

月測位衛星システムの実証へ： GNSSとの違いと課題解決へのアプローチ

2025年6月3日 第10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 渋谷 季裕

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	107億円（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	- 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

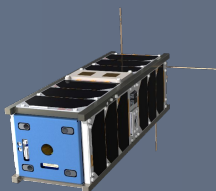
2019年打上げ



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

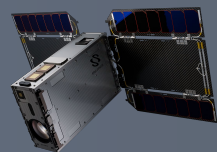
2022年打上げ



EQUULEUS (運用支援)
6U級の月近傍探査機
©東京大学

運用支援実績

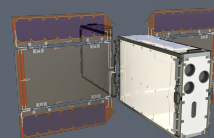
2023年打上げ



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

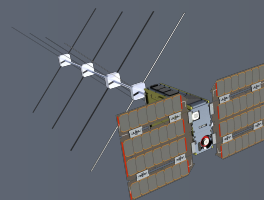
2024年秋以降 7機打上げ予定



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

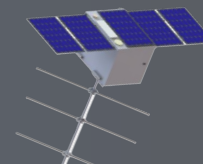


VDES実証衛星
6U級の海洋状況把握用衛星

30-100kg級

開発中

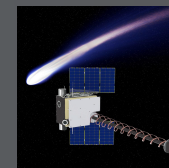
2026年頃 複数機打上げ予定



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

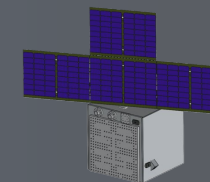


Comet Interceptor
彗星探査衛星

100kg以上

開発中

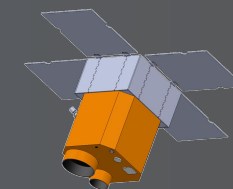
2028年以降 打上げ予定



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

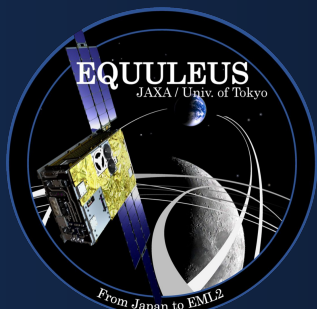
高度な軌道制御

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

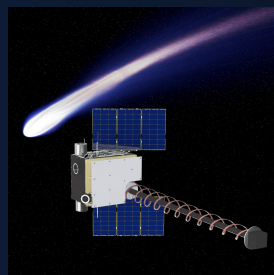
- 地球-月圏における軌道制御技術の実証を行ったJAXA・東京大学共同開発の探査機。
- 創業エンジニアが東大在籍時に開発に参画。当社は運用に参画。
- 第6回宇宙開発利用大賞選考委員会特別賞受賞。



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。



成果を
相互に活用

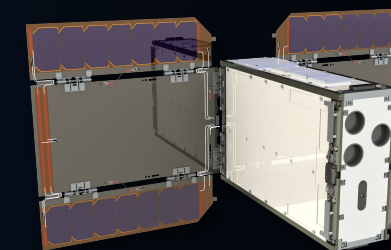
地球ビジネスへの応用

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



将来的に

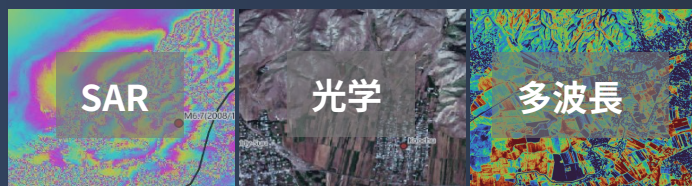
- 16Uサイズ CubeSat
- 50kg級 超小型衛星
- 100kg級 小型衛星

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フィージビリティ・スタディ

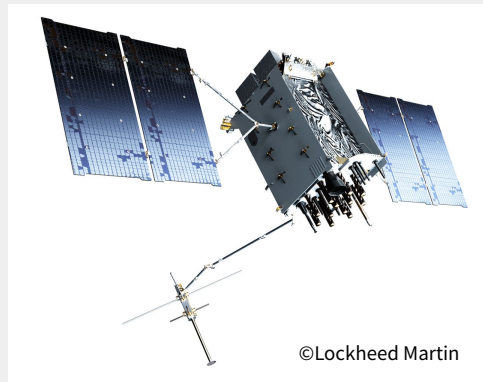
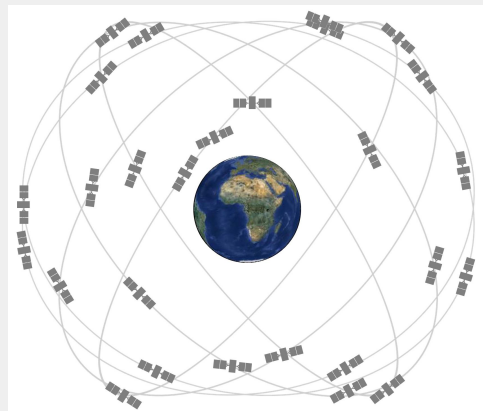
2024年11月20日、JAXA企画競争「月測位システム（LNSS）のFOCに向けたフィージビリティ・スタディ（その1）」の契約先に選定
→実証のその先を見据えた実用システムにおける高精度サービス提供に向けての検討を開始

月測位における課題 ～GNSSとの比較、LNSSでの方針や世界的動向～

比較対象

＜従来GNSS＞

GPS, Galileo, QZSSなど、既存の地球周回衛星コンステレーションによる測位インフラ

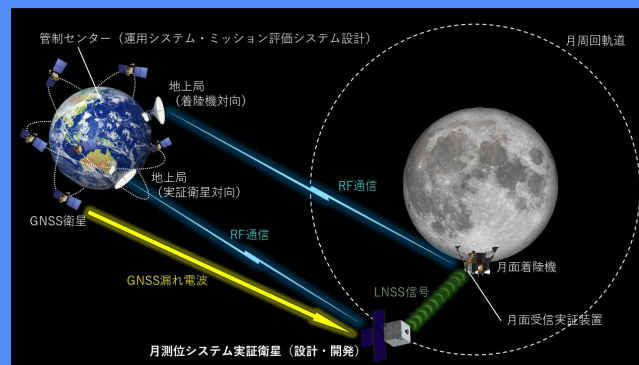


＜月測位衛星システム＞

特に日米欧はLunaNetという枠組みの中で、LunaNet Interoperability Specification (LNIS)において規定されるLunar Augmented Navigation Service (LANS)信号という規格化された測位信号を衛星から配信する

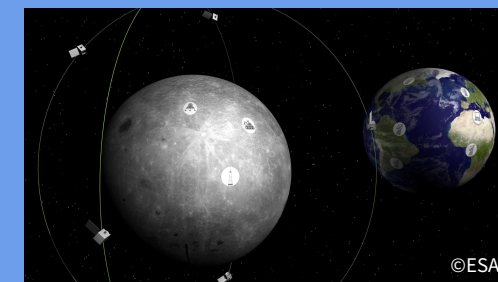
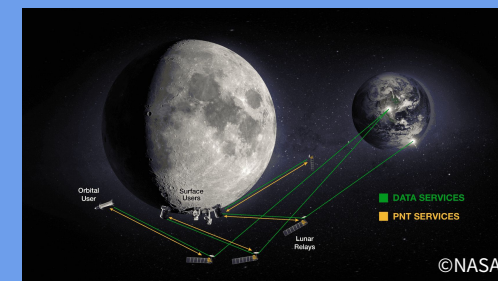
＜LNSS＞

日本で開発が進められている月測位衛星システム (LNSS: Lunar Navigation Satellite System)
アークエッジ・スペースにて実証機を開発中



＜海外システム＞

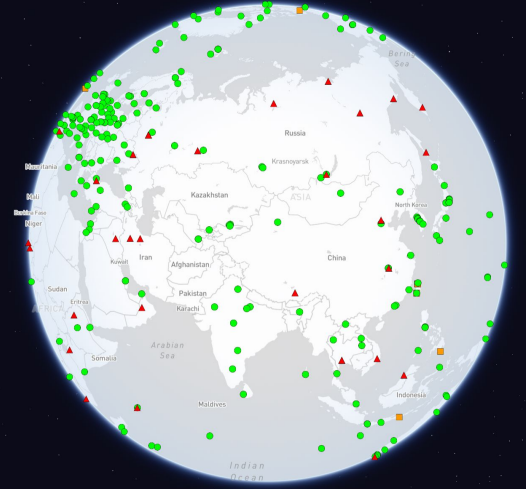
LCRNS (米)やLCNS (欧)など、海外で開発されている月測位衛星システム



衛星の軌道時刻決定

<従来GNSS>

- ・ 多数の地上局から常時GNSS衛星を監視し、高精度な軌道時刻決定を実施
- ・ 地上及び衛星上に非常に高安定な時刻標準や原子時計が存在する
- ・ 時系や座標系を管理する国際的インフラが整備済み
- ・ 送信系の内部遅延はすべて航法メッセージのクロック情報に含められる



世界中に存在するIGSの地上局

<月測位における課題>

- ・ 現時点で月面に衛星を監視する地上局や時刻標準となる原子時計は存在しない
- ・ 地球からの監視・軌道時刻決定には大型の地上局が必要
- ・ 輸送費の観点で大型の原子時計は搭載が困難
- ・ 時系や座標系を管理するインフラが未整備
- ・ 地上監視局がないので、送信系や時刻同期系の遅延量の補正が必要



Deep Space Networkのアンテナ

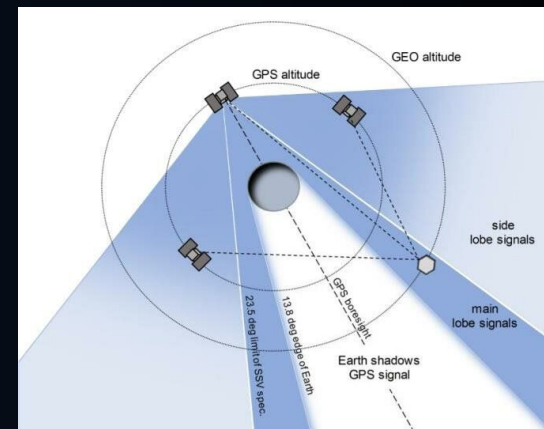
衛星の軌道時刻決定

<LNSSでの方針>

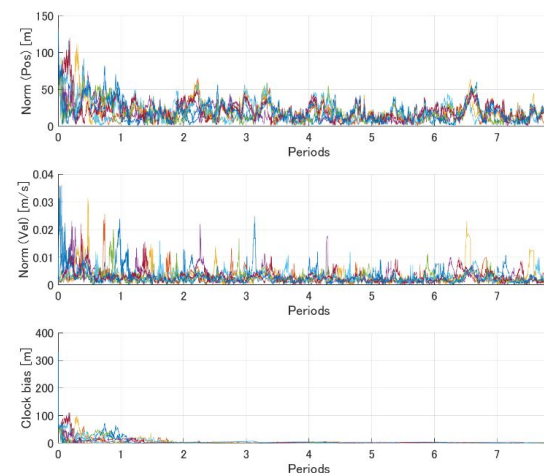
- ・ 地球の地上局に頼らず、オンボードで軌道時刻決定を行う
- ・ 主な観測量はGNSS漏れ電波からの擬似距離・ドップラー
- ・ 比較的軽量かつ安定度の高い小型原子時計を採用し、衛星内時刻管理システムを開発する

<これまでの開発実施内容・今後の開発予定>

- ・ GNSS観測量に基づく軌道時刻決定のソフトウェアシミュレーションを実施済み
- ・ 十分な精度が得られる見込みが得られた
- ・ 現在衛星に搭載する基板及びそれに実装する軌道時刻決定アルゴリズムの開発を実施中



GNSS漏れ電波・サイドローブ^[1]



軌道時刻決定シミュレーション

衛星の軌道時刻決定

<海外システムの状況>

- LuGREやLunar Pathfinderなど、月周辺でのGNSS受信実証は進んでいる
- 一方で、NASA・ESAは完全にオンボードかつGNSS依存ではなく、地上局やその他のセンサも組み合わせた航法を検討中
- 月面開発が進むにつれて、月面に補正や監視のための局を建設し、GNSSと近い形に進んでいく兆候がある
 - ESA: NOVAMOONなど



LuGRE

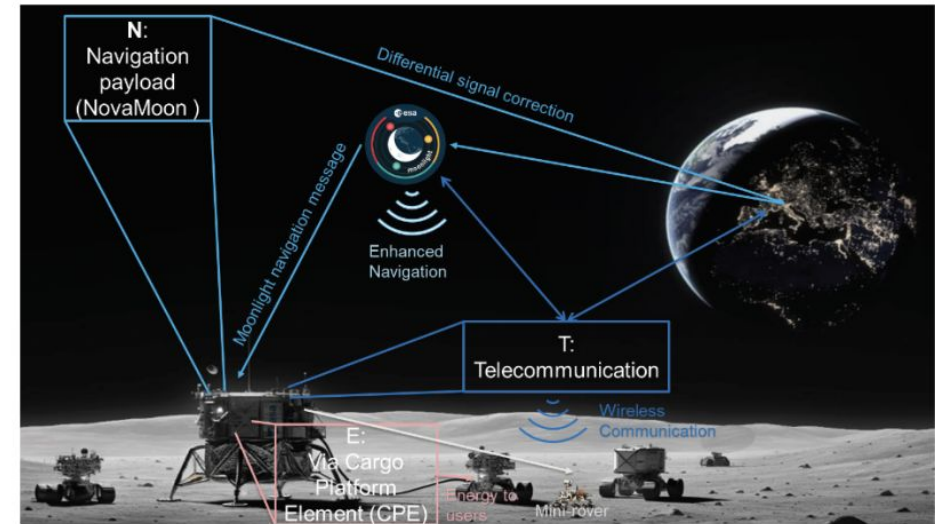


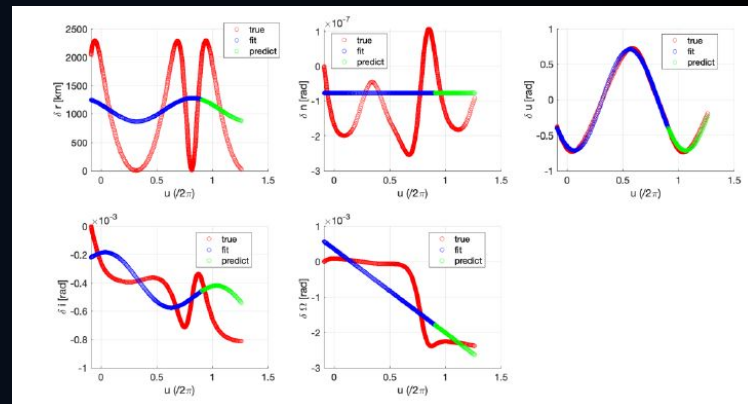
FIGURE 2 ArgoNET Mission concept including the NovaMoon payload.

NOVAMOON

エフェメリス形式

<従来GNSS>

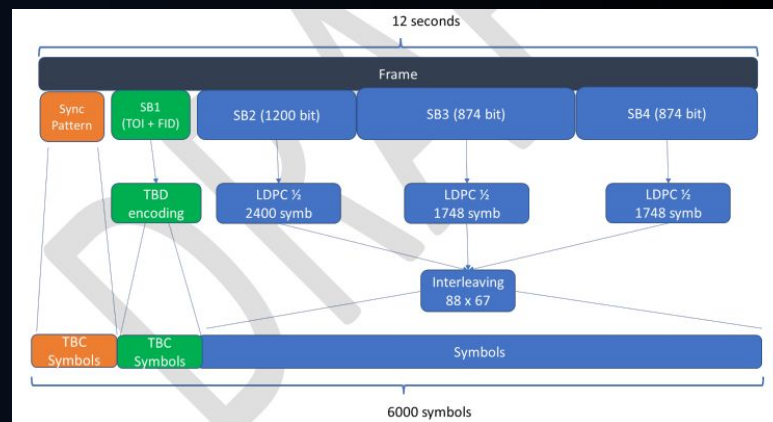
- ・ 軌道は円軌道のみを想定
- ・ ケプラー要素+摂動量パラメータ（11項目）による放送歴の配信（GPSの場合）
 - ・ 有効期間：2～4時間程度
 - ・ 300 bitのサブフレーム（パリティ含む） × 3により配信
- ・ 高頻度な衛星 - 地上局間の通信により地上で航法メッセージを計算してアップロード可能



GPSエフェメリス形式のシミュレーション

<月測位における課題>

- ・ ELFOなどの楕円軌道でもフィッティング可能である必要がある
- ・ 地球重力などの摂動要因が多い
 - ・ 実際、GPSの形式を使っても大きな誤差が出る
- ・ 地上局との通信頻度がGNSSよりも低いため、エフェメリスの長寿命化やオンボードでの生成など工夫が必要
- ・ LNISの規定により、1200 bitのサブフレーム × 1に上記のメッセージを収める必要がある



LNISメッセージ形式規定

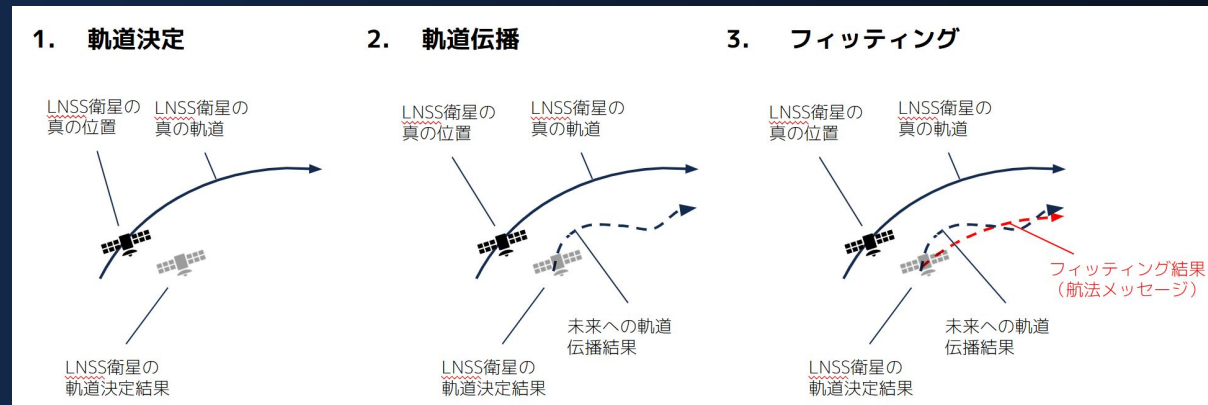
エフェメリス形式

<LNSSでの方針>

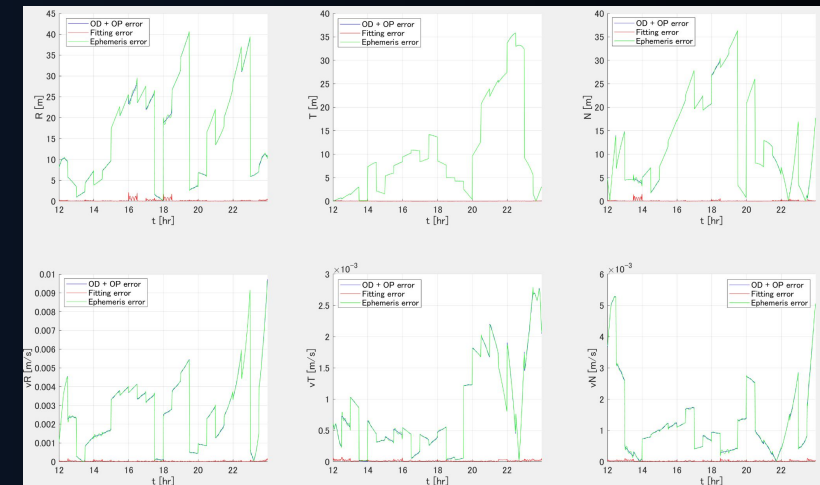
- ・ 摂動量を多項式＋フーリエ級数により表現し、複雑なダイナミクスにも対応できるようにする
- ・ 軌道時刻決定結果をもとに未来に軌道伝搬を行い、得られた軌道に対して内挿という形でフィッティングを実施し、エフェメリスを生成する
- ・ 軌道時刻決定に加え、航法メッセージ計算もオンボードで実施し、高頻度（30分,TBD）でエフェメリスを更新する

<これまでの開発実施内容・今後の開発予定>

- ・ 軌道時刻決定誤差＋軌道伝搬誤差＋フィッティング誤差を全て考慮した誤差評価を実施済み
- ・ ビット数評価・ソフトウェア無線シミュレータ＋受信機（この後発表）による実際の利用環境における評価を今後実施予定



航法メッセージの生成手順

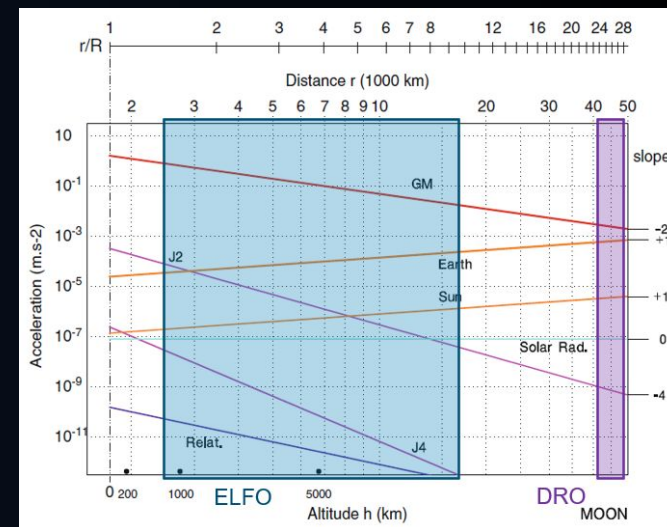


誤差評価シミュレーション結果の一例

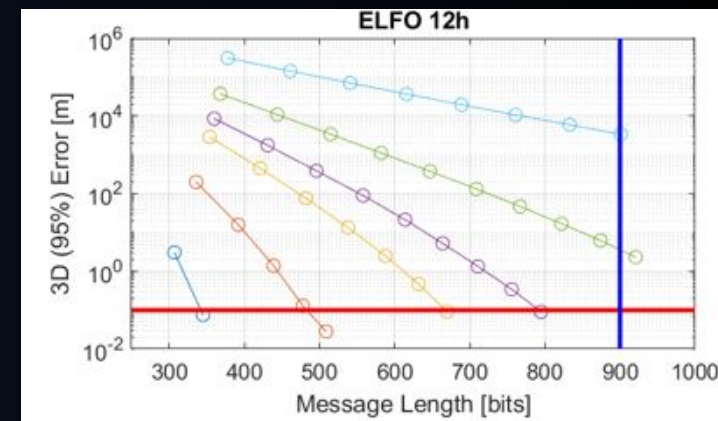
エフェメリス形式

<海外システムの状況>

- ・ 摂動量表現にチェビシェフ多項式を利用する検討が複数存在する
 - ・ 必要ビット数の検討も実施されており、チェビシェフ多項式の優位性が見られている
- ・ ESA・NASAとは採用軌道や地上局通信頻度の異なる日本のLNSSにおいても同様に有効かは要確認
- ・ 一方で、フィッティング誤差のみの評価が多く、エフェメリス生成に必要な軌道時刻決定や軌道伝搬も合わせた評価は盛んではない
- ・ LunaNetチームが各所で行われている検討をとりまとめ、LNISに基づく規格化を進めている
 - ・ AEでの検討結果も打ち込むことでLNIS制定に働きかけていきたい



月軌道におけるダイナミクスの効果^[2]



メッセージビット数とフィッティング誤差のトレードオフ^[2]

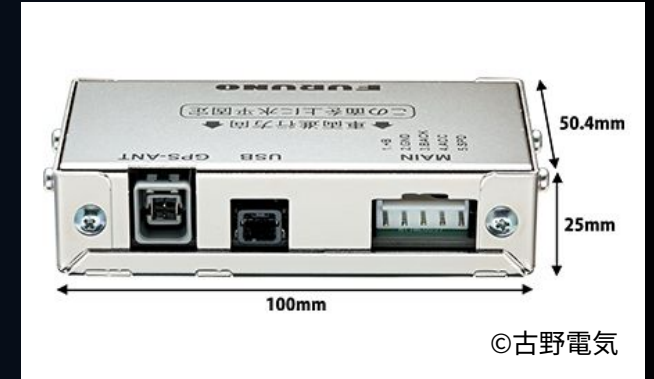
ユーザ受信機の開発

<従来GNSS>

- ・ ユーザ受信機マーケットが非常に成熟しており、小型で安価なものから、非常に高い精度での測位を実現できるものまで、様々なチップやモジュールが世に出回っている

<月測位における課題>

- ・ 月測位では従来GNSSで使われているL帯ではなく、S帯の搬送波が用いられる予定
- ・ S帯における測位用途のチップやモジュールの開発は殆ど行われていない
- ・ LNISにより信号形式の大枠が規定されるが、完全に確定するまではまだ時間がかかる
- ・ 大枠は共通化される予定だが、システムによって独自の信号形式を持つ可能性がある
- ・ 放射線が厳しい環境でしか使用されないため、放射線耐性が求められる



古野電機製 PT-G1



Trimble製 BD9250s：NavIC向け
S帯拡張オプションあり

ユーザ受信機の開発

<LNSSでの方針>

- SDRベースでユーザ受信機を開発することによって、航法メッセージの形式変更に対応できるようにする
- 民生品中心で構成しつつも、放射線試験を通じた耐環境性評価を実施する予定

<これまでの開発実施内容・今後の開発予定>

- LNSS受信機のBBMのHWを開発済み
 - SWについては一部開発済み、信号仕様の策定とともに残りを進めていく予定
 - Spirent社のLANS信号シミュレータによる評価を実施予定
- 中部大学のSDR受信機を用いた航法メッセージの評価などを今後実施予定



LNSS受信機BBM

ユーザ受信機の開発

＜海外システムの状況＞

- 海外製LANS受信機の開発情報はまだあまり表に出てきていないが、同様にSDRベースの開発が中心と考えられる
 - Intuitive Machines
 - CesiumAstro
- Intuitive Machines社の開発は現状BBM段階



Intuitive MachinesにおけるLANS受信機試作状況^[3]



CesiumAstroのLANS受信機基板^[4]

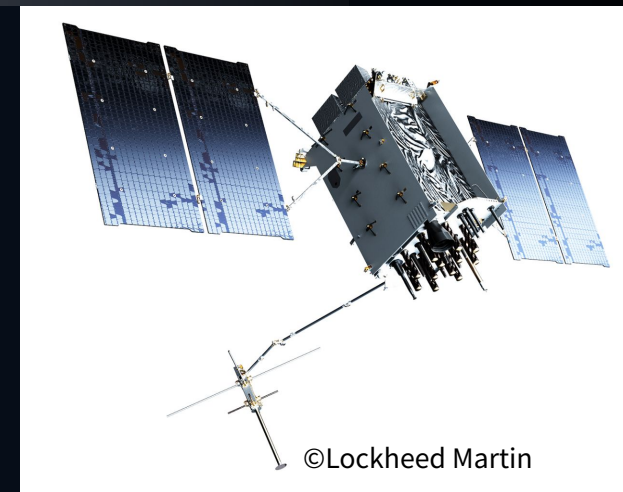
衛星の開発・打上

<従来GNSS>

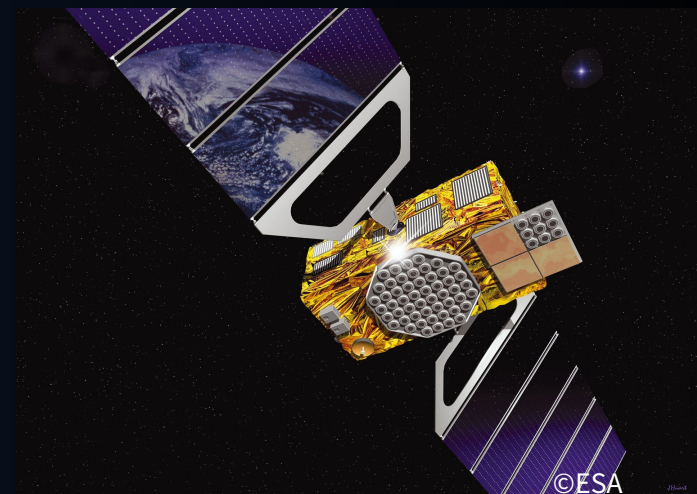
- ・ 信頼度が高く、サイズも大きい衛星が利用されてきた
 - ・ GPS Block III: 約 3.7 トン
 - ・ QZSS 4号機: 約 4.8 トン
- ・ 一方、GalileoやBeiDouなどは小型化が進んでいる
 - ・ Galileo: 約 700 kg
 - ・ BeiDou (MEO): 約 1 トン

<月測位における課題>

- ・ 月軌道への輸送費用が非常に高価
- ・ ほぼ全人類が恩恵を受けている地球測位と異なり、将来的なユーザー数の拡大が未知数



GPS Block III 衛星



Galileo 衛星

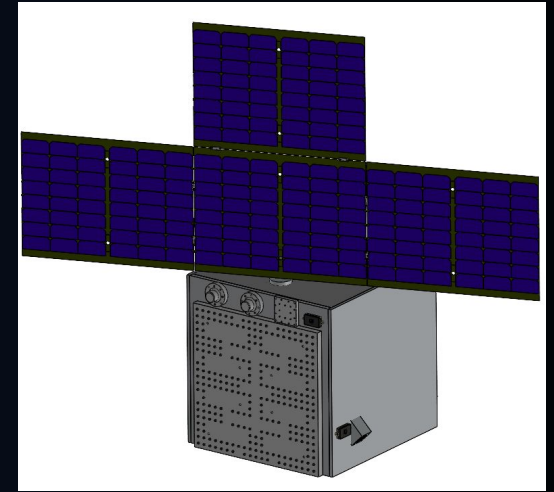
衛星の開発・打上

<LNSSでの方針>

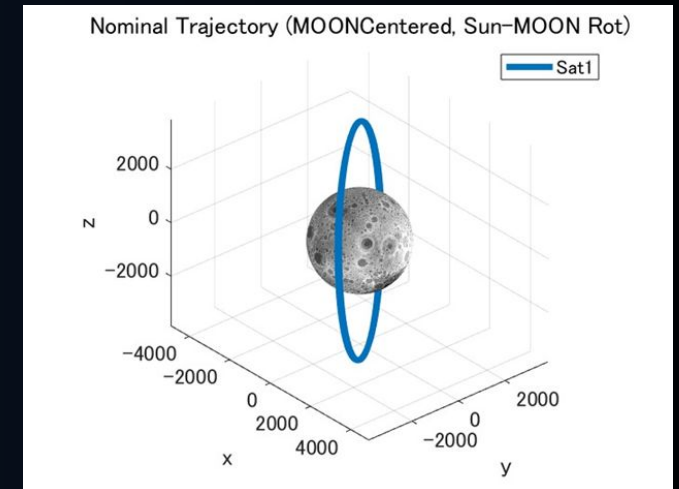
- ・ 可能な限り衛星を小型化し、開発・打上費用を抑える
 - ・ 実証機では月面着陸機と共に軌道投入しやすく、推進系が小型で済む、月極軌道への投入も選択の余地に入る
 - ・ ターゲット質量としては100 kg前後を想定している
- ・ 衛星搭載コンポーネントは民生品中心で構成しつつも、放射線試験を通じた耐環境性評価を実施する予定
- ・ 従来の超小型衛星と比較し、一部冗長化を行い、信頼性を向上させる

<世界的な流れ>

- ・ 世界的にも従来GNSSよりも小さな衛星での開発が進んでいる
- ・ 通信機能と測位機能を一つの衛星に持たせることによる打上効率の向上が図られている
- ・ LNISを通じたインターオペラビリティによる、協調的な測位コンステレーションの形成が想定されている



LNSS実証衛星概念図（更新予定）



実証機投入軌道候補

まとめ・現在の開発ステータス

- ・ 月測位衛星システムの実現には、従来GNSSとは異なる課題が多くあり、いくつかの例を紹介した
 - ・ 衛星の軌道時刻決定
 - ・ エフェメリス形式
 - ・ ユーザ受信機の開発
 - ・ 衛星の開発・打上
- ・ これらの課題について、現在日本のLNSSでの方針と、海外システムの状況についてまとめた
- ・ 上記の対策方針を織り込んだうえで、アークエッジ・スペースでは月測位実証衛星及びその搭載ペイロードの開発を進めている
 - ・ 測位ペイロード：今年度末から来年度にかけての最初の統合試験に向けて、各構成サブシステム・コンポーネントの開発を進めている
 - ・ 衛星システム：軌道条件や打ち上げ機インターフェース条件の更新に伴い、概念設計の更新を実施し、サブシステム設計及び長納期コンポーネントの調達に向かって進んでいる

参考文献

- [1] Donaldson, J. E., Parker, J. K., Moreau, M. C., et al (2018). *Characterization of On-Orbit GPS Transmit Antenna Patterns for Space Users*. Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), pp. 1208-1245.
- [2] De Oliveira Salgueiro, F., Melman, F. T., Swinden, R., Audet, Y., Giordano, P., & Ventura-Traveset, J. (2025). *A novel navigation message for future lcns satellites*. Engineering Proceedings, 88(1), 52.
- [3] Stewart, S., Hartigan, M., Garcia, F., Lightsey, G. (2025). *Intuitive Machines LANS/PNT Lunar User Terminal Architecture*. Workshop on Cislunar Positioning, Navigation, and Timing (PNT).
- [4] Pfeifer, D. (2025). *CesiumAstro Development of LunaNet AFS Receiver*. Workshop on Cislunar Positioning, Navigation, and Timing (PNT).