

月面活動に向けた測位技術開発の状況

2024年3月14日

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

国際宇宙探査センター



目次

1. 月測位技術開発の位置付け、必要性
2. 技術開発の検討状況
3. 国際調整状況
4. まとめ

1. 「宇宙基本計画」における位置付け

宇宙基本計画： 令和5年（2023年）6月改定

4. 宇宙政策に関する具体的アプローチ

(3) (b)月面における持続的な有人活動 【国際パートナーと民間事業者が連携した持続的な月面活動】

(中略)

- 具体的には、アルテミス計画の下、国際協力による月・火星探査を実施するとともに、持続的な有人活動に必要な、環境制御・生命維持システム、月周回有人拠点（ゲートウェイ）補給機及び有人与圧ローバの研究開発、月極域探査機（LUPEX）による水資源関連データの取得等に向けた取組を着実に実施していく。**既に要素技術開発に着手した月周回衛星による測位・通信システムについても、着実に研究開発を進めるとともに、国際協力の下、位置付けていく。**

宇宙基本計画工程表： 令和5年（2023年）12月改定

令和5年度 (2023年度)	令和6年度 (2024年度)	令和7年度 (2025年度)	令和8年度 (2026年度)	令和9年度 (2027年度)	令和10年度 (2028年度)	令和11年度 (2029年度)	令和12年度 (2030年度)	令和13年度 (2031年度)	令和14年度 (2032年度)	令和15年度以降
【国際パートナーや民間事業者と連携した持続的な月面活動】										
持続的な活動に不可欠なインフラ(測位通信、資源探査・採掘利用・電力供給、無人建設、食料生産)の研究開発[内閣府、国土交通省、総務省、文部科学省、経済産業省、農林水産省等] 宇宙無人建設革新技術開発[国土交通省・文部科学省] 測位・通信に関する研究開発 [文部科学省・総務省]										

1. 「宇宙技術戦略(案)」における位置付け

宇宙政策委員会 第110回 会合：令和6年（2024年）2月26日開催

資料1 “宇宙技術戦略(案)”より抜粋

3. 宇宙科学・探査

III. 月面探査・開発等

(2)環境認識と技術戦略

④月通信・測位技術

ii. 技術開発の重要性と進め方

(中略)

月面・月周回軌道上で、リアルタイムに測位を行うための月測位システム技術は、月探査の運用性の大幅な向上のために、非常に重要である。月測位システム(LNSS)の実現のため、月近傍GNSS受信機やその観測量に基づく月周回軌道上での軌道決定技術、月面にいるユーザが自分の位置や時刻の算出に用いる測位衛星から発信される航法メッセージの生成技術等を確立する必要がある。米国や欧州等においても取組が進められている中、日本も含めて相互運用性を確保しつつ、国際協力の下での月面測位実証や、月面上での測位基準局の配備等に初期段階から参画し、我が国として独自性のある貢献を果たすことが必要である。

資料2 “宇宙技術戦略(案)の概要(詳細版)”より抜粋

III.月面探査・開発等

- 人類の恒常的な活動領域が深宇宙に拡大することを目指した、アルテミス計画が進捗する。
- 国際パートナーとともに、持続的な月面探査（限られた資源を効率的に探査・利用する技術）と、基盤技術の開発を進めていく。

月通信・測位技術

- 月圏内や月-地球圏の間における通信や、月面・月周回軌道上でリアルタイムに測位を行うための技術。



- 【出典】JAXA
- 重要な技術開発：
- ✓ 大容量リアルタイム通信技術
 - ✓ 小型軽量化技術
 - ✓ 惑星間インターネット技術
 - ✓ 月測位システム技術
 - ✓ 月面拠点内のRF通信技術 等

- 月面探査における通信測位技術は、国際的に協調して共通のインフラ規格を共同利用する方向で調整が進められている。

月表面探査技術

- 月面着陸後の人・物の移動機能や、耐環境機能、作業支援機能を提供し、広域・長期の月面探査活動を実現する基盤技術。

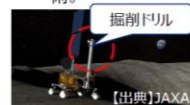


- 【出典】TOYOTA
- 重要な技術開発：
- ✓ 航法誘導制御技術
 - ✓ 耐環境技術
 - ✓ 走行機構技術
 - ✓ 作業支援技術 等

- JAXA/トヨタが研究開発中の月・火星のローバでは米・ロ・中に実績があり、後続では欧州、インド等で取り組みが進んでいる。

月資源開発技術

- 水資源を含む資源探査や、資源利用に必要な施設・設備等の整備のための事前調査を行うための技術。



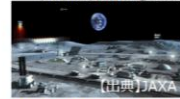
- 【出典】JAXA
- 重要な技術開発：
- ✓ 月周回資源探査技術
 - ✓ 月面資源探査技術 等

月極域探査機（LUPEX）プロジェクトのイメージ

- 月を活動拠点とする際にはエネルギーの確保が極めて重要であり、その資源として「水」が有力視されている

月資源利用技術

- 持続可能な月面探査の実現に向けて、月面の資源を効率的に利用するための技術。



- 【出典】JAXA
- 重要な技術開発：
- ✓ 水資源利用技術
 - ✓ 宇宙無人建設技術
 - ✓ 月面での食料生産技術 等

- 2022年10月にISECGより公表された「国際宇宙探査ロードマップ追補版2022」において、月面の氷含有レギス原料として、月周回有人拠点「ゲートウェイ」と月面拠点間の往復に使用する宇宙機の推進を月面で生成する構想等が掲げられている。

2. 検討状況：宇宙開発利用加速化戦略プログラム

宇宙開発利用加速化戦略プログラム（スターダストプログラム）におけるプロジェクトの一つとして選定された「**月面活動のための測位・通信技術開発**」をJAXAが文部科学省からの受託により、令和3年度より実施中。

実施内容・期待される効果

- 月探査活動において、当面**有人と圧ローバ**での探査が主たる手段となり、**月の南極域で水平40m以下の航法精度**が求められている。この精度を目標としたLNSSのキー要素技術（**マルチGNSS化、月近傍航法機能、航法高精度化**）の開発を行い、**成熟度TRL4**（実験室環境レベルでの有効性確認）まで上げる。
- 月－地球間の**高速通信1Gbps**を目標として、**高感度送受信技術**（位相変調方式光通信技術）の研究とともに関連要素技術（**遠距離捕捉追尾技術、大口径光学系等**）を向上させ、**成熟度TRL4**を目指す。
- LNSSは地球地上局の運用制約の影響を受けず、リアルタイムでの航法値が得られるため、**宇宙機（月周回機及び月面における人・ロボット・ローバ等）運用効率の飛躍的向上、探査ミッションの価値拡大と創出**が期待できる。

実施体制・スケジュール

主管実施機関：JAXA
共同参画機関：NICT

実施項目	R3	R4	R5	R6	R7
測位・通信アーキテクチャ/システム検討	→				
測位	LNSS実証機システムの検討				
	マルチGNSS化				
	月近傍航法機能				
	航法高精度化				
通信	国際インターオペラビリティ方式の研究				
	遠距離捕捉追尾技術の研究				
	月－地球間通信用高感度送受信技術の研究				
	軽量大口径光学系の研究				
搭載補償光学技術の研究					

2. 検討状況：月面における測位精度要求

月測位サービスを利用するユーザの例（有人と圧ローバ）



©TOYOTA. Unauthorized use is prohibited

表. 有人と圧ローバのミッション概要

		ミッションフェーズ#1	ミッションフェーズ#2
ミッション 要求	運用期間	10年間	
	クルー人数	2名	
	探査領域	南極域	SPA盆地（5領域 6地点）
	ミッション頻度	1ミッション / 年	
運用 コンセプト	ミッション期間	31日（非常時3日含む）	42日
	有人時走行距離	20 km/日	
	総走行距離	10,000km	
走行機能	最大速度	15km/時	
	最大斜度	±20度	
	障害物乗り越え性能	30cm	
システム 機能	居住機能	空間容積、隕石防御、ECLSS、衛生、水・食料保管	
	船外活動機能	リソース供給、照明、ハッチ機能等	
	航法誘導・運転機能	測位、航路計画、自動/マニュアル/遠隔操縦、障害物検知等	
	通信・管制機能	X/Ka/S、自動異常検知・処置(FDIR)等	
	探査機能	観測機器搭載、窓 等	

表. 月面における有人と圧ローバの測位精度要求

測位精度	（月面絶対位置に対する）位置誤差 水平精度40m以内
根拠	南極域の地図解像度(平均80m/pixel)での 位置同定要求より

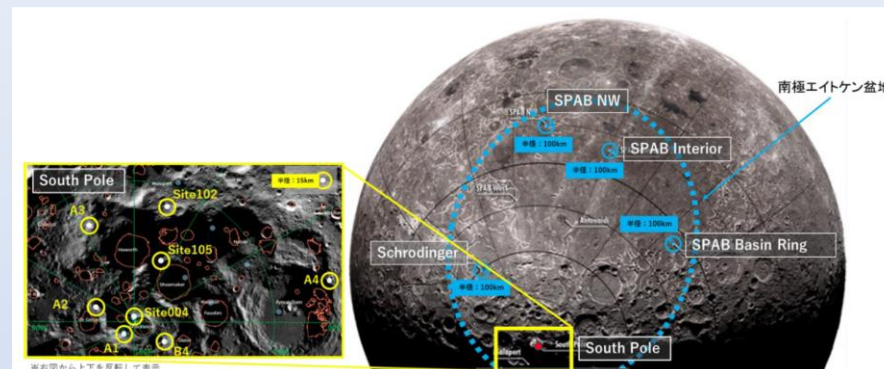
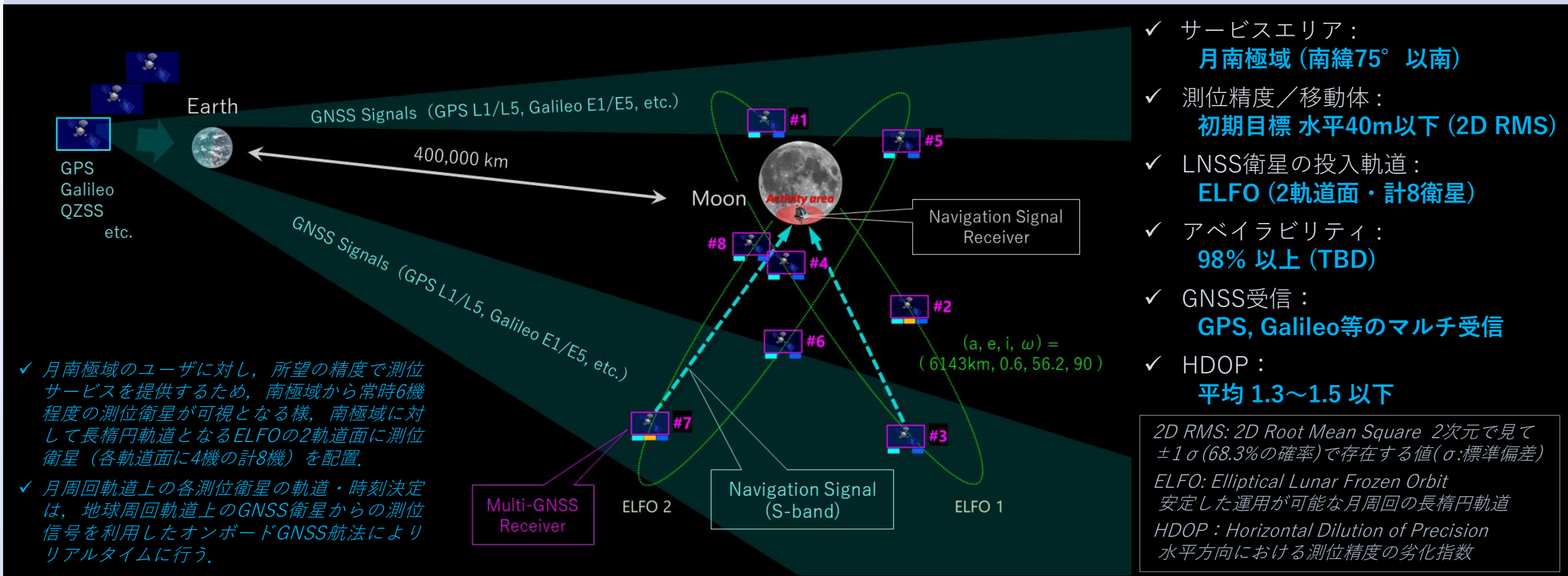


図. 有人と圧ローバの探査計画範囲

2. 検討状況：月測位衛星システム(LNSS)の構想概略

- 地球でのGPSの様な測位衛星網を月周回軌道に構築、月面探査の様々な活動(与圧ローバ、曝露ローバ、EVA等)に貢献
- 月周回測位衛星の軌道・時刻決定には静止軌道GPS受信技術を発展させたマルチGNSS受信機の活用を想定
- NASA/ESAと月版GNSS(Global Navigation Satellite System)に相当するLANS (Lunar Augmented Navigation Service)の共同構築に向けた国際調整を継続的に実施中



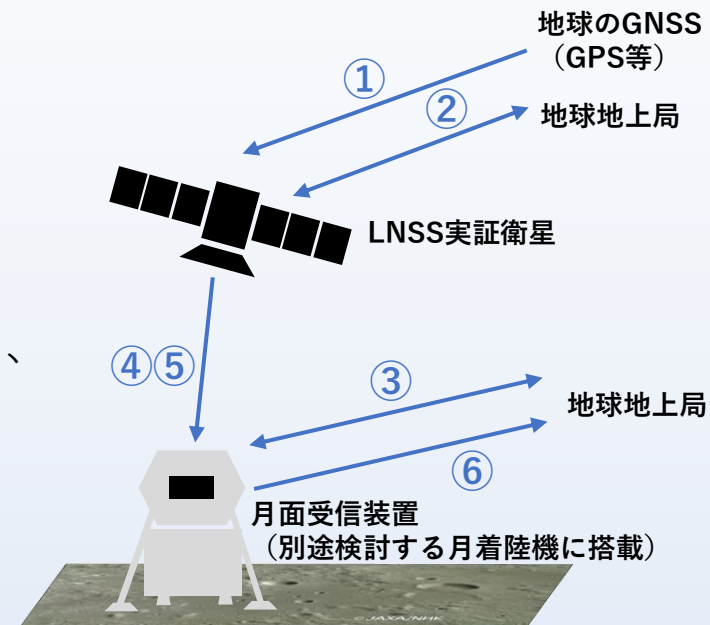
月測位衛星システムの構想概略図

2. 検討状況：月測位技術実証の概要

月測位衛星(LNSS)システムの構築に先立ち、月周回軌道上にLNSS実証衛星(1機)を投入、及び月面に受信装置を設置(着陸機に搭載)し、月測位技術実証ミッションを実施することが必要と考えられる(2028年頃)。

■ 月測位技術実証の概要

- ① LNSS実証衛星がGNSS漏れ電波を使って自己位置を推定
- ② LNSS実証衛星が地球地上局との通信で自己位置を同定
- ③ 月面の受信装置が地球地上局との通信で自己位置を決定
- ④ ①～③より、LNSS実証衛星と受信装置の疑似距離を推定
- ⑤ 受信装置がLNSS実証衛星から受信した測位結果と④の比較により誤差を評価
- ⑥ ⑤の測距精度評価にて、将来の月測位システムにおける測位性能を解析的に検証し、詳細な評価を実施



■ キー技術

・マルチGNSS化

トレードオフによって受信するGNSS信号を決定

・月近傍航法機能

月近傍航法ソフトウェアの要求分析等を実施

・航法高精度化

GNSS信号を用いた高精度の航法アルゴリズムを検討

■ 技術の優位性

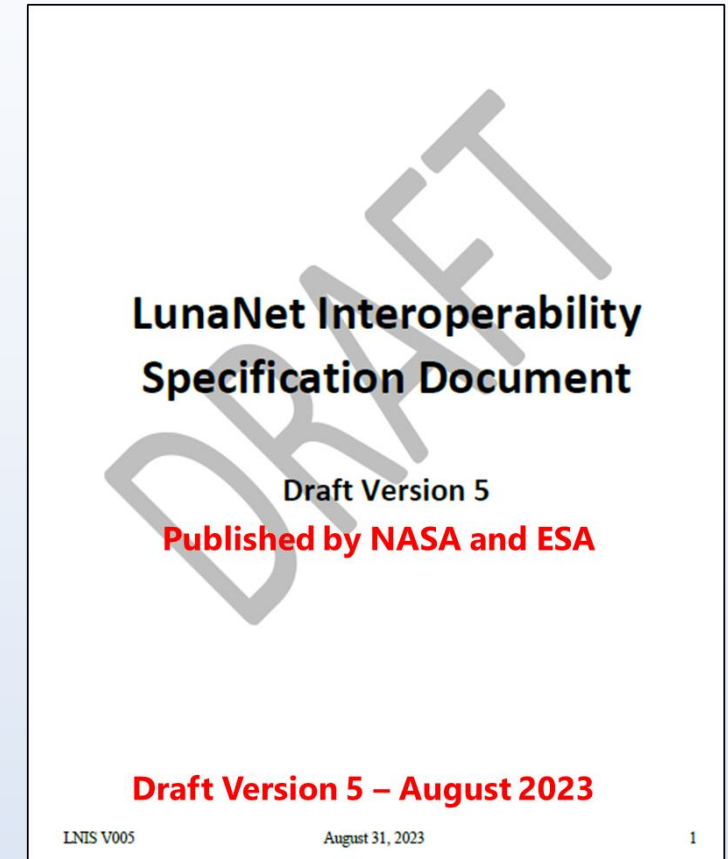
精度の高い測位システムを構築するためには、**測位衛星に搭載する高精度のGNSS受信技術が重要**。日本の当該技術は**世界的に優位なレベルにあり、持続的な月面活動に向けた戦略的技術を確立することが必要**。

< GNSS受信機の国際比較 >

国際比較	Mosaic Airbus (欧州)	TJS-2搭載 GPSR (中国)	Navigator GSFC (米国)	Viceroy GD (米国)	LION Airbus (欧州)	GEORIX RUAG (欧州)	静止GPSR (日本)
リソース	3.9 kg / 10W	N/A	5 kg / 30 W	1.1 kg / 8 W	6 kg / 20 W	9.0 kg / 15W	3.0 kg / 19W
GTO航法機能	×	×	×	×	×	△	○(ETS-9～)
オンボード航法精度*1	150m(3Drms) ただし実力値は1km弱	オンボードは実現せず	N/A	100 m 0.01m/s (1σ)	30 m 0.05m/s (3Drms)	20m 1cm/s (3Drms)	Along: 6m Cross: 4m Radial: 30m 0.1 m/s (95%)
GEO実績 (オフライン)	○	○	×	○	×	×	○
(オンボード)	△	×	×	○	×	×	○

3. 国際調整状況：LunaNetとの連携・標準化・相互運用

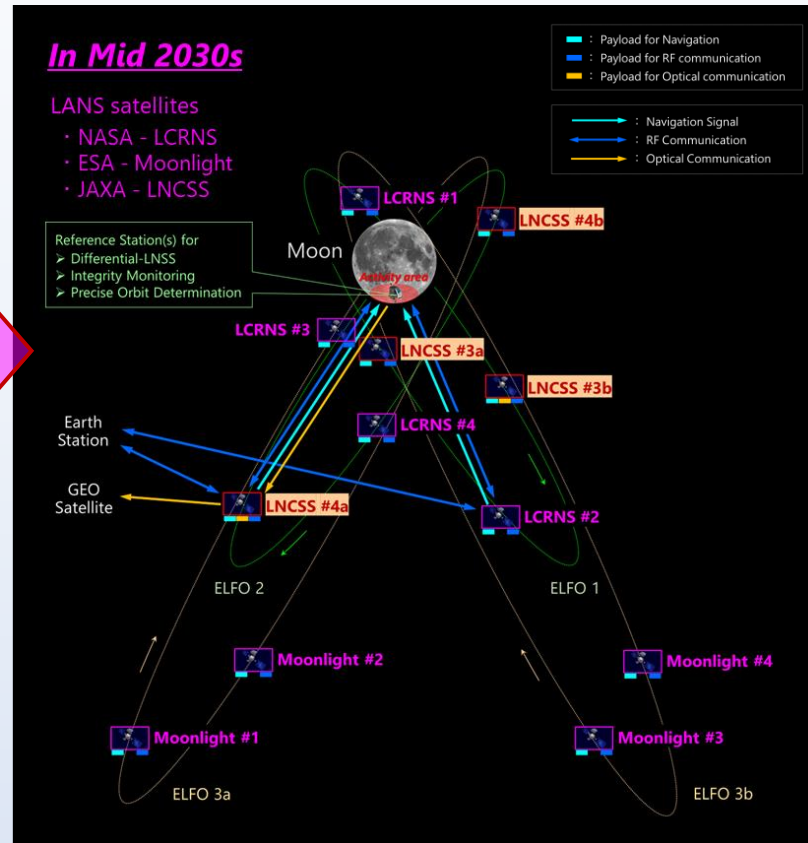
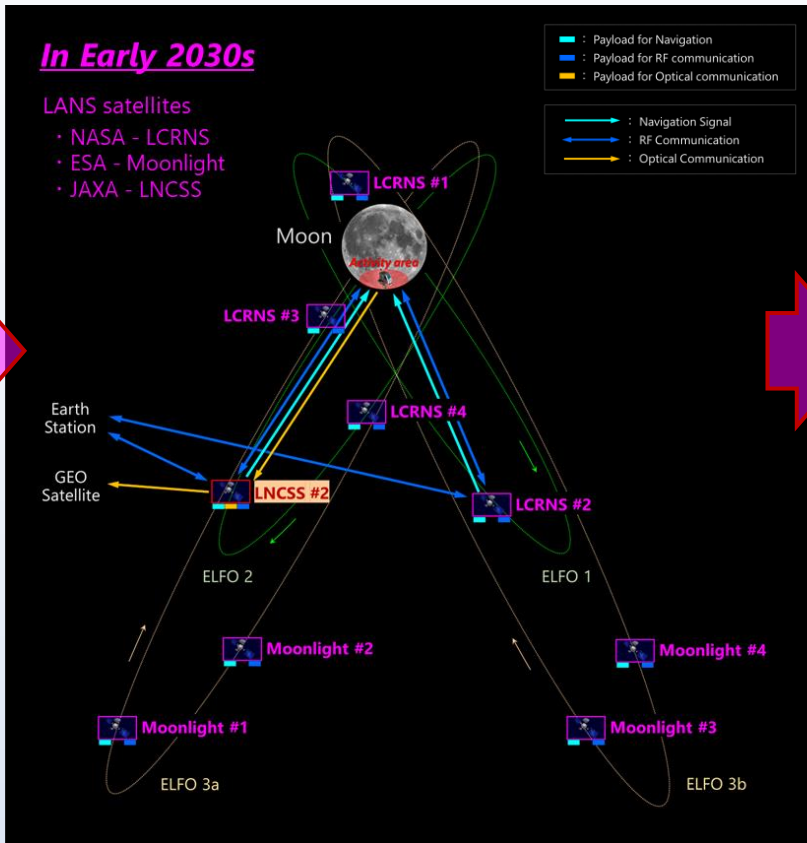
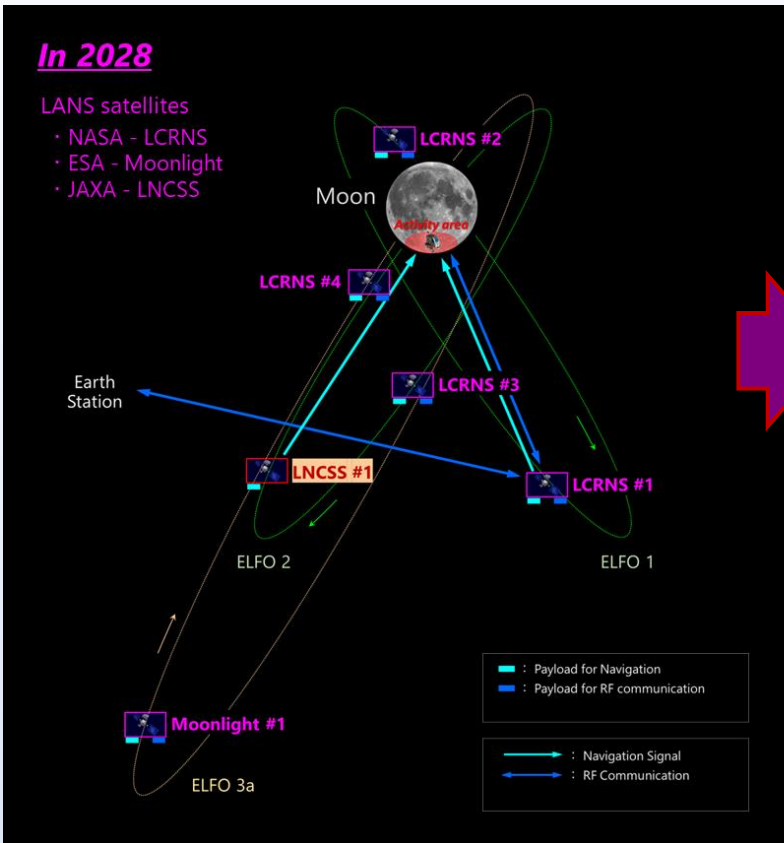
- LunaNetという月圏の測位・通信システムを構築する計画が欧米主導で進められており、日本(JAXA)もこのLunaNetに参画することで、JAXAが行う月探査ミッションの運用における、欧米の測位・通信システムとの相互運用性を初期段階から確保する。
- LunaNetの標準化文書であるLunaNet Interoperability Specification (LNIS)において、測位・通信の各サービスの仕様やフォーマット、要求等が記載されており、このLNISの調整にJAXAも正式に加わっている。
- LNIS Draft Version 5が去年の8月に公開され、現在Version 5の制定に向けた国際作業がNASA/ESA/JAXA間で進んでいる。本制定からNASA/ESA/JAXAのクレジットになる予定である。
- 特に月測位衛星システムについて、JAXAは2028年頃に欧米と共同で技術実証を実施する検討を進めており、2024年2月にはNASA、ESAとの3者会合を開始、国際調整を精力的に進めている。



3. 国際調整状況：月測位・通信アーキテクチャ開発シナリオ構想【案】



日本としては2028年頃に月測位実証衛星を月周回軌道に投入しLNSS技術を実証、その後2030年頃に月測位運用機を投入し、2030年半ばまでに欧米との協働による測位・通信衛星のコンステレーション構築を段階的に目指す。



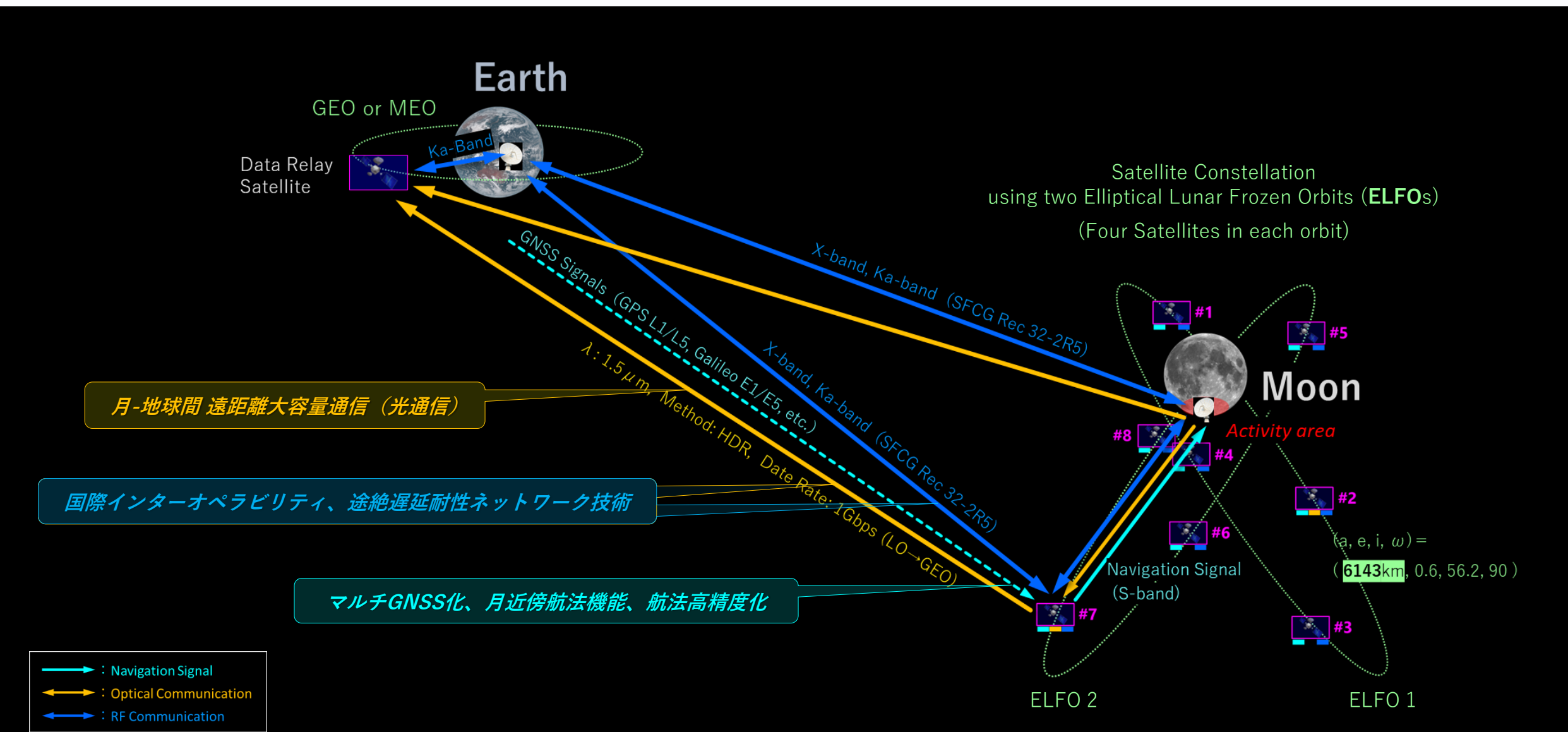
Navigation Service	• Horizontal positioning accuracy: 20m by Filter estimate
Communication Service	• Simultaneous visibility: 2 Satellites 100%

Navigation Service	• Horizontal positioning accuracy: 10m by Filter estimate
Communication Service	• Simultaneous visibility: 2 Satellites 100% • Provide for High-speed communication: More than 1Gbps return rate (After Technology Demonstration of Optical communication)

Navigation Service	• Horizontal positioning accuracy: a few meters by Relative positioning using Lunar reference station(s)
Communication Service	• Simultaneous visibility: 2 Satellites 100% • Provide for High-speed communication: More than 1Gbps return rate

- 将来の月探査活動を支えるための測位・通信基盤の必要性や各種政策文書における位置付け、宇宙開発利用加速化戦略プログラムにおける活動状況とともに、特に月測位技術に関するシステム構想、技術実証、キー技術等について報告した。
- また、最適と考える測位・通信の総合アーキテクチャ構築に向けて、国際協働を前提として、段階的に開発を進めていくシナリオ案を紹介した。具体的には、2028年頃を目標に欧米と共同で月測位技術に関する実証を実施、2030年代半ばを目途にELFO の2軌道面に計8機の衛星コンステレーションの構築を検討中。引き続きNASA、ESAとの協議を進める。
- 月測位技術実証を早期に実施することにより、国際宇宙探査（測位分野）における日本のプレゼンスを確立することが重要であると考えます。

【参考】月測位・通信の総合アーキテクチャ(ベースライン案)



月-地球間 遠距離大容量通信 (光通信)

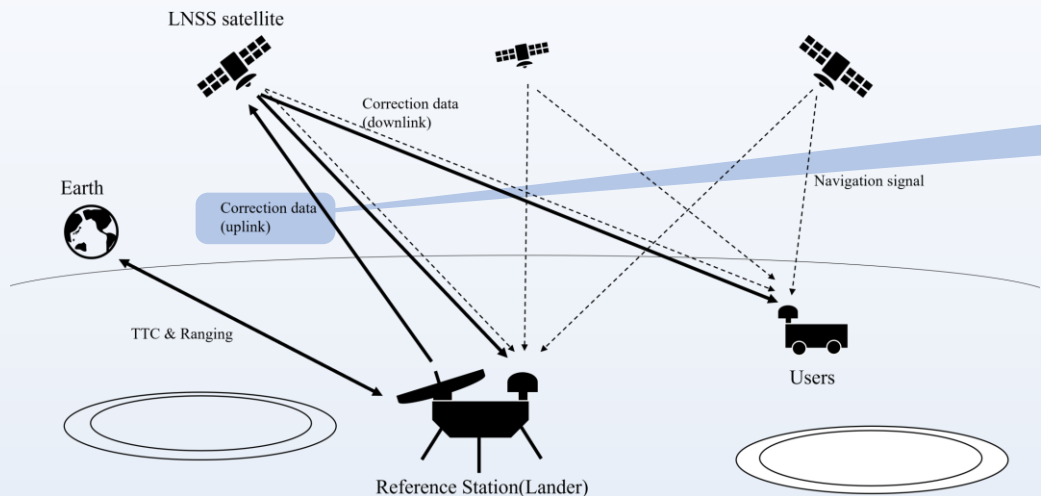
国際インターオペラビリティ、途絶遅延耐性ネットワーク技術

マルチGNSS化、月近傍航法機能、航法高精度化

JAXA's concept of Lunar Navigation and Communications Satellite System (LNCSS)

【参考】月面基準局・相対測位技術について

NASA/ESAと連携し、2030年代半ば(目標)に**月面基準局設置・相対測位技術の導入**により、**数m級の測位サービスの提供**を目指す。



Differential positioning concept ※)

LNSS衛星のSISRE*を低減し、月面ユーザはLNSS測位信号と疑似距離補正值を用いることで測位精度は各段に向上※)

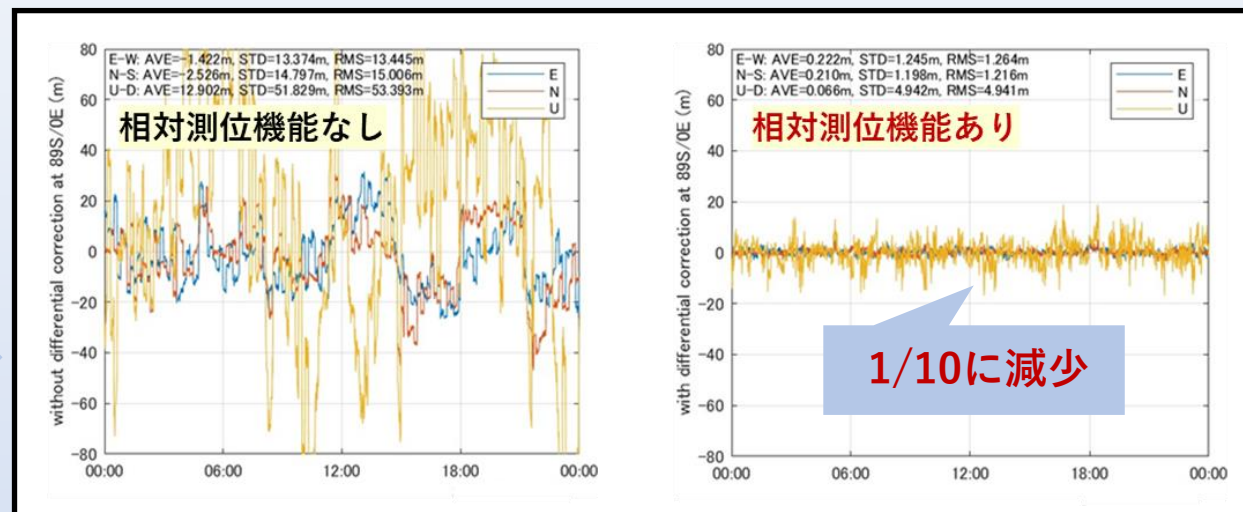
*SISRE: Signal-in-Space Ranging Error 空間信号測距誤差

◆ 月面基準局 (相対測位のための補正情報の発信, 周回衛星のインテグリティ運用)

受信した疑似距離測定値に基づき疑似距離補正值を生成し、その補正值を月周回のLNSS衛星に直接アップリンク

◆ LNSS衛星

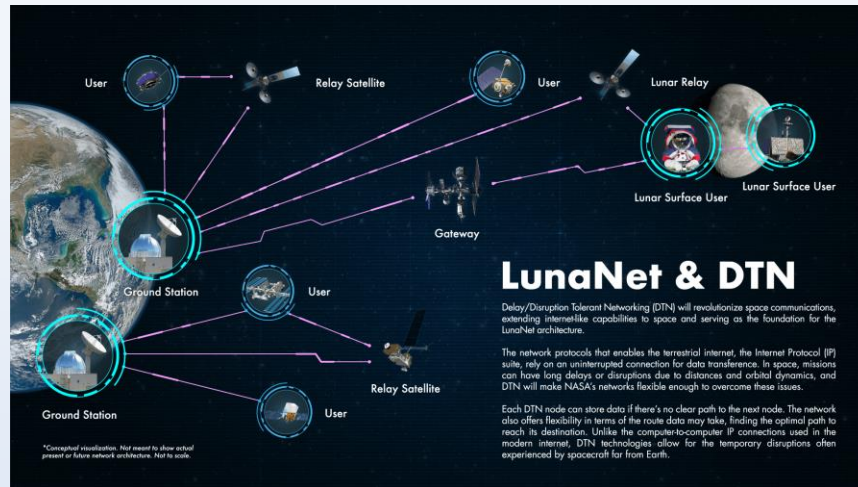
受信した疑似距離補正值を航法メッセージに含めて即座に月面ユーザに向け送信



水平方向・垂直方向の位置決め誤差(RMS値)※)

米国：NASA

- 2020年からLunaNet概念検討を実施。
- LCRNS(Lunar Communications Relay and Navigation Systems)衛星を2025年時点で1機以上, 2027年時点で2機以上, 2028/2029年時点で4機以上とする衛星コンステレーションを月周回軌道上に段階的に構築予定。



©NASA

米国：民間企業

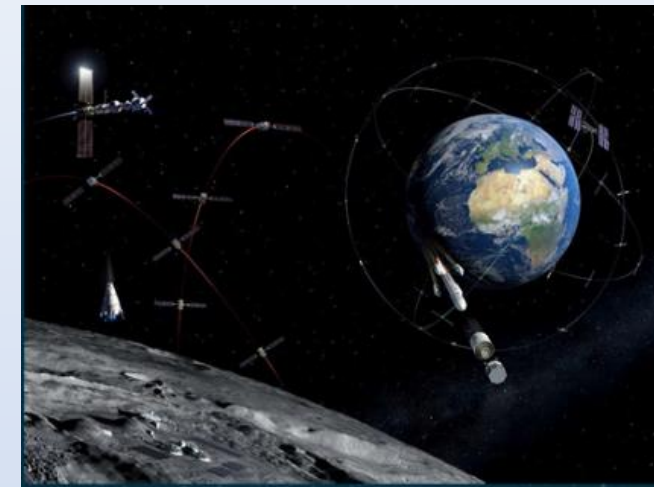
- Crescent Space Services LLC、CREANといった企業が月通信測位サービス構想を検討中。

<https://news.lockheedmartin.com/2023-03-28-Crescent-Space-to-Deliver-Critical-Services-to-a-Growing-Lunar-Economy>

<https://creaninc.com/crean-announces-lunar-communications-navigation-services-development/>

ESA

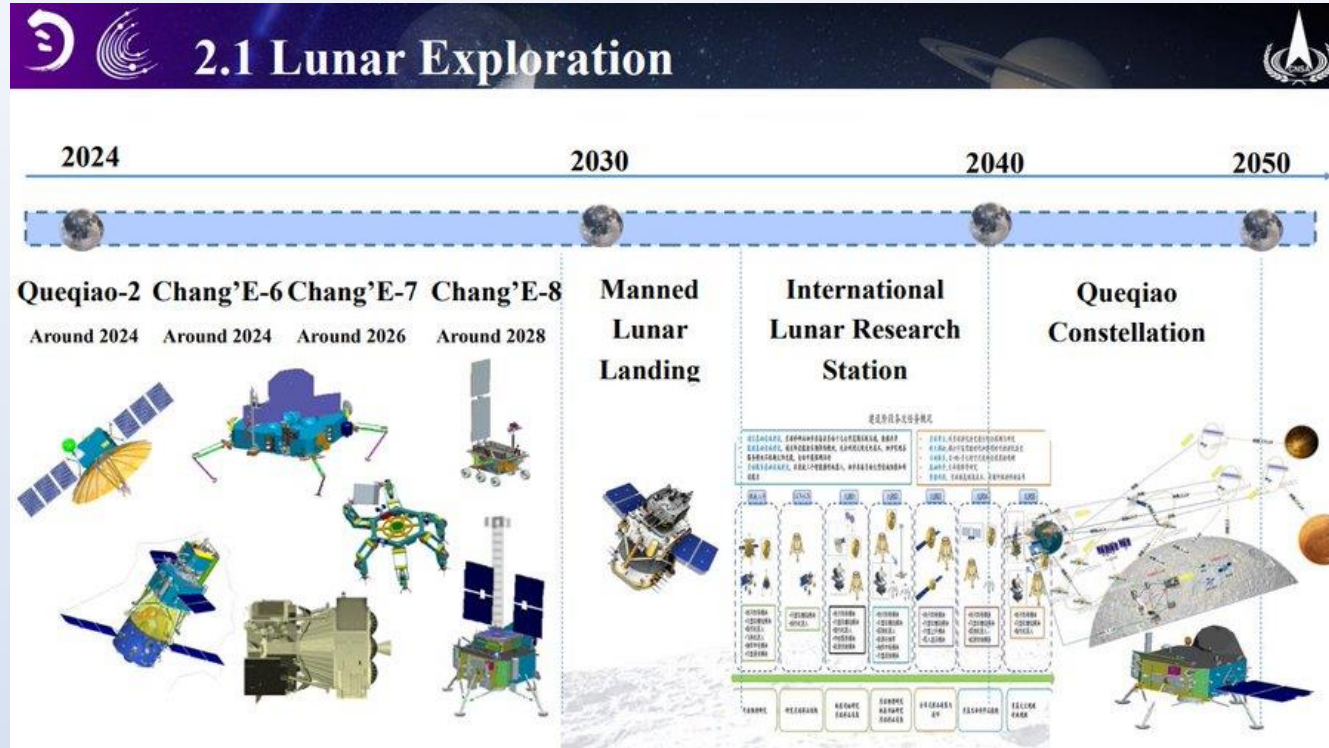
- 月探査のための通信・航法アーキテクチャ構想としてMoonlight構想を立ち上げ、2022年11月のESA閣僚級理事会で、初期計画のフェーズA移行承認。
- LCNS(Lunar Communications and Navigation Services)衛星を2027年時点で1機以上、2030年にかけて数機追加（2025年のESA閣僚級理事会で決定予定）し、計4機とする衛星コンステレーションを月周回軌道上に構築予定。
- Moonlightの最初のステップとして、通信(電波)中継衛星(Lunar Pathfinder)を月軌道に打上げ(2025)予定。GNSS (GPS, Galileo) 受信機の軌道実証も予定。



©ESA

中国

- Queqiao (鵲橋、じゃっきょう) という名の下で、月通信測位衛星システムの検討を進めている。2023年4月から今年の4月にかけてQueqiao constellation planのコンペティションを行っている。
- 2024年前半にQueqiao-2 (通信衛星) を月の軌道上 (ELFO) に投入する予定であり、China's lunar exploration programのfourth phase missions (Chang'e 6, Chang'e 7, Chang'e 8) をサポートする計画
- Tiandu (天都) -1, 2もQueqiao-2と同時に打ち上げられ、月測位の実験が行われる予定。



CNSA 資料 (2023年IAC)

報道情報 :

<https://www.chinadaily.com.cn/a/202402/22/WS65d6e298a31082fc043b88dd.html>

<https://spacenews.com/china-to-launch-lunar-navigation-and-communications-test-satellites/>