

「月面・月周回軌道宇宙機への測位・IoT通信サービスを提供する超小型衛星」の成果の概要について

実施体制	主管実施機関	国立大学法人福井大学 特命准教授 青柳賢英	実施期間	令和3年度～ 令和5年度 (3年間)	実施規模	予算総額(契約額) 140百万円		
	研究代表者名					1年目	2年目	3年目
	共同参画機関					40百万円	50百万円	50百万円

背景・全体目標

月面上のローバー、観測器及び月周回軌道衛星（以下「月宇宙機」）への「測位およびIoT（低ビットレート）通信」のサービスを提供する6Uサイズの超小型衛星インフラに関する研究を行い、デファクトスタンダードを目指す。初期の実験・実証では、月宇宙機やサービス提供宇宙機は十分なリソースが持てないことが想定される。そこで、月周回軌道に複数機投入され、測位に使える電波を放送し、月地球間の通信を中継する超小型衛星（月周回サービス機と称する）によるインフラ構築を目指し、測位信号送受信機・IoT通信機器の開発とその地上実証、これら機器を搭載できる6Uキューブサットの月周回サービス機の設計、エンジニアリングモデル(以下EM)の開発を行い、必要な予算と打ち上げ機会、および実証対象の月宇宙機の目途が得られたら、すぐにこの月周回サービス機の実験ができるまでの準備を実施する。なお、本事業で開発した衛星は、月測位通信サービス衛星「LunaCube」と命名した。

全体概要・主な成果

① 測位装置のEM開発と地上試験による実証

ソフトウェア無線とモデルベース開発を活用した測位送信機を開発し、放射線・熱真空・振動試験等を実施し、EMを完成させた。さらに、ソフトウェア無線機を利用し、月面で受信される測位電波を模擬的に生成する月測位信号シミュレータの開発、測位精度の検証を行い、実機シミュレーションの結果2drms(測位誤差95%内)は53.6mという結果を得た。

② IoT通信装置の地上試験による実証

LoRa無線通信を利用し、月周回・月面間通信用のIoT通信装置のEMを開発した。アンテナパターン測定を実施し、得られた結果をもとに、End-To-End試験を実施した。送信電力20mW以下で293bpsの通信サービスを月軌道・月面間で提供できることを示した。

③ 衛星EMの開発、環境試験及び将来検討

測位信号送受信機とIoT通信装置を搭載した6UキューブサットEMを完成させた。月周回環境における熱解析、電力解析、回線計算および姿勢制御シミュレーションを実施し、本衛星が月周回軌道において、問題無く運用可能であることを明らかにした。月軌道環境を想定した熱真空試験、振動試験、温度サイクル試験を完了した。2機の衛星の軌道維持コストを下げる場合に最適な軌道を明らかにした。最適な軌道としては、高度400km、軌道傾斜角80度、2衛星の位相差15度の軌道とし、このときのユーザー測位誤差は24.3m、各衛星の軌道維持コストは $\Delta v \approx 5.2\text{m/s}$ と導出した。

以上の成果により、本事業の目標を達成できた。

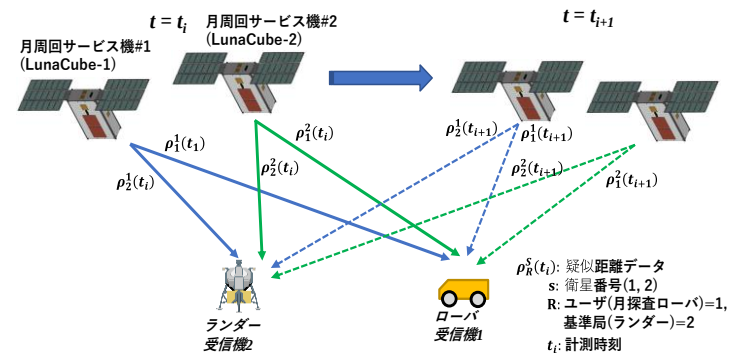
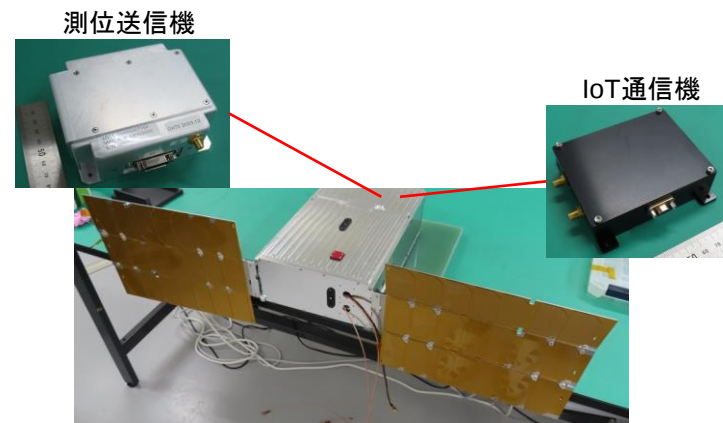


図 月宇宙機測位システムの原理

MDPO(Multi-epoch Double-differenced Pseudorange Observations):
月宇宙機(ローバ)が停止していれば、2機の測位衛星からの2回の観測で測位演算が可能



月測位通信サービス衛星LunaCube EM

①「測位装置のEM開発と地上試験による実証」

実施内容・成果

ソフトウェア無線による測位装置の開発

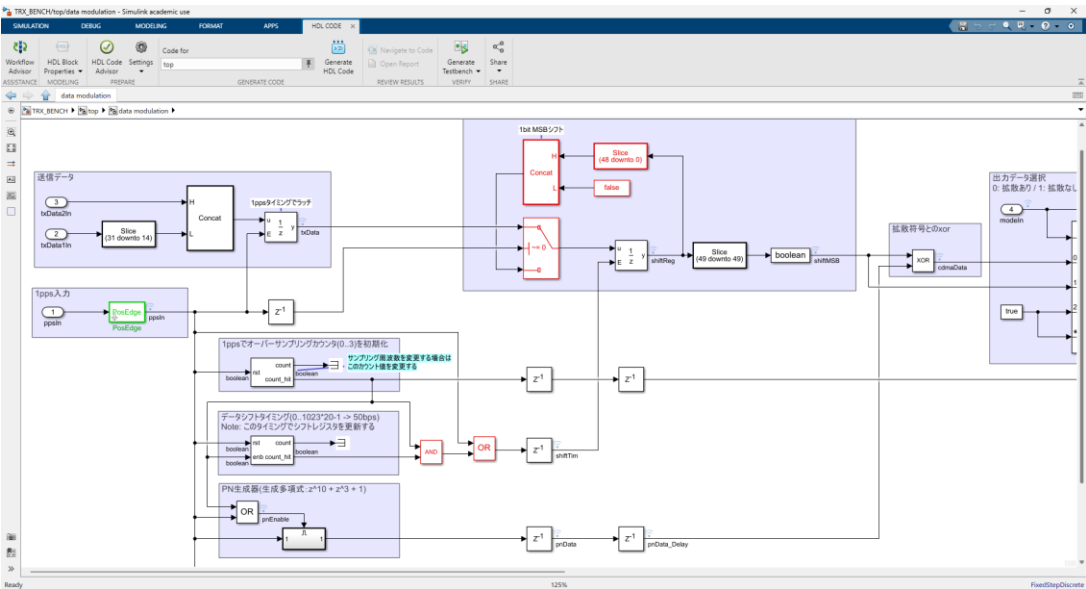
- ・ 将来の月測位衛星システムの相互運用に向けて、NASAやESAが中心となり測位信号の仕様を検討中
- ・ 仕様が未確定な状態で送信機開発を行うために、ハードウェアに依存せずソフトウェアの変更のみで新しい仕様に対応できるソフトウェア無線（SDR: Software Defined Radio）を採用
- ・ EMの測位信号周波数はSFCG勧告に従い2GHz帯とした

モデルベース開発による測位装置開発の効率化

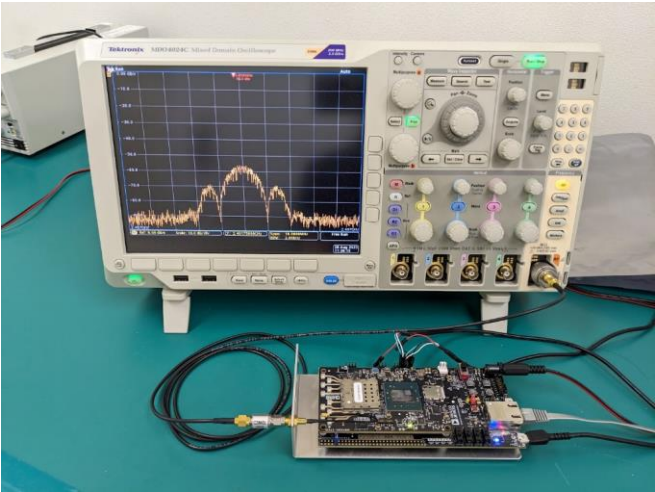
- ・ ソフトウェア無線の特性を生かし、送信機の開発にはモデルベース開発（MBD: Model Based Development）を採用
- ・ 月測位送信機の機能を数値モデル化し、シミュレーションをベースとした開発や検証を行うことで、効率的な開発を実現



月測位送信機EMの外観



モデルベース開発による月測位送信機の開発



月測位信号の生成

①「測位装置のEM開発と地上試験による実証」

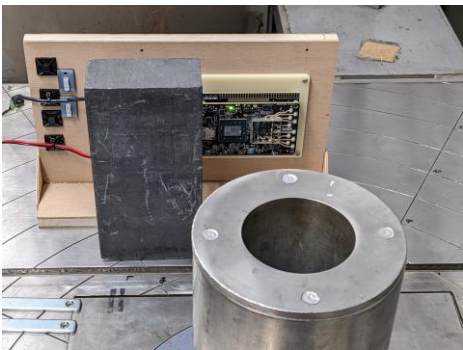
実施内容・成果

月測位送信機の環境試験

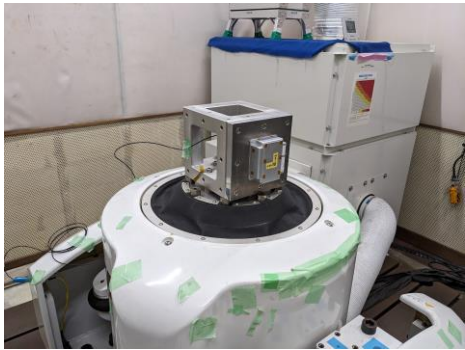
- 市販のSDR開発基板をベースとした月測位送信機に対し、放射線試験・振動試験・熱真空試験を実施
- 月周回衛星搭載機器としての要求を満足することを確認

地上試験による測位性能の実証

- 測位性能の実証実験のために、月面で受信される月測位信号を模擬するシミュレータを開発
- ソフトウェア無線をベースとした月測位受信機でシミュレータからの信号を受信し、測位演算を行うことで、測位性能を確認
- 2機の月測位衛星により、53.6 m (2drms) の測位精度が得られることを確認



月測位送信機の放射線試験(トータルドーズ)



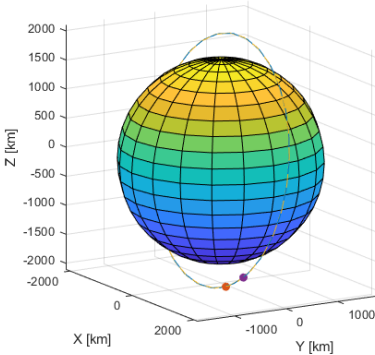
月測位送信機の振動試験



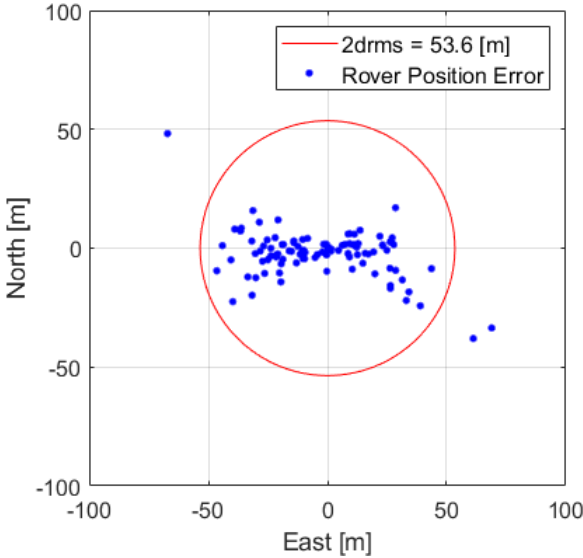
月測位受信機の試作機

```
D:\Work\LNSS>lnss-sdr-sim
Usage: lnss-sdr-sim [options]
Options:
  -e <yuma_alm>      Keplerian elements of navigation satellites (required)
  -u <user_motion>   User motion file (dynamic mode)
  -l <location>      Lat,Lon,Hgt (static mode) e.g. 35.6813,139.7662,10.0
  -t <date,time>     Scenario start time YYYY/MM/DD,hh:mm:ss
  -o <output>        I/Q sampling data file (default: lnsssim.bin)
  -s <frequency>     Sampling frequency [Hz] (default: 26000000)
  -b <iq_bits>       I/Q data format [8/16] (default: 16)
  -D                Enable debug mode

D:\Work\LNSS>lnss-sdr-sim -e alm_lunacube.txt -l -89.66,129.2,100.0
Using static location mode.
xyz = -6516.6, 7990.0, -1737069.4
lla = -89.660000, 129.200000, 100.0
Start time = 2023/08/30,16:44:30 (2277:319470)
01 148.3 24.8
02 165.0 4.8
Number of channels = 2
Generating baseband signals...
Time = 300.0
Done!
Process time = 28.841[sec]
```



シミュレータによる月測位信号の生成



地上試験による測位精度の確認

②「IoT通信装置のEMの開発と性能評価」

実施内容・成果

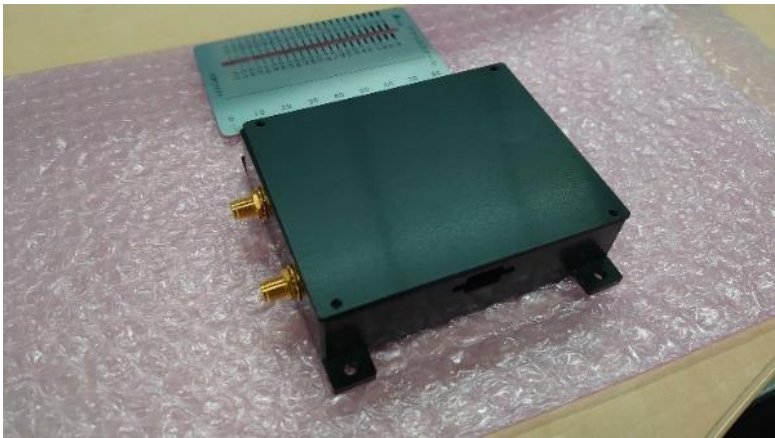
月におけるIoT通信: 月宇宙機間を結ぶ低速度の通信回線を提供する

[用途]

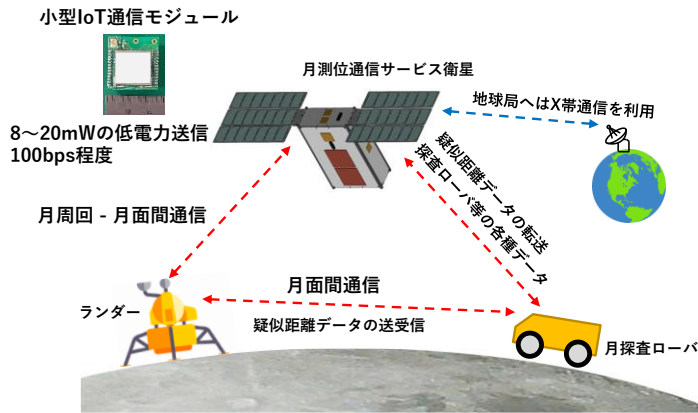
- 月宇宙機(月面ランダーや探査ローバー)の情報収集・転送
 - 機体の各種や月面上に設置したセンサ情報のデータを受信し、送受信機のメモリにデータ保存を行い、受信データを地球にデータを転送する
- ランダーとローバー間の疑似距離データの転送中継

IoT通信装置EMの開発結果

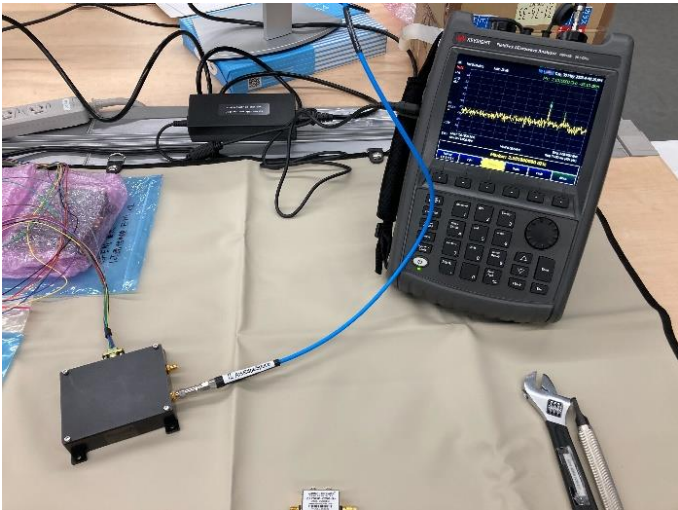
- 月周回衛星とローバー側両方に搭載することを前提として、同じ設計とした
- 変調方式: LoRa (低消費電力で長距離通信ができる通信方式の規格)
- 送信出力: 最大250mW
- 通信速度: 最大1953bps
- 電源電圧5V、消費電流300mA以下
- 月周回-月面間(ランダー・ローバー)の通信と月面間通信の両周波数(2GHz帯)に対応
 - SFCG勧告に準拠した周波数
 - 月周回衛星との通信と月面間通信が1台で可能になり、重量などのリソース節約になる



IoT通信装置EM



IoT通信による月周回-月面間のデータ中継



IoT通信装置EM送信試験

②「IoT通信装置のEMの開発と性能評価」

実施内容・成果

IoT通信装置EM機の実験環境

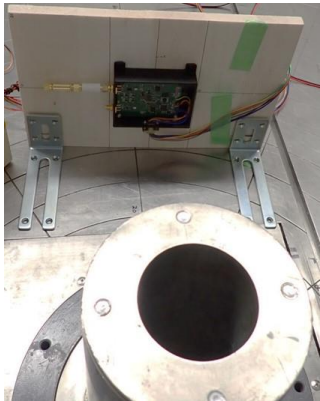
- 市販の特定小電力無線機をベースとした月IoT通信装置に対し、放射線試験、温度サイクル試験(-40℃ ~60℃)を実施して問題が無いことを確認。
- 熱真空・機械環境試験は衛星搭載後に実施

2GHz対応Uplink及びDownlinkパッチアンテナ

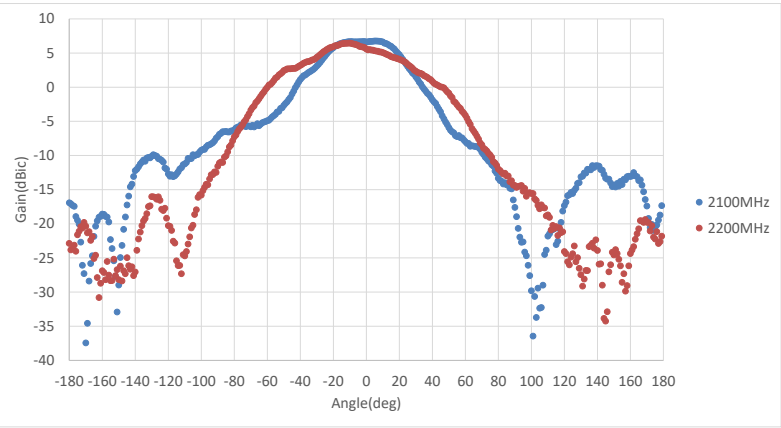
- 6Uキューブサットに搭載可能で高利得な小型パッチアンテナ(各100mmx100mm)を開発
- 電波暗室でアンテナパターン測定を実施し、設計通りの利得であることを確認(送信6.78dBi, 受信6.47dBi, 半値角 $\pm 30^\circ$)
- 同じアンテナをローバー等にも取り付けすることで通信可能、さらにローバー側のアンテナが低利得のモノポールアンテナ(2.14dBi)であっても、衛星側アンテナが本開発アンテナであれば通信成立する

End-To-End試験

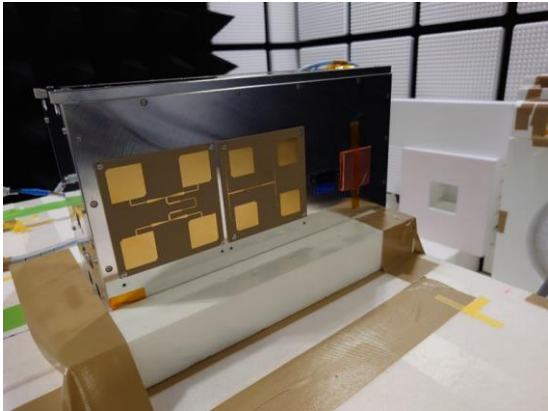
- 測定したアンテナ利得をもとに回線計算を行い、この伝送路を模擬したEnd-To-End試験を実施した。
- 性能評価の結果、20mWという微弱電波で293bpsの通信が可能になったことが分かった
- 運用解析の結果、20mWで、1パスにつき約30kBの通信サービスを月軌道-月面間で提供できることを確認した。



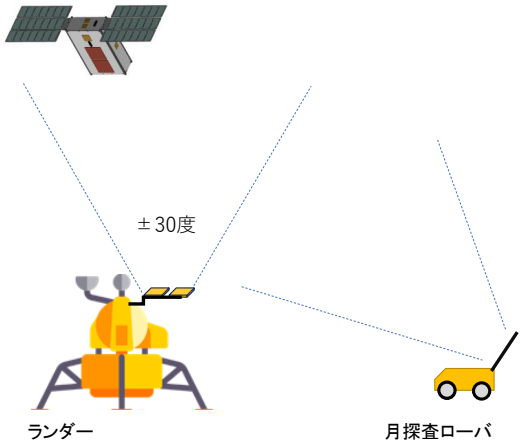
IoT通信装置の放射線試験
(トータルドーズ)



開発したUplink及びDownlinkパッチアンテナ利得



開発したUplink及びDownlinkパッチアンテナ



IoT通信装置EM一月面通信イメージ

③「衛星EMの開発，環境試験及び将来検討」

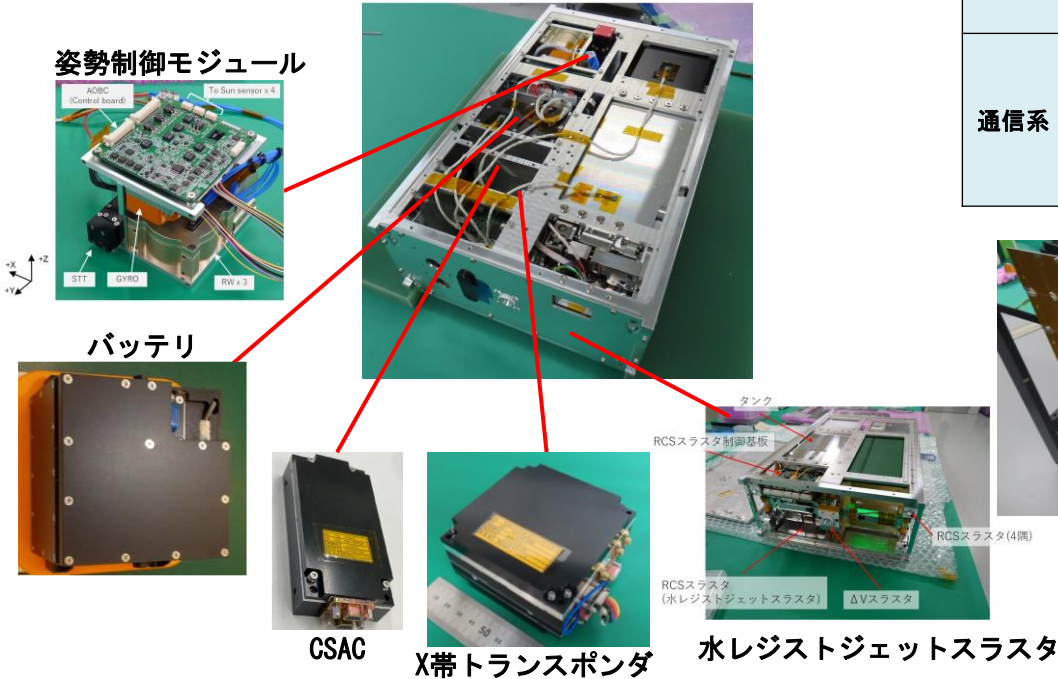
実施内容・成果

衛星EMの開発

- ・ 実証済の地球周回キューブサットバス (TRICOM-2) をベースに設計し、多くのコンポーネントを地球周回での実績品を使用することにより、早期開発を実現
- ・ 月周回6Uキューブサット用の姿勢軌道制御系は新規設計
 - ・ 姿勢制御モジュールはスタートラッカを含め1U(10cm立方) で構成
 - ・ PaleBlue社の水レジストジェットスラスタを採用
- ・ 月測位衛星システムに必要な地上衛星間の時刻同期機能はX帯トランスポンダとCSAC(チップスケール原子時計) を利用したダイレクトPMIによる時刻同期を用いることを検討
- ・ 安全な運用を目指した設計
 - ・ 受信アンテナ・送信アンテナともにどのような姿勢でも地球局との通信が可能な配置設計
 - ・ 姿勢喪失時においても、Safetyモードであれば電力収支が正になる電力設計

姿勢軌道制御系の仕様

項目	仕様
スタートラッカ	クロスボアサイト: 15arcsec(1 σ) ボアサイト 90arcsec(1 σ)
太陽センサ	視野角 +/-60° 精度 < 0.5°
ジャイロ	バイアス安定度 > 0.3° /h 範囲 +/-200° /s
リアクションホイール	蓄積角運動量 30.6mNms 最大トルク 2.3nNm 回転速度範囲 +/-
スラスタ	推力: 4mN(Δ v), 1mN(RCS) Isp: 70s 推進剤量: 0.9kg



サイズ	100 × 226.3 × H366 mm ³
重量	< 14kg (wet mass)
姿勢・軌道制御系	3軸 姿勢安定 月面指向・太陽指向・地球指向 機器構成 3軸リアクションホイール 水レジストジェットスラスタ RCS 4基 軌道制御1基 スタートラッカ 1台 3軸ジャイロ스코ープ 太陽センサ 4台
電源系	発生電力: 50.7 W (最大) 消費電力: 20.6W (平均) バス電圧: 12V(非安定), 5.0V(安定) 太陽電池パネル: 7直6並 リチウムイオン電池 (12.6V, 77Wh)
通信系	テレメトリ/コマンド: X帯 コマンド通信速度: 16 ~ 1024 bps, ダウンリンク通信速度: 128 ~ 8192bps 送信用低利得アンテナ: 4面 送信用中利得アンテナ: 1面 受信用低利得アンテナ: 2面

展開型太陽電池パネル
(最大発生電力: 50.7W)

③「衛星EMの開発，環境試験及び将来検討」

实施内容・成果

詳細設計のシミュレーション

月周回環境における熱解析、電力解析、回線計算および姿勢制御シミュレーションを実施し、本衛星が月周回軌道において、問題無く運用可能であることを明らかにした。

【熱解析】

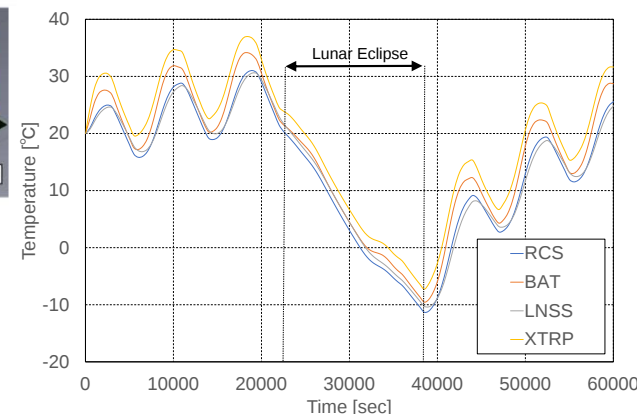
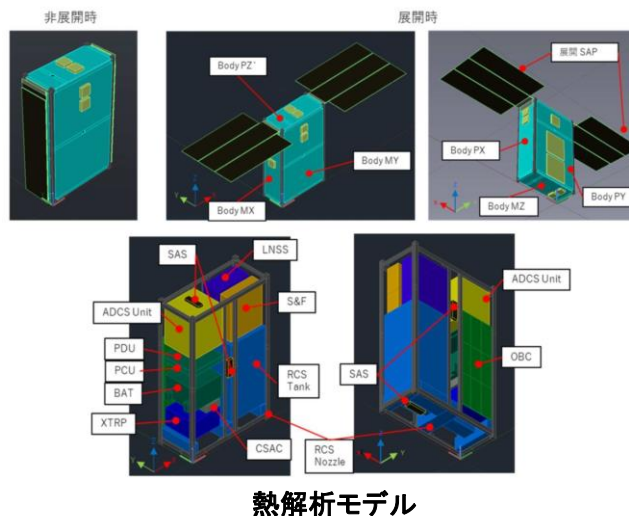
- ・ 定常時は、全ての機器の正常温度範囲内であることを確認できている。月蝕中には大幅に温度が低下(-10℃)することが分かった。スラスタが動作温度範囲を下回るが、保存温度は満たすため、月蝕期間中に噴射をしない限りは問題にはならないと考えられる。また、バッテリーは、月食期間中は放電状態であり、放電時の許容温度は満足していることが分かった。

【姿勢制御】

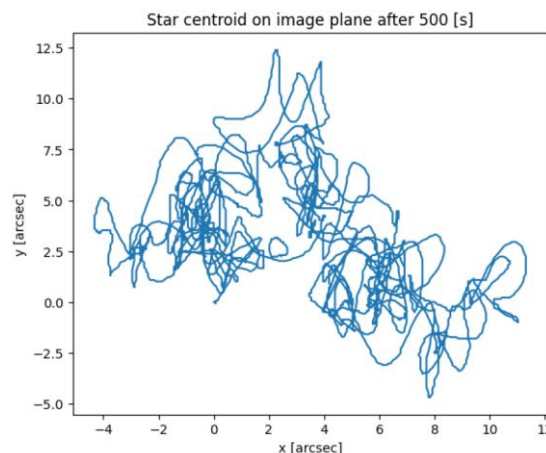
- 姿勢精度は、20arcsec以下に抑えられており、ミッションおよび地上局との通信を確立するのに十分な精度は得られている。また、アンロード(RCS噴射)頻度と推進剤量や外乱環境での軌道制御の成立性も確認できており、姿勢制御系設計の妥当性を確認できた。

【電力設計】

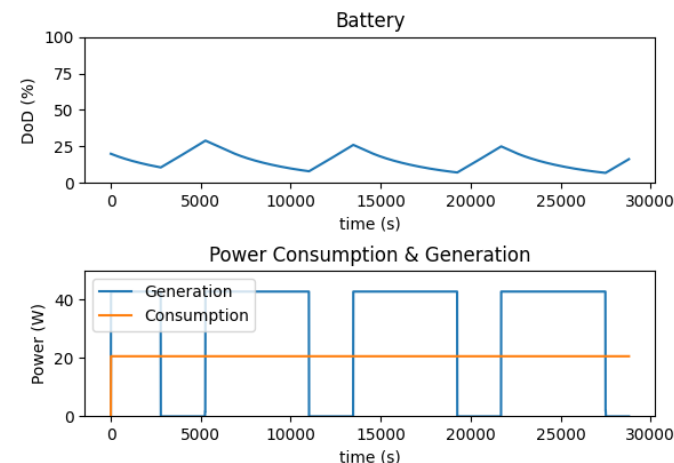
- 太陽指向時の放電深度(DoD)は30%、軌道維持時はDoD60%程度までを許容することにより成立することを確認できており、初期姿勢捕捉時は、5時間以内に太陽指向が確立できれば電力収支が十分に成り立つことを確認できた。姿勢喪失(タンブリング)時においてもSafety holdモードであれば、電力収支は正になり、衛星の生存性が確保できていることが分かった。



月蝕時の温度履歴例
(*LNSS: 月測位送信機)



モデルベースシミュレーションによる姿勢 精度の評価



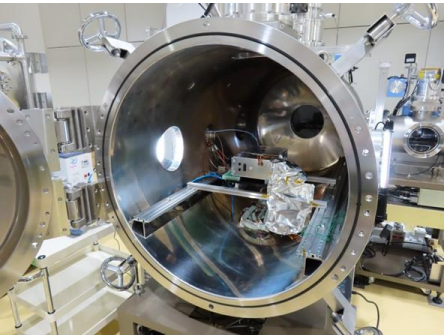
定常時の電力収支例
(上: DoD, 下: 発生・消費電力)

③「衛星EMの開発，環境試験及び将来検討」

実施内容・成果

EMの宇宙環境試験

- 月測位送信機EMとIoT通信装置EMを搭載した衛星EMは月軌道環境を想定した熱真空試験、振動試験、温度サイクル試験を完了し、各環境において問題無く動作することを確認できた。
- 熱真空試験は、高温側は全機器問題無く動作完了、低温側はスラスタを除く全機器問題無く動作完了した。
 - スラスタ噴射は、推進剤利用効率を上げるために、+30℃程度の温度まで上昇が必要なため、温度上昇後に噴射試験を実施
- 振動試験は、想定輸送手段でのQTランダム振動試験を実施
- 温度サイクル試験は、-10℃～+50℃、5サイクル実施



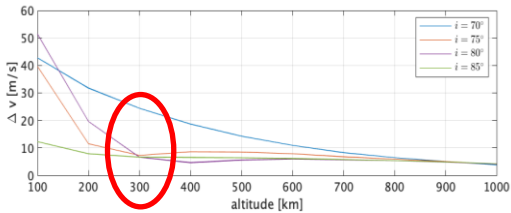
熱真空試験



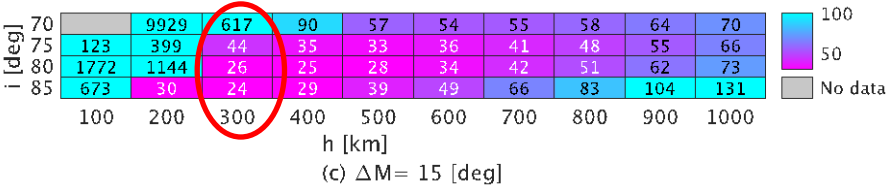
振動試験

軌道・測位シミュレーション

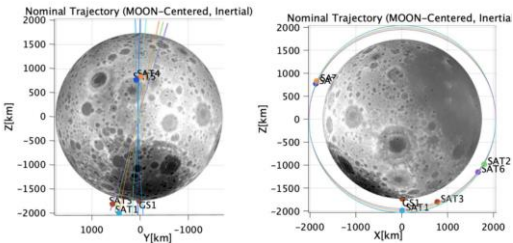
- 地上局とのレンジング運用
 - 本衛星を福井工業大学アンテナ(13.5m)によりレンジング運用(RARR)する場合、5分間隔で最低3回以上の観測は必要
- 測位手法にMDP0を使う2機の衛星の軌道維持コストを下げる場合に最適な軌道をシミュレーションにより明らかにした。
 - 最適な軌道としては、高度400km、軌道傾斜角80度、2衛星の位相差15度の軌道とし、このときのユーザー測位誤差は24.3m、各衛星の軌道維持コストは $\Delta v \approx 5.2\text{m/s}$ と導出した。衛星EMは $\Delta v = 6.6\text{m/s}$ x 2倍マージンで設計しており、衛星設計としても問題が無いことが分かった
- 2機以上の月測位衛星の最適な軌道配置は、需要(2機の衛星が極域で同時可視となる測位時間割合の目標をいつ達成するか)により変わる事を明らかにした。
 - (Case2) 1, 2機目を隣接させた場合、2機だけでも測位の時間割合は10%を確保できるが、6機での上限は30%までとなる。
 - (Case5) 時間割合40%を6機で達成する場合は、2機投入時点での時間割合を犠牲にして3機目以降に時間割合を上げるという方法になる。
 - すなわち、短期的に必要な需要だけではなく長期的な需要を考慮した上で軌道配置を選定する必要があることを明らかにした。



各軌道(高度、傾斜角)と軌道維持コスト(Δv)



各軌道(高度、傾斜角)におけるユーザー測位誤差のグリッドサーチ結果(位相差15°のみ抜粋)



(Case5) 6機配置時の最適な軌道プロファイルの例

(令和4年度のみ) ④「普及啓発(ワークショップ開催)」

実施内容・成果

中学生・高校生に対する「衛星測位技術を学ぶワークショップ」

- ・ 福井県教育総合研究所の協力のもと、2022年7月24日に開催
- ・ 福井県内の中学高1校、高校4校が参加(内訳: 中学生 4人, 高校生 9人)
- ・ 「衛星測位技術」に関する講義、GPS付き缶サットによるGPSアート作成実験を実施し、実践的に原理・GPSの使い方を学んでもらった。
- ・ 参加した生徒達は、「ふくい缶サットHigh School」にて電子回路やプログラミングを学んだ生徒達がほとんどであり、積極的に実験用缶サットの組立を進めていた。GPSアートの作成実験では、意図した通りの絵になるように、どのように歩けば良いかを生徒達で議論し、例えばコーンや班員などを目印にするなど、各班で工夫して進めていた。



ワークショップの様子



GPSアート実験の様子

企業向け講義・実習(人工衛星設計基礎論)

- ・ 2023年3月16日に、ふくい宇宙産業創出研究会の協力のもとに開催
- ・ 参加人数は18名、9機関(県、企業、大学)
- ・ 衛星測位の講義と、衛星通信の講義、衛星通信のためのアンテナパターン測定の実習を実施。
- ・ アンテナパターン試験実習では、福井県工業技術センターの6面電波無響室を使用して、参加者らがキューブサットに搭載するアンテナの利得測定を行った。
- ・ 地域企業らに衛星測位・通信を学んでもらい、積極的な議論や作業を行うことができた。また、本事業への協力企業も受講生として参加しており、本事業で使用している測位・通信の技術理解の促進ができた。



生徒達が作成した
GPSアートの例(赤字部分)



缶サット内部部品



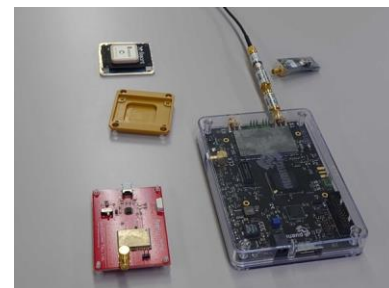
生徒達が組み立て
GPS付き缶サット



衛星通信の講義・実習の様子
(左: 6面電波無響室でのアンテナパターン実習)



衛星測位の講義の様子

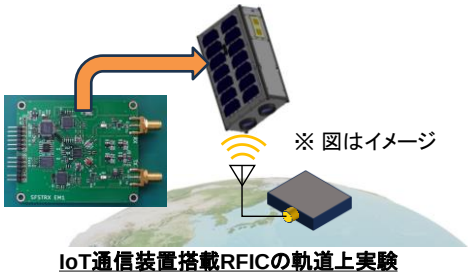


その他の成果

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：2	国内：11 国際：1	国内：0 国際：0	国内：1 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

- 月測位送信機
 - ソフトウェア無線とモデルベース開発による衛星搭載機器開発への新規アプローチは、A社が研究開発を進める月測位衛星に採用
 - この開発アプローチは、効率性と柔軟性を向上させた今後の衛星開発に寄与することが期待される。
- IoT通信装置
 - 装置の一部であるRFICはアークエッジ・スペース社の地球周回衛星およびセーレン社を中心として開発するFUSION-1衛星(福井大学はミッション担当)に搭載され、軌道上実証予定
 - IoT通信装置本体は、アークエッジ・スペース社衛星のペイロードの一つとして搭載検討を進めたが、直近の衛星では搭載スペースの関係で見送った。但し、今後の調整次第では別機に載せられる可能性があるため、検討は継続する。
- 月周回6Uキューブサットのシステム設計
 - 詳細設計の内容を国内外で広く発表をしている。また、本事業終了後もSmall Satellite Conference等において国内外発表を行っており、今後増加することが予想される月周回キューブサットの設計標準に対する貢献が期待できる。



月ミッションに利用可能な福井工業大学
あわら宇宙センター13.5mアンテナ



Small Satellite Conference 2024での
発表

今後の研究開発計画

- 月測位通信サービスを行うミッション機器・キューブサットのEM開発に成功しており、測位・通信インフラの構築に目途が立ったと言える。本事業終了後は、想定するX帯地球局(福井工業大学あわら宇宙センター13.5mアンテナ)との電波適合性試験準備を継続して実施している。
- 月周回軌道への投入に関しては、月面開発事業者やJAXAらにコンタクトを取り、投入機会の探索をしているところである。また、測位技術や時刻同期機能の実証は、地球周回での実証機会の計画を検討しているところである。
- 開発したIoT通信装置に搭載するRFIC単独での地球周回での軌道上実証は、2024年度に実施することを計画している。
- MDP0測位手法は、超小型衛星以外の今後の月測位システムの初期運用や技術実証においても利用ができる方法である。本事業の成果はMDP0の説明も含めて、本事業終了後もSmall Satellite Conference等において国内外発表を行っており、本手法の活用の普及についても継続的に行っていく。

事後評価票

令和6年3月末時点

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	月面・月周回軌道宇宙機への測位・IoT 通信サービスを提供する超小型衛星						
3. 主管実施機関・研究代表者	国立大学法人 福井大学 特命准教授 青柳賢英						
4. 共同参画機関	国立大学法人 東京大学、学校法人中部大学 中部大学						
5. 事業期間	令和3年度～令和5年度						
6. 総経費	140百万円						
7. 自己点検結果	S						
(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 月面上のローバー、観測器及び月周回軌道衛星（以下「月宇宙機」）への「測位およびIoT（低ビットレートの）通信」のサービスを提供する6Uサイズの超小型衛星インフラに関する研究を行い、デファクトスタンダードを目指す。初期の実験・実証では、月宇宙機やサービス提供宇宙機は十分なリソースが持てないことが想定される。そこで、月周回軌道に複数機投入され、測位に使える電波を放送し、月地球間の通信を中継する超小型衛星（月周回サービス機と称する）によるインフラ構築を目指し、測位信号送信機・IoT 通信機器の開発とその地上実証、これら機器を搭載できる6Uサイズの月周回サービス機的设计、エンジニアリングモデル(以下EM)の開発を行い、必要な予算と打ち上げ機会、および実証対象の月宇宙機の出発が得られたら、すぐにこの月周回サービス機の実験ができるまでの準備を実施する。 ◆ 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」は以下の通りであり、それぞれの達成度を併記する。達成度の指標に使用したTRL(技術成熟度)に関しては表1-1の内容を基準とした。この値は中間報告の際の「5. 成果に関する事後自己点検の方針」の参考例」の通りである。 表 1-1 TRL の内容 <table border="1"> <tr> <td>TRL1</td> <td>原理的な可能性が示されている。</td> </tr> <tr> <td>TRL2</td> <td>技術的な概念モデルが提案されている。</td> </tr> <tr> <td>TRL3</td> <td>技術的な概念モデルが定量的に検討されている。</td> </tr> </table>		TRL1	原理的な可能性が示されている。	TRL2	技術的な概念モデルが提案されている。	TRL3	技術的な概念モデルが定量的に検討されている。
TRL1	原理的な可能性が示されている。						
TRL2	技術的な概念モデルが提案されている。						
TRL3	技術的な概念モデルが定量的に検討されている。						

TRL4	技術要素としての実証モデルが実験室レベルで試験されている。
TRL5	技術要素としての実証モデルが、実際の使用環境に近い条件のもとで試験されている。
TRL6	システムとして実証モデルが試験されている。
TRL7	システムとして実証モデルが、実際の使用環境に近い条件のもとで試験されている。
TRL8	実際のフライトモデルが製作され、試験が終了している。
TRL9	実際のフライトモデルが打ち上げられ、実際のフライトによって性能が確認されている。

実施項目① 月測位装置の EM 開発と地上試験による実証

[目標値]

- ・低軌道の月周回衛星による測位を想定した月測位送受信機の開発を行う。
- ・低軌道の月周回衛星への搭載を想定した環境試験を行う。

[評価指標] TRL

[達成度]

月測位送受信機の EM 開発に成功しており、また単体での振動試験、熱真空試験を実施しており、さらに衛星に搭載した状態での同様の環境試験を QT レベルで実施し、問題ないことを確認しているため、TRL7 相当に到達と判断し、達成度は 100%とする。

実施項目② IoT 通信装置の EM 開発と地上試験による実証

[目標値]

- ・低軌道の月周回衛星と月面宇宙機間の通信を想定した IoT 通信装置の EM 開発を行う。
- ・低軌道の月周回衛星への搭載を想定した環境試験を行う

[評価指標] TRL

[達成度]

IoT 通信装置の EM 開発に成功しており、また単体での温度試験を実施しており、さらに衛星に搭載した状態での振動試験 (QT レベル) と熱真空試験、温度サイクル試験を実施した。振動試験では、ヒューマンエラーによるボルト脱落が発生したが、その点を除いては問題が無かったため、TRL7 相当に到達と判断し、達成度は 90%とする。

実施項目③ 月周回衛星の EM 開発と環境試験、月宇宙機測位システムのサービス品質の解析

[目標値]

- ・低軌道の月周回環境で、測位・IoT 通信ミッションが可能な 6U-CubeSat の EM 開発を行う。
- ・低軌道の月周回環境を想定した環境試験を行う。
- ・月宇宙機測位システムに関する論文発表を行う。

[評価指標] TRL、国際会議発表または投稿論文 1 本以上

[達成度]

月周回衛星の EM 開発に成功しており、月測位送信機と IoT 通信装置を搭載し、振動試験 (QT レベル) と熱真空試験、温度サイクル試験を実施しており、TRL7 相当に到達と判断する。また、論文発表に関しては、査読付き学術論文 2 件 (Acta Astronautica、Remote Sensing)、国際会議発表 1 件 (73rd

IAC)発表しており目標を達成している(2024年8月には事業終了後の成果を含めて、Small Satellite Conferenceにて発表)。以上の成果より達成度を100%と評価する。

「必要性」

[科学的・技術的意義](独創性、革新性、先導性、発展性等)

[他国の先進研究開発との比較における妥当性]

中間報告時の審査委員コメントとして「目標性能・成果等が国内外の技術動向に比べて新規性・独創性があることを、できるだけ客観的かつ具体的に示すこと。(一部抜粋)」と頂いているため、それを踏まえて、上記2項目を含めた必要性について述べる。

月探査はARTEMIS計画などを中心として、各国・民間企業で大きな高まりを見せており、今後、月での科学探査や資源獲得などを目指し、様々な月宇宙機の活動が盛んになることが予想される。しかし、それら月宇宙機への通信中継や測位サービスを提供するインフラの整備が課題となっている。この分野においては、NASAのLCRNS(Lunar Communications Relay and Navigation Systems)/LunaNet、ESAのLCNS(Lunar Communications and Navigation Services)/Moonlightが進められており、日本でもJAXAを中心として、LNSS(Lunar Navigation Satellite System)の計画がある。LNSSのシミュレーション結果は単独測位・衛星数8機での水平の測位精度は約15mとなっている。しかし、初期の実証用の月宇宙機は「Small Start」であると考えられ、多数の測位衛星が必要となるインフラ計画が完了するまでの間に、多種多様な月宇宙機による探査を支える技術が必要である。本研究では、大学が多くの知見を持っている地球周回の超小型衛星の基盤技術を利用して、低コスト・短期開発・少ない機数の月周回の6Uキューブサットによる測位・通信のインフラを開発することを目的としたものである。本研究で構築する測位システムはMDPO(Multi-epoch Double-differenced Pseudorange Observations)を用いて最低2機による測位を可能なものとし、先行研究の調査結果を参考に、測位精度100m以上を要求とした。また、送信出力20mWの過去衛星に搭載した通信機をベースにして100bps以上の月面-月軌道間の通信を実現させることを目標とする。国内外の技術動向に対して、月周回のキューブサットでの測位システムを実現した例は無く革新性があり、また月周回で特定小電力による通信サービスの例は無く、これらの点においても独創性があり、世界に先駆けて実証することで、将来、国際的にも優位性を持つ技術になる。本課題では、これらを実現するための基盤技術として、核となる開発要素である測位装置・IoT通信装置および6UキューブサットそれぞれのEMの開発に成功し、QT環境試験を実施しており、フライトモデル開発に移行する準備が整った。測位送信機は、各国機関との将来的な相互運用の可能性を考慮し、周波数や変調方式などを後から変更可能なアーキテクチャを目指し、ソフトウェア無線による再構築可能な送信機の開発に成功しており、発展性があると言える。このソフトウェア無線の特性を生かし、送信機の開発にはモデルベース開発(MBD: Model Based Development)を採用しており、月測位送信機の機能を数値モデル化し、シミュレーションをベースとした開発や検証を行うことで、効率的な開発を実現しており、従来の衛星機器開発には無い新規性・独創的が十分に高い開発であったと言える。

測位・通信シミュレーションにおいても、2機の月測位衛星を最適配置したMDPOにより、水平方向のユーザー測位誤差24.3mを達成しており、またIoT通信装置は新しい変調方式であるLoRaを用いることにより20mWでの月面-月軌道間の通信ができることを確認している。この成果は、上述の国内外の技術動向と比較としても妥当な値であり、国内外の先進研究開発と比較して妥当な成果であると言える。

本事業で提案する MDP0 は他の月測位衛星にもそのまま応用が可能であり、今後の月測位システムの初期運用や技術実証で利用できる方法のため発展性はあると言える。さらに、測位信号は、NASA の LunaNet の標準化文書をベースとして互換性を持たせて検討したため、将来的な月測位システムを補間し、利便性や測位精度改善に寄与できる可能性があり、将来的な発展性も十分に高いと言える。これらにより、月宇宙機側に負担の少ない実用的な性能を持つ測位・通信インフラの構築に目途が立ったと言える。以上より、本事業の必要性は十分あったと自己評価している。

「有効性」

・[新しい知の創出]

MDP0 手法を用い、かつ最適軌道であれば、2 機の月周回衛星で測位精度約 20m という実用に足る精度での測位情報が得られることが分かった。また、この結果が 6U キューブサットで実現可能な結果として、論文、国際会議や国内シンポジウムにより広く示せた点は重要であり、本事業の有効性を示している。さらに、月低軌道であれば、月周回-月面間を 20mW という微弱電波で通信ができるという点に関しても、新しい発見であり、今後の月通信インフラ構築に向けて有用な結果である。月測位送信機の開発は、ソフトウェア無線とモデルベース開発により行い、開発プロセスの効率化と柔軟性の向上が実現させており、将来の衛星搭載機器の開発プロセスに活用可能な有用な結果であったと言える。加えて、本課題では月測位・IoT 通信をミッションとする 6U キューブサットの設計開発を行ったが、ミッションペイロード部は、1U 程度のサイズを配分としており、他ミッションへの換装が可能なため、本成果は月周回の標準的な 6U キューブサットの設計を示せたとも言え、将来的に増加が予想される月周回キューブサットの基盤技術となることが期待される。

・[人材の養成]

本事業では、業務参加者として積極的に学生が参加し、研究を進めた。中部大学では修士課程の 2 名が参加し、月測位手法および月測位送信機に関連したテーマで修士号を取得した。その内 1 名は博士後期課程に進み、月測位システムに関する分野での博士号取得に向けた研究を継続している。東京大学では修士課程の 2 名が参加し、軌道・月測位に関連したテーマで修士号を取得した。その内 1 名は同大学博士後期課程に進み、軌道設計に関する研究を継続しており、内 1 名は海外大学大学院に進んでいる。また、本事業に協力したヒューストン大学博士課程学生は、月測位を含む研究テーマで博士号を取得し、関連内容で NASA/JPL (Jet Propulsion Laboratory) に就職し、継続し研究を続けている。また、本事業の協力企業らは地球周回衛星の設計開発の経験は多くあるが、月周回衛星の設計は初めてといった企業もあり、国内企業が月周回衛星の設計経験を積めたという点では、人材の育成に貢献できたと言える。さらに、本事業では、普及啓発の一環として、中学生・高校生に対して「衛星測位技術を学ぶワークショップ」を開催した。本ワークショップは、福井県教育総合研究所と協力し、2022 年 7 月に開催し、測位技術の座学や実験用缶サットの組立、GPS アート作成実験を行うことにより、実践的に測位原理や GPS の使い方を学んでもらった。本ワークショップには、福井県内の中学校 1 校、高校 4 校が参加した。また、2023 年 3 月に企業向けの講義・現場実習を開催した。参加人数は 18 名、9 機関(県、企業、大学)の方々が参加した。衛星測位の講義では、測位の原理や、衛星に搭載する GPS 受信機の仕組み・特徴などの講義を行った。衛星通信

の講義では通信原理、回線計算、アンテナの仕組み等の講義を行った。現場実習では、福井県工業技術センターの6面電波無響室を使用して、アンテナ利得測定などを行った。これらにより、地域企業らに衛星測位・通信を学んでもらい、積極的な議論や作業を行うことができた。また、本事業への協力企業も受講生として参加しており、本事業で使用している測位・通信の技術理解の促進ができたと考えられる。以上の取り組みにより、人材の養成に関して有効性があったと考えられる。

「効率性」

〔計画・実施体制の妥当性〕〔研究開発の手段やアプローチの妥当性〕

本事業は3大学と複数企業による産学連携体制で、各団体が有する実績・知的資産を有効活用することで進めた。また、本事業では設計と調達の順序・スケジュールを工夫し進めた。初年度に概念設計を完了させ、早期に必要な機器性能の洗い出しを行うことにより、高額かつ長納期の姿勢制御系部品の早期調達を開始した。概念設計が短い期間だったため、未調整事項に関しては、新規設計となる衛星構造やデータ処理装置、スラスタ、搭載ソフトウェア等を、早期調達機器の仕様に合うように開発を進めた。また、測位送信機には、地上の移動体通信基地局などで広く利用されているソフトウェア無線を月周回の超小型衛星に応用したことは新規性に加えて、仕様検討と機器開発が並行して進んでいる月測位システム開発において、ハードウェアの再設計をすることなく、ソフトウェアの変更のみで新しい仕様に対応できることは効率的な開発アプローチといえる。さらに、月測位送信機の開発にはモデルベース開発を採用しており、高速かつ柔軟なシミュレーションをベースとした開発・検証工程により、効率の高い開発アプローチにより事業を進めた。

実施体制は、主管実施期間を福井大学が務め、各大学、協力機関と製造メーカを統括し、衛星の設計、開発、試験を主導して実施した。衛星の部品設計製造は福井県地域企業であるセーレン株式会社が担当し、福井大学との密な連携で進めた。また、株式会社アークエッジ・スペースが、姿勢シミュレーションの実施を主に行い、本衛星の姿勢性能妥当性の評価を行った。東京大学では今までのIoT通信衛星の実績を活用し、アークエッジ・スペースの協力のもと月用IoT通信装置の開発を行った。また、東京大学では、軌道シミュレーションや測位システムのサービス品質の評価などを通じて、本測位システムに最適な軌道の導出を行った。中部大学では、宇宙機搭載のGPS受信機の開発経験を活かし、三菱プレシジョン株式会社らの協力のもと測位装置の検討、設計、開発を行った。また、衛星バス開発に関しては、細かな調整が多いため、協力機関、製造メーカも含めたWeb週例会を開くことにより、製造・調達の実施状況を細かく管理し、スケジュール・費用共に効率良く進めた。ミッション機器開発も含めた定例会は毎月Web開催とし、各サブテーマの進捗を確認しつつ、相談や試験に関わる調整を効率よく進めた。以上の工夫、体制により、実効2.5年の間に概念設計からミッション機器開発、EM開発・試験完了が完了しており、効率性は十分にあったと評価でき、また、計画・実施体制も妥当であったと評価できる。

（２）成果

「アウトプット」

「アウトプットに関する事後自己点検の実施方針」を表2-1に示す。なお中間報告時の審査委員コメントとして「サクセスクライテリアに、とくに新規性と独創性を裏付ける目標性能等の定量的指標を設定すること。（一部抜粋）」と頂いているため、中間報告時に記載した実施方針に追記している。

表 2-1 実施項目ごとのサクセスクライテリア

実施項目	ミニマムサクセス	フルサクセス
実施項目① 月測位装置の EM 開発と地上試験による実証	TRL5～6 BBM 相当の測位送信機および受信機をそれぞれ 1 機以上開発すること。 主要な部品や回路の環境試験を実施すること。	TRL7 測位送信機および受信機の EM をそれぞれ 1 機以上開発すること。 月面で受信される測位信号を模擬するシミュレータを 1 機以上開発すること。 モジュールレベルでの環境試験を実施すること。 (追加)実機シミュレーションにより 100m 以上の測位精度が達成できること
実施項目② IoT 通信装置の EM 開発と地上試験による実証	TRL5～6 IoT 通信装置の EM を完成させ、アンテナが設計・製作されていること。 要求される電力制約の中で IoT 通信装置間の低ビットレート通信ができること。(追加)想定される軌道高度、送信電力 20mW で 100bps の通信速度を達成できる設計であること。	TRL7 IoT 送受信機 EM が月環境で動作することを実証する環境試験が終わっていること。 衛星構造モデルにとりつけた状態での End-to-end 試験が終わっていること。
実施項目③ 月周回衛星の EM 開発と環境試験、月宇宙機測位システムのサービス品質の解析	TRL5～6 衛星搭載可能なデータ処理装置、電源、姿勢制御系、推進系の EM を製造・調達し、所定の機能を満たしていることが確認できていること。 姿勢、熱シミュレーションにより、本衛星の運用成立性が確認できていること。 2 機の月周回衛星の軌道によるサービス品質の変化を解析するシミュレータが完成し、最適な軌道が導き出せていること。 (追加)測位・軌道シミュレーションにより 100m 以上の測位精度が達成できること	TRL7 衛星 EM の開発が完了すること。衛星 EM には衛星構造、バス機器、測位送信機、IoT 通信装置を含むこと。但し、X 帯トランスポンダは設計のみ完了していること。 月周回軌道を想定した環境試験により、所定の機能を満たしていることが確認できていること。 衛星機数が増えた場合のサービス品質の向上を解析でき、さらにパラメトリックスタディにより最適な軌道・投入順序などを明らかにしていること。

表 2-1 に対するアウトプットを以下に記載する。

実施項目① 月測位装置の EM 開発と地上試験による実証

月測位送信機の EM を 1 機開発に成功しており、搭載ソフトウェアは、MATLAB/Simulink 環境でのモデルベース開発を採用し、測位信号の出力の確認まで完了した。測位周波数は SFCG 勧告に準

拠しており、2.5GHz 帯とした。主要な部品・回路に対しては放射線試験（トータルドーズ、シングルイベント試験）を実施しており、月環境で問題無く使える結果を得た。月測位送信機の試作機はモジュールレベルでの振動試験、熱真空試験を実施しており、さらに EM は衛星に搭載した状態での同様の環境試験を実施し（ランダム振動試験は QT レベル）、問題ないこと確認しているため、TRL7 相当に到達と判断する。月測位受信機は、ソフトウェア無線で構成された月測位送信機 EM と同じハードウェアを、ソフトウェア変更により受信機にする計画だったが、世界的な半導体不足の影響により、事業期間中にハードウェアの納入ができない見込みとなったため、別の無線 IC を利用して試作機を 1 機開発し、性能評価を行った。フルサクセスは受信機 EM1 機としていることから一部未達成とするが、ハードウェアは月測位送信機 EM として検証済みであり、受信機の地上試験に関しても月測位信号と同じ S 帯周波数である測位衛星 IRNSS の受信実験にも成功しているため、十分な成果であると言える。また、月面で受信される測位信号を模擬するシミュレータは、中部大学海老沼研究室で開発、公開しているソフトウェア無線を用いた GPS 信号シミュレータである gps-sdr-sim をベースに、月測位信号シミュレータを 1 機開発した。測位手法に MDPO、軌道高度 300km、疑似距離観測頻度 30 秒などとしたシミュレーションを実施した結果、2drms（測位誤差 95%内）は 53.6m という結果を得た。以上の成果より、ミニマムサクセスは達成、フルサクセスは外的要因（世界的な半導体不足）により一部未達成であるが、本事業の目的としては概ね達成していると言える。

実施項目② IoT 通信装置の EM 開発と地上試験による実証

IoT 通信装置の月周回衛星側と月面宇宙機側の EM 開発に成功した。主要な部品・回路に対しては放射線試験（トータルドーズ、シングルイベント試験）を実施しており、月環境で問題無く使える結果を得ている。また単体での温度試験を実施しており、さらに衛星に搭載した状態での振動試験（QT レベル）と熱真空試験、温度サイクル試験を実施した。熱真空試験、温度サイクル試験では試験中に相互通信を行い続け、正常に完了した。振動試験では、ボルト脱落が発生したが、IoT 通信装置の組立工程を確認したところ、規定トルクでの取り付けが行われていないことが分かったため、機器自体の設計不具合ではなく、ヒューマンエラーが原因であり、IoT 通信装置には問題無いと判断し、TRL7 相当とみなした。さらに、開発した IoT 用パッチアンテナを衛星構造モデルに取り付け、アンテナパターン測定を実施した。得られた利得をもとに回線計算を行い、この条件に合致した伝送路を模擬した End-To-End 試験を実施した。性能評価の結果、20mW の制約で 293bps、1 パスにつき約 30kB の通信サービスを月軌道-月面間で提供できることを確認した。以上の成果より、ミニマム、フルサクセス達成とみなす。

実施項目③ 月周回衛星の EM 開発と環境試験、月宇宙機測位システムのサービス品質の解析

測位信号送信機と IoT 通信装置を搭載した 6U キューブサット EM の開発に成功した。月周回環境での熱解析、電力解析および姿勢制御シミュレーションを実施し、本衛星が月周回軌道において、問題無く運用可能であることを明らかにした。通信設計においては、月-地球間で安定した回線が成り立つアンテナ配置を明らかにした。また、スラスタには水レジストジェットスラスタを採用しており、2 年間（マージン 2 倍）の軌道上寿命が確保できる推薬量とした。本衛星内コンポーネントの制御が可能なデータ処理装置は先行研究をベースに開発し、電源、姿勢制御系およびスラスタの制御を行い、所定の機能を満たせていることを確認した。月測位衛星システムに必要な地上衛

星間の時刻同期機能は X 帯トランスポンダ (BBM 相当) を用いたダイレクト PM による時刻同期を用いて、十分要求精度を満足できることを確認した。衛星 EM は月軌道環境を想定した熱真空試験、振動試験、温度サイクル試験を完了し、各環境において問題無く動作することが確認できた。

本衛星のサービス品質の評価に関しては、まず軌道推定・制御シミュレータを開発し、地上局とのレンジング運用の間欠性による衛星の位置推定の時間変化を明らかにし、レンジング運用に必要な運用時間・間隔を定量的に明らかにした。さらに、2 機の衛星の軌道維持コストを下げる場合に最適な軌道を明らかにした。最適な軌道としては、高度 400km、軌道傾斜角 80 度、2 衛星の位相差 15 度の軌道とし、このときのユーザー測位誤差は 24.3m、各衛星の軌道維持コストは Δv =約 5.2m/s と導出した。また、2 機以上の月測位衛星の最適な軌道配置は、「2 機の衛星が極域で同時可視となる測位時間割合の目標をいつ達成するか」を需要とし、パラメトリックスタディを実施した。例えば、1、2 機目を隣接させた場合、2 機で時間割合は 10%を確保できるが、6 機での上限は 30%までとなる。対して、時間割合 40%を 6 機で達成させる場合は、2 機投入時点での時間割合を犠牲にして 3 機目以降に時間割合を上げるという方法となる。すなわち、短期的に必要な需要だけではなく長期的な需要を考慮した上で軌道配置を選定する必要があることを明らかにした。

「アウトカム」 (令和 6 年 10 月末時点)

表 2-2 実施項目ごとのアウトカム

実施項目	アウトカム
実施項目① 月測位装置の EM 開発と地上試験による実証	月宇宙機へ測位信号を送信できる技術の構築がなされることを効果・効用の指標とする。 本プロジェクト以外の衛星への搭載がなされることを波及効果の指標とする。
実施項目② IoT 通信装置の EM 開発と地上試験による実証	微小電力で月周回-月宇宙機間の通信が可能な技術の構築がなされることを効果・効用の指標とする。地球周回衛星での商用通信サービスが可能な 2GHz 帯 IoT 通信装置が開発されたことを効果・効用の指標とするとともに、実際に使用するミッションの確保を波及効果とする。
実施項目③ 月周回衛星の EM 開発と環境試験 月宇宙機測位システムのサービス品質の解析	月測位衛星に適した 6U-CubeSat 衛星バスの技術開発がなされることを効果・効用の指標とする。 本測位システムの有用性や最適設計に関して論文発表等し、月測位サービスを早期に展開できるように促すことを波及効果の指標とする。

実施項目① 月測位装置の EM 開発と地上試験による実証

本課題により、月宇宙機用の測位送信機および測位受信機の開発に成功し、これら技術の構築に成功しており、効果・効用はあったものとみなす。開発した月測位送信機は、ソフトウェア無線とモデルベース開発により、柔軟性と効率性を兼ね備えたアプローチによる開発成果である。この開発アプローチ

は、A 社が研究開発を進める月測位衛星に採用されており、本開発成果の波及効果は得られたと言える。

実施項目② IoT 通信装置の EM 開発と地上試験による実証

本課題により、20mW という微小電力で月周回-月宇宙機間の通信が可能な IoT 通信装置の開発に成功しており、効果・効用はあったものとみなす。また、地球周回衛星での商用通信サービスが可能な 2GHz 帯 IoT 通信装置の開発に成功しており、効果・効用はあったものとみなす。地球周回衛星での実験として、IoT 通信装置本体を、アークエッジ・スペース社開発衛星のペイロードの一つとして搭載検討を進めたが、直近の衛星では搭載スペースの関係で見送った。但し、今後の調整次第では別機に載せられる可能性があるため、検討は継続する。ただし、開発した IoT 通信装置に搭載する RFIC 単独では、アークエッジ・スペース社の衛星に搭載される予定である。また、セーレン社が中心となって開発をした FUSION-1 衛星(福井大学は搭載ミッション機器開発)にも搭載されており、今後軌道上実証に進む。これらにより、本開発成果の波及効果は得られたと言える。

実施項目③ 月周回衛星の EM 開発と環境試験、月宇宙機測位システムのサービス品質の解析

本課題により、月測位衛星に適した 6U キューブサットの衛星バス技術の開発に成功しており効果・効用はあったものとみなす。本衛星バス技術は地球周回衛星にも転用可能な技術であり、今後の利用拡大にもつなげられる結果を得られた。また、論文発表に関しては、査読付き学術論文 2 件(Acta Astronautica、Remote Sensing)、国際会議発表 1 件(73rd IAC)、国内学会では 8 件発表、クロスを活用したシンポジウム(3 件発表)開催をした。また本事業終了後にも、Small Satellite Conference での発表を行っており、波及効果は得られたとみなす。学術論文と国際会議発表では、衛星のシステム構成や搭載コンポーネントの詳細、電力設計、姿勢制御解析、熱解析、回線設計等の詳細な設計内容を含めて発表しており、今後増加することが予想される月周回キューブサットに対する設計結果を公開した点は、今後波及効果が出てくることが期待できるものである。

(3) 今後の展望

本課題の成果により、月測位通信サービスを行うキューブサットの EM 開発に成功しており、測位・通信インフラの構築に目途が立ったと言える。本事業終了後は、想定する X 帯地球局(福井工業大学 13.5m アンテナ)との電波適合性試験準備を継続して実施している。月周回軌道への投入に関しては、月面開発事業者や JAXA らにコンタクトを取り、投入機会の探索をしているところである。また、本事業の測位技術や時刻同期機能の実証は、地球周回軌道においても可能な道筋を見つけているため、JAXA-SMASH プロジェクト等への申請等も考慮に入れ、実証機会の計画を検討しているところである。

開発衛星の月周回実証実験以外としては、開発した IoT 通信装置に搭載する RFIC 単独での地球周回軌道での実験を計画している。また、ソフトウェア無線とモデルベース開発による衛星搭載機器開発のアプローチは、他の月測位衛星プロジェクトにも採用されており、本成果は、効率性と柔軟性を向上させた今後の衛星開発に寄与することが期待される。また、最低 2 機の衛星による測位手法である MDP0 は、超小型衛星以外の今後の月測位システムの初期運用や技術実証においても利用ができる方法である。本事業の成果は MDP0 の説明も含めて、本事業終了後も Small Satellite Conference 等において国内外発表を行っており、本手法の活用が広まる活動を行っている。

以上のように、本事業で開発した衛星のフライトモデル開発ならびに月周回軌道への投入や地球周回

での実証機会の探索を続けていくと共に、要素技術の軌道上実験、提案手法の普及についても、継続的に進めていく計画である。

8. 評価点

A

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

月面上のローバー、観測器及び月周回軌道衛星に測位およびIoT通信のサービスを提供する超小型衛星インフラを実現するための基盤技術を概ね技術成熟度7(エンジニアリングモデル(EM)による月環境での試験)まで開発することを目指した時宜にあった取り組みである。

測位については、受信機の調達遅れの影響か送受信機による測距、測位の地上実証ができていない点や、本事業終了後の軌道上や月近傍での実証は、未だ機会を探索中と考えられ、その後の具体ミッションでの活用や産業応用に関しても十分に見据えられていない点は不十分であるが、MDPO(Multi-epoch Double-differenced Pseudorange Observations)測位方式に適用可能なソフトウェア無線(SDR)を使った送信機の開発と適切な衛星の軌道配置まで提案することができた。

IoT通信と搭載6U衛星については、協力企業の既存技術をベースにしているが、EMの開発と月環境での試験まで終了している点で評価できる。振動試験など打上げ環境を意識して実施しているのでプロト・フライト・モデル(PFM)まで検証し、打上げ準備ができたとみなせる。Xバンド・トランスポンダも搭載しダイレクトプロトタイプモデル(PM)による時刻同期もできたことで月周回での軌道決定も可能になった。

本事業で開発したMDPO測位方式、SDRによる開発アプローチ、IoT通信、6U衛星バスは、地球周回衛星では既存技術として捉えられるものであり、月衛星という条件を除けば最先端技術ではない。MDPO測位は一般に静止物体の位置決め(いわゆる3重差による測量)に使われるアルゴリズムであり、月面ローバーなど移動体に使用するにはダイナミクスを補償したフィルタリング処理が必要で応用範囲が限られるため、将来の測位方式として採用されるか疑問が残る。

しかしながら、計画された新規性、独創性に富む測位・IoT通信サービスを提供する超小型衛星の技術開発と性能検証は、予定通りきっちりと実施し、所定の成果は得られていると判断される。

外部への成果の普及については、中高生向けの測位講座や企業への衛星設計講義を実施しておりアウトリーチ活動も評価できる。対外PRなど社会でのすそ野拡大にも良く取り組まれている。本事業に協力した大学院生は修士、博士論文の執筆も行い外部発表も多数行っている。

費用対効果に関しては、定性的な記載をあったものの、他方法に比べてどれだけ効率化が図れたのか定量的な指標は提示されていない。目標に対する達成度は90-100%でとびぬけた成果が得られているとは言えないが、所期の開発成果が出ており、当初の目標を十分達成している。

以上により、本課題は、相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献していると認められる。

今後は、以下の点が期待される。

- ロードマップとマイルストーンを定めて、計画的かつ継続して開発に取り組んで実証機会の獲得や具体ミッションでの活用などの成果創出に務めることを期待する。
- 常に社会に発信して、我が国の月探査でのポジション獲得や社会への普及啓発に務めることを期待する。
- 国際宇宙探査の今後の見通しが不明確であることは理解するが、今後どのような月周回サービス機および着陸機、ローバにいつ頃実装する可能性があるのかを絶えずサーベイした上で、搭載機器開発・運用の準備を進めることを期待する。
- 本当に有効に作動するか of 具体的実証機会の確保することを期待する。
- 打上までの具体的な段取りを検討して実フライトを達成することを期待する。