

令和 4 年度地球観測技術等調査研究委託事業
『将来宇宙探査にかかると技術調査』
中間成果報告書

一般財団法人衛星システム技術推進機構
Advanced Satellite Systems Technology Center
(ASTEC)

1. はじめに
2. 宇宙探査や軌道上作業の動向
 - 2.1. シスルナや宇宙探査における動向、およびユースケース
 - 2.2. 太陽光発電システムにおける動向、およびユースケース
3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査
4. シスルナや月/惑星上及びその周回軌道での測位システムの調査
 - 4.1. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向
 - 4.2. 次世代GNSSの動向
 - 4.3. 基準時刻システムの動向
 - 4.4. 月近傍における政策動向
5. 遠距離高速通信システムの調査

本書は、文科省殿よりASTECが受託した「将来宇宙探査にかかる技術調査」業務における『中間報告書』である。当該調査業務の目的を以下に示す。

「将来宇宙探査にかかる技術調査」の目的

宇宙開発は欧米を含め世界中で研究開発に取り組まれており、日本の宇宙開発においても**世界の最新の技術動向を踏まえ、今後の宇宙開発を検討**していく必要がある。本委託業務において、今後の宇宙探査等における研究開発計画検討のため、世界の宇宙探査の動向を調査することが目的である。

本書は、中間報告時点における調査結果に基づき考察した現時点の見解を示している。

1. はじめに
2. 宇宙探査や軌道上作業の動向
 - 2.1. シスルナや宇宙探査における動向、およびユースケース
 - 2.2. 太陽光発電システムにおける動向、およびユースケース
3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査
4. シスルナや月/惑星上及びその周回軌道での測位システムの調査
 - 4.1. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向
 - 4.2. 次世代GNSSの動向
 - 4.3. 基準時刻システムの動向
 - 4.4. 月近傍における政策動向
5. 遠距離高速通信システムの調査

(調査要求)

- (1) シスルナや宇宙探査における無人・ロボティクスによる自動作業、組み立て作業等、従来の衛星・宇宙利用を超えた宇宙空間における能動的作業に関する動向や先進的なユースケースがあれば、少なくとも5事例を調査の上でまとめること。
- (2) (1) の調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

本業務で調査する軌道上作業

- 衛星の製造と運用、技術開発、ビジネスモデルの創造と、ガイドライン、ベストプラクティスを推進する観点、並びに、現在の開発と実証の状況を考慮し、より有益な調査結果を導き出せると判断した表1の5つの軌道上作業とそのユースケースについて調査する。

IDA Global Trends in On Orbit Servicing, Assembly and Manufacturing 上の定義と分類

IDA	
On-Orbit Service	Remote Survey 遠隔による検査
軌道上サービス	Relocate 再配置
	Refuel 燃料補給
	Repair 修理
	Replace 部品交換
	Recharge 充電
Assembly	組み立て
Manufacturing	製造

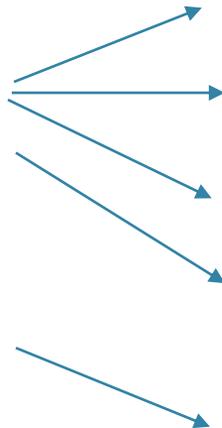


表1 本業務で調査する軌道上作業

	軌道上作業内容	選定理由
1	軌道遷移、再配置	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙機の増加により、早く正確な軌道投入や、再配置の重要性が増加する。 コスト削減の為にライドシェアが一般化し、利用の拡大が見込まれる。
2	デブリ除去	<ul style="list-style-type: none"> 軌道上実証がされているものとしてアストロスケール社のELSA-d衛星があるが、軌道上作業に必要な技術、標準の調査に実ミッションに基づく示唆を得ることが可能である。
3	寿命延長	<ul style="list-style-type: none"> 2021-2031 までに累積売上が\$14.3 Bill まで増えると言われる軌道上作業に於いて、増加の大きな要因とされ、今後の軌道上作業の動向を握るものである。(1)
4	燃料補給	<ul style="list-style-type: none"> Space Logistics社のMEV-1/MEV-2は実際に進行中の軌道上作業の一つであり、軌道上作業に必要な技術、標準の調査に関して実ミッションに基づく示唆を得ることが可能である。
5	軌道上組み立て	<ul style="list-style-type: none"> 組み立てに使用されるロボティクスは今後の軌道上作業の重要な要素であり、軌道上作業に必要な技術、標準の調査に有益な示唆を得ることが可能である。

2.1.1 本業務での調査対象

22-004-R-009

本業務で調査するユースケースとサマリ

軌道上作業	作業内容	サービスの価値	開発状況 打ち上げ	ユースケース (仕様書要求項目1) *黒太文字について詳細調査	利用・事業拡大に重要な要素となる標準化 (仕様要求項目2)	ユースケースに必要な要素となる技術 (仕様要求項目3)	技術実現に必要な 計算機要件 (仕様要求項目4)
軌道遷移、再配置	<ul style="list-style-type: none"> 衛星を目的の軌道まで導く 軌道を変更する 再突入又は基場軌道まで移動する 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料を節約し早く軌道へ投入 ミッションの変更により新たな利益を生み出す 衛星自身の燃料積載を減らし、ペイロード積載量を増やす 打ち上げのコストを下げる 	サービス提供中 <ul style="list-style-type: none"> 2019 2026 	<Last one mile service> <ul style="list-style-type: none"> Exolaunch - Reliant Momentum - Vigoride <運用開始後の軌道変更> <ul style="list-style-type: none"> Space Logistic Astroscale 	<ul style="list-style-type: none"> ロボティクス 	<ul style="list-style-type: none"> ランデブ・近傍運用技術 ロボティクス技術 	
デブリ除去	<ul style="list-style-type: none"> デブリを軌道上から除去する 軌道離脱できない衛星を除去する 	<ul style="list-style-type: none"> 衛星の運用に関するリスクとコストを低減する。 責任ある態度を示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 2021 2025 2025 2025 2025 	<ul style="list-style-type: none"> Astroscale-ELSA-d JAXA主導-CRD2 英国宇宙庁主導-COSMIC 欧州宇宙機関主導-Sunrise 欧州宇宙機関主導-ADRIOS 	<ul style="list-style-type: none"> ロボティクス 	<ul style="list-style-type: none"> ランデブ・近傍運用技術 ロボティクス技術 	
寿命延長	<ul style="list-style-type: none"> 推進薬が枯渇した衛星へドッキングし、軌道の維持、姿勢制御を実施する 	<ul style="list-style-type: none"> 衛星の管理計画に柔軟性を実現 予定以上の収入をもたらす。 燃料補給よりも比較的簡単なロボットアーム技術で実現 	<ul style="list-style-type: none"> 2019/20 2021 不明 不明 	<ul style="list-style-type: none"> Space Logistic-MEV-1、MEV-2 Astroscale-LEXI Airbus-O.CUBED Service Starfish 	<ul style="list-style-type: none"> ロボティクス 	<ul style="list-style-type: none"> ランデブ・近傍運用技術 ロボティクス技術 	
燃料補給	<ul style="list-style-type: none"> 推進剤を外部より供給する 	<ul style="list-style-type: none"> 給油後は衛星自身による運用を行うことができる 複雑なミッションの遂行実現 LEO以遠の人間の活動を実現 衛星管理プランに柔軟性や予定以上の収入をもたらす 	<ul style="list-style-type: none"> 2007 2023 2025 2025 	<ul style="list-style-type: none"> Darpa主導-OrbitatI Express NASA主導-OSAM-1 Orbit Fab- Gas Station In Space Space Logistic 	<ul style="list-style-type: none"> 給油/排油バルブ ロボティクス 	<ul style="list-style-type: none"> ランデブ・近傍運用技術 ロボティクス技術 	
軌道上組み立て	<ul style="list-style-type: none"> ロボットアームを用いて、組み立てや交換を行う 大きな構造物を軌道上で実現させる 	<ul style="list-style-type: none"> 環境要求を和らげデザインの幅を広げる 打上のコストとリスクを低減 大きなアセットの実現を可能にする 	<ul style="list-style-type: none"> 2016 2022 	<ul style="list-style-type: none"> NASA主導-CIRAS NASA主導-OSAM-1, OSAM-2 	<ul style="list-style-type: none"> ロボティクス 	<ul style="list-style-type: none"> ランデブ・近傍運用技術 ロボティクス技術 	

2.1.1 軌道上作業とそのユースケースの特徴 22-004-R-009

【現状】

- 「軌道遷移・再配置サービス」、「デブリ除去サービス」、「寿命延長サービス」、「燃料補給サービス」、「軌道上組み立て」の5つのサービスについて具体的なユースケースを調査した。
- 商業サービスとして実用化されているケースは、打ち上げ時の「軌道遷移サービス」(Exolaunch/Momentum)、「寿命延長サービス」(MEV-1/MEV-2)等と限定的であり、「デブリ除去サービス」、「燃料補給サービス」等が実用化に向けて取り組みが進んでいる。

【分析】

- これまでは、費用対効果の観点より、軌道上作業の対象が、ISS、ハッブル望遠鏡等に限定され、市場規模が小さかった。また、技術実証も少なく、ビジネスモデル(サービス提供)が確立していない為、軌道上サービスによる提供価値に理解が進んでいない事により、市場拡大が進んでいないと考えられる。

軌道上作業に関わる標準化の状況

- 標準化を「宇宙の持続利用に資するような、宇宙機の設計や運用の基準作り(ベストプラクティス等)」とし、現在確認できる標準化の動きを右図へ示す。
- 軌道上サービスに係る技術は技術勃興期であるが、次第に技術が成熟していきと考えられる。軌道上サービスに乗り出す企業は年々増加し、競争は既に激化、技術は乱立し始めている。
- 宇宙機関や政府、民間企業のプログラムと実ミッション活動が活発化してきていると同時に、各関係機関、民間企業、業界団体や標準機構による標準化の動きも出ている。

現在の問題点

- 衛星の多くは各メーカーの設計で進められており、軌道上で何らかのサービスを受けることを前提に設計されていない。
- 軌道上サービスの実施に必要なロボティクス関連技術、特にロボットアームのエンドエフェクター、ドッキングインターフェイス、機械的電気的なインターフェイス、並びに、燃料補給システムとインターフェイスについてはこれからの発展が期待される

宇宙機関	取り組む標準化の内容
NASA	<ul style="list-style-type: none"> Cooperative Service Valve 開発 ISSにおけるロボットアームのエンドエフェクタに関する標準化
JAXA	<ul style="list-style-type: none"> プログラム管理要求 (JMR) 技術要求、ガイドライン (JERG) 機械的、電気的インターフェイス (IF)
ESA	<ul style="list-style-type: none"> ESPRIT 燃料補給システム、バルブ
業界団体	取り組む標準化の内容
PERASPERA	<ul style="list-style-type: none"> Robotic System開発
SPACE SAFETY COALITION	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙での持続利用可能な行動指針 (Best Practices for the Sustainability of Space Operations) を34社で署名・合意し、公表
CONFERS	<ul style="list-style-type: none"> 商業的なRPO及びOOSの基本原則、推奨設計と運用プラクティス、OOSミッション・フェーズに関する文章の公開
標準機構	取り組む標準化の内容
ISO	<ul style="list-style-type: none"> 近接運用 (RPO) および軌道上サービス (OOS) - プログラムの原則と実践 ISO 24330 宇宙機とロケットのインターフェイス標準 ISO 14303 デブリ低減要件 ISO 24113
企業	取り組む標準化の内容
Northrop Grumman	<ul style="list-style-type: none"> 燃料補給、電源、機械的電気的IF
Orbit Fab	<ul style="list-style-type: none"> RAFTI 燃料補給システム、バルブ
Astroscale	<ul style="list-style-type: none"> ドッキングインターフェイス/捕獲機構
ALTIUS	<ul style="list-style-type: none"> 機械的電気的IF、データ移送
iBOSS	<ul style="list-style-type: none"> 機械的電気的IF、データ移送
Lockheed Martin	<ul style="list-style-type: none"> 機械的電気的IF、データ移送

利用拡大、事業拡大に必要な標準化動向

- 成果が出ている標準化は、安全性、運用の枠組み等に関するものが大半である。
- 標準化はサービスを受ける側、サービスを提供する側の両者に大きな利益をもたらすものであり、軌道上サービスの拡大には標準化は欠かせない要素である。
- 初期段階はあらゆるものが乱立する事が予測されるが、実例を蓄積する中で自然淘汰的に絞られる一方、意図的に標準化の策定を目指し、政府等が援助を実施しイニシアティブをとっていく事も必要とされる。
- 一方、標準化が技術競争を損なうことは避ける必要もあり、標準化すべき分野の見極めも必要である。

今後標準化が期待される分野

- 前項表1の通り、以下の分野の技術における標準化が重視されていると判断される。

ロボティクス

- ロボットアームのエンドエフェクタ
- ドッキングインターフェイス
- 捕獲機構

燃料補給

- 燃料の移送システム
- 給油/排油バルブ

標準化の利点

サービス提供側

- 自社の技術、製品の販売、浸透による利益の最大化
- 市場シェアの獲得、占有
- 先陣を切って標準化活動・サービスインする事でプレゼンスを示しリーダーシップを取れる
- 早期に潜在クライアントの掘り起こしが進み市場が拡大する

サービス受益側

- 早く、安く、質が良いサービスが購入できる
- 品質の担保、価格の比較が容易になる(市場の秩序化)
- 標準化対応によりライフサイクルコストの低減

2.1.2 利用拡大、事業拡大に必要な標準化の取り組み

22-004-R-009

【現状】

- 安全性や運用の枠組みに関する国際的な標準化事例(主にロボティクス、燃料補給)を調査した。
- 市場拡大に向けた標準化、ガイドライン・ベストプラクティスの形成や合意は十分とは言えないが、多種多様な枠組み(宇宙機関、業界団体、標準機構、企業単独など)で取り組みが進んでいる。
- 技術的な観点では、ISSのロボットアームのエンドエフェクター、ドッキングに関する標準化、燃料補給バルブに関する標準化の動きがあるが、標準を活用した事例としては、ISSのロボットアーム以外における実績は非常に限定的である。

【分析】

- 軌道上作業は安全保障用途と表裏一体であり、アンカーテナントによる技術発展が期待できる一方、軌道上サービス拡大への障壁となる可能性もある。この観点から、サービス市場の拡大には、技術的な安全性に関する標準に加えて、安全保障とは切り離れた宇宙の安定的な利用に関する仕組みが重要である。
- 商用システムに対する認証の仕組み(ホワイトリスト化)のように、標準化とガイドライン・ベストプラクティスをどのように運用するか、どのようにビジネスに結びつけるかはこれからの議論すべき点である。
- コスト面では、国際機関が作成したISSロボットアームの標準等は、安全性を重視しており、一般的な軌道上作業に供するには要求が高すぎる(高額となる)。衛星間を対象とした場合では、要求される安全性の緩和が可能であり、企業が参画したグループで標準を作成し維持管理する仕組みが重要となる。
- 産業界を見ると、早くに実証されたものが標準となる傾向もみられる。標準を取る為には実証を加速させる必要がある。

1. はじめに
2. 宇宙探査や軌道上作業の動向
 - 2.1. シスルナや宇宙探査における動向、およびユースケース
 - 2.2. 太陽光発電システムにおける動向、およびユースケース
3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査
4. シスルナや月/惑星上及びその周回軌道での測位システムの調査
 - 4.1. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向
 - 4.2. 次世代GNSSの動向
 - 4.3. 基準時刻システムの動向
 - 4.4. 月近傍における政策動向
5. 遠距離高速通信システムの調査

(調査要求)

- (1) 将来的な軌道上作業の対象として太陽光発電システムが考えられるが、世界における本システムの動向及びユースケースを調査し、まとめること。
また、各ユースケースにおける軌道や発電規模、総開発費予測、事業規模等を想定される観点でまとめ、長所・短所（リスク含む）等を考察すること。
- (2) (1) の調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること

*1) SSPS : Space Solar Power System

◆ 太陽光発電システムのユーザ、および用途

当初の検討では、地上への電力供給に主眼が置かれていたが、近年は宇宙空間の活動領域拡大(ARTEMIS計画等)もあり、**宇宙インフラへの供給や軍事目的(軍事基地や遠隔地)への供給に対するニーズも増加**しており、技術開発推進の要因となっている。

1. 地上における電力供給者

SSPSが地上電力網に接続されるとすると、昼夜や天候に左右されない再生可能エネルギーを電力網に供給することができることになる。**電力供給安定化に加え、カーボンニュートラルの取り組みの観点でメリット**がある。(地上局周辺に与える環境変化は課題あり)
化石燃料や他の再生可能エネルギーなど、比較的安価で定着しているさまざまなエネルギー源と競合することになり、人口密集地では、従来の電源は1キロワットあたり数ドルの価格で電力を供給できている。そのため、**価格で競争できるようになるためには数十年単位の開発が必要となる可能性**もある。

2. 遠隔地にある地上設備のユーザ

現状軍事基地の電力は発電機等で賄われており、液体燃料をトラックで輸送する際の輸送隊は頻繁に攻撃のターゲットになっている。SSPSが利用できると、**敵軍からの攻撃リスクがなくなり、電力単価以上のメリット**がある。
軍隊以外でも孤立した地域社会では、人口密集地に比してインフラコストを考慮すると、**他の利用用途と併用可能なSSPSは使い勝手が良い。(防災時の非常電源等の用途もあり)**
安定性が高いという特性は、大規模な産業施設、鉄道システム、および世界中で増加中の電力消費の多い海水淡水化プラントもユーザに含まれる可能性がある。

3. 宇宙インフラ管理者

宇宙活動が活発化するのに伴い、**宇宙ステーション、月面活動(氷の採掘、永久影領域等)に必要な電力需要が増加し**、大容量の電力が必要とされる可能性が高い。
宇宙空間のワイヤレス電力伝送は地上伝送に比して効率が良い(環境汚染の懸念も小さい)、かつ現状の宇宙システムにおける電力システムが高価である点を考慮すると、地上とは異なりSSPSも価格面で競合できる可能性がある。
上記を踏まえると、宇宙インフラとして有力な基幹システムの候補となる。

1990年代～2010年代

NASAをはじめ積極的な取り組み
(コンセプト検討、部分実証)が活発

- **SPS2000/SPS WG(日本)**
打上げを前提としない異例のWG
上記以外にもJAXA/USEFも検討
*マイクロ波伝送実験なども実施
- **フレッシュルックスタディ/SERT*¹(米)**
サンタワー,ISC*²(集光方式)など技術進展に伴うコンセプトが検討

2010年代～2018年頃

国レベルの新たな検討・実証
が少ない時期

- **マイクロ波無線電力伝送実験(日本)**
JAXA, MHIなど重要技術の実証に取り組む
- **SPS-ALPHA(米国)**
NASAのInnovative Advanced Concepts programで検討

2018年頃～

グリーンエネルギー・活動領域の拡大を
背景に国レベルの活動が活発化

- **AFRL*³/NRL*⁴中心に活動(米)**
「Arachne」による新たな軌道上技術実証を計画(2025年打上予定)
- **BEIS*⁵/UKSA*⁶中心に活動(英)**
技術開発を目的とする SBSP イノベーション・プログラムを計画
- **CAST*⁷/大学中心に活動(中)**
コンセプト検討に加え、SSP 委員会を設立し産学技術交流を進める

◆ 米・英・中の代表的なコンセプト/開発背景(本調査の対象としては後述Caltechも含める)

SPS-ALPHA(米)

- 元NASAのエンジニアが提案したコンセプトをNASAが採用
- 重力勾配安定構造体であり、反射鏡による集光方式
- AFRL/NRLも技術実証に取り組んでいることから軍民あわせた戦略と推察

CASSIOPeiA(英)

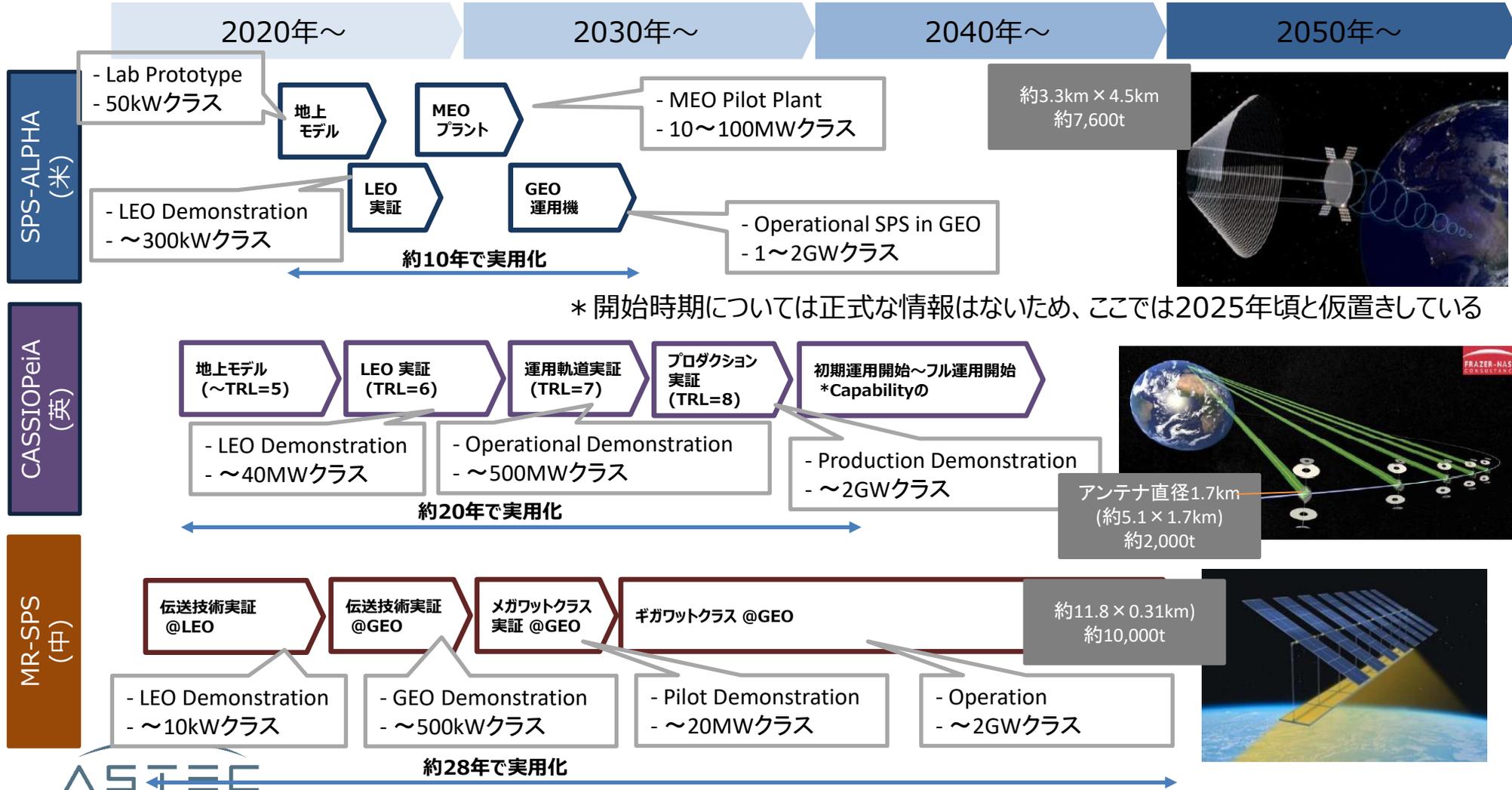
- 2017年にIECL*⁸社が中心となり検討
- 円錐形の曲率を持つ一次および二次による集光システムで太陽輻射圧を利用
- 2050年までにCO2ネットゼロ実現の選択肢として検討

MR-SPS(中)

- 2014年にCAST社が中心となり検討
- 太陽電池パネルを独立して回転させ集光システムを除去
- 軍民デュアルユース戦略であるが、2060年までのカーボンニュートラル達成に向け追い風あり

*1) SERT : SSP Exploratory Research and Technology, *2) ISC : Integrated Symmetrical Concentrator, *3) AFRL : Air Force Research Laboratory, *4) NRL : Naval Research Laboratory, *5) BEIS : Department for Business, Energy & Industrial Strategy, *6) UKSA : UK Space Agency, *7) CAST : China Association for Science and Technology, *8) IECL : International Electric Company

◆ 上述(SPS-ALPHA(米), CASSIOPeiA(英), MR-SPS(中))の開発ロードマップ(概要)を以下に示す。(システム詳細は次頁)



◆ 構造面の特徴

大量モジュール構成、大型反射鏡、大型トラス構造、膜展開型構造など軌道上作業(構築・修理など)の観点で、それぞれ特異な特徴を有している

SPS-ALPHA
(米)

- 分離したサンドイッチパネル内の「太陽光発電部」に太陽光を入射させる構造、**構造物を小さな単位のモジュール化**
- 電力コストは 6セント/kWh との見積あり

CASSIOPeiA
(英)

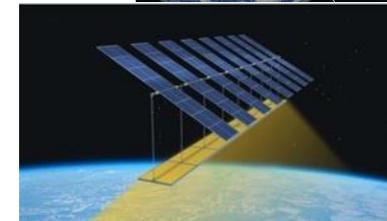
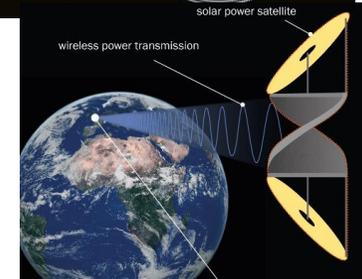
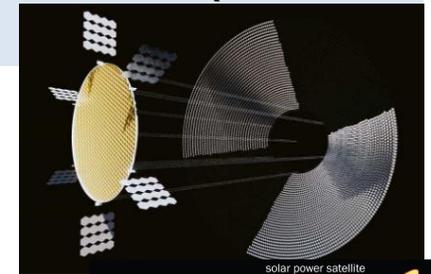
- **2つの巨大な楕円鏡と6万枚ものソーラーパネル(集光型発電部)**をらせん配列する構造、駆動部がないことが特徴
- 電力コストは 不明、他の再生エネルギーよりもハードルレートは良いとの試算あり

MR-SPS
(中)

- 大型の太陽電池パネルを**回転可能なジョイント/トラスで支える構造**、高い精度が求められる集光システムが不要
- 電力コストは 15セント/kWhとの見積あり

Caltech/SSPD
(米)

- **集光装置と送信アンテナを膜展開型**とすることで低価格化を目指す
- 電力コストは 不明、実証機(SSPD-1)を2021年12月に打上げ予定であったが遅延中



【ユースケース調査のエグゼクティブサマリ】

- 太陽光発電システムの動向、およびユースケースとして、SPS-ALPHA(米), CASSIOPEIA(英), MR-SPS(中)、CALTECH(米)を調査し、構造的特徴の抽出、および経済性に対する考察を行った。
- 2010年代は経済性への疑問もあり活動が比較的低調であったが、クリーンエネルギー問題、活動領域の拡大、基礎技術の進展(特に輸送コスト)に伴い、2010年後半から活動が活性化されている。
- 特にアルテミス計画をはじめとして月面活動が活発化していることは、安定したユーザーの確保につながりイニシャルコスト問題が解決、開発が加速する可能性がある。
- 一方で民間ユーザがあられていない点から、Value Propositionが成立する市場は限られていると推察される。
- 現状の主要なユースケース(コンセプト)では、実用化までは10年から30年程度要する計画であり、今後の社会情勢に左右される可能性が高い。ただし、地上実証、低軌道を用いた実証は数年以内に実施(CALTECHは2022年12月打上げ予定)され、2030年までには低軌道で数十～数百kW程度の発電システムが実証される計画である。

1. はじめに
2. 宇宙探査や軌道上作業の動向
 - 2.1. シスルナや宇宙探査における動向、およびユースケース
 - 2.2. 太陽光発電システムにおける動向、およびユースケース
3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査
4. シスルナや月/惑星上及びその周回軌道での測位システムの調査
 - 4.1. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向
 - 4.2. 次世代GNSSの動向
 - 4.3. 基準時刻システムの動向
 - 4.4. 月近傍における政策動向
5. 遠距離高速通信システムの調査

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査 22-004-R-009

(調査要求)

- (1) 宇宙探査や軌道上作業では、軌道上におけるロボティクスやランデブーディング等、様々な技術が必要である。それらの必要な技術を洗い出し、各技術における最新動向、技術成熟度、必要な計算機等を調査の上、まとめること。

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査_{22-004-R-009}

各ユースケースに必要な技術の整理

ここまでの調査結果から各アプリケーション分野のユースケースに共通に必要で重要な技術として、ランデブ・近傍運用技術(RPO技術)及びロボティクス技術が抽出される。

寿命延長

- 安全に接近するランデブ・近傍運用技術
- 確実なドッキングを実現するロボティクス技術
- クライアント衛星の要求精度に応じた姿勢制御技術

燃料補給

- 安全に近づき、ドッキングする技術
- 真空下で機能する燃料供給システム
- 非協力衛星に対しロボットアームを用いた複雑な作業を可能とするエンドエフェクターの開発を含めたロボティクス技術

軌道上組み立て

- クライアントに安全に近づき作業をするRPO技術
- ロボットアームを用いた複雑な作業を可能とするロボティクス技術と付随するエンドエフェクター

軌道遷移、再配置

- 多数の衛星を効率的に運ぶ為の推進系技術
- 安全にドッキングするランデブ・近傍運用技術
- ドッキングする為のロボティクス技術

デブリ除去

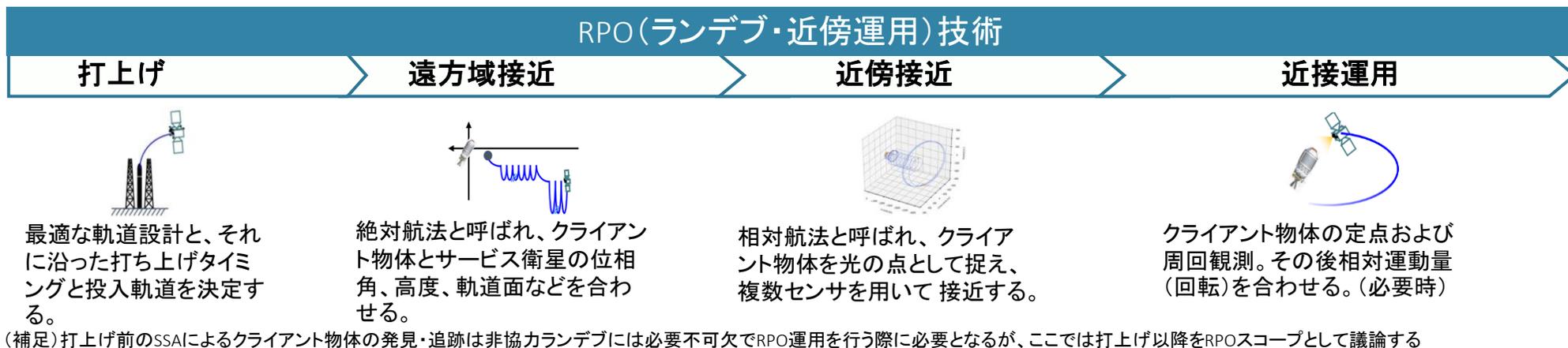
- クライアント衛星へ安全に近づくRPO技術
- ドッキングする機構、及び、把持するアームなどのロボティクス技術

以降で、ランデブ・近傍運用技術(RPO技術)及びロボティクス技術を対象に、技術動向、技術要素について整理する。

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査_{22-004-R-009}

RPO (Rendezvous and Proximity Operation)

ターゲット軌道を狙ったロケット打ち上げから極近傍までの運用を指し、軌道力学、地上管制技術、運用技術、安全技術、衛星システム技術を全て統合することで実現する



協力/非協力的対象(クライアント)へのRPO

クライアント衛星側と相互通信が確立されるなど協力的対象へのRPOの場合、精度面や安全面で確実性が高く、HTV等実績も比較的多い。一方、姿勢や位置をその衛星から把握できない/しない状態でランデブ・接近を行う非協力的対象へのRPOの場合は、SSAサービス等で対象を把握しアプローチする絶対航法やサービサー衛星(チェイサー)側のセンサに依存した相対航法を組み合わせた手法での対応が必要

技術的ポイント

RPOには、高いマヌーバリティと姿勢制御、航法センサによる接近技術とそれをシステムとして動作させるオンボード・地上での処理や運用技術が重要となる。次ページで、周回衛星と比べた場合の設計面での特徴的な要素を整理する。

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査 22-004-R-009

打上げ前～打上げ

- ・ クライアント軌道の予測
- ・ 適切な目標軌道の設定(サービス、クライアントの位相差等の考慮)
- ・ サービスの初期軌道投入(LS)
- ・ 初期チェックアウト運用 等

遠方域接近

絶対航法(下記要素含む)

- ・ 軌道決定結果を用いた航法誘導制御(位相、高度合わせ～航法センサ捕捉可能距離までサービス誘導)
- ・ サービス、クライアントの軌道決定
- ・ マニューバ計画立案・実行
- ・ 絶対航法から相対航法への接続 等

近傍接近

相対航法(下記要素含む)

- ・ 航法センサによるクライアント捕捉
- ・ クライアント補足後の航法誘導制御
- ・ 航法センサデータのオンボード処理
- ・ 中近距離接近軌道設計
- ・ サービス、クライアントの軌道決定
- ・ マニューバ計画立案・実行 等

近接運用

- ・ クライアントの運動推定・形状認識
- ・ 相対停止
- ・ 非協力目標に対する6自由度相対接近
- ・ クライアントに合わせた回転 等

技術要素

シーケンスごとの技術要素・動向、ユースケース、プロジェクト別コンポ・計算機等実装状況について調査を継続中

宇宙ロボティクス技術

概要・ポイント

複数種類の複雑な作業を遂行可能な宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術は、軌道上サービス活動の中核をなす要素技術であり、前出の通り全ての軌道上サービスに必須となる。

ロボティクスは我が国が培ってきた遠隔・自律制御技術による強みを発揮することが期待される分野であり、最近では、新たな軸としてアルテミス計画に伴う月面での探査・拠点建設活動や、軌道上サービスのさまざまなアプリケーションの試みの中で技術開発が加速している。

宇宙ロボティクスアプリケーション分野のうち、技術成熟度の高いものとしてADR、寿命延長について調査

ADR (Active Debris Removal)におけるロボティクス

宇宙デブリは、過去に打ち上げられた衛星やロケット上段が主であるため、非協力な対象であり、取っ手などの捕獲インターフェイスを持たず、多少の回転運動やすりこぎ運動が残留している可能性がある。

実装状況、要素技術、計算機について調査継続中

【エグゼグティブサマリ】

- 調査結果から、軌道上作業の各ユースケースに共通してランデブ・近傍運用技術（RPO技術）及びロボティックス技術が重要であることが確認された。
- RPO技術：ターゲットへのRPOには、サービス衛星の打上げから、遠方域接近及び近接接近を経た近接運用までの個々のフェーズごとに必要な技術があることを確認し、整理した。今後は整理されたフェーズごとの軌道上実績やユースケースごとの搭載計算機等の状況を調査し、技術トレンドを整理する。
- ロボティックス技術：我が国が培ってきた遠隔・自律制御技術による強みを発揮することが期待される分野であり、月面での探査・拠点建設活動や、軌道上サービスのさまざまなアプリケーション中で技術開発が加速している。今後、技術成熟度の高いデブリ除去（ADR）及び寿命延長を対象にユースケースごとの技術整理を行う。

1. はじめに
2. 宇宙探査や軌道上作業の動向
 - 2.1. シスルナや宇宙探査における動向、およびユースケース
 - 2.2. 太陽光発電システムにおける動向、およびユースケース
3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査
4. シスルナや月/惑星上及びその周回軌道での測位システムの調査
 - 4.1. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向
 - 4.2. 次世代GNSSの動向
 - 4.3. 基準時刻システムの動向
 - 4.4. 月近傍における政策動向
5. 遠距離高速通信システムの調査

(調査要求)

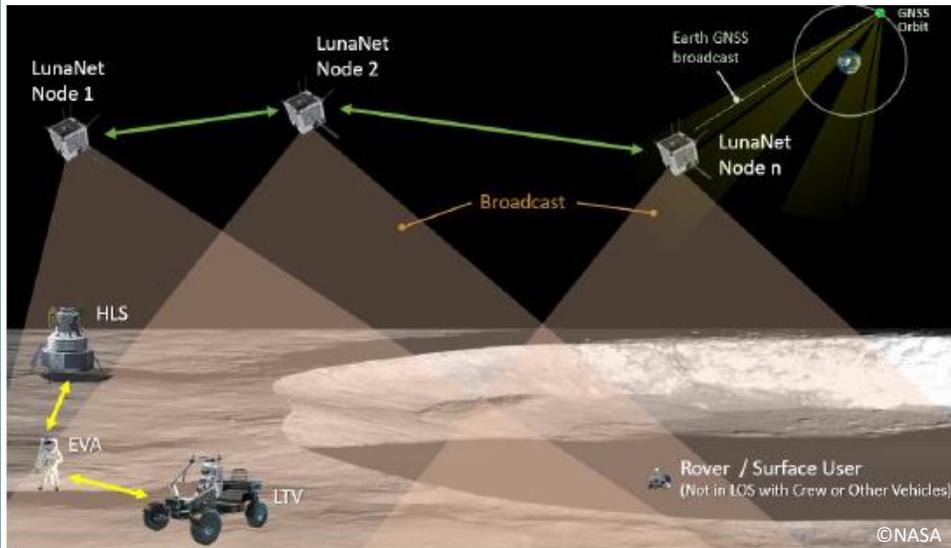
- (1) シスルナや月、惑星近傍は、地球から遠方にあるため、全球測位衛星システム(GNSS)の測位信号が届きにくく、GNSSとは異なる当該空間における新たな測位システムを構築する必要があることを踏まえ、これを実現するための方式や用途、構成等を調査し、今後必要となる技術をまとめること。
- (2) (1)の調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。また国際協力等の観点で必要なシステムや技術を調査すること。

4.1.1 月測位システムの概要

22-004-R-009

◆ 代表的な2ケース(LunaNet, Moonlight)の特徴(キーワード:商用プレイヤー、GNSS信号利用)

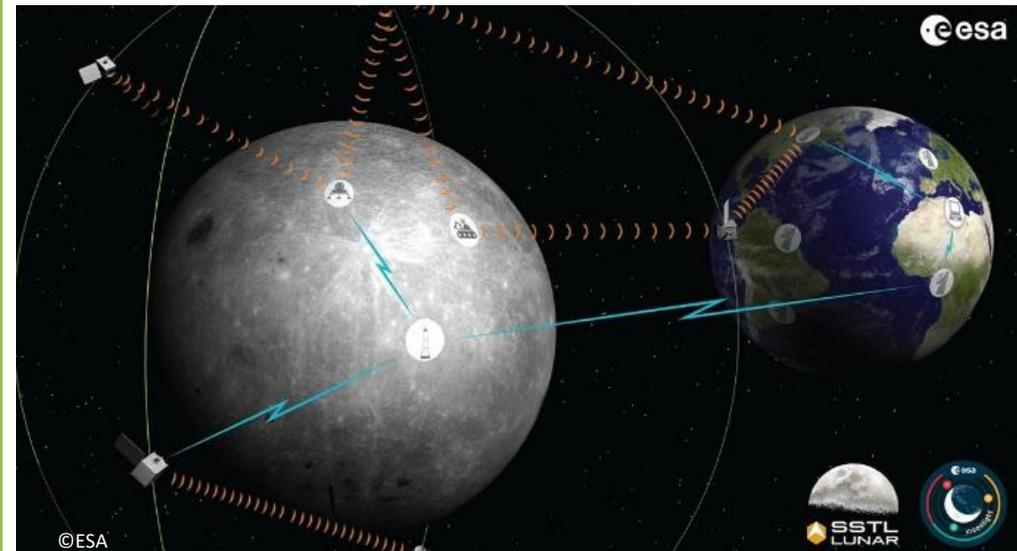
【LunaNet】



測位信号：微弱GNSS信号のリレー方式

- 多様な商用・政府プロバイダがサービス提供
*Network of Networkの思想
- オープン
相互運用可能な国際標準(Like Internet)
- スケーラブル：導入は最小限、順次拡張

【Moonlight】



- Telespazio中心のコンソーシアム
GNSSを月で使用するための調査を実施
- SSTL中心のコンソーシアム
CLMSS(商用月ミッション支援サービス)
2025年に実証機打上げ予定(Pathfinder)
⇒ Hostedペイロード:GNSS受信機搭載

*1)Commercial Lunar Mission Support Service

4.1.1 月測位システムの概要 ~LunaNet~

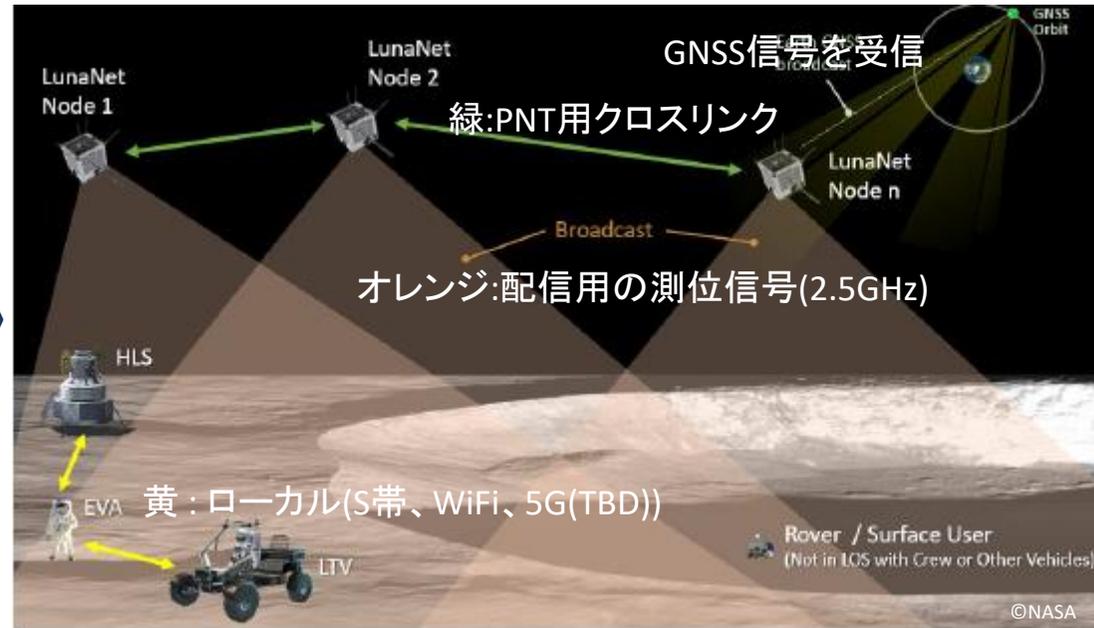
22-004-R-009

◆ 実現に向けたキー技術：GNSS信号アンテナ/受信機、RNSS受信機、LNSS規格(国際標準)

□ LunaNetのシステム構成

RNSS (Radio Navigation Satellite Service)

- 地球からのGNSS信号を受信(リレー衛星)
*基準ノードをレンジングで決定する方式との情報もあり
- クロスリンクで衛星間の測距・キャリブレーション
- リレー衛星が航法信号をブロードキャスト
⇒ ユーザはGPSのように受信機を用いて位置/速度を決定
- 初期フェーズは衛星機数が少なく捕捉時間大
⇒段階的に拡張・光学式PNTを追加



- **LuGRE(NASA/ISA)：微弱GNSS信号(GPS, Galileo)の特性評価を目指す(2023年)**
*CLPS(商業月ペイロードサービス)を利用して月面へペイロードを輸送

【関連動向】

- **商業サービス調達**アプローチを準備中(NASAとESA間ではLunar Pathfinderの使用契約を締結)
- 海軍天文台、国家地理情報局と共同で**PNT標準(時刻、月基準フレーム、測地・重力モデル)を定義**

4.1.2. エグゼクティブサマリ

～シスルナ周辺における新たな測位システムの動向～ 22-004-R-009

【エグゼクティブサマリ】

- シスルナや月における測位システムの動向として、Lunanet、Moonlightを中心に調査、考察を行った。
- Lunanet(NASA)においては、**GNSSの微弱信号を利用した中継型**の測位システムを構想しており、**商用プレイヤーの積極的育成・活用(Moonlightも共通)**が特徴。(Moonlight(ESA)はLunar Pathfinderのホストペイロードとして、同様の仕組みの実証を予定)
- 上記を踏まえ、海外における大きなトレンドの中における主なキー要素(GNSSと異なる点に着目)を以下に示す。

<GNSSとの接続>

1. GNSSアンテナの高感度化・マルチシグナル対応
2. GNSSとLNSS^{*1}の時刻同期システム(補正手法検討含む)

<RNSSの利用拡大>

3. 商用プレイヤーの育成、産業化の機会創出
4. RNSSの航法メッセージ規格の定義
5. 測位ペイロードの小型化(輸送コストの低減含む)

1. はじめに
2. 宇宙探査や軌道上作業の動向
 - 2.1. シスルナや宇宙探査における動向、およびユースケース
 - 2.2. 太陽光発電システムにおける動向、およびユースケース
3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査
4. シスルナや月/惑星上及びその周回軌道での測位システムの調査
 - 4.1. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向
 - 4.2. 次世代GNSSの動向
 - 4.3. 基準時刻システムの動向
 - 4.4. 月近傍における政策動向
5. 遠距離高速通信システムの調査

(調査要求)

- (1) 次世代GNSSの国内外(国外は欧州、米国、インドは含めること)の技術動向について調査すること。併せて、次世代GNSSを実現するためのペイロード技術について調査しまとめること。
- (2) 現状のペイロード進化のみならず、新しい測位・航法・タイミングサービスについて調査し、まとめること。
- (3) (1)及び(2)の調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。
- (4) 測位衛星等が利用するクロック安定度の高い基準時計の技術を調査し、その各々に対して基準時計システムの仕様を調査し、まとめること。
- (5) (4)の調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。
- (6) 月近傍における各国の政策動向について調査し、まとめること。また欧米における月測位の連携について調査し、まとめること。

4.2. 次世代GNSSの動向

22-004-R-009

- 欧米はフレキシブルペイロード/フルデジタルペイロードによる抗たん性の向上
- リージョナルサービスは機数増加(サービス領域拡大、持続性向上)がトレンド

◆ 次世代GNSSの動向

★: 今後のキー要素

	2020	2025	2030
GPS(米)	GPS II (MEO24機)	+GPS III	+GPS III F ★フレキシブルペイロード
GLONASS(露)	GLONASS (MEO24機)	+High Orbit GLONASS ★IGSO6機追加(都市部増強)	
BeiDou(中)	Step I Experiment	Step II Regional	Step III / GLOBAL(MEO24機+GEO3機+IGSO3機) ★通信との統合
Galileo(欧)	Galileo 1st (MEO 24機)	Galileo 2nd ★フレキシブルペイロード	
NavIC(印)	7機体制 (GEO3機+IGSO4機)	11機体制 ★サービス広域化	
QZSS(日)	実証衛星	4機体制 (GEO1機+QZO3機)	7機体制(GEO2機+IGSO1機+QZS4機) ★持続性向上

4.2. 次世代GNSSの動向

低軌道衛星利用のメリットは認識されつつあるが、既存GNSSへの依存度は要検討

◆低軌道衛星の利用

◆XONA Space Systems/PULSAR

特徴：HEXAGONと提携してオートノミーなどの商用ユーザをターゲット(将来的には官需も見込む)

GNSSへの依存：

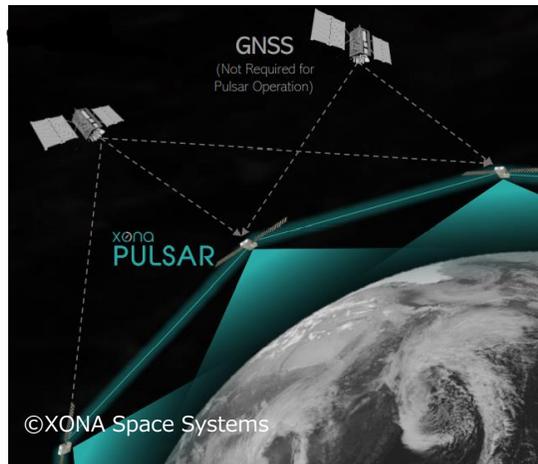
軌道上実証から徐々にGNSS依存度を低下
(最終的にはGNSSから独立させGPS代替も担う)

*軌道決定・時刻システムがキー

◆類似

- Geospace(中)
- STL*1(米)
- APS*2(米)

*1 : Satellite Time and Location
*2 : Assured Positioning System



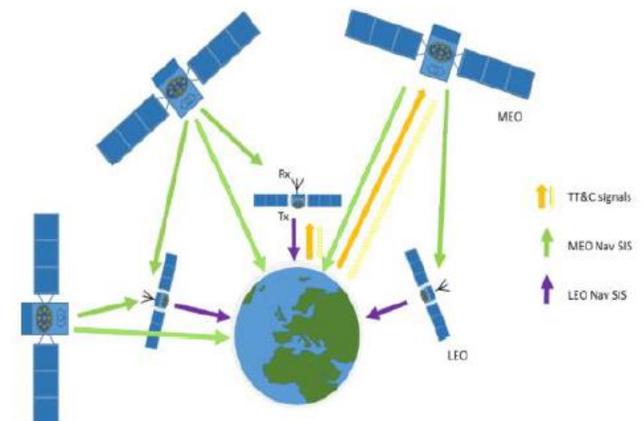
◆Future Nav Program(ESA)

特徴：Galileoの可用性(都市部、屋内など)やレジリエンス向上に寄与

GNSSへの依存：

LEO衛星の時刻情報、位置決定に利用

*中国も同様の取り組みあり
(Centispace-1)



欧州LEO PNTコンセプト

測位衛星等が利用するクロック安定度の高い基準時計の技術を調査した。

◆原子時計の分類

原子時計	ルビジウム	水素メーザ	セシウム
原理	ルビジウム原子の超微細構造間の遷移を利用した原子時計。小型で安価。	水素原子の超微細構造間の遷移を用いた水素メーザ発振を利用した原子時計。	絶対零度近くに冷やしたセシウム原子が吸収するマイクロ波の振動数を利用。
精度	1秒で 10^{-11}	1秒で 10^{-13}	1秒で 10^{-15}

◆【日本独自】光格子時計 : 誤差は1秒で 10^{-18}

原理：特定波長のレーザ光の干渉により光格子を形成し、ストロンチウム原子を光格子に1個ずつ100万個入れて、その振動を計測し時刻を測る

【エグゼクティブサマリ】

- 次世代GNSSの国内外(日本、欧州、米国、インド)の動向、および次世代ペイロード、および既存のGNSSだけでなく、低軌道衛星などを活用した新たな測位システムについても調査した。
- ウクライナにおけるGPS妨害・干渉の事例もあり、「脅威対策」の重要性が年々増加している。この流れもあり、次世代GNSSは抗たん性向上が1つのトレンドとなっている。さらに、GNSSが構造的に有する弱点(信号強度の弱さなど)を補うために、**低軌道衛星の利用などマルチレイヤー化の取り組み**が見受けられる。低軌道衛星は、自動運転・オートノミーなど産業ニーズに応える動向もある。
- 上記を踏まえ、海外含めた大きなトレンドの中における主なキー要素を以下に示す。

<GNSSの抗たん性向上>

1. フレキシブルペイロード/フルデジタルペイロード
2. ジャミング・スプーフィング検知システム
3. 低軌道衛星による補完

<新たなPNTサービス提供>

3. 精密軌道決定・時刻システム(多数機前提)

1. はじめに
2. 宇宙探査や軌道上作業の動向
 - 2.1. シスルナや宇宙探査における動向、およびユースケース
 - 2.2. 太陽光発電システムにおける動向、およびユースケース
3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査
4. シスルナや月/惑星上及びその周回軌道での測位システムの調査
 - 4.1. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向
 - 4.2. 次世代GNSSの動向
 - 4.3. 基準時刻システムの動向
 - 4.4. 月近傍における政策動向
5. 遠距離高速通信システムの調査

(調査要求)

- (1) シスルナや月・惑星等の遠距離にかかる通信を行う際の、電波・光等の方式を調査し、それぞれの長所や短所を調査し、必要な要素技術、システム構成、各通信方式を調査すること。
- (2) 本調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること

5. 遠距離高速通信システムの調査

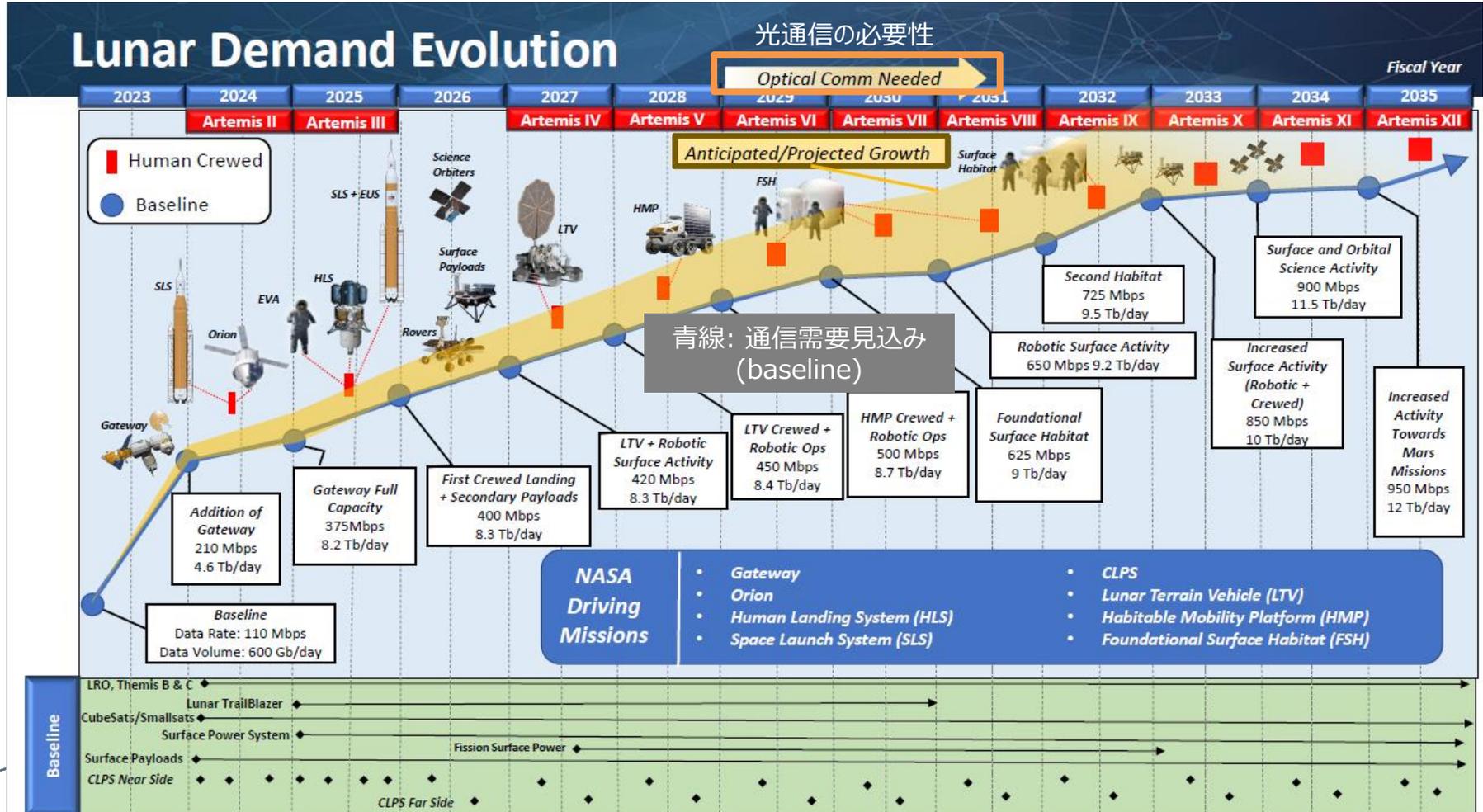
~LunaNet~

22-004-R-009

通信需要は右肩上がり、2030年ごろから光通信も必要となる予測(初期フェーズはRF)

*スケーラブル：導入は最小限、必要に応じて順次拡張

◆通信需要の予測



5. 遠距離高速通信システムの調査 ~LunaNet~

22-004-R-009

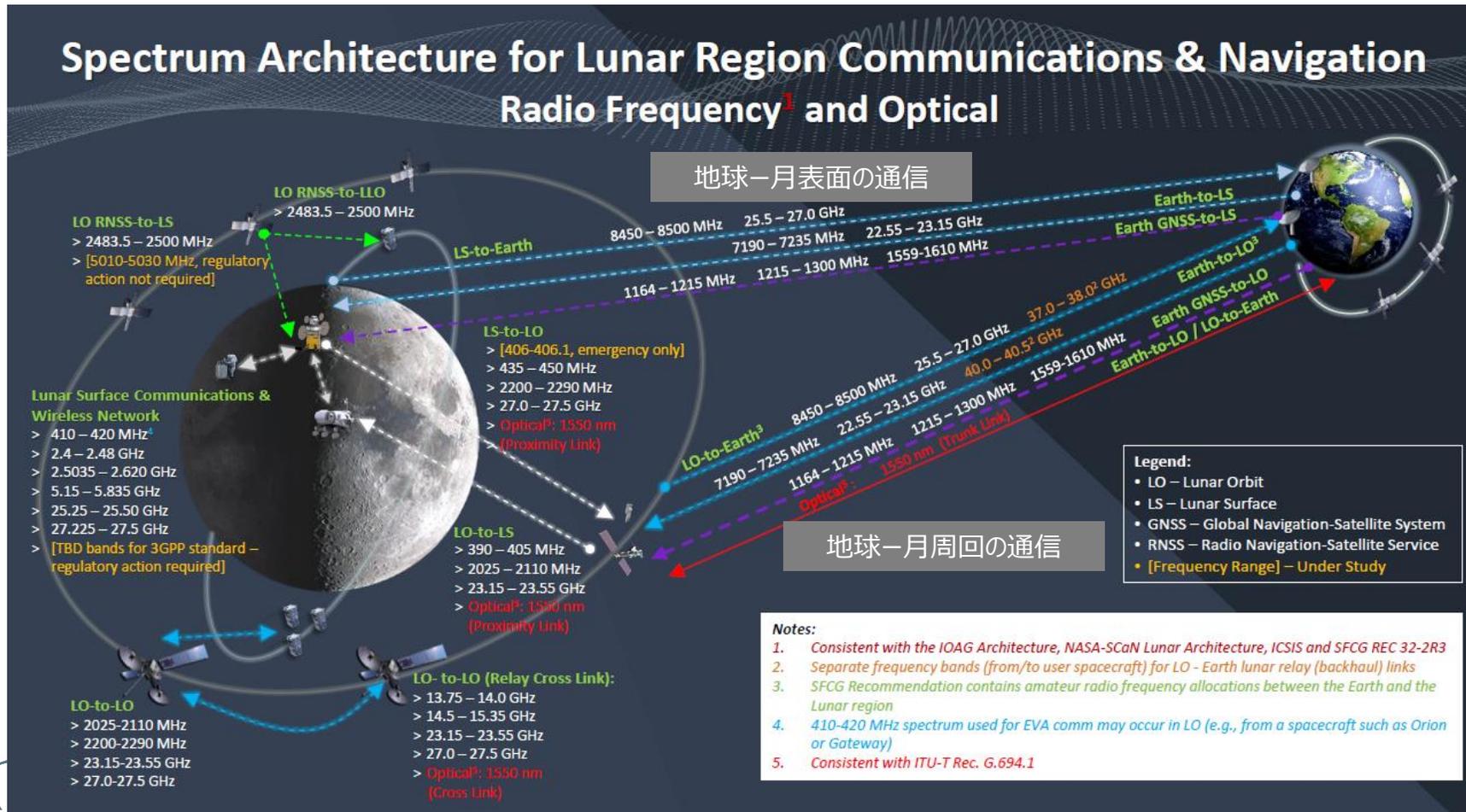
◆ 月圏以外への適用も意識

- 通信サービス：IP*¹もしくは、DTN BP *²をベースとする構想(Network of Networkの思想が基本)
- 1.55μm帯の光通信：地球-月、および月域内で共通(RFも併用)

*1 : Internet Protocol

*2 : Delay/Disruption Tolerant Networking Band Protocol

◆ 周波数アーキテクチャ



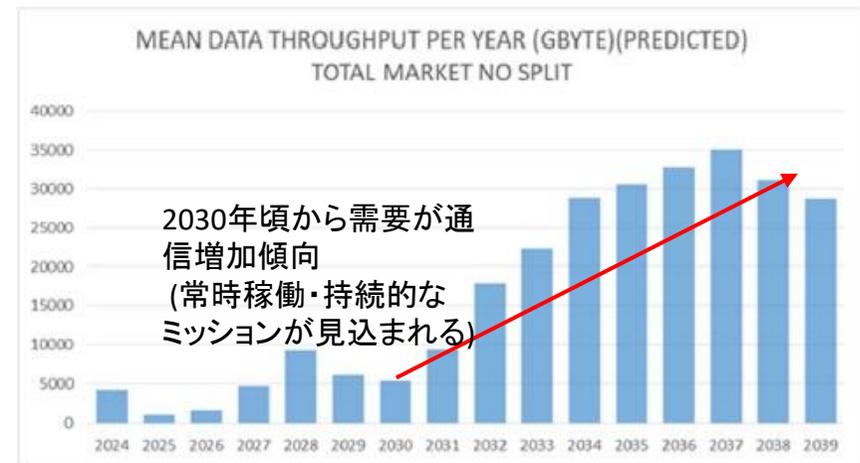
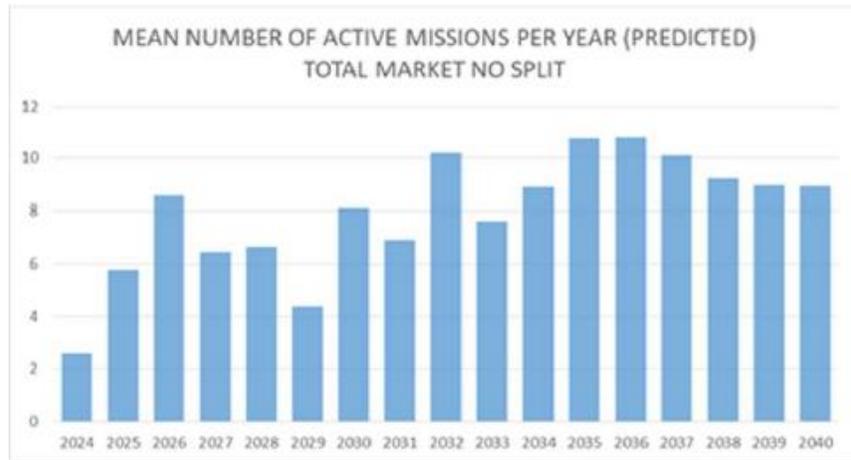
5. 遠距離高速通信システムの調査 ~MoonLight~

22-004-R-009

◆ CLMSS(Commercial Lunar Mission Support Service)/Lunar Pathfinder 市場コンセプトを示し、試行・実証する場を提供することで需要を喚起することが目的の1つ

➤ 月における通信需要予測

2030年代にかけては輸送船の影響で山谷があるが2030年代以降安定したミッション(常時・持続的稼働)により需要は安定的に増加(LunaNetと同様の予測)



➤ ESAがアンカーテナントとなり、SSTL社が月通信サービスを構築・提供(2021.9)

- 産業界の初期投資リスクを取り除き、商用市場拡大の機会を創出(NASAがLunar Pathfinderを利用することを許可)
- Lunar Pathfinderでは、自律型(固定ウィンドウ)/スケジュール型/緊急サービスを提供
(構成) S/UHF(0.5~2Mbps)で月周辺と通信を行い、Xバンド通信(5Mbps以下)で地球ヘデータを伝送する
タイムラグはあるがユーザ利便性が高い[Store&Forward]方式で中継、中継衛星内にデータは一度保存される

【エグゼクティブサマリ】

- シスルナや月における遠距離高速通信システムの動向として、LunaNet、Moonlightを中心に調査、考察を行った。
- NASA/ESAともに需要予測に基づいた予見性のある、段階的な開発を計画している。地球-月通信(月圏通信も同様)は、RF、光通信を併用したシステム構想である。
- この中でLunar Pathfinder(SSTL/ESA)は、**LunaNetアーキテクチャとは異なる周波数を用いた実証システムであるが、ESA/NASA共同利用**により、商用プレイヤーの参入促進をサポートしている。



(財)衛星システム技術推進機構