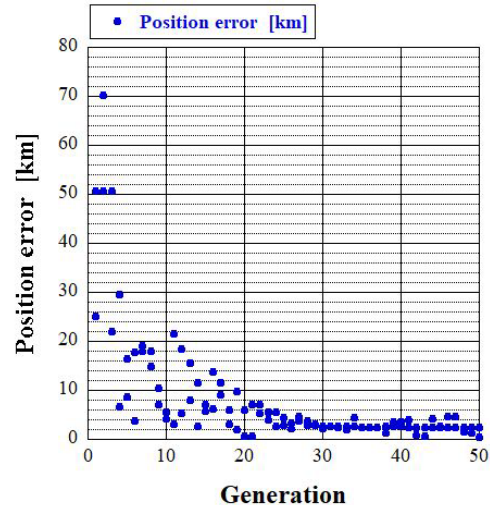
各地上局からの測距信号の時間遅れ検出方法



軌道決定の流れ

		ドップラーシフト量 Δf					
		1kHz	100Hz	10Hz	1Hz	0.1Hz	0.01Hz
伝搬遅延時間 Δt	1μs	69.383	110.853	18.662	2.466	0.981	0.587

ドップラーシフトの検出感度と位置誤差 (単位km)の関係



遺传的アルゴリズム(GA)により軌道決定位置の誤差が収束する様子。横軸はGAの世代数

③ 「コミュニティ形成」

実施内容・成果

超小型探査機コミュニティの形成を進めていくために、「超小型探査機を用いた月以遠深宇宙探査に関する研究会」を立ち上げ、毎年開催した。深宇宙探査に興味をもつ工学と理学の関係者がともに集い、情報・意見交換をできる場として機能した。また、若手研究者が3~4割程度は参加し、人材育成にも役立った。同研究会は2023年度にも実施されている。

研究会開催実績

年度	場所	形態	参加者数	講演数
2020	オンライン	独自開催	165	11 + 総合討論(50分)
2021	オンライン	宇宙科学技術連合講演会のオーガナイズドセッション	38	16
2022	熊本	同上	60	13

2022年度研究会発表リスト

発表題目	所属
Flight Model Development of OPERA, Onboard Processing of Earth-origin one-way RAdio ranging signal	九工大
超小型探査機EQUULEUSの運用	ISAS/東大
世界最小月着陸機OMOTENASHIの運用	ISAS
水を推進剤に用いる電気推進機による深宇宙探査の検討	東大
超小型ソーラー電力セイルによる深宇宙航行技術実証計画	東工大
小型相乗り宇宙機用ハイブリッドキックモータの開発状況	北大
高推力推進系を有する超小型衛星の検討状況	東大
深宇宙コンステレーションによる小天体マルチフライバイ探査構想	ISAS/JAXA
月宇宙機へ測位・通信サービスを提供する超小型衛星のシステム設計	福井大学
GEO-X 計画の現状と将来展望	都立大
複数の小型衛星を用いた金星衛星間電波掩蔽観測の検討	京都産業大
中性子測定による月の水資源探査を狙うMoMoTar0 計画	理研
将来の月惑星探査小型機器開発と観測ロケットによる実証実験	京都大学

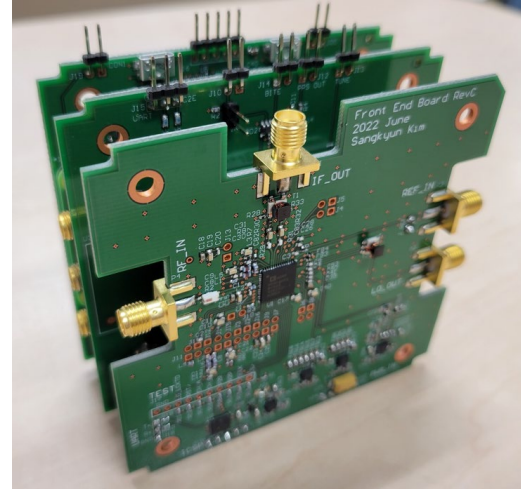
④ 「フライトモデル製作・システム統合」

実施内容・成果

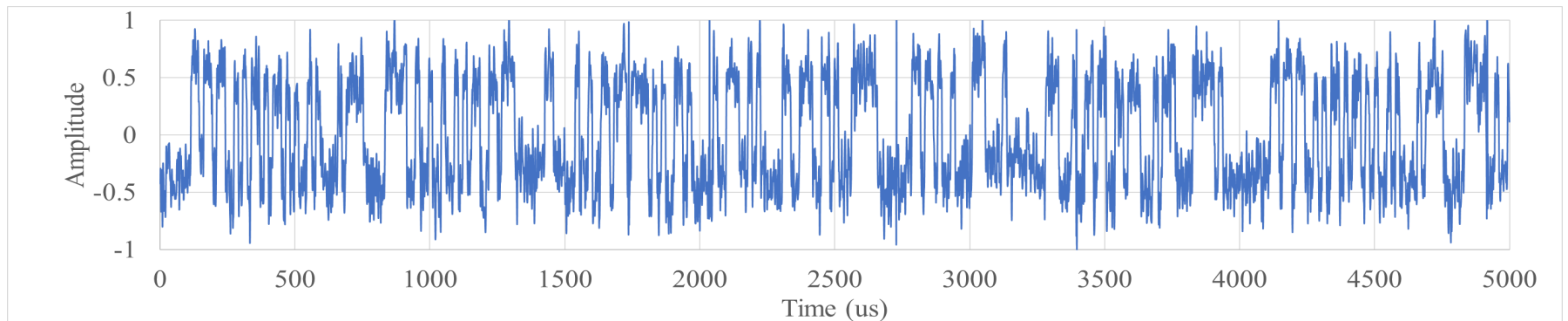
OPERAのエンジニアリングモデルの開発結果に基づいてフライトモデル(FM)の設計を確定した。組み立てられたFMの動作確認をHIL試験シミュレータを活用して行った。HILシミュレータから出力された測距信号をFMで受信し、スペクトラム拡散された測距信号を復調して、PRN(Pseudo Random Number)符号の先頭位置を正しく検出できること、ドップラーシフトを検出できることを確かめた。



OPERA FMのHIL試験シミュレータを用いた機能試験



フライトモデルを組み立てた状態

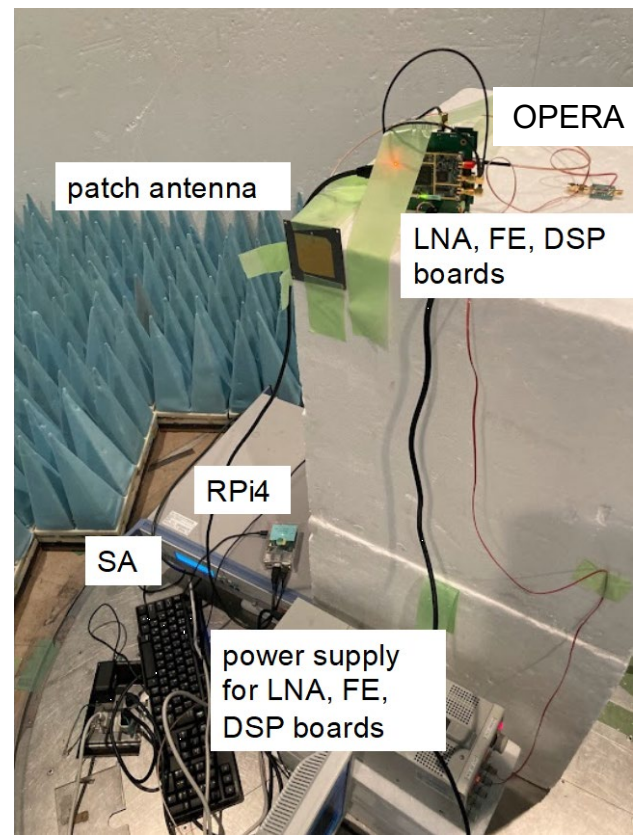


OPERA FMで復調した測距信号

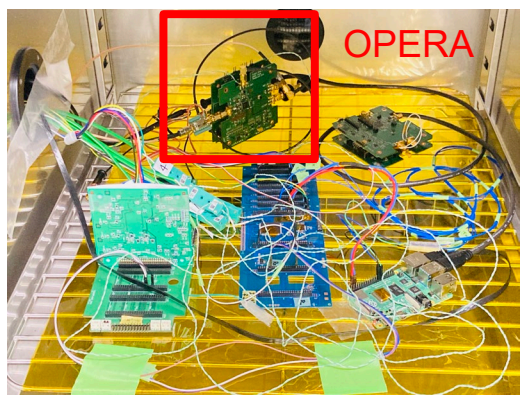
④ 「フライトモデル製作・システム統合」

実施内容・成果

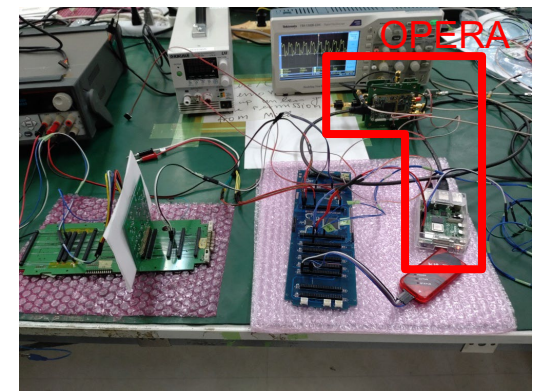
測距機器ペイロードOPERAのフライトモデルの環境試験(熱試験)を行うとともに、2024年打ち上げ予定のLEOPARD衛星に組み込み、システム統合試験を行い、機器の動作を確認した。



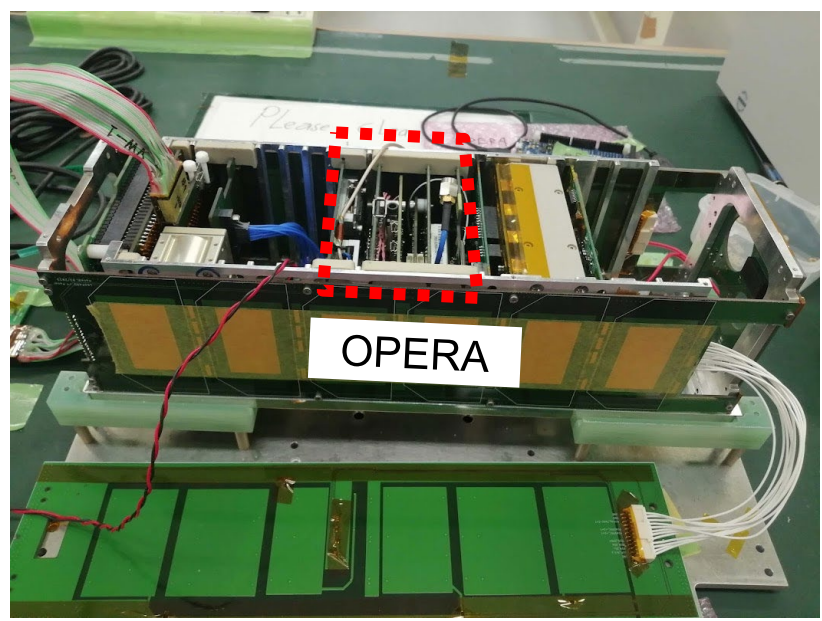
受信感度試験の様子



熱試験の様子



インターフェース確認機能試験の様子



LEOPARD衛星の構体に組み込んだ状態

その他の成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他 研究発表	実用化事業	プレスリリー ス・取材対応	展示会展展
	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 3 国際 : 3	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0
	受賞・表彰リスト					

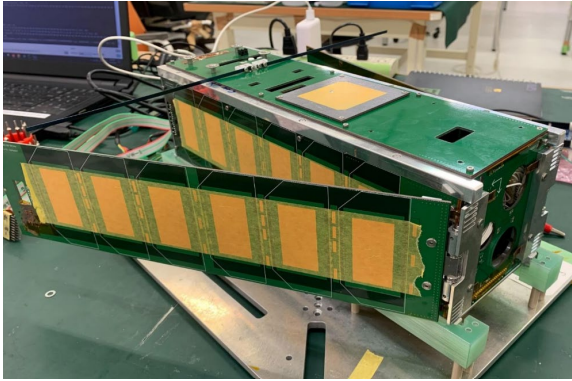
成果展開の状況・期待される効果

本研究で開発される軌道決定技術が実用化の段階に至った時には、超小型探査機による月探査を行おうとする大学関係者、新興宇宙機関、New Space企業といったユーザに対してサービスを有料で提供することができる。探査機と地上局が1対1で通信する必要がなく、地上局側は時間同期された測距信号をブロードキャストするだけで済むので、多数のユーザに対して同時にサービスを提供することが可能である。サービスプロバイダ側は、(a)月方向に向かって複数の地上局から同期された測距信号を常に送り出す、(b)探査機搭載用の測距ペイロードをユーザに提供する、の2点を行えばよい。LEOPARD衛星での実証後に事業化の準備を行う。

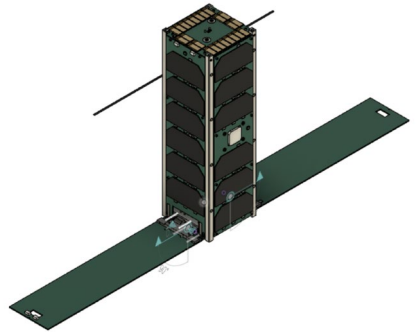
本研究のアウトカムで最も重要なのは、「月探査へのハードルを下げる」ことにある。超小型衛星は「宇宙へのハードルを下げる」ことに成功し、近年のNew Space企業の隆盛をもたらして宇宙セクターの拡大と発展に貢献してきた。本研究は、超小型衛星を通じた宇宙新規参入の流れを月探査にもつなげる効果をもたらす。社会的には月探査により多くの国が参入することに、学術的には独創的な月探査ミッションにより大型探査機ではなし得ない学術的成果を得ることにつながる。人材育成という観点からは、地球低軌道より遥かにチャレンジングな状況でミッションを成功させるために、より高度な人材育成の場を作り出すことができる。

宇宙機関所有の大型地上アンテナを使わないと軌道が決定できないという現状は、月探査への大きな参入障壁となっている。より小さなアンテナでの軌道決定を可能にする技術を確認できれば、「誰でも月探査ができるようになる」未来に一步近づく。

本研究は超小型探査機コミュニティの形成に一役買ったが、国内の宇宙工学・理学関係者が交流を深めることで、「ものづくり」の興味が先行して進められてきた日本の大学における超小型衛星研究を次の段階に進める効果をもたらす。



開発中のLEOPARD衛星



LEOPARD衛星の完成予想図

今後の研究開発計画

- 2024年春まで：LEOPARD衛星に測距ペイロードを搭載し、打ち上げ前の入念なシステム試験を行う
- 2024年春まで：測距信号を発信する地上局の整備を行う
- 2024年末まで：測距信号到達時間差検出の精度をあげる
- 2024年末まで：ドップラーシフト検出の精度をあげる
- 2024年秋以降：LEOPARD衛星を国際宇宙ステーションから放出し、地上の複数局からの信号を衛星側で受信し、地球周回軌道での軌道決定実験を行う
- 2025年以降：月ミッションに向けた打ち上げ機会を確保する

事後評価票

令和5年3月末現在

1. プログラム名 宇宙探査基盤技術高度化プログラム
2. 課題名 地上発の電波測距信号のオンボード処理による超小型探査機の軌道決定技術の開発
3. 主管実施機関・研究代表者 国立大学法人九州工業大学 教授 趙孟佑
4. 共同参画機関
5. 事業期間 令和2年度～令和4年度
6. 総経費 74百万円
7. 自己点検結果
(1) 課題の達成状況
「所期の目標に対する達成度」 ◆ 所期の目標 宇宙機関が使うような特別な地上系に頼らずに大学等の研究者が自力で月探査を行えることを目的とし、月探査を行う超小型探査機に適した軌道決定技術の研究開発を行う。複数の直径数メートルのアンテナから出された測距信号を、探査機側で受信・オンボード処理して、探査機自身で軌道決定する技術を開発する。提案者が培ってきた超小型衛星、特に超小型原子時計の宇宙実証の経験に基づき、市販のソフトウェア無線機、コンピュータボード、原子時計を組み合わせた安価で CubeSat に搭載可能な測距機器を開発する。2021年に国際宇宙ステーションから放出予定の CubeSat を使った概念実証結果と、地上でのエンジニアリングモデル開発に基づき、2023年以降の軌道上実証を目指したフライトモデルを製作し、実証機のシステムと統合する。合わせて、超小型探査機コミュニティを国内大学等を中心として形成する活動を行う。
◆ 達成度 中間報告の際に作成した「実施項目ごとの目標値及び評価指標」は下記の通りである。

実施項目	目標値	評価指標
実施項目① 軌道上での概念実証	KITSUNE 衛星により軌道上で地上局と衛星間の距離を算出できることを示す	距離算出の成功率と算出された距離の精度
	軌道上での原子時計のずれを計測する	原子時計のずれの軌道上での計測時間
実施項目② エンジニアリングモデル開発	測距機器のフライトモデルの開発に移行する	TRL
実施項目③ コミュニティ形成	超小型探査機による月以遠探査に関する研究会を定期的で開催し、研究者間のネットワークを形成する	研究会の開催数 各研究会の参加者数
実施項目④ FM 製作・システム統合	低軌道実証に向けた測距機器のフライトモデルを製作し、衛星システムとの統合を行う	TRL

そのうち、実施項目①の「軌道上での原子時計のずれを計測する」については、業務計画を地上予備機の原子時計のズレを計測するに変更している。以下にそれぞれの達成度を記述する。

実施項目	結果
実施項目① 軌道上での概念実証	KITSUNE 衛星で 3 回実験を行い、うち一回は軌道上で地上局と衛星間の距離を算出できた。算出された距離の精度はおよそ 50km であった。
	地上予備機に搭載された超小型原子時計 (CSAC) の時間ずれを GPS 信号と比較しながら 150 時間に亘って計測した。時間ずれは 150 時間にわたり標準偏差 0.32 μ s で変動すること、地上局からの信号を 10 分間受信したと場合の計測誤差が距離にして 130m ほどになることがわかった。
実施項目② エンジニアリングモデル開発	測距機器のエンジニアリングモデルを開発し、機能試験・環境試験を経てフライトモデルの開発に移行した。TRL=6 に到達
実施項目③ コミュニティ形成	「超小型探査機を用いた月以遠深宇宙探査に関する研究会」を毎年開催し、20 年度 (オンライン) は 165 名、21 年度 (オンライン) は 38 名、22 年度 (対面) は 60 名が参加した。うち、21, 22 年度の若手研究者の参加は 3~4 割程度と思われる。
実施項目④ FM 製作・システム統合	低軌道実証に向けた測距機器のフライトモデルを製作し、衛星システムとの統合を行った。TRL=8 に到達

上記のことから、所期の目標を達成したと結論づける。

「必要性」

・ [他国の先進研究開発との比較における妥当性]

今後の月探査における Position-Navigation-Tracking (PNT) 技術としては、地球近傍インフラに依拠したものから月近傍インフラに依拠したものに徐々に移行すると考えられる。最終的には、GNSS (Global Navigation Satellite Systems) と同様の LNSS (Lunar Navigation Satellite Systems) が月周回軌道に建設されて月周回や月面での活動に対して PNT サービスを提供するものと思われ、各国で LNSS に関する研究開発が進められている。本研究で行っている地上に置かれた数 m 級のアンテナからの信号を受信して軌道決定を行う技術は GNSS から LNSS の移行期に必要とされる技術である。

本研究が目指すのは、多くの超小型探査機が自律的に月探査を行える環境を作ることにある。現在の月ミッション用 PNT は数 10m 級の大型アンテナを配した DSN (Deep Space Network) のような巨大インフラに依拠しているが、DSN の活用は本研究の目指すところに合致しない。LNSS 建設前の次の段階として GNSS 信号を月近傍で受信するというアイデアもあり、研究開発が進められている。超小型探査機に搭載されるアンテナと受信機でも GNSS 信号の受信と解読ができるのであれば、GNSS 信号の月遷移・月周回軌道での利用は本研究の目指すところにも合致する。しかし、本研究で考えるシステムで探査機が受信できる信号強度は、GNSS 信号の直接受信に比べて数桁高く、リソースの限られた CubeSat 等の超小型探査機により適したものである。このようなことから、本研究は今後 LNSS が建設されるまでの間に予想される大学等による多種多彩な超小型探査機による月探査を推進するために必要な研究開発であり、今後の月探査のロードマップにおいても時宜にかなったものであると言える。

・ [科学コミュニティの活性化等]

SLS-1 による 10 機の相乗り CubeSat の打ち上げは、超小型衛星開発を行っている世界中の大学関係者に次の目標を与えるものであった。CubeSat 等の超小型探査機による月以遠探査はまさにホットなトピックとなり、超小型衛星関連の国際会議でもこのテーマを扱ったセッションは非常に活況を帯びている。これまでに 2000 機を超える CubeSat が低地球軌道に打ち上げられ多くの成果を上げてきたが、チャレンジを求める大学関係者、特に大学院生等の若手研究者、の間には超小型衛星開発の魅力が薄れ始めて来ていたのも事実である。そのような時に、月ミッションの可能性がでてきたことは、大きな目標を大学関係者に与えるものであった。2019 年に JAXA が実施した「月周回を中心とした超小型探査機ミッションに関する情報提供要請 (RFI)」に実に 63 件の応募が寄せられたことが関心の高さを物語っている。特に月ミッションは超小型衛星を作る工学系の関係者と超小型衛星を使った観測を行う理学系の関係者が協力していく上で格好の題材であり、「ものづくり」の興味が先行して進められてきた日本の大学における超小型衛星研究を次の段階に進める上でも非常に適したものであった。

そのような中、月ミッションを企図する工学・理学・その他の研究者が一同に介し、情報や意見の交換を行える場を作ることが重要であった。工学関係者の集まりとしては宇宙科学技術連合講演会、理学関係者の集まりとしては日本地球惑星科学連合大会が中心であるが、両者は必ずしも連携していなかった。本来なら宇宙科学研究所がコミュニティ活性化の中心となるべきであったが、必

ずしもそのような機能を果たせていなかった。そのような中で 2020 年に「超小型探査機を用いた月以遠深宇宙探査に関する研究会」を立ち上げることができたのは大きな成果であった。この研究会は宇宙科学技術連合講演会のオーガナイズドセッションとして 2023 年も開催されており、今年からは宇宙科学研究所の若手教員が中心となって進めるなど、世代交代も進みつつ、今後も活動に期待がもてる。

「有効性」

・ [実用化・事業化や社会実装に至る全段階を通じた取組]

中間報告時の審査委員のコメントとして「出口(社会実装に向けたビジネス)についても、もう少し具体的な内容に言及すること」とあるので、それに関連して有効性を述べる。

本研究で開発する軌道決定技術が宇宙実証され、実用化の段階に至った時に想定されるユーザーとしては、CubeSat 等の超小型探査機による月探査を行おうとする大学関係者や新興国宇宙機関、資源探査やエンターテイメント目的で月周回や月面ミッションを行おうとする企業関係者がある。これらのユーザーに対してサービスを有料で提供することはもちろん可能である。DSN のように探査機と地上局が 1 対 1 で通信する必要がなく、地上局側は時間同期された測距信号をブロードキャストするだけで済むので、多数のユーザに対して同時にサービスを提供することが可能である。本研究では、CubeSat に搭載可能な 0.5U(10cmx10cmx5cm)の測距機器ペイロード(電波受信を行うソフトウェア無線機、オンボード処理を行うコンピュータ、超小型原子時計の組み合わせ)を開発したが、このペイロードを各ユーザが購入すれば軌道決定や月面での位置決定を自分で行えるようになる。サービスプロバイダ側は、(a)24 時間切れ目なく月方向に向かって複数の地上局から同期された測距信号を送り出す、(b)探査機搭載用のハードウェアをユーザーに提供する、の 2 点を行えばよい。地上局インフラが必要となるが、数 m クラスのパラボラアンテナ複数(北半球と南半球に 3 局ずつの計 6 局あれば良い)を揃えるだけで良い。測距ペイロードの製作は、現在のところは九工大の内製(九工大で設計した基板を外部業者に製作してもらっている)であるが、設計情報等を全て企業に移管することで持続可能な供給体制をもつことができる。

社会実装に至る取り組みとしては、上記のようなことが必要であり、本研究は社会実装・事業化の可能性が高く課題解決に有効な研究事案であると言える。しかしながら、今回の委託事業の範疇に社会実装・事業化に向けた取り組みを行うことは入っておらず、実際の作業は行なっていない。LEOPARD 衛星での軌道上実証が済めば本格的に開始できると思われる。

・ [(見込まれる) 直接・間接の成果・効果やその他の波及効果の内容]

中間報告時の審査委員のコメントとして「個別技術要素だけでなく成果の意義(社会的・学術的・人材育成的な意義及び裾野拡大へのインパクトが明確か)について、アウトカムも含めて目標/評価の考え方を設定すること。」とあるので、それに関連して有効性を述べる。

本研究のアウトカムで最も重要なのは、「月探査へのハードルを下げる」ことにある。CubeSat に代表される超小型衛星は「宇宙へのハードルを下げる」ことに成功した。CubeSat を通じて宇宙参入を果たした国は 2013 年以降だけでも 30 カ国にのぼる。また国内だけでも 20 を超える大学が人工

衛星を打ち上げた経験があり、非宇宙の民間企業も超小型衛星を通じて宇宙参入を果たしてきた。このような流れが近年の New Space 企業の隆盛につながっており、宇宙セクターの拡大と発展に多大な貢献を果たしてきた。

本研究の波及効果として、「超小型衛星を通じた宇宙新規参入の流れを月探査にもつなげる」ことが言える。社会的には月探査により多くの国が参入することを意味し（月探査の成果を特定の国が独占しないことにつながる）、学術的には独創的な月探査ミッションにより大型探査機ではなし得ない学術的成果を得ることにつながる。人材育成という観点からは、地球低軌道より遥かにチャレンジングな状況でミッションを成功させねばならず、より高度な人材育成の場を作り出すことができる。

本研究で目指すのは「誰でも月探査ができるようになる」未来である。宇宙機関所有の大型地上アンテナを使わないと軌道が決定できないというのは月探査への大きな参入障壁となっている。より小さなアンテナでの軌道決定を可能にする技術を確立できれば、本研究が目指す未来の実現に向けて非常に有効性の高いものである。

「効率性」

・ [研究開発の手段やアプローチの妥当性]

総額 7500 万円のうち、直接経費が 5800 万円ほどで、そのうち人件費に 3900 万円、物品費に 1300 万円弱、旅費・その他に 600 万円という配分であった。物品費はほとんどが実施項目②と④であり、そのうち試験用の HIL (Hardware-in-the-Loop) シミュレータが主たるものであった。実施項目①はすでに KITSUNE 衛星がほぼ完成していたので、搭載ソフト作成・運用・データ解析にかかる人件費が主たるものであった。実施項目③は旅費が主たるものである。測距機器ペイロードの開発という本研究の核心部分に経費を集中させ、他プロジェクト (KITSUNE や LEOPARD) とうまく相乗効果を得られる形で効率よく研究開発を行った。

(2) 成果

「アウトプット」

中間報告時に記載した「アウトプットに関する事後自己点検の実施方針」は以下のとおり

実施項目	ミニマムサクセス	フルサクセス
実施項目① 軌道上での概念実証	TRL8 KITSUNE 衛星に搭載される測距機器が完成し、試験が終了している。	TRL9 KITSUNE による軌道上実験により、衛星と地上局間の距離の算出精度についてのデータを多数取得する
実施項目② エンジニアリングモデル開発	TRL6 測距機器の EM の性能評価を HIL を使って行う	TRL6 測距機器の EM の宇宙環境試験を単体及 LEOPARD のシステム EM に組み込んで行う

実施項目③ コミュニティ形成	国内の関係者を集めた深宇宙探査に関するコミュニティを形成し、研究会を3回以上実施する。	宇宙工学と宇宙物理学の連携・融合に資するコミュニティを形成する活動により特別セッションを企画・開催し、国内大学等から延べで300人以上の参加を得る。
実施項目④ FM 製作・システム統合	TRL8 測距機器のFMの性能評価をHILを使って行い、LEOPARDのシステムEMに組み込んで、システム統合試験を行う	TRL8 測距機器のFMをLEOPARD EMに組み込んで、静止軌道圏～月以遠を想定した試験により目標性能を確認する。さらに、事業終了後の地球周回軌道での実証ミッションの見通しが示されている。

これらについて、アウトプットを記載する

実施項目	アウトプット
実施項目① 軌道上での概念実証	KITSUNE 衛星で軌道上実験を行い、衛星と地上局間の距離の算出精度についてのデータを3回取得した。ミニマムサクセスとフルサクセスの中間を達成。
実施項目② エンジニアリングモデル開発	測距機器のEMの宇宙環境試験を行い、LEOPARDのシステムEMに組み込んで熱サイクル試験を行った。フルサクセスを達成。
実施項目③ コミュニティ形成	宇宙工学と理学の関係者からなる「超小型探査機を用いた月以遠深宇宙探査に関する研究会」を3回開催し、延べで263名が参加。フルサクセスをほぼ達成。
実施項目④ FM 製作・システム統合	測距機器のFMの性能評価をHILシミュレータを使って行い、LEOPARDのシステムEMに組み込んで、システム統合試験を行った。測距機器としてはTRL=8に到達。ミニマムサクセスを達成。

「アウトカム」 (令和5年10月末時点)

中間報告時に記載した《アウトカムに関する事後自己点検の実施方針》は以下のとおり

実施項目①については、UHF 測距機器を応用した電離層電子密度の測定ミッションの実現性に目処がたつことを波及効果の指標とする。

実施項目②については、実施項目④にスムーズにつながることを波及効果の指標とする。

実施項目③については、深宇宙探査に関する研究会で形成したネットワークの取り組みを継続し、ネットワークへの民間企業の参加を促し、宇宙探査活動の裾野を広げることを波及効果の指標とする。

実施項目④については、超小型探査機に搭載可能な技術の構築がなされることを効果・効用の指標とし、実際に使用する深宇宙ミッションの確保ができることを波及効果の指標とする。

実施項目①

KITSUNE 衛星では、衛星が受信した UHF 測距信号をオンボード処理し、PRN (Pseudo Random Number) 符号の解読や信号の時間遅れを検出できることを示した。電離層電子密度測定のためにはオンボード処理を行う搭載コンピュータのサンプリング速度を 1 桁あげること、GPS による衛星位置の同定を確実にすること、といった課題が抽出できた。これらは解決できない課題ではなく、電離層電子密度の測定ミッションの実現性に目処がたったと言える。

実施項目②

測距機器の EM から FM 開発にスムーズに繋がった。よって波及効果は得られたと結論づける。

実施項目③

2023 年 10 月に開催された研究会では、アークエッジスペースや LETARA といった民間企業が参加しており、波及効果は得られたと結論づける。

実施項目④

測距機器 FM は 2024 年に地球周回軌道に打ち上げ予定の LEOPARD に搭載されて軌道上試験を実施する予定であり、システム統合試験を進めている。そのため超小型探査機に搭載可能な技術は構築されたと言える。しかしながら、実際に使用する深宇宙ミッションの確保はできておらず、今後の課題である。

(3) 今後の展望

2024 年に地球周回軌道に 3U のキューブサット (LEOPARD: Light intensity Experiment with On-orbit Positioning and satellite Ranging Demonstration) を打ち上げる予定である。中間報告時には 2023 年度としていたが、衛星本体の開発が遅れており、現在のところ 24 年 3 月に衛星完成・引き渡し、24 年秋頃に打ち上げ予定である。それに向けて打ち上げ機会の確保 (民間事業者と打ち上げ契約を締結済み)、周波数調整 (ITU に API/CR を提出済み) を進めている。主たる遅れの原因は資金面とコンポーネント調達の遅れである。現在自己資金で開発中であるが、PFM (Proto Flight Model) 一式のみを製作し打ち上げる方向で予算圧縮を図っている。打ち上げ資金は確保済みである。PFM 一式のハードウェアは納入済みである。

LEOPARD 衛星のミッションとしては、OPRERA のフライト実証の他にルーナーホライズングロー撮影用カメラによる地球大気を通過する地球縁の太陽光の撮影、シングルイベントラッチアップ対策素子の宇宙実証、トータルドーズ地上試験方法の軌道上試験による検証、展開型太陽電池パドルの実証等を考えている。

8. 評価点

B

評価を以下の5段階評価とする。

S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。

A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。

B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。

C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。

D) 成果はほとんど得られていない。

9. 評価理由

将来、超小型衛星を使った宇宙探査の数が増えると、衛星と地上局が一对一对応する従来の”two way ranging”では対応できず、GPSのように放送型の”one way ranging”で、かつ超小型衛星に搭載できる小型受信機で測距できる技術が必要となる。本事業ではその基本原理をLEO超小型衛星により実証し、さらに本格実証に向けたFM機器の開発まで計画通り進めることができたと評価できる。

計画に従いきちりと技術開発が進められ、一定レベルの開発成果が得られており、軌道上での概念実証の成果は限定的ではあるが、それ以外の項目は概ね目標に沿って相応の成果を挙げたと評価できる。

本事業の成果は当面の有効な先進技術として有効な開発成果になると考えられ、「誰でも月探査ができるようになる」未来に近づくために、本事業を足掛かりとして、今後さらなる精力的な取り組みが期待される。

また、技術実証のためのCubesatの開発を進めており、打ち上げ手段は確定していないが軌道上実証の実現性は高いと思われ、宇宙航空利用の促進への一層の貢献が見込まれる。

一方、提案されている手法の原理は既知のものであり、本来の課題は原理実証(測距ができた)ではなく目標とする測距精度(5km)を実現する性能をもつ技術の確立にある。精度を決める要素は主なものでも、①回線設計と受信S/N比、②PRNコードの周波数(解像度)と受信機構成(LNA、受信帯域幅、検波手法)、③搭載原子時計の安定度と時刻誤差の校正手法、④地上局間の時刻同期精度、などが上げられる。しかし、本事業ではいずれも定量的に分析と設計を行い、実証データを設計値と比較評価していることが読み取れなかった。例えば、①実証時のS/N値は何で回線設計と合っているか、LEO(500km)から月近傍(380,000km)で信号電力は50dB以上減衰するが月近傍での測距精度はLEO実証データから外挿できるのか、②実証データでは数点(1/29データで7回、10/28データで8回、10/29データで2回)しか検波できていないと示されているが、そもそも常時PRNロックオンできているのか、できていないならS/Nが設計値通りになっていないのではないか、③原子時計は安定度(アランバリエンス)を評価して測距精度に反映しているか、④地上局間の時刻同期がGPS1PPSで要求値通りに可能か、などの点において説明が十分示されていない。

誤差バジェットの積み上げがないまま軌道上実証を行っても得られた精度が正しいか、技術が確立しているかは判定できない(成果のTRL6、8には同意できない)。

最終的な性能検証が目標値に届いておらず今後の目標達成の見込みも不明確であり、一部成果が十分でないと思われる。

また、費用対効果や、今後の高度化、社会実装（ビジネス化/製品化/ユーザ開拓）へのロードマップが明確に示されていない。

本事業に参加した学生の知識や技術の向上、意識の変容など教育効果の評価指標に係る情報についても明確に示されるとなお良い。

以上より、本課題は、超小型衛星による月探査を実現可能とする”one way ranging”の原理実証を軌道上で行うなど予定した計画は実行できたが、課題である測距精度（5km）の定量的評価ができていないことから、相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果（定量的な技術評価）は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。

今後は、以下の点が期待される。

➤ 本事業で立ち上げたコミュニティにおける議論により技術の評価がなされ、今後より信頼性の高い定量的な軌道上実証とその評価が行われることに期待する。