

日本の月測位インフラを切り拓く： 実証ミッションから実用化への挑戦

2025年1月23日 第9回月測位研究会

株式会社アークエッジ・スペース

先端研究開発事業部 渋川 季裕

ABOUT US

会社名	株式会社アークエッジ・スペース
設立年月日	2018年7月18日
所在地	東京都江東区有明一丁目3番33号 ドーム有明ヘッドクォーター
資本金	27億円（資本準備金含む） ※なお、政府等からの受注・採択総額は累計300億円超
メンバー数	約140名（2024年10月時点） ※役員・非常勤社員等含む。フルタイムの正社員数は80名
主な事業	<ul style="list-style-type: none"> 超小型衛星の設計・開発及び運用サービスの提供 超小型衛星によるコンステレーション構築 超小型衛星関連のコンポーネント・ソフトウェアの提供 衛星管制用地上局の運用サービスの提供 教育・コンサルティング業務 など

〈主要な取り組み〉

- **超小型衛星の量産化・コンステレーション構築**
 - 国産の超小型衛星バスや、ADCS（姿勢決定制御サブシステム）のコア技術を保有
 - 2024年以降の6U衛星打上げ（7機）を皮切りに、年数十機の国内量産を本格化
- **幅広いミッションへの対応**
 - 海洋通信、海洋観測（衛星VDES等）
 - IoTデータ収集
 - 次世代通信インフラ（光通信）
 - リモートセンシング（GHGモニタリング、海洋汚染モニタリング、水資源管理等）
 - 低軌道測位システム（LEO PNT）
 - 月通信・月測位システム
 - 深宇宙探査

アークエッジ・スペースの衛星シリーズ (開発・運用実績を含む)

- これまで超小型衛星の開発・量産化を推進してきたが、今後は本格的な打上げ・利用フェーズに移行。
- 地球観測や位置情報などのサービス提供を可能とする多様な超小型衛星を開発し、新たな市場を開拓。

3U衛星

打上げ運用実績

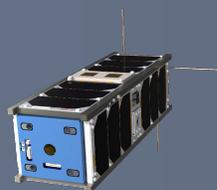
2019年打上げ



RWASAT-1
3U級のIoT衛星

打上げ運用実績

2023年打上げ (放出)



OPTIMAL-1
3U級の
実証プラットフォーム

6U衛星

運用支援実績

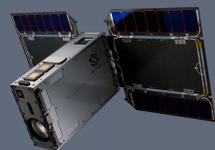
2022年打上げ



EQUULEUS (運用支援)
6U級の月近傍探査機
©東京大学

運用支援実績

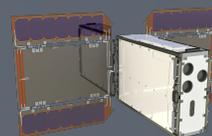
2023年打上げ



SPHERE-1 EYE
(ソニーグループの運用支援)
6U級の宇宙撮影用の衛星

利活用フェーズへ

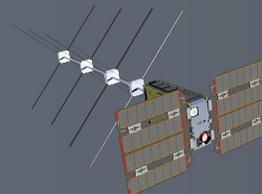
2024年秋以降 7機打上げ予定



6U衛星汎用バスシリーズ
6U級の量産型多目的衛星

開発中

2024年以降 複数機打上げ予定

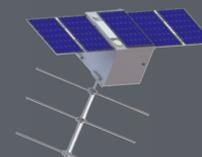


VDES実証衛星
6U級の海洋状況把握用衛星

30-100kg級

開発中

2026年頃 複数機打上げ予定



VDES・海洋観測衛星
海洋向け通信、観測衛星

開発中

2029年 打上げ予定

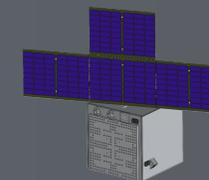


Comet Interceptor
彗星探査衛星

100kg以上

開発中

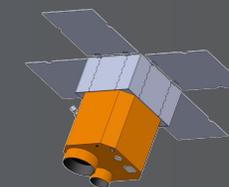
2028年以降 打上げ予定



月測位衛星
月面活動向けの測位衛星

開発中

2027年以降 実証機打上げ予定



多波長リモートセンシング衛星
環境・農業向け多頻度観測衛星

高度なシステム設計開発能力

月・深宇宙向けの先端的な探査機開発から地球周回のコンステレーションまで、多様なミッションにおけるシステム設計開発の経験をもとにさらなる設計開発・提案能力を追及。

月・深宇宙の先端的な技術

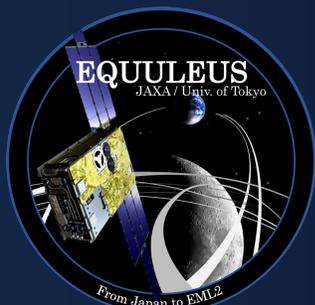
高度な軌道制御

軽量化・小型化

過酷な環境への対応
(熱・放射線・電力)

超小型探査機 EQUULEUS

- 地球-月圏における軌道制御技術の実証を行ったJAXA・東京大学共同開発の探査機。
- 創業エンジニアが東大在籍時に開発に参画。当社は運用に参画。
- 第6回宇宙開発利用大賞選考委員会特別賞受賞。



画像提供：東京大学中須賀・船瀬・五十里研究室

長周期彗星探査機 Comet Interceptor

- 欧州宇宙機関（ESA）とJAXAの共同ミッション。1機の探査機の開発を当社が担当。
- 太陽-地球系ラグランジュ点に待機し、観測対象の彗星を発見し次第接近し、観測する高度なミッション。



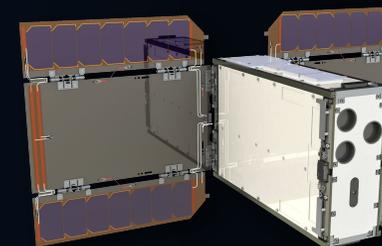
地球ビジネスへの応用

小型・高性能

多様な
ミッション

低価格・量産

アークエッジ・スペース
衛星汎用シリーズ



成果を
相互に活用

将来的に

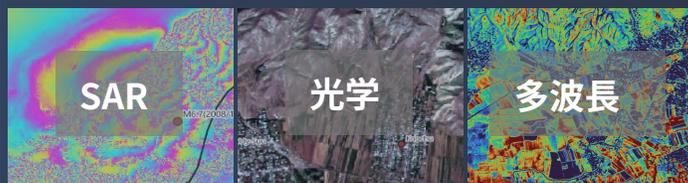
- 16Uサイズ CubeSat
- 50kg級 超小型衛星
- 100kg級 小型衛星

などへ、設計思想を踏襲しながら発展

多様なミッションへの対応

- リモートセンシング、IoT通信・VDES、電波観測、月面インフラ・深宇宙探査に対応可能な衛星開発実績を有する。
- 衛星を活用して分野横断的に総合的な衛星ソリューション提供を目指す。

衛星リモートセンシング（地球観測）



通信



位置情報



月・深宇宙



衛星開発



サービス
提供

将来の事業領域



月測位への取り組み

スターダストプログラムでの取り組み

月測位通信インフラアーキテクチャや月測位実証ミッションの概念検討・試作の実績

- ・ 「月面活動に向けた測位・通信技術開発に関する検討（そのイ）」（2021年度）
- ・ 「月探査に向けた測位・通信の総合アーキテクチャ更新検討（そのイ）」（2022年度）
- ・ 「月測位システム技術実証ミッションに関する概念検討（そのイ）」（2022年度）
- ・ 「月測位システム技術実証機の要素試作試験等（そのイ）」（2023年度）



宇宙戦略基金採択・月測位実証衛星の開発の本格化

2024年11月22日、宇宙戦略基金技術開発テーマ「月測位システム技術」実施機関として採択
→月測位ペイロードシステム及び月測位実証衛星システムの開発へ本格的に着手

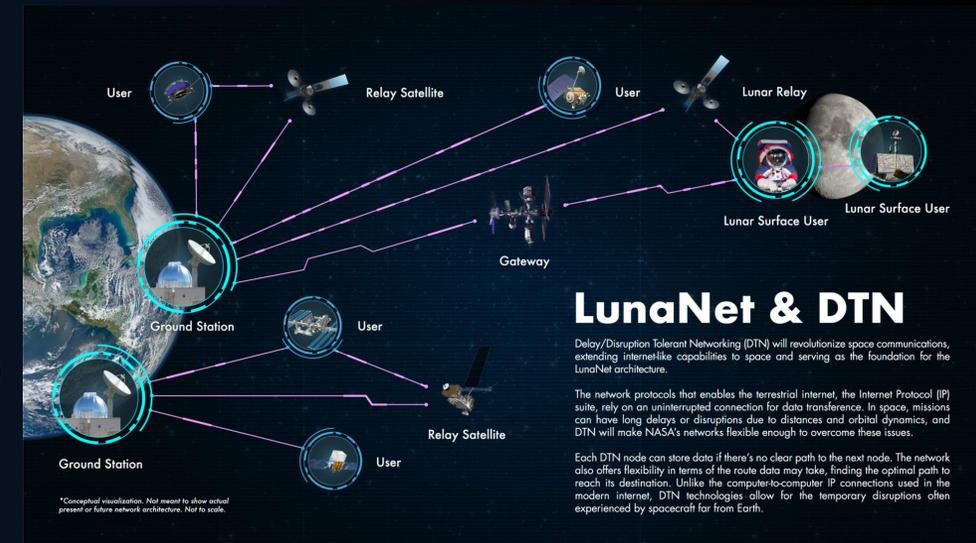
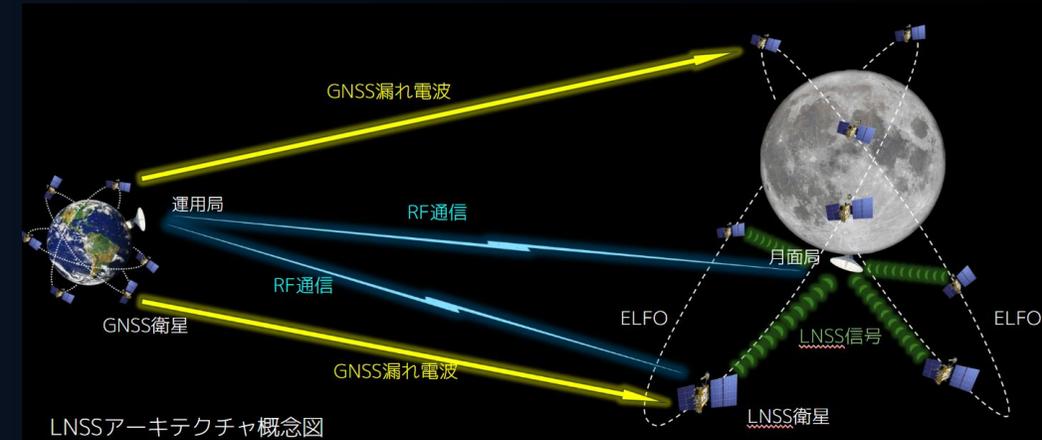
LNSS FOCフェージビリティ・スタディ契約

2024年11月20日、JAXA企画競争「月測位システム（LNSS）のFOCに向けたフェージビリティ・スタディ（その1）」の契約先に選定
→実証のその先を見据えた実用システムにおける高精度サービス提供に向けての検討を開始

月測位実証ミッションの 概念検討及び試作の実績

月測位衛星システム (LNSS)

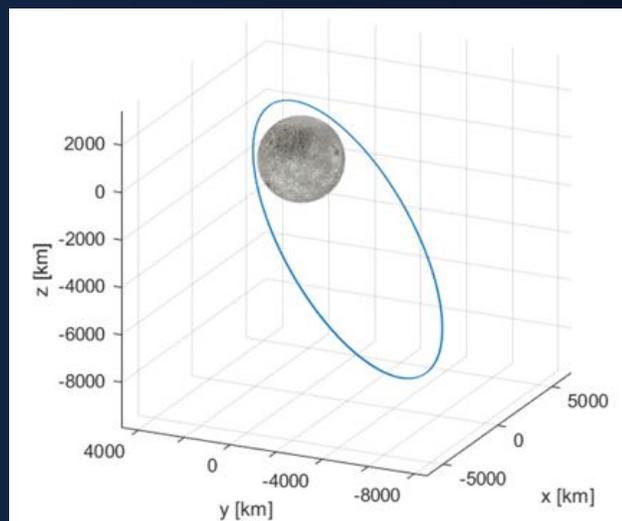
- ・ 月探査活動の活発化に伴い、月面ローバーなどの測位ニーズが高まると考えられる
- ・ 月面の測位ニーズに応えるため、月周回衛星のコンステレーションによる月測位衛星システム(LNSS: Lunar Navigation Satellite System)の構築が必要
 - ・ 多数の月面ユーザーへの対応
 - ・ 地球非可視領域への活動領域の拡大
- ・ 日本のLNSS衛星システムの特徴
 - ・ 衛星の軌道時刻決定にGNSSの漏れ電波を利用しオンボードで実施することで、地上局の負担を低減
 - ・ 欧米の月測位システム(LCRNS(米), Moonlight(欧))と協調し、効率的に実証・開発を推進する(LunaNet)



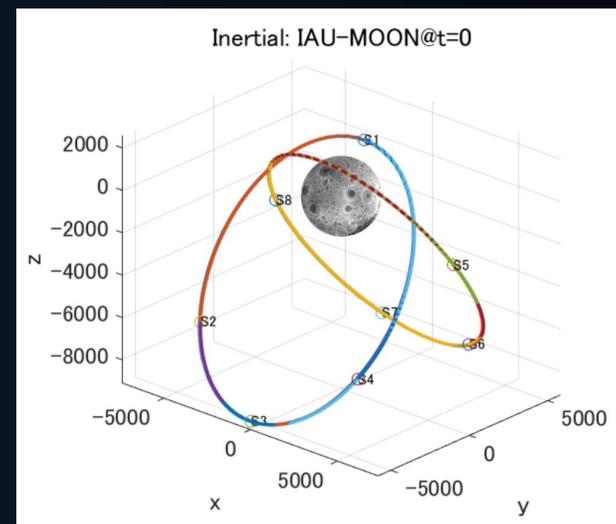
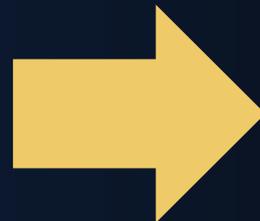
LunaNet (©NASA)

月測位実証ミッション

- LNSSコンステレーションの実現に向け、様々な技術課題を解決する必要がある
- 月測位実証ミッションを行うことによってこれらの技術課題を解決することが重要
 - 月圏におけるGNSS信号利用の実証
 - GNSS観測量を用いた月軌道でのオンボード軌道時刻決定の実証及び精度の検証
 - LNSS信号の送受信の実証及び測距精度の検証
- この実証ミッションを超小型衛星によって実現することで、低コストかつ早期の実証を目指す



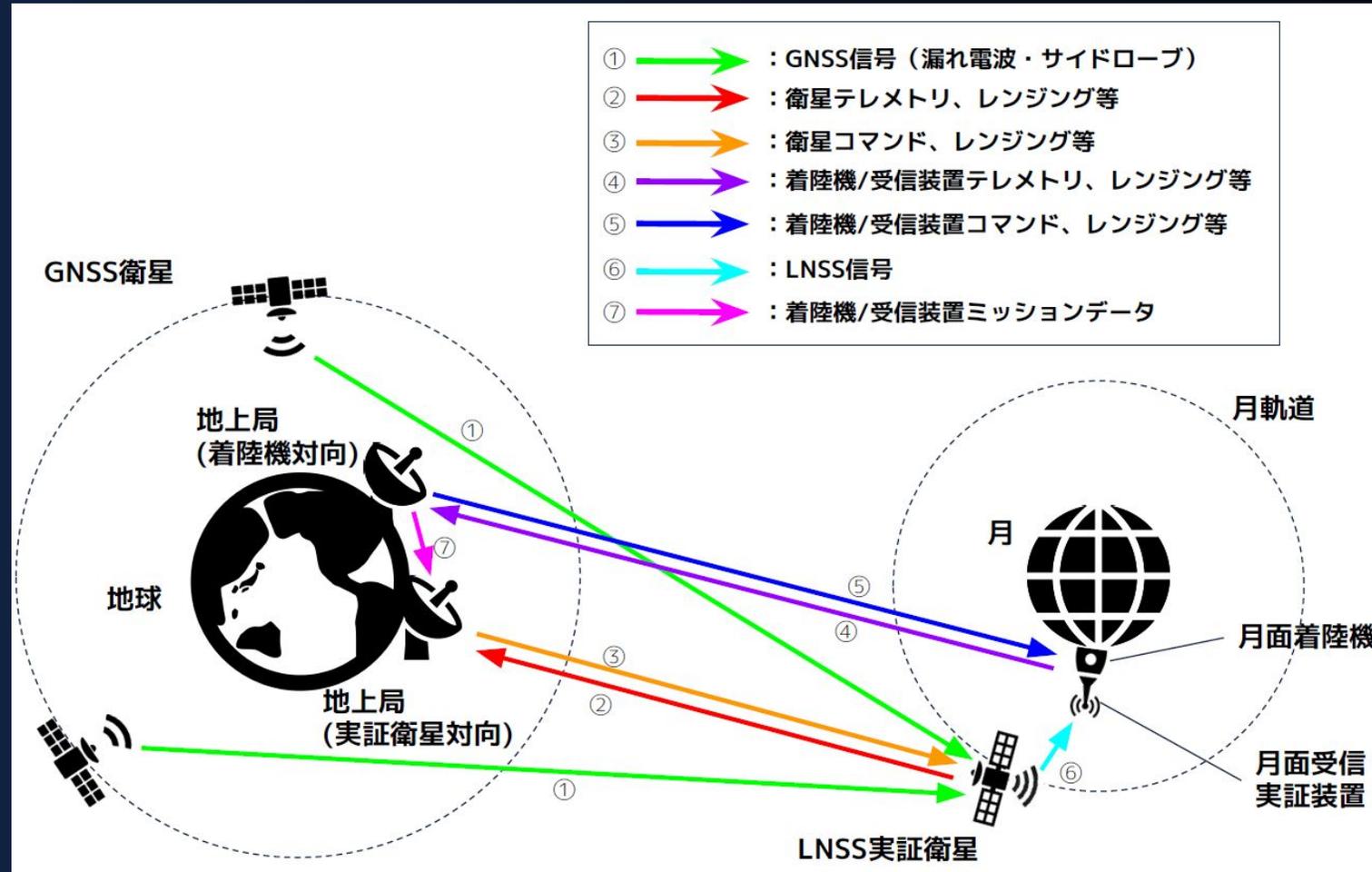
2029年：1機による実証



2030年代：8-10機による実用システム

月測位実証ミッションの構成

- LNSS信号を送信するLNSS実証衛星と、LNSS信号を受信する月面受信実証装置、及びそれを搭載した月面着陸機を中心とする月測位実証ミッションの構成を検討した

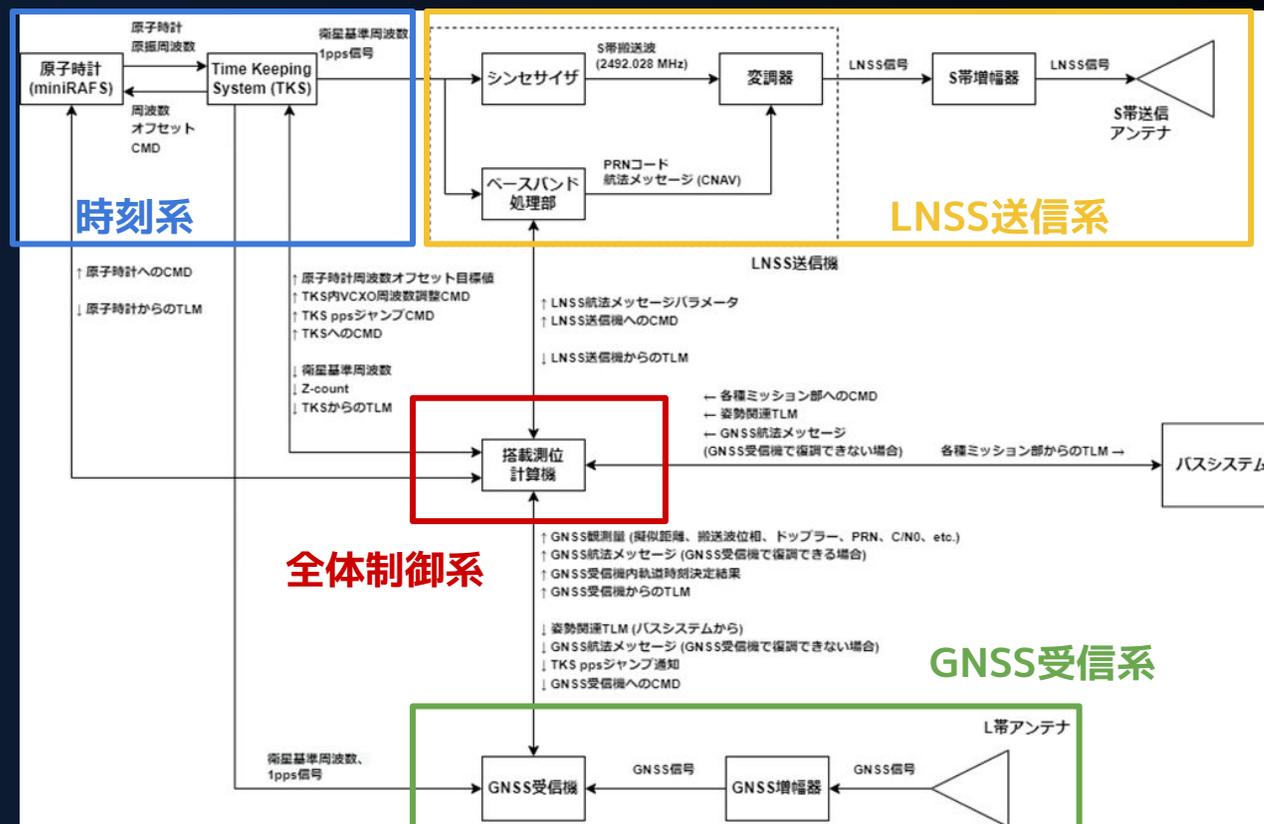


ペイロードシステムのシステム設計

以下の機能を持つ測位ペイロードシステムの概念設計を実施した

- GNSSの漏れ電波やサイドローブ信号を受信し、オンボードで軌道・時刻決定を行う
- 衛星内で安定度の高い時刻系を持ち、GNSSによる時刻決定結果と同期させる
- GNSSによる軌道決定結果と内部の時刻系からLNSS信号を生成し、月南極域へ送信する

機能	構成機器
全体制御	搭載測位計算機
時刻系	原子時計、TKS
LNSS送信系	LNSS送信機、Sバンド増幅器、LNSSアンテナ、LNSSアンテナジンバル
GNSS受信系	GNSS受信機、GNSSアンテナ、LバンドLNA



ペイロードシステムの要素試作

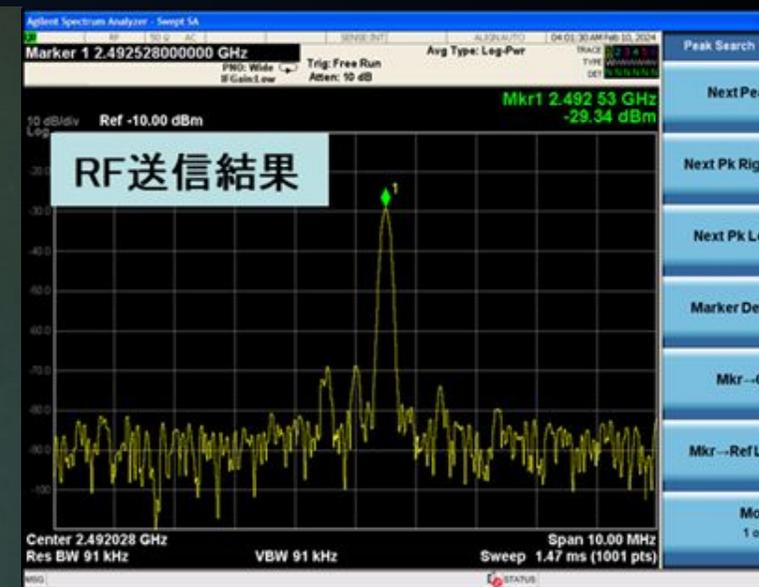
- ペイロードシステムを構成する以下のコンポーネントの試作を実施した
 - TKS：試作機の製作、位相雑音の測定、アラン分散の測定など
 - LNSS送信機：試作機の製作、RF信号送信機能の検証など
 - 搭載測位計算機：FPGAへの軌道時刻決定シミュレータの実装、実行時間の測定など



TKS試作機



LNSS送信機試作機



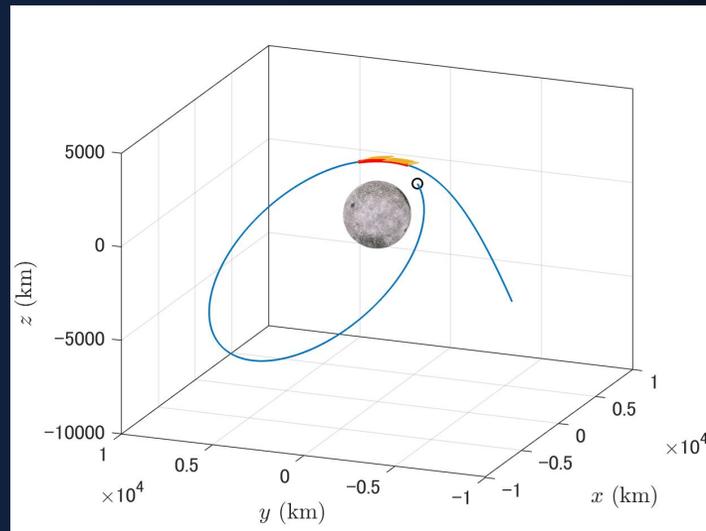
LNSS送信機検証結果

実証衛星システム概念設計

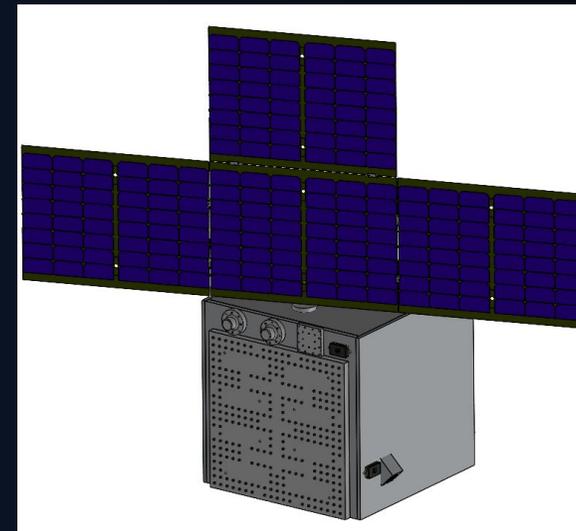
実証衛星システムに対して、以下の検討を実施した

- 軌道設計・運用コンセプト作成
- コンポーネントサイジング&コンポーネント候補選定
- システムブロック検討
- 質量・電力バジェット検討
- 熱解析・電力解析

上記の検討の結果、100 kg前後の衛星によるフェージビリティを確認した



遷移軌道設計



衛星外観 (更新中)

今後の月測位ペイロードシステム・ 月測位実証衛星の開発

測位ペイロードシステム開発における課題

これまでの概念設計や試作から本格的な測位ペイロードシステムのEM開発に進むにあたって、特に以下の課題がハードルとなっている。弊社単独ではなく、国内のPNTコミュニティの力を結集して解決していきたい。

1. オンボード軌道時刻決定システムの開発
2. 安定度の高い時刻系の開発
3. LNSS用エフェメリス・航法メッセージフォーマットの開発
4. ペイロードシステム全体の検証計画の立案・統合試験の実施
5. 月測位のユーザー候補等とのディスカッション・ユーザーニーズの反映

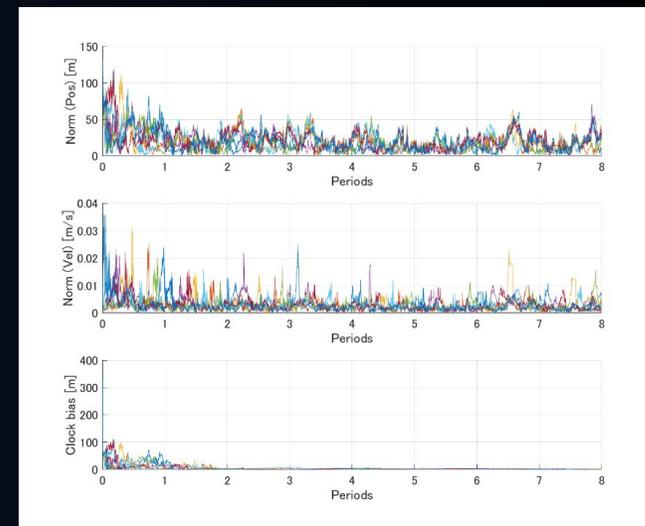
オンボード軌道時刻決定システムの開発

<現時点での設計・開発状況>

- 概念設計段階でシミュレーションによる軌道時刻決定性能の検証は実施済み
 - $SISE_pos (95\%) \leq 40 \text{ m}$ の要求を満たすことが可能
- 試作において、上記シミュレータをFPGA上で実装・実行済み

<今後の課題>

- リアルタイムで外部からの観測量を受け取り、軌道時刻決定を更新する実装はまだ実施できていない
 - nsオーダーでの同期を行った上で実現する必要がある
- 現時点の検証ではGNSS観測量はあくまで模擬であり、より現実的な誤差や観測環境に基づいた性能の検証が必要
 - GNSS受信機の実機やGNSSシミュレータを用いた検証を進める
 - LuGREなど、先行して予定されている実環境における検証データの利用



軌道時刻決定シミュレーション



LuGRE (Blue Ghost 1搭載)

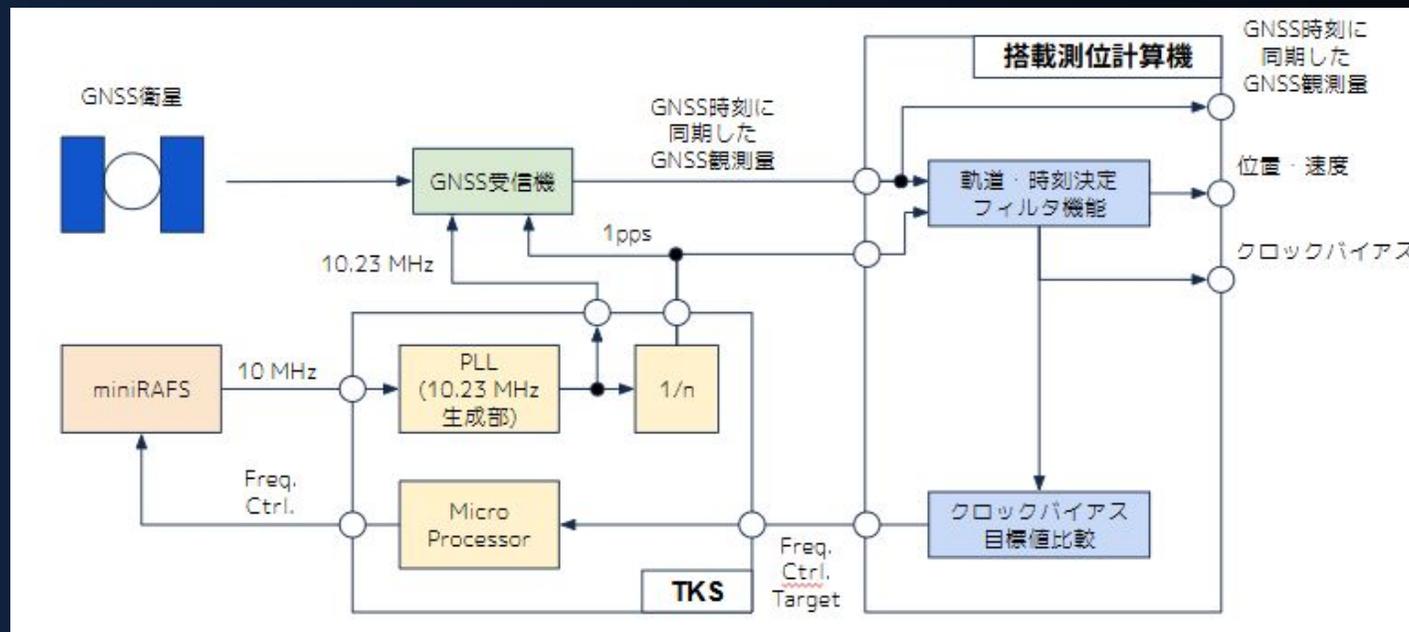
安定度の高い時刻系の開発

<現時点での設計・開発状況>

- ・ ペイロードシステムとしての時刻同期方式やブロック図を検討済み
- ・ TKSの試作を通じて、ベースとなる原子時計に正確に追従する衛星基準周波数の生成は検証済み

<今後の課題>

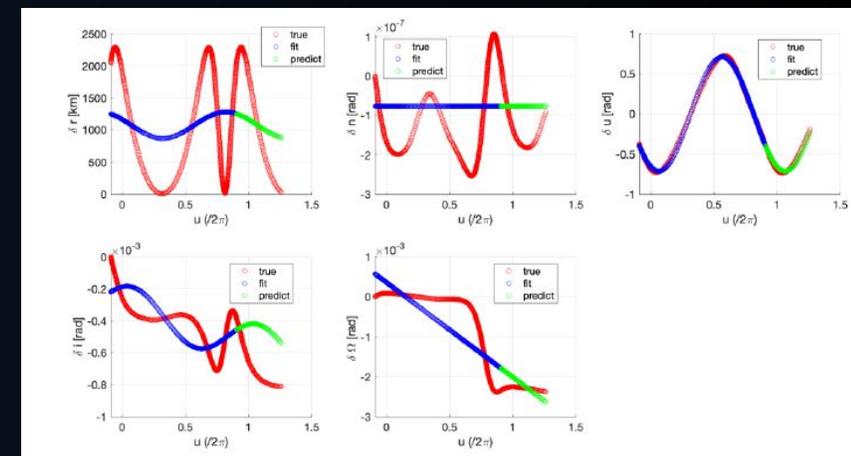
- ・ 時刻同期方式の定量的な検証（特に時刻比較の必要性）
- ・ 高安定な時刻制御の実機での検証方法の検討



LNSS用エフェメリス・航法メッセージフォーマットの開発

<現時点での設計・開発状況>

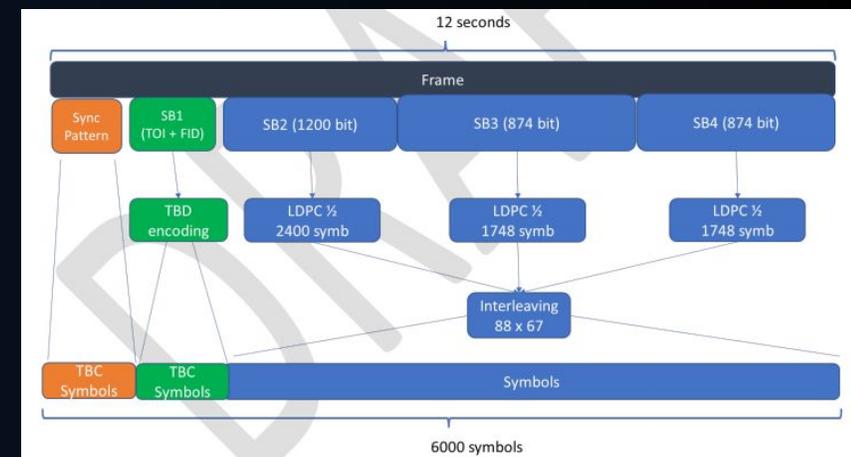
- 月周回軌道においてGPSのエフェメリス形式をそのまま採用した場合のシミュレーションを行い、十分なフィッティング精度や有効期間の実現が難しいことを確認済み
 - 月周回軌道における摂動の大きさ
 - ELFOといった離心率の大きい楕円軌道への適用性
- パラメータ数の増加・エフェメリス有効期間の調整により、必要なフィッティング精度の達成を確認済み



GPSエフェメリス形式のシミュレーション

<今後の課題>

- LNISの改訂に合わせたエフェメリス形式の改良
 - 受信機としての扱いやすさも考慮する必要があり、受信機メーカーや将来ユーザーなどへのヒアリングも必須
- 検討結果を積極的に国際学会等で発表し、LNISの制定に働きかけ、国際協調における日本のプレゼンスを高める



LNISメッセージ形式規定

ペイロードシステム全体の検証計画の立案

<現時点での設計・開発状況>

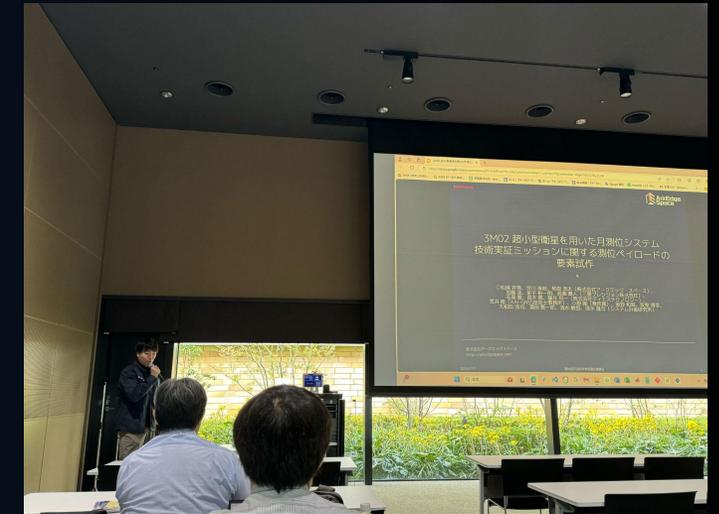
- 部分的に試験計画を立案開始
 - 段階的なペイロードの統合を想定
 - BBMレベルでの統合試験の実施
- 必要な特殊機材（月圏GNSSシミュレータ等）を整理中

<今後の課題>

- 試験計画の詳細化
 - 試験系の設計（測位信号の送受信、時刻同期精度の検証）
- 試験系の構築

<現時点での状況>

- 宇宙戦略基金の採択まで概念設計が中心であったため、学会発表等によるアウトリーチが中心であった
 - ユーザー候補や受信機メーカー候補などとのディスカッションは積極的に行ってこなかった
- 宇宙戦略基金採択を受け、本格的にユーザーニーズ調査活動を開始
 - 月面産業ビジョン協議会への参加
 - 測位航法学会・測位技術振興会等PNT関連コミュニティへの貢献



第68回宇宙科学技術連合講演会における発表
(2024年11月)

<今後の課題>

- ユーザーニーズ調査活動の加速
- 具体的なユーザー候補や受信機メーカー候補とのディスカッション
 - 月面探査活動における必要精度等の調査
 - ロバー等への搭載に向けて求められる仕様等の調査

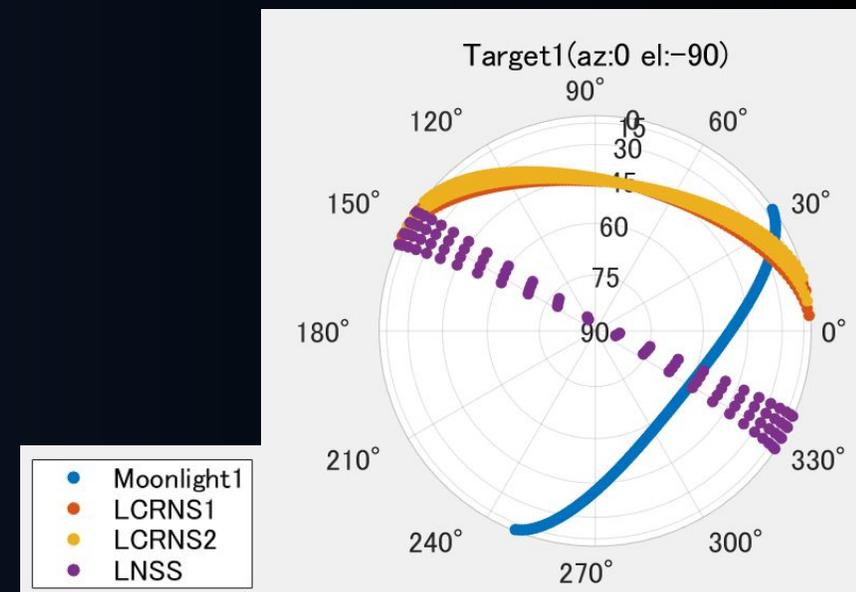


月面産業ビジョン協議会への参加

LNSS FOCに向けた フェージビリティ・スタディ

実用コンステレーション形成に向けた課題

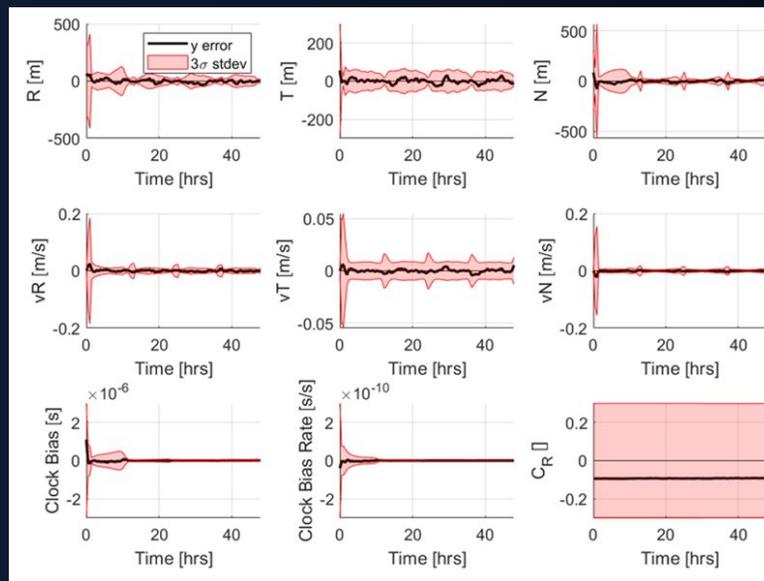
- 月測位サービスを実用的に提供するにあたって、開発機数を減らすためにも欧米の測位衛星システムと協調し一体としてコンステレーションを組むことが想定される
 - 月測位実証衛星はLNISに従い開発を行い、欧米の測位システムとの相互運用性の実証を実施する予定である
- 一方で、実用的な測位サービス提供に向けては課題がある
 - 欧米の測位衛星配置を反映した、日本の測位衛星の適切な配置及び機数の検討
 - 実証衛星から実用衛星への衛星設計の更新
 - 信頼性の向上
 - 推進系のリサイズ
 - 複数機製造・運用手法の確立
 - GNSS以外の観測量の利用によるLNSS衛星の軌道時刻決定精度向上及び冗長性の確保
 - 現時点では欧米の測位衛星よりも軌道時刻決定精度が低い



混合コンステレーションのスカイプロット

実用コンステレーション形成に向けたシナリオ

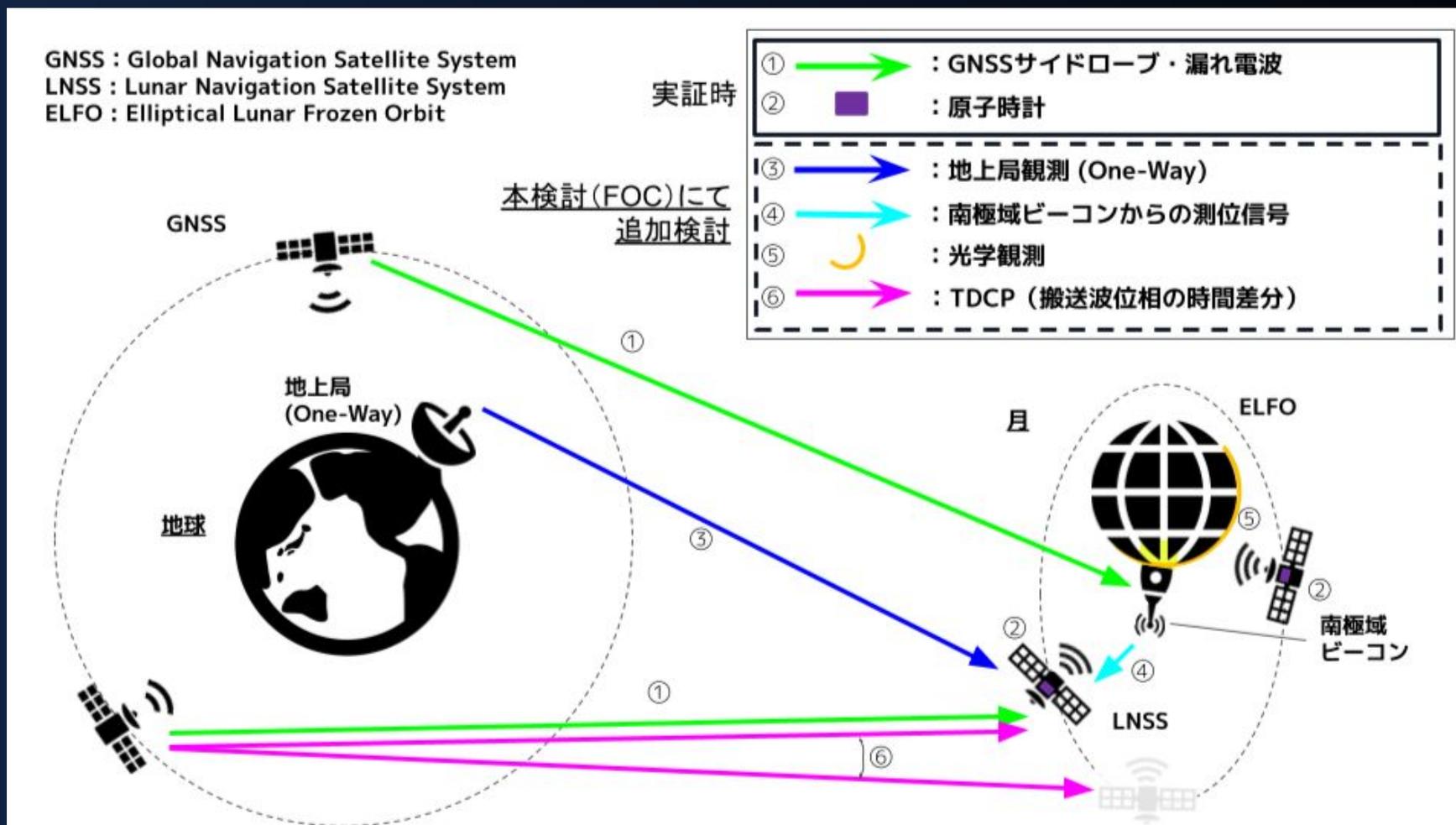
- 実用化（FOC）に向けた課題解決のため、実証衛星の開発と並行して独自に検討を進める
 - その第一歩として本年度のフェージビリティ・スタディにおいて高精度化の検討を実施
- 実証衛星の2～3年後の打上を想定して、FOCレベルのサービスを提供可能な測位衛星の開発を目指す
 - この測位衛星の打上によって、欧米と協調したコンステレーションの一角を十分担うことが可能となる



GPSのみの軌道時刻決定シミュレーション結果
→追加の観測量による高精度化の検討を実施中

精度・信頼度向上に向けた複合航法の検討

- TDCP、光学観測、One-way Ranging、南極域ビーコンによる複合航法のシミュレーションを実施し、精度・信頼性向上に向けて検討を進める



まとめ

- ・ アークエッジ・スペースでは、2021年度から月測位に関する検討を進めてきており、その実績をもとに、2024年度から宇宙戦略基金を用いて、本格的に月測位ペイロードシステム及び月測位実証衛星の開発を進め、国内の月測位に関する開発を牽引していく
- ・ 一方で、開発において課題はまだ多くあり、我々だけでなく国内の技術力を結集し解決していきたいと考えている
 - ・ 協力の可能性を皆様と是非議論させていただきたい
- ・ ユーザー候補や受信機メーカー候補とのディスカッションも加速させ、使いやすい国産インフラの構築を目指す
- ・ 実証のその先を見据え、FOCフェーズにおける高精度化・高信頼化のためのフィージビリティ・スタディも進めており、よりよいサービス提供を目指す