

**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技術調査」
委託業務成果報告書
(公開版)**

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

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
6. 定常調査業務
 - 6.1. 定常調査・動向調査
 - 6.2. 適宜調査・事実確認

本書は、文科省殿よりASTECが受託した令和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技術調査」業務における『委託業務成果報告書』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。

「世界の最新技術動向」を踏まえ、日本の強み弱み分析を通じて今後の宇宙開発の研究開発計画に資する検討を行った。

1.はじめに

～ [宇宙探査や軌道上作業の動向調査]に関する調査内容～

22-004-R-011

～ [宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査]に関する調査内容～

調査要求

1. 宇宙探査や軌道上作業の動向調査

- (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。
- (3) 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。
- (4) (3) の調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること

調査要求

2. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

- (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ドッキング等、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。
- (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。

1.はじめに
～[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]
に関する調査内容～

22-004-R-011

調査要求

3. 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

- (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。

1.はじめに
～[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]
に関する調査内容～

22-004-R-011

調査要求

3. 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(つづき)

- | |
|---|
| (3) 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。 |
| (4) 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。 |
| (5) (3)及び(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) 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。 |
| (7) (6)の調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。 |
| (8) 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。 |

1.はじめに

～[遠距離高速通信システムの調査]に関する調査内容～

22-004-R-011

調査要求

4. 遠距離高速通信システムの調査

- (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

◆ 中間報告会(11/2)

| # | ご指摘・ご意見・コメント | ステータス |
|---|---|---|
| 1 | 絶対航法から相対航法への変更に注視して技術の比較をすると有用ではないか。 | (済) 左記観点に着目し報告書に記載 |
| 2 | シスルナ経済圏が形成されると高頻度・同時複数の月軌道投入があると想定される。このような状況における測位システム(レンジングでは対応できないようなケース)に関する技術開発計画があると良いのではないか。 | (済) 直接的な事例は見受けられなかったが、関連する技術事例の概要を追記 |
| 3 | 低軌道衛星利用でのメリットについても明記いただけるとありがたい。 | (済) 低軌道衛星利用のメリットを明記した |

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
6. 定常調査業務
 - 6.1. 定常調査・動向調査
 - 6.2. 適宜調査・事実確認

(調査要求)

- 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。
- 上記調査結果に基づき、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

軌道上作業の定義と分類

- 「軌道上作業」について、その範囲、分類、定義について国際的に確立又は共有されているものは存在しない。
- 参考になるものとしては、米国家宇宙会議による「国家ISAM戦略」における定義（ISAMとは、軌道上、天体及び両者の間で用いられる一連の能力とされている）がある。また、シンクタンク、軌道上サービスの業界団体も、その範囲、分類及び定義を試みており、これらも参照できる。
- 本調査では、軌道上作業分野の技術実証等の活動の中で存在感を示す米国家宇宙会議における定義や範囲をベースとしつつ、調査の範囲・内容を検討した。

NSTC In-SPACE SERVICING, ASSEMBLY, AND MANUFACTURING 上の定義と分類⁽¹⁾

| NSTC In-Space Servicing, Assembly and Manufacturing | |
|--|---|
| In-Space Servicing, Assembly and Manufacturing 軌道上サービス Assembly 組立 Manufacturing 製造 | 分類/定義 |
| Life Extension 寿命延長 | Visually Acquire Rendezvous and/or Proximity operations Docking Berthing Relocation Refueling Upgrading Responding Repair or Alternation 修理または改造 |
| Assembly 組立 | the construction of space systems in space using pre-manufactured components |
| Manufacturing 製造 | the transformation of raw or recycled materials into components, products, or infrastructure in space |

ESPI In-Orbit Service Policy and Business perspective 上の定義と分類⁽²⁾

| ESPI In-Orbit Service Policy and Business Perspective | |
|--|---|
| In Orbit Servicing 軌道上サービス | 分類/定義 |
| Maintenance メンテナンス | Repair Reconfiguration Refueling Recharging Upgrade |
| Tugging and Towing 牽引 | Station Keeping Orbit Correction Relocation De-Orbiting Recycling |
| Inspection 検査 | In Orbit Inspection |
| Assembly 組立 | |
| Manufacturing 製造 | |

*各分類の詳細の定義は出典基を確認ください。

IDA Global Trends in On Orbit Servicing, Assembly and Manufacturing 上の定義と分類⁽³⁾

| IDA Global Trends in On Orbit Servicing, Assembly and Manufacturing | |
|--|--|
| On-Orbit Service | 軌道上作業 定義 |
| Remote Survey 遠隔による検査 | close or ultra-close inspection of a spacecraft or satellite |
| Relocate 再配置(デブリ除去) | moving the spacecraft, which includes orbit maintenance, modification, and transportation |
| Refuel 燃料補給 | adding propellant, which includes transfer of fluids from one spacecraft to another |
| Repair 修理 | fixing spacecraft, which includes activities such as untagging deployable systems or realigning optics |
| Replace 部品交換 | change out parts of a spacecraft, possibly as an upgrade |
| Recharge 充電 | delivering electric power to a spacecraft, remotely or through a physical connection |
| Assembly 組み立て | the on-orbit aggregation of components to constitute a spacecraft or spacecraft subsystem |
| Manufacturing 製造 | on-orbit transformation of raw materials into usable spacecraft components |

CONFERS Lexicon 上の定義と分類 (一部抜粋)⁽⁴⁾

| CONFERS CONFERS Lexicon | |
|----------------------------|---|
| On-Orbit Servicing (OOS) | Activities by a servicer spacecraft or servicing agent on a client space object which require rendezvous and/or proximity operations. |
| On-Orbit Assembly | On-orbit activities to physically attach objects to each other. |
| Relocation | Changing the orbit of the Client Space Object by a Servicing Vehicle. |
| Docked Life Extensio | On-orbit services enabling increased duration of client operations as a Combined Stack. |

(1) NATIONAL SCIENCE & TECHNOLOGY COUNCIL April 2022, IN-SPACE SERVICING, ASSEMBLY, AND MANUFACTURING NATIONAL STRATEGY, pp.6
<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/04/04-2022-ISAM-National-Strategy-Final.pdf>
 (2) European Space Policy Institute. (2020). In-Orbit Services - Policy and Business Perspectives pp.3

(3) Benjamin A. Corbin, Amana Abdurrezak, Luke P. Newell, Gordon M. Roesler, Bhavya Lal (2020) Global Trends in On Orbit Servicing, Assembly and Manufacturing (OSAM), SCIENCE & TECHNOLOGY POLICY INSTITUTE pp. iv, pp.4 | <https://www.ida.org/-/media/feature/publications/g/g/global-trends-in-on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-osam/d-13161.astx>
 (4) CONFERS Lexicon April 2022
<https://www.satelliteconfers.org/wp-content/uploads/2022/04/CONFERS-Lexicon-Paper-Apr-2022.pdf>

2.1.1 本業務での調査対象

本業務の対象として調査する軌道上作業

- 本調査においては、前述の米国政府による定義及び業界団体の定義・分類等を踏まえ、技術要素の開発状況（実現性）並びにユースケース及び需要（将来性）等を踏まえ、表1の5つの軌道上作業の分類に基づいて、先進的なユースケースを調査する。

表1 本業務の調査対象とした軌道上作業の分類

| 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">迅速、かつ、正確な目的軌道への投入ニーズや、Orbital Transfer Vehicle 等でコスト削減の為にライドシェアが一般化することにより、利用の拡大が見込まれる。既存アセットの有効利用の為に、軌道を変更する再配置のニーズが見込まれる。 |
| 2 デブリ除去 | <ul style="list-style-type: none">軌道上のデブリ問題が深刻度を増し宇宙持続利用へのリスクが高まる中、日本、欧州においてデブリ除去技術の実証が進んでいる他、民間企業の参入も進んでいる。商業的な市場の創設など課題は残るものの、国際的な規範や規制が変わることで将来の需要も期待できる。アストロスケール社がデブリ除去実証衛星ELSA-dの実証、JAXAによる商業デブリ除去実証（CRD2）など、日本が世界に先駆けた実証を行っている分野。運用・実証の経験、現在進行中及び将来計画中のミッションを念頭に、将来日本が市場において優位な立場を獲得するために、特に注力して開発することが必要な技術、そのために必要な標準の対象などについても検討する必要がある。 |
| 3 寿命延長 | <ul style="list-style-type: none">2021年から2031年までに累積売上が\$14.3 Billion までの拡大が予想されるなど、軌道上作業においても、特に、商業的なニーズ・売上拡大が見込まれる作業⁽¹⁾であり、将来の需要が見込まれる。Space Logistics社のMEV-1/MEV-2は、すでに実証を成功して顧客を獲得しているミッションであり、同ミッションの調査・分析により、技術や標準化についての示唆を得ることが可能。 |
| 4 燃料補給 | <ul style="list-style-type: none">予定外のマナーバでの燃料消費、ミッション延長の為にニーズが見込まれる。民生・商用・防衛アクターからの需要も期待されるなど、技術が確立されると将来のニーズ拡大も期待できる作業。また、将来のニーズ拡大のためには、インターフェースの標準化が鍵となる作業でもある。民間企業を含む各国において開発と実証が進められているが、日本では、J-SPARKを活用しJAXAとアストロスケール社において、燃料補給サービスに関するコンセプト共創活動が開始されている。 |
| 5 軌道上組立 | <ul style="list-style-type: none">巨大アセット（太陽光パネル、アンテナ等）の実現、軌道上のリサイクルへの応用に向けて組立のための技術の実証が進められているが、組立のためのロボティクスは、将来の多様な軌道上作業に展開できるキー技術。米国におけるOSAM-1、OSAM-2等の実証、欧州（EU）での実証なども進む。 |

(1) GlobeNews Wire NSR's In-Orbit Services Report Projects \$14.3 Billion in Revenues as Non-Geo Constellations Grow Demand
<https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/02/15/2384849/0/en/NSR-s-In-Orbit-Services-Report-Projects-14-3-Billion-in-Revenues-as-Non-Geo-Constellations-Grow-Demand.html>



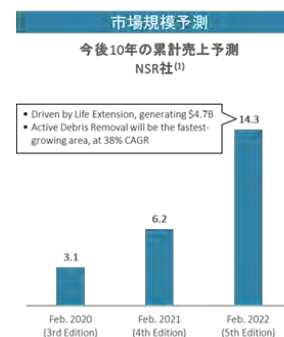
軌道上作業の開発状況

- 衛星は一度打ち上げられた後に軌道上で何らかのサービスを受けることは、有人国際宇宙ステーションを除き想定されてこなかった。しかし、Space Logistics社のMEV1及びMEV2に代表される静止軌道上での寿命延長サービスが開始されるなど、宇宙機関、民間企業問わず、多くの軌道上サービスの技術開発、事業展開がされるまでになった。
- 軌道上サービスのビジネスは、衛星にドッキングして姿勢や軌道位置保持を代替して延命するだけでなく、ドッキング後に衛星の点検、修理や機器の交換等のロボティクスを利用したサービスへと発展すると想定される。

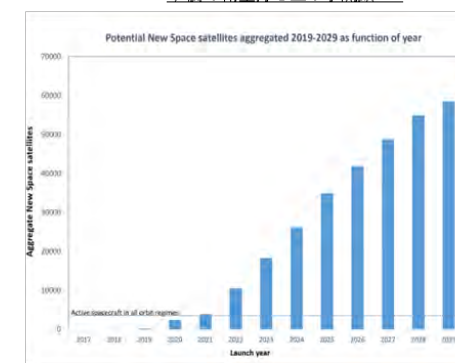
市場規模予測 今後10年で14.3billionドルの累計収益額

- Northern Sky Research（NSR社）のIn-Orbit Service :Satellite Servicing, ADR and SSA 5th Edition(LoSM5)によると、今後十年の累計収益の予測額は、2020年、2021年当時の予測額より大幅に上昇し、14.3Bドルの累計売り上げを予測。上昇理由はGEO、LEOに於いてそれぞれの要因が存在。⁽²⁾
- しかし、現状の技術実証状況を踏まえると、収益が大きな上昇を迎えるには時間を要する可能性もある。⁽²⁾

| 売上の上昇要因 | |
|--|---|
| 静止軌道(GEO) | 低軌道(LEO) |
| <ul style="list-style-type: none"> MEV-1/MEV-2の成功に端を発し、寿命延長サービスの開発と広がりが見込まれる（累計売上\$4.7Bに到達する予測） | <ul style="list-style-type: none"> 小型コンステレーションの発展 <ul style="list-style-type: none"> 打ち上げ衛星の増加による軌道の混雑により、軌道の利用の確保の為にデブリ除去(ADR)が必要となる（2022年から2031年までの平均上昇年率は38%） |



今後の衛星打ち上げ予測数⁽³⁾



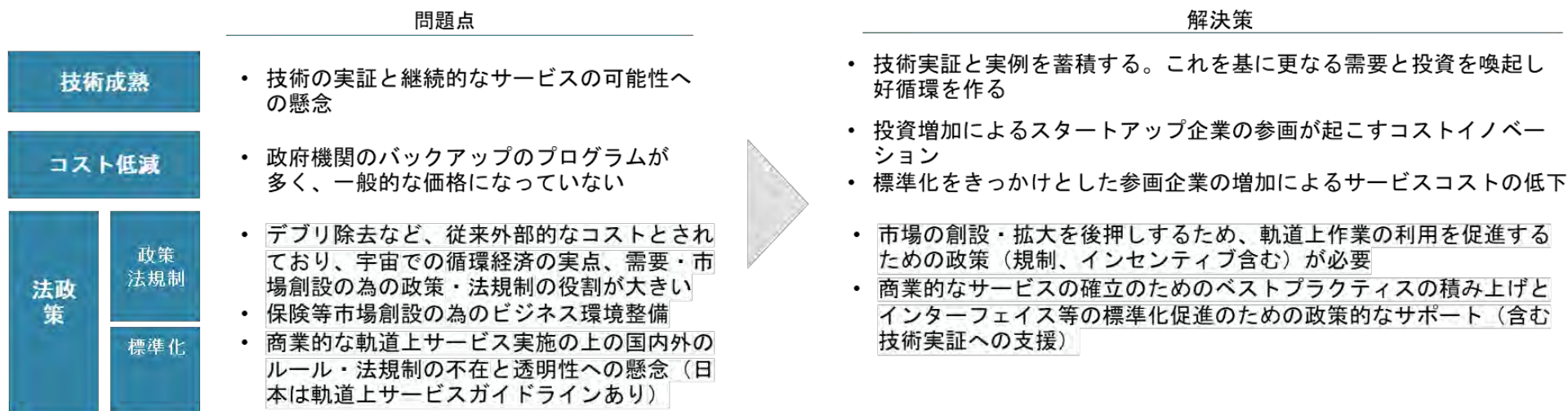
⁽¹⁾ Northern Sky Research In-Orbit Service :Satellite Servicing, ADR and SSA 5th Edition
⁽²⁾ GlobeNews Wire NSR's In-Orbit Services Report Projects \$14.3 Billion in Revenues as Non-Geo Constellations Grow Demand
<https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/02/15/2384849/0/en/NSR-s-In-Orbit-Services-Report-Projects-14-3-Billion-in-Revenues-as-Non-Geo-Constellations-Grow-Demand.html>
⁽³⁾ The Space Safety Coalition in the context of international space cooperation
<https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2020/tech-20E.pdf>

今後の動向

- レガシーと呼ばれる既存プレーヤーからスタートアップ企業の参入が更に増加
- 低軌道から静止軌道におけるサービスだけではなく、ルナゲートウェイ計画等、人類の月以遠の利用に向けて軌道上の作業は必須のものとなり、更なる拡大が予想される

軌道上作業の更なる拡大の為に

- 軌道上作業を実現する為の技術の複雑さ、リスク、標準や規範に関する国際的な合意がまだ足りない点を懸念する声も存在⁽¹⁾
- 拡大を妨げる要因と、拡大に向けた方策を大きく3点に集約



上記動向を踏まえ、序段にて選定した各軌道上作業の状況を整理し、先進的なユースケースを調査する。

(1) GlobeNews Wire NSR's In-Orbit Services Report Projects \$14.3 Billion in Revenues as Non-Geo Constellations Grow Demand
<https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/02/15/2384849/0/en/NSR-s-In-Orbit-Services-Report-Projects-14-3-Billion-in-Revenues-as-Non-Geo-Constellations-Grow-Demand.html>

2.1.3 シスルナや宇宙探査における動向、およびユースケースサマリ

22-004-R-011

本業務で調査したユースケースとサマリ

本業務で調査した軌道上作業とそれぞれのユースケース、拡大に必要な標準化、ユースケースに必要な技術のまとめ

| 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 *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 | ユースケースに必要な技術 |
|----------|--|---|--|---|--|---|
| 軌道遷移、再配置 | <ul style="list-style-type: none"> 軌道を変更する 再突入又は墓場軌道まで移動する 衛星を目的の軌道まで導く | <ul style="list-style-type: none"> ミッションの変更により新たな利益を生み出す 燃料を節約し早く軌道へ投入 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 | <運用開始後の軌道変更> <ul style="list-style-type: none"> Space Logistics Astroscale <Last one mile service> Exolaunch - Reliant Momentus - Vigoride | <ul style="list-style-type: none"> ロボティクス | <ul style="list-style-type: none"> 多数の衛星を効率的に運ぶ為の推進系技術 |
| デブリ除去 | <ul style="list-style-type: none"> デブリを軌道上から除去する 自力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"> ドッキング機構及び把持するアームなどのロボティクス技術 |
| 寿命延長 | <ul style="list-style-type: none"> 推進剤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"> 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 | <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"> 1997 2007 2023 2025 2025 | <ul style="list-style-type: none"> JAXA-ETS-VII Darpa主導-Orbital 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"> 真空下で機能する燃料供給システム 非協力衛星に対し複雑な作業を可能とするエンドエフェクターを含むロボティクス技術 |
| 軌道上組立 | <ul style="list-style-type: none"> ロボットアームを用いて、組立や交換を行う 大きな構造物の軌道上での実現、衛星部品の再利用を実現する | <ul style="list-style-type: none"> 環境要求を和らげデザインの幅を広げる 打上的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"> 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 |

※本調査では技術開発と技術標準を中心に調査し、法整備、ルール作り等の政策的なアプローチに関する調査は除いている。



【エグゼグティブサマリ】

【現状】

- ビジネスモデルの観点において、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、サービス調達による受益そのものに懐疑的な顧客も存在する。

上記を踏まえた「強み・弱み」分析

- 軌道遷移サービス(OTVを使用)については、技術成熟度が実用レベルに達している事、さらに、打ち上げコスト削減の為にライドシェアの浸透により、着実に実証が進んでいる。(供給と需要が一致)
- 「デブリ除去サービス」、「燃料補給サービス」、および「軌道上組み立て」については、先進的なRPO技術とロボティクス技術の実証がまだ不足しており、今後の発展のキー要素となっている。

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。
- 標準化を、軌道上サービスの実施に係る標準と技術標準に分けるが、具体例については技術標準を中心に調査を進める。
- 軌道上サービスに係る技術は勃興期であるが、次第に技術が成熟していくと考えられる。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、各宇宙機関、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。⁽¹⁾
- 軌道上サービスの実施に必要なロボットアームの機構や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、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。

表2 確認されている標準化の動き

| 宇宙機関 | 取り組み内容 |
|------------------------|---|
| 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 | 取り組み内容 |
| PERASPERA | <ul style="list-style-type: none"> 軌道上作業における標準化の推進、Robotic Systemの開発 |
| 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 | 取り組み内容 |
| 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: ISO14303 デブリ低減要件: ISO24113 |
| 企業 | 取り組み内容 |
| 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 |

標準化の今後

- 現在のところ、成果が見える標準化は、軌道上サービス実施面に係る標準に関するものが大半である。
- 技術の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技術の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。

| 技術の標準化の利点 | |
|--|--|
| サービス提供側 | サービス受益側 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 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 | <ul style="list-style-type: none"> • 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 |

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、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

事項以降で具体的な技術的標準化が確認できるロボティクスと燃料補給について調査する

ロボティクスにおける標準化

- ISSのロボットアーム
 - NASDA(現JAXA)によるKIKUミッションにおいて、2つの宇宙機の接近・結合を自動及び遠隔操縦により行うためのランデブ・ドッキング技術実験と、地上からの遠隔操作により無人で軌道上作業を行うための宇宙用ロボット技術実験を行って以来、ロボティクスによる軌道上作業が進められてきた。⁽¹⁾
 - それ以後、ISSにて使用されるロボットアームの開発が進み、それらのエンドエフェクターにおける標準化がされている
- 軌道上サービスの標準化
 - 軌道上で使用されるロボットアームをはじめ各ロボティクスに於ける技術開発は進んでいる。しかし軌道上での実証例がまだ少ない為、ISSで使用されるロボットアーム以外における標準化は進んでいない。

ISSで使用されているロボットアームのエンドエフェクターにおける標準化の例⁽²⁾



Fig. 4. Existing standard interfaces: Top left: EE on SRMS (Courtesy of NASA), Top right: LEE on SSRMS (Courtesy of NASA), Bottom left: JEM EE (Courtesy of JAXA), Bottom right: OTCM (Courtesy of NASA).

標準化を拡大する為に

- ISSにおける現存の標準は有人の標準インターフェイス対応に仕様が設定されており、重さなど軌道上サービスには対応していない為、そのままの適用は難しい。
- 既存プログラムは政府機関の大きなバックアップがあり、そこで開発された高額な標準仕様を一般的な商業ベースに適用させるのは難しい。
 - OSAM-1 (NASA) SPIDERロボットアーム \$142M規模
 - RGSS(DARPA) 数百億の規模
- 商業ベースの軌道上サービスに適合する標準を実現していく必要がある。

今後の動向

- アームの技術確立の為、サービスシステム全体での統合的実証を重ねながら軌道上での実証例を増やし標準を形成していく。
- 商業ベースでは、ロボティクスの標準モジュール単位での組立や交換を目指すもの、ドッキング機構の標準化が図られ、拡大が期待される。

(1) 技術試験衛星VII型「きく7号」(ETS-VII)「おりひめ・ひこぼし」 https://www.jaxa.jp/projects/sat/ets7/index_j.html

(2) Maximo A. Roa, Korbinian Nottensteiner, Armin Wedler, Gerhard Grunwald, German Aerospace Center (DLR), 82234 Wessling, Germany, Robotic Technologies for In-Space Assembly Operations <https://elib.dlr.de/116805/1/Roa-Astra17.pdf>

ロボティックスにおける標準化

| 標準技術 | Lockheed Martin社 Mission Augmentation Port (MAP) |
|------|---|
| 概要 | <p>軌道上でのドッキングとミッションを拡張させる為のオープンソースインターフェイス。ソフトウェアをアップデートする、新しいアプリをダウンロードするように、ミッションの変更を可能にする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ドッキングを容易にする機械的なインターフェイス Augmentation System Port Interface (ASPIN)はこのMAP標準に適合しており、電氣的、データ移送を可能とし、打ち上げ後に軌道上でミッションを拡張させる 衛星の寿命は燃料の有無にかかわることが大きいですが、ミッション機器の陳腐化にも左右される。ミッション機器をアップデート、または、新しくダウンロードできれば、衛星の寿命を延長することが可能となる。 GEO衛星は寿命が長い為ミッション機器の陳腐化が避けられないが、ミッション機器を拡張し、既存アセットを有効活用する。(1) <div data-bbox="385 933 750 1150">  </div> <p>(1) https://news.lockheedmartin.com/2022-02-25-Lockheed-Martin-Releases-Open-Source-Interface-Standard-for-On-Orbit-Docking</p> |

| アストロスケール社 近接近傍運用を支援するドッキングプレート | |
|---|--|
| <p>カスタム可能なドッキングプレートを衛星に装着する事で、接近及び物体の回転の推定の難易度を下げ、磁石方式の捕獲を可能にする。</p> <ul style="list-style-type: none"> 2021年のELSA-dミッションにより宇宙空間で実証 識別マーカと反射器が近接近傍接近時に航法誘導をサポートし、EOL、燃料補給やりロケーション等のコスト節減 主にLEO小型コンステレーションに於いて拡大が期待される | |
| <div data-bbox="1301 648 1520 776">  </div> <div data-bbox="1541 648 1657 776">  </div> <p>ドッキングプレートとドッキングのイメージ Youtube動画より https://www.youtube.com/watch?v=mg8cPvKNYY</p> | |
| <ul style="list-style-type: none"> その他の軌道上におけるドッキング方法も存在し、用途に応じて標準化が進むと推測 | |
| 方法 | プログラム |
| ローンチアダプターリングをアームで保持 | アストロスケール LEX  |
| アボジエンジンでのドッキング | Space Logistic MEV-1/MEV-2  |

燃料補給における標準化

- 燃料補給における事前準備
 - 事前にバルブを取り付けることにより、ロボットアームでの作業が削減され、難易度とコストが大幅に下がる
- 給油方法の標準化
 - 給油方法では、シャトルが合体する、ロボットアームでポッドをつける、推進剤移送ラインを取りつけて入れる等、幾つかの方法が存在する
- NASAやESAが中心となり、それぞれが標準を目指す給油/排油バルブが開発されている

標準化を進める為に

- 軌道上での給油作業の難易度を下げるバルブの取り付け等、事前準備を広げる
- 実例を蓄積し、より利便性が高いものへ集約していく

今後の動向

- 今後寿命延長/燃料補給は拡大が期待される軌道上サービスとされ、実例が増えると予測される。事前準備済の衛星が増え、難易度とコストの低下が実現すれば需要がさらに伸びると予想される。
- Orbit Fab社はアストロスケールと給油の契約を締結し、商業化をリードしている。給油が実現すれば一気に拡大されることを期待する。

現在進められている給油方法

シャトルが合体



シャトルによる給油イメージ⁽¹⁾

- バルブ等の事前準備が必要
- シャトル側に合体する為のRPO技術が必要

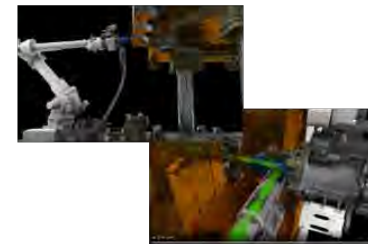
ロボットアームでポッドを装着



ポッドを横着するイメージ⁽²⁾

- クライアント側に合わせたポッドを準備
- ロボティクス技術によりポッドをクライアントへ装着

ロボットアームで推進移送ラインを取り付ける



ロボットアームを用いてラインを使用した給油イメージ⁽³⁾

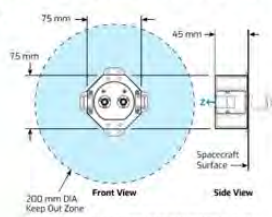

- 複雑な作業を可能にするロボティクス技術を駆使



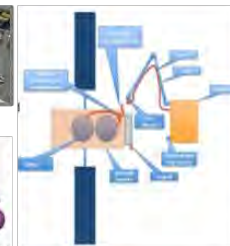
(1) Orbit Fab Gas Stations in Space™ <https://www.orbitfab.com/>

(2) Northrop Grumman to launch new satellite-servicing mission in 2024 <https://spacenews.com/northrop-grumman-to-launch-new-satellite-servicing-mission-in-2024/>

(3) NASA'S EXPLORATION & IN-SPACE SERVICES <https://nxis.gsfc.nasa.gov/osam-1.html>

燃料補給における標準化

| 標準技術 | Orbit Fab社 Gas Station In Space Rapidly Attachable Fluid Transfer Interface | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|------|-------|------|-------|-------|------|----------|--------|-------------|--------|----------|----------|--------------|-----------|
| 概要 | <p>Orbit Fab社はRAFTIの仕様を公開し、標準化を狙う。アストロスケール屋社はOrbit Fab社と軌道上で給油を受ける契約を締結。寿命延長衛星LEXIIにはRAFTIが搭載される。</p> <p><u>RAFTI詳細</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 2段階のラッチ構造によりミスアライメントを許容。ロボットアームを使用せず自身でアライメントを取る。 力強いクランピングにより高圧の流体や衛星の揺動にも耐える構造 燃料シャトル上にはRAFTIサービスバルブ及び3つの接近補助マーカを設置 Orbit Fab社の燃料シャトルがクライアント衛星をキャプチャーしRAFTIへ結合 推薬と押し出しガスや酸化剤の両方の流体を供給・充填できるように2つの流体コネクタを有する。2本のツメにより捕獲⇒引込⇒嵌合する   <p>Orbit Fab社より公開されている仕様⁽¹⁾</p> <table border="1" data-bbox="890 928 1056 1170"> <thead> <tr> <th colspan="2">Mechanical and Electrical Capabilities</th> </tr> <tr> <th>Item</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mass</td> <td>~10kg</td> </tr> <tr> <td>Power</td> <td>~10W</td> </tr> <tr> <td>Pressure</td> <td>~10MPa</td> </tr> <tr> <td>Temperature</td> <td>~100°C</td> </tr> <tr> <td>Material</td> <td>Aluminum</td> </tr> <tr> <td>Manufacturer</td> <td>Orbit Fab</td> </tr> </tbody> </table> | Mechanical and Electrical Capabilities | | Item | Value | Mass | ~10kg | Power | ~10W | Pressure | ~10MPa | Temperature | ~100°C | Material | Aluminum | Manufacturer | Orbit Fab |
| Mechanical and Electrical Capabilities | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Item | Value | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mass | ~10kg | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Power | ~10W | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pressure | ~10MPa | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Temperature | ~100°C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Material | Aluminum | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Manufacturer | Orbit Fab | | | | | | | | | | | | | | | | |

| NASA CSV (Cooperative Service Valve) ESA ASSIST | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|------------|------------|------------|-----|---------------|------------|------------|------------|------------|----------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <p>各宇宙機関で燃料給油/排油バルブが考案され標準化が図られてきたが、未だに軌道上での燃料補給の実例が限られており、標準化には至っていない。</p> <p><u>NASA CSV (Cooperative Service Valve)</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> NASAが中心となり開発した給油、排油バルブ。推進剤や加圧剤の充填を容易にする。 OSAM-1に於いて給油時に取り付けてそのまま残し、将来の給油に使用する予定 <table border="1" data-bbox="1139 714 1429 828"> <thead> <tr> <th>Configuration</th> <th>CSV</th> <th>CSV</th> <th>CSV</th> <th>CSV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Working Fluid</td> <td>Propellant</td> <td>Propellant</td> <td>Propellant</td> <td>Propellant</td> </tr> <tr> <td>Pressure</td> <td>~10MPa</td> <td>~10MPa</td> <td>~10MPa</td> <td>~10MPa</td> </tr> <tr> <td>Temperature</td> <td>~100°C</td> <td>~100°C</td> <td>~100°C</td> <td>~100°C</td> </tr> <tr> <td>Material</td> <td>Aluminum</td> <td>Aluminum</td> <td>Aluminum</td> <td>Aluminum</td> </tr> <tr> <td>Manufacturer</td> <td>Orbit Fab</td> <td>Orbit Fab</td> <td>Orbit Fab</td> <td>Orbit Fab</td> </tr> </tbody> </table> <p>NASA CSV概要⁽²⁾</p>   <p>ESA ASSIST概要⁽³⁾</p> <ul style="list-style-type: none"> ESAが中心となりGMV、Moog、The National Technical University of Athens、DLRが参加 LIDARと反射板を使い接近 最終段階ではvisual servoing 2種類のマーカを使用 専用のエンドエフェクターをBerthing Fixtureへ差し込み給油をする | Configuration | CSV | CSV | CSV | CSV | Working Fluid | Propellant | Propellant | Propellant | Propellant | Pressure | ~10MPa | ~10MPa | ~10MPa | ~10MPa | Temperature | ~100°C | ~100°C | ~100°C | ~100°C | Material | Aluminum | Aluminum | Aluminum | Aluminum | Manufacturer | Orbit Fab | Orbit Fab | Orbit Fab | Orbit Fab |
| Configuration | CSV | CSV | CSV | CSV | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Working Fluid | Propellant | Propellant | Propellant | Propellant | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pressure | ~10MPa | ~10MPa | ~10MPa | ~10MPa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Temperature | ~100°C | ~100°C | ~100°C | ~100°C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Material | Aluminum | Aluminum | Aluminum | Aluminum | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Manufacturer | Orbit Fab | Orbit Fab | Orbit Fab | Orbit Fab | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

(1) RAFTI Block 2 Spec Sheet <https://www.orbitfab.com/raftib2>

(2) Robotics Automation And Control Cooperative Service Valve for In-orbit Cooperative Satellite Fueling (GSC-TOPS-170) <https://technology.nasa.gov/patent/GSC-TOPS-170>

(3) HARMONISED SYSTEM STUDY ON INTERFACES AND STANDARDISATION OF FUEL TRANSFER (ASSIST) https://indico.esa.int/event/128/attachments/733/861/10_GMV-ASSIST-CleanSpace.pdf

【エグゼグティブサマリ】

【現状】

- 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があるが、事例としては、ISSのロボットアーム以外における実績は限定的である。

【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、商用の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、市場拡大には、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。
- 例えば、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。
- また、現存のISSロボットアームの標準は国際機関が作成し、安全性を重視した標準となっており、一般的な軌道上作業に供するには高額すぎる。安全性緩和の可能性も考慮し、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必要である。
- 上述の仕組みとともに、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。標準を主導するためには実証を加速させる必要もある。

上記を踏まえた「強み・弱み」分析

- ビジネスを進める上では、国際的な標準化とガイドライン・ベストプラクティスの形成にどのようにプレゼンスを示すか、イニシアティブをとるかが重要である。日本企業が軌道上作業の分野での事業拡大を目指すには、技術的競争力だけでなく、政府機関、各企業が連携して国際的な合意形成への参加が必要である。

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
6. 定常調査業務
 - 6.1. 定常調査・動向調査
 - 6.2. 適宜調査・事実確認

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 22-004-R-011

(調査要求)

- 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。
- 上記調査結果に基づき、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

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 22-004-R-011

【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), SSPD/CALTECH(米)を調査し、発電コスト等のシステム特性、および構造的特徴の抽出、および経済性に対する考察を行った。
- 2010年代は経済性の課題があり活動も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(安全保障含む)、および基礎技術の進展(特に輸送コスト)**に伴い、2010年後半から活性化されている。(Starship級で期待される輸送コスト(100ドル/kg程度)が実現すれば、コスト優位性が出るとの試算もあり)
- 欧米中においては、**具体的な実現時期を掲げた計画(軌道上実証含む)**が既に存在している。
- ただし実用化までは10~30年程度要する計画であり、すぐに実用化が進むフェーズではないが、地上実証も進めつつ、**欧米中ともに2030年までには低軌道で数十~数百kW程度のシステムが実証される計画**である。具体的には、AFRL/Northrop(米)のARACHNEでは、2025年打上げ予定で安全保障用途(前線への電力供給)を目的とし、**ビームフォーミングにより柔軟な運用**を可能とする技術実証を計画しており、2023年1月に打ち上げられた**革新的な軽量化技術**の実証であるCALTECHがある。
- 調査したユースケースはそれぞれ目的が異なることもあり、**大量モジュール構成、大型反射鏡、大型トラス構造、膜展開構造**などそれぞれで特徴を有しており、課題であった発電コストは改善の見込みが示され、1構成単位あたり、数千~10,000tクラスで、1~2GW級のコンセプトである。
- **上記を踏まえた「強み・弱み」分析**
2010年後半の外部環境を加味するとコスト面の改善に加え、目的(ニーズ)が多様化している一方で、日本において、これらの変化は推進の「強い動機付け」には至っていない。一部例外的に民間ファンドからの資金提供もあるものの、**予算規模、国内ニーズの状況を鑑みると、「個別要素技術」を強みとして拡大するためには、軌道上作業の1つのユースケースとして考慮しつつ、他のユースケース(デブリ除去, 燃料補給等)と協調して実証・強化を継続することが必要か。**

*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。

2.2.2. 太陽光発電システムの構造的特徴(サマリ)

22-004-R-011

◆ 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、**構成品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)

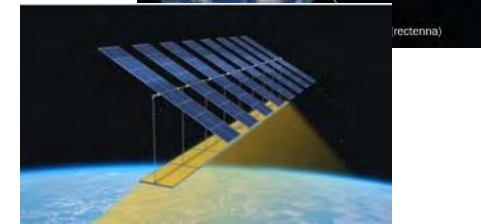
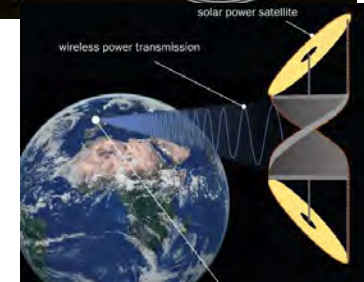
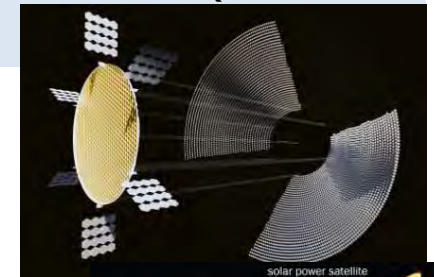
- **2つの巨大な楕円鏡と6万枚ものソーラーパネル(集光型発電部)**をらせん配列する構造、駆動部がないことが特徴
- 電力コストは 不明、他の再生エネルギーよりもハードルレートは良いとの試算あり

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

SSPD/CALTECH
(米)

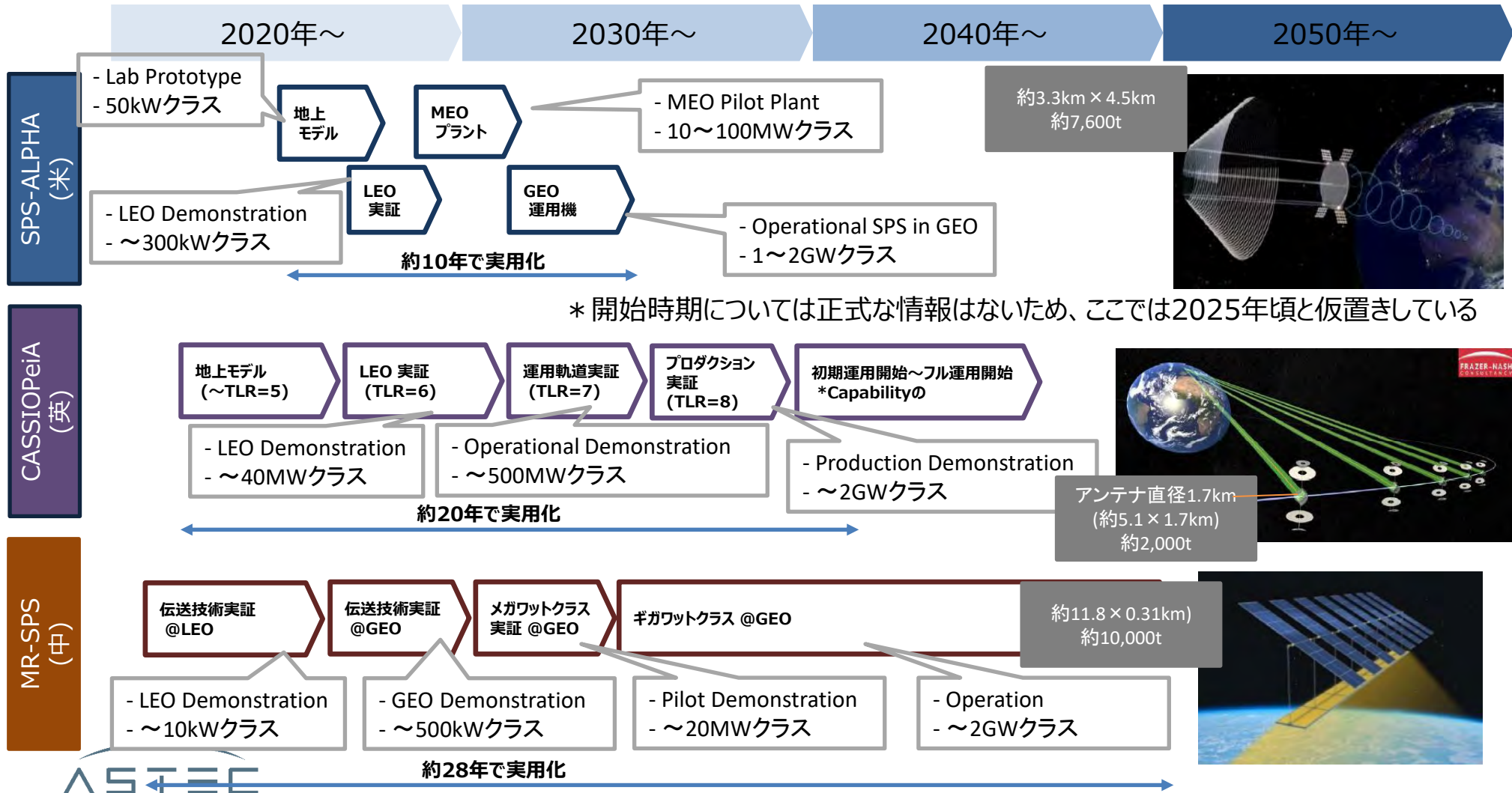
- **集光装置と送信アンテナを膜展開型**とすることで低価格化を目指す
- 電力コストは 不明、実証機(SSPD-1)を2023年1月に打上げられた



2.2.2. 太陽光発電システムのロードマップ

22-004-R-011

◆ 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。(詳細は次頁以降参照)



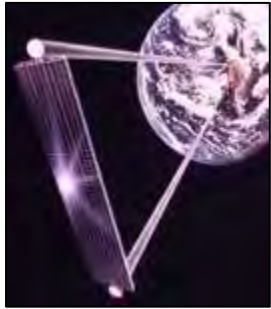
2.2.3. 太陽光発電システムの構造的特徴 ~(参考)システム構成別の発電コスト比較~

22-004-R-011

- 2010年代後半以降にコンセプトが再検討されたシステムは20セント/kwh以下と相対的に安価
- Type-5 : CALTECHの薄型フィルムのように大幅な質量削減は考慮されていないと推察

[注記]コスト算出にいくつか前提をおいているため絶対値としての精度は高くないと推察するが、相対的な比較は可能

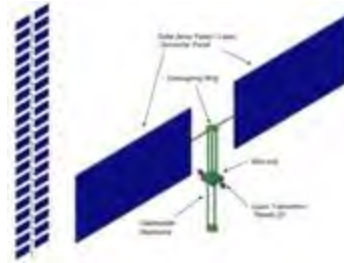
Type 1



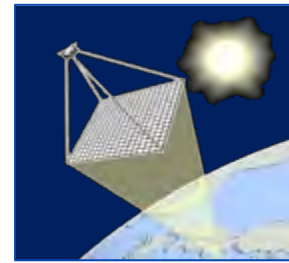
Type 2



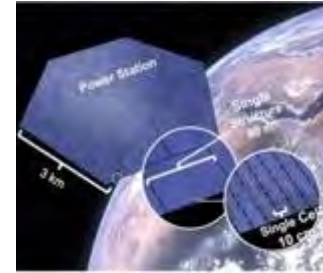
Type 3



Type 4



Type 5



Type 6



EXAMPLE:
1979 Ref. SPS
(US | DOE & NASA)

EXAMPLE:
Multi-Rotating
Joint
(CHINA | CAST)

EXAMPLE:
Modular Electric
Laser SPS
(US | AEROSPACE)

EXAMPLE:
"Simple" Integrated
Sandwich SPS
(JAPAN)

EXAMPLE:
Single-Substrate Thin-
Film SPS Swarm
(US | CIT-NG)

EXAMPLE:
SPS-ALPHA Mk-III
(US | MSTI)

質量 [MT(トン)]

20,000 MT

20,000 MT

18,400 MT

18,000 MT

14,000 MT

7,500 MT

COST OF ENERGY DELIVERED (\$ / kWh) OVER 30 YEAR LIFE

300¢ / kWh

19¢ / kWh

44¢ / kWh

72¢ / kWh

520¢ / kWh

4-5¢ / kWh



MR-SPS系

CALTECH系

SPS-ALPHA系
CASSIOPEIA系

2.2.3. 太陽光発電システムの構造的特徴

~Space Energy Initiative~

22-004-R-011

- 英国の助成金が一因となってSEIが形成
- 米国の2025年実証機、中国は2028年に実証実験、欧州「Solaris」等、具体的な実現時期を定めている点が特徴

◆ Space Energy Initiative

Mission

- Net Zeroへの挑戦と再生可能エネルギーを補完する新しいベースロードエネルギー技術の必要性に伴い、**宇宙太陽光発電の開発を主導**
- 設計、研究、技術実証の体系的かつ強力的なプログラムを通じて**宇宙×エネルギー×デジタル×製造のエコシステム間の統合・改革**を促進

Target

- **National Clean Energy Policy –Net Zero–の達成**に向けて、下記を推進
 - ✓ 2030年までに最初の軌道実証用SBSPシステムを確立
 - ✓ 2040年までに送電もに電力を供給するシステムを運用
 - ✓ 2040年半ばまでに第一世代の運用を開始
 - **英国の大部分の化石燃料による発電を代替**

Member ship(50以上の団体が参加@2022年時点)



Research



Development and Innovation



Implementation and Commercialisation

出所) SEI1, SEI2, 各国動向

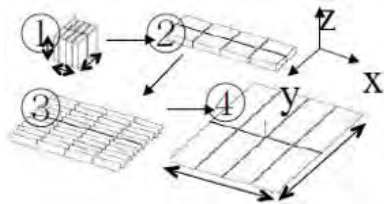
2.2.4. 太陽光発電システムの構造的特徴に起因する 技術分析

22-004-R-011

基本的な構成要素 (モジュール・パネル・トラス)

【自己展開方式】

システム構成要素そのものに展開・組み立て機構が備わっており、軌道に打上げ後に形状を変更する

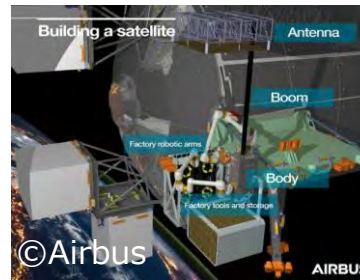


【特徴】

- ✓ 展開構造はシンプルでコストは比較的安価
- ✓ 展開後のユニット(数100m程度)の接合等、展開以降の構築は技術課題あり
- ✓ 長期的なメンテナンスには別の仕組みが必要

【軌道上製造方式】

部材を軌道上のPlatformに輸送し、Platformにて3Dプリンタ等による製造・組み立てを行う(部分適用が主)



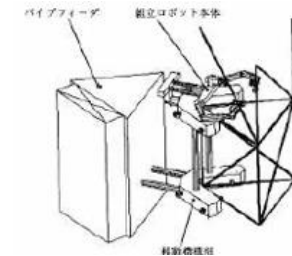
【特徴】

- ✓ 自由度が高く効率的だが初期投資は高価となる
- ✓ 現時点の技術では他の方法と組み合わせが必要
- ✓ Platformの建設自体が課題となる

出所) [SSPS](#), [構造の課題](#), [Airbus](#)

【ロボット構築方式】

システム構成要素とは異なる宇宙機を用いて、軌道上で構成要素の接合など組み立てを行う

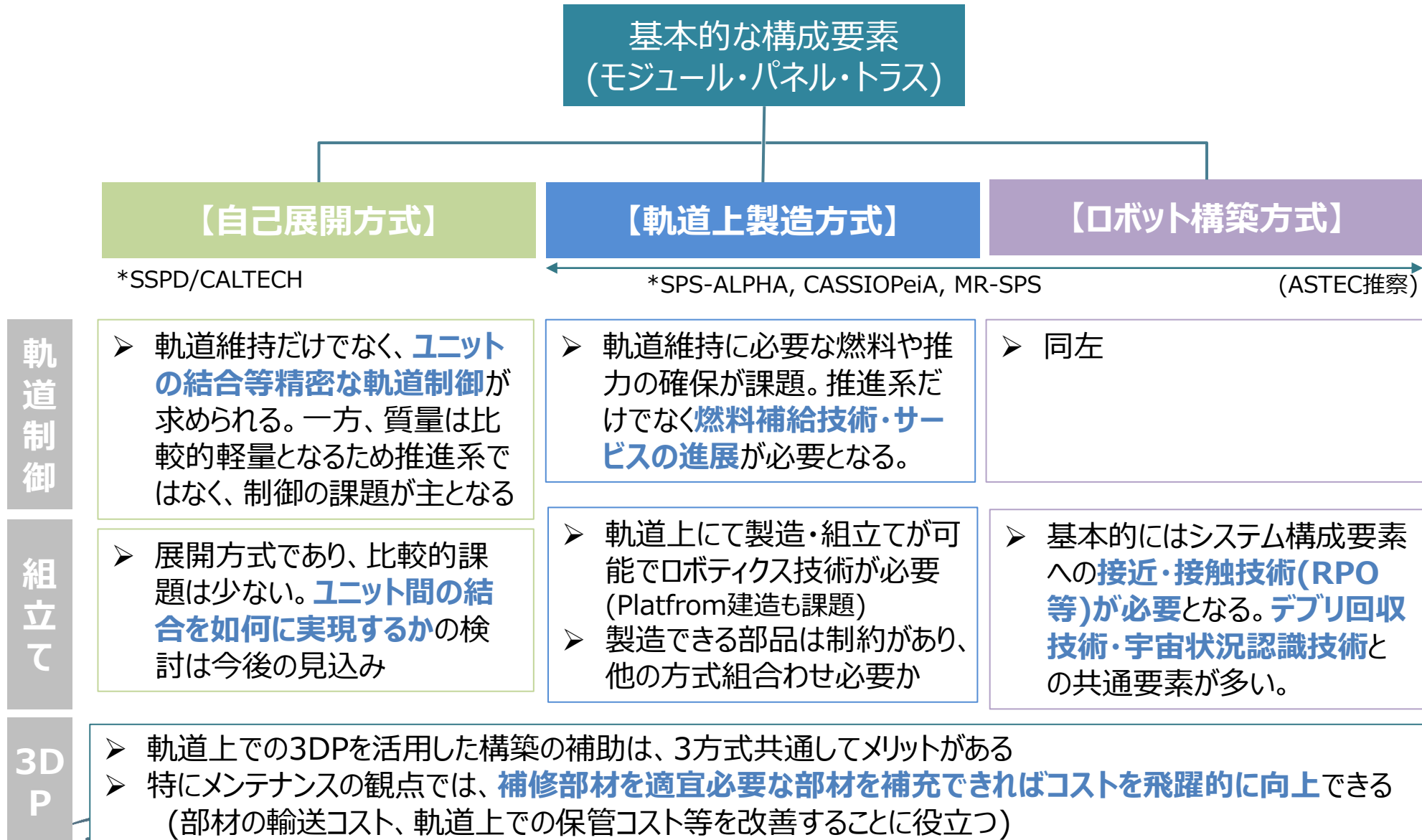


【特徴】

- ✓ 構成要素とは別の設計となり比較的高価
- ✓ システムに依存せず複雑な組立てが可能となる
- ✓ ロボットにメンテナンス機能を持たせることも可能

2.2.4. 太陽光発電システムの構造的特徴に起因する技術分析

22-004-R-011



【補足】上記には含まれていないが、構築過程も考慮した姿勢制御方式も課題の1つである

*ISSはCMGを用いているがより大きな構造体に対しては課題が残る

出所) [SSPS](#)

2.2.4. 太陽光発電システムの構造的特徴に起因する ～実証状況～

22-004-R-011

◆ SSPIDR Project (AFRF/Northrop, 米)

◆ SSPD/CALTECH (米)

概要

概要

トピック

トピック

目的：前線の基地等への電力確保
GPSのように軍用から民間利用への技術移転も期待

目的：膜状の集光・送信アンテナによる軽量システムの実証

- 2018年：ペイロード開発にAFRFから1億ドル以上の契約を締結
- 2021年：太陽光エネルギーをRFへの変換に成功(地上実証)
- 2022年：**ビームフォーミング技術を地上実証**
- 2025年に**プロトタイプ衛星を打ち上げ予定(ARACHNE)**

- 2013年：Donald Bren財団より100万ドルの寄付により研究が開始(最終的には1億ドルを超える予定)
- 2023.1：実証機を打上げ
*構想から設計、製造、テストまで、約35人のチームで実施

システム構成 /技術実証

システム構成 /技術実証

- **サンドイッチタイル方式**
太陽電池で収集したエネルギーをRFに変換して送信
- ✓ **SPIRRAL：熱に対する技術**
極端な温度変化を抑えるVariable emissivity Material(VME).
2023年打上げ実証予定
- ✓ **ARACHNE：サンドイッチタイルを用いた発電・送電実証**
9枚のタイルを用いて2025年に打上げ予定
- ✓ **SPINDLE：展開可能な構造物の技術実証**
現状は地上で実証実験をしており、今後の方向性を検討
- **Critical Technologies**
- ✓ **展開構造、発電技術、熱制御、分散制御、RFビームフォーミング**

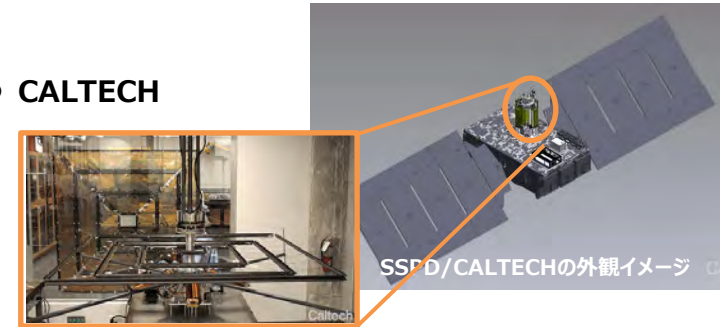
- **DOLCE：軌道上展開型超軽量複合材実験**
約1.8×1.8mのモジュール単位で展開
(実用時にはモジュールを組み合わせ1km程度の長さを構成)
- **MAPLE：マイクロ波電力伝送低軌道実験装置**
軽量・柔軟な送信機を配置し、タイミング制御により電力を集中・伝送する
- **ALBA：32種類の太陽電池を評価**
- **Vigoride：制御装置(上記3つの実験装置を制御)**

主なプレイヤー

主なプレイヤー

- AFRL/NRL
- Northrop Grumman

- CALTECH



DOLCE : Deployable on-Orbit ultraLight Composite Experiment
MAPLE : Microwave Array for Power-transfer Low-orbit Experiment

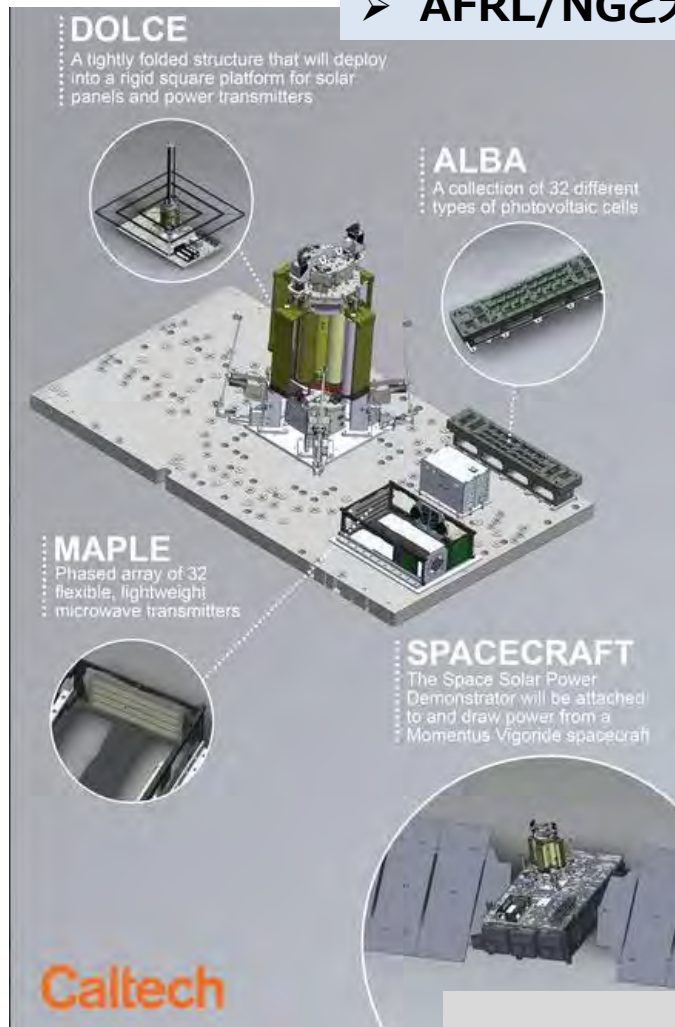
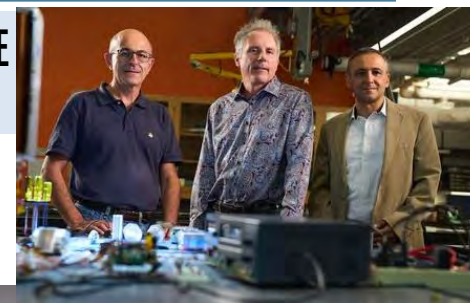
SSPIDR : Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research
SPIRRAL : Space Power InfraRed Regulation and Analysis of Lifetime
SPINDLE : Space Power INcremental DepLoyable Experiment

出所) [AFRL](#), [NG](#), [ビームフォーミング実証](#), [CALTECH](#),

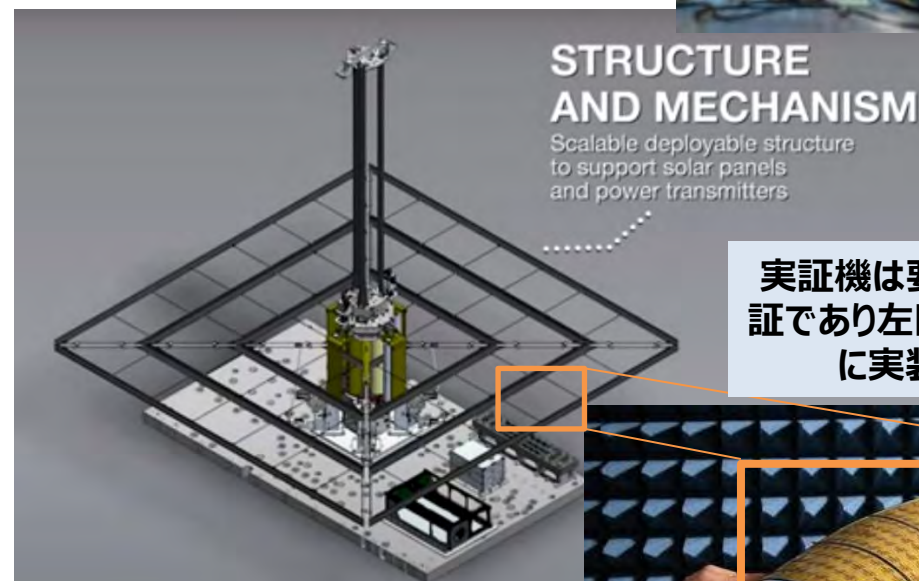
2.2.4. 太陽光発電システムの構造的特徴に起因する ~(補足)SSPD/CALTECH関連~

22-004-R-011

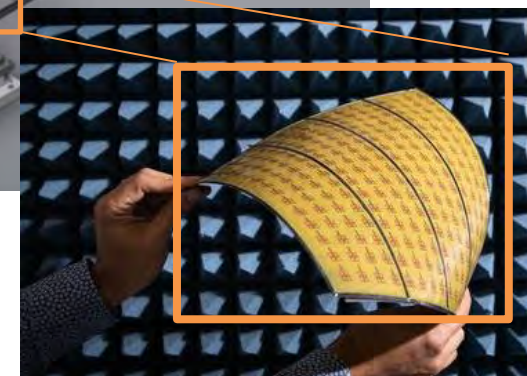
- これまで検討されてきたシステムより非常に軽量で革新的な実証
- AFRL/NGと大きく異なる技術が米国内で同時に発生



展開



実証機は要素ごとの検証であり左図(MAPLE)に実装される



アンテナシートの試作機
✓ 濃いオレンジ色の資格が1台の送信機に対応するアンテナ

衛星コンフィギュレーション



2.2.5. 太陽光発電システムにおける動向、およびユースケース ～有識者のご意見～

22-004-R-011

◆ 調査結果を踏まえた有識者のご意見(サマリ)

- 欧米中に比してシステム全体のプロジェクト化は低調であるものの、日本においても経産省が主体となり、**月面活動に向け「超長距離無線伝送の可能性を確認するための、地球低軌道からの無線送電技術の開発・実証」**のプロジェクトが2022年に立ち上がった。
- また日本の特徴は、「**細く長く継続した研究開発**」であり、要素技術の蓄積は進んでいる。一方で、「使われる技術」とするためには、**小さくてもミッションをつくり、要素技術を実証**することが大事である。(数が重要なファクターになっているとの認識)
- 今回の調査のように軌道上作業と関連付けて考察するなどの活動を通じて、地球観測等も含む**他のユースケースとシナジーが見込めるミッションの検討が大事**と考えている。

2.2.5. 太陽光発電システムにおける動向、およびユースケース ～強み・弱み分析～

22-004-R-011

- 多額の予算が必要となる実用システムにおいては、予算規模・国内ニーズの差異があり条件は良くない。
- 個別の要素技術を「強み」として強化し続けるために、他のユースケースとのシナジーが必要か。

動向分析サマリ

| Fact Finding及び 海外動向分析 | 現状の日本における動向分析 | |
|---|---|--|
| | 強み弱み | |
| <p><米国></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ コンセプト提案は多くあり、代表例としては、SPS-ALPHA, SSPD/CALTECH等。 ✓ 主なプレイヤーは、NASAを筆頭に安全保障関係ではAFRL/NFLも技術実証に取り組む。これに産業界ではNorthrop社、学術分野では、SSPDを主導するカリフォルニア工科大学(CALTECH)がある。 ✓ 地上試験から軌道上実証へ移行しつつある状況 <ul style="list-style-type: none"> - AFRL/Northrop 2022年にアクティブ電子走査アレイ機能(ビーム方向制御)を地上にて実証。2025年に実証衛星を打ち上げ予定。 - SSPD/CALTECH 2022年に実証機を打上げ済み(展開機構/送電の実証予定) <p><欧州></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 米国と同じくコンセプトは多数あるが代表例としては、CASSIOPEIA(英)がある。推進にあたり、産学官が集まったSEI(イニシアティブ)を結成 ✓ 上記とは別に、ESAが「Solaris」計画を立ち上げ、FSを開始(GSTPに約2.1億円を当て、その一部をSolarisに使用する予定) <p><中国></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 代表的なコンセプトはCASTが主導するMR-SPSがある ✓ 実証状況の詳細は不明だが、IAC等学会での報告は定期的にあり | <p><JAXA></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 2000年代にJAXAや経産省により1GW級のコンセプト検討[1]を実施 ✓ JAXAが主なプレイヤーであるが、送電技術など個別の要素技術は経産省主導でMHI, MELCO等が開発を進めており、また軌道上作業技術はAstroscaleやMELCO/NECもJAXAプログラムの中で関連技術を保有する ✓ 宇宙基本計画(概要編)の「産業・科学技術基盤を始めとする我が国の宇宙活動をささえる総合的基盤の強化」に「VII. 宇宙太陽光発電の研究開発」が掲げられている。 ✓ 上記もあり、月面を対象とした実証等、個別要素の軌道上実証計画はあるもののシステムとしての計画はない | <p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 長期的に研究開発を続けた結果として、システムを下支えする要素技術は蓄積されている。特に組み立てに必要な協力体への接近、ロボティクスについては軌道上実績あり。 <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 安全保障、ネットゼロなどのニーズが相対的に低く、プロジェクト化は欧米に比して遅れがある(近年のトレンドである、地上電力代替以外を目的とした利用ニーズ) |

[1] JAXA/SSPS, ESA

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
6. 定常調査業務
 - 6.1. 定常調査・動向調査
 - 6.2. 適宜調査・事実確認

(調査要求)

- 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ドッキング等、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。
- 上記調査結果に基づき、日本の強み・弱みを分析し、まとめること

【エグゼクティブサマリ】

ランデブ・近傍運用

- 特定の軌道上サービスに特化した事業者も増えサービス毎のセグメンテーションが進みつつあるなか、共通するRPO技術の重要性は高い。肝となる相対航法センサについて、各社光学カメラの使用が多く、OSAM-1では赤外カメラをバックアップに、近接運用では安全性やドッキングのためのアプローチに物理形状などが把握できるLIDARを採用するケースが複数見られる。航法センサはRPOミッションにクリティカルであるため、バックアップを考慮したり、評価（dissimilarチエック）用にセンサを追加で設けたりなど実装も幅広い
- サービスごとに顧客衛星条件等を考慮して適切なRPOも決まってくるものであり、デブリ除去であれば非協力接近、そのほか、燃料補給や寿命延長、修理やEOLサービスなどは協力・準協力接近を前提とした対応がされている。
- 上記も踏まえ、航法センサ、オンボード処理、推進系、GMC等の技術的課題をクリアし標準化が進めば開発要素・リスクを低くでき、低コスト化・サービス化の促進につながると考えられる。

ロボティクス

- 寿命延長サービス機(2例)から得られた特徴として、2本のロボットアーム、機能に応じたツール交換キット、ツールスロット、PROセンサ群（LIDAR, 可視/照明/赤外カメラ等）が共通して実装されている。
- 衛星全体を固定し牽引する機能も有するOSAM-1では、バース（安定保持）システムも装備。
- 日本ではまだまだ軌道上サービスに資するようなロボットアームの実証が少なく、開発が急がれる。

上記を踏まえた「強み・弱み」分析

- 協力物体と準協力物体へのRPOを実証し、非協力物体へのRPO技術の開発においては世界をリードしている。これらを活かしてサービスの幅を広げる為に組立・製造、検査、修理等を実施する為のロボットアームと用途に応じたエンドエフェクターの開発を進め、さらに競争力の確保の為のコストダウンが求められる。

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）及びロボティックス技術が抽出される。

| 寿命延長 | 燃料補給 | 軌道上組立 | 軌道遷移、再配置 | デブリ除去 |
|---|--|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">クライアント衛星へ安全に近づく RPO技術確実なドッキングを実現する ロボティッ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 | <ul style="list-style-type: none">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為の ロボティックス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 ロボティックス技術 | <ul style="list-style-type: none">クライアント衛星へ安全に近づく 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 ロボティックス技術と付随するエンドエフェクター | <ul style="list-style-type: none">多数の衛星を効率的に運ぶ為の推進系技術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為の ロボティックス技術 | <ul style="list-style-type: none">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 ロボティックス技術 |

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

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



（補足） 打上げ前のSSAによるクライアント物体の発見・追跡は非協力ランデブには必要不可欠でRPO運用を行う際に必要となるが、ここでは打上げ以降をRPOスコープとして議論する

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の姿勢が安定し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。

周回衛星に比べ設計上異なる事項

ミッション設計 (Mission Design)

- 1) フェーズに応じた航法・接近手法の決定
 - 遠方域接近、近傍接近、近接運用に対する絶対航法、相対航法、6自由度相対接近等
- 2) 軌道設計
 - RPOに効率的な初期投入軌道を決定（ターゲットの観測、軌道決定、LSPとの調整等）
 - 位相調整、高度調整、共軌道化等を考慮した軌道設計
- 3) フェーズに応じた地上可視確保
 - 近接運用フェーズでは連続可視の確保等

衛星 (Space Segment)

- 1) 安全設計
 - 接近、近接運用時の衝突リスクを考慮したハザード解析、FDIR、Abort設計
- 2) ミッション成立性を考慮したアクチュエータの設計
 - 燃料は軌道制御を中心に、姿勢制御での燃料使用の抑制等
- 3) 高度なGNC (Guidance Navigation Control) 能力
 - OBCで相対姿勢と相対軌道を算出し、マニューバーを判断・実行（相対航法では航法センサから得られるデータを考慮）
 - 体系的かつ細かな誘導制御設計のためのGNCモダリティ設計（安全軌道への退避等複数モード設計）
- 4) ランデブセンサ（航法センサ）ペイロードの搭載
 - 測定レンジに応じたセンサ搭載(VISCAM-T,W等)と設計（指向精度）
- 5) ターゲット軌道LTAN⁽¹⁾変化へ対応したサバイバビリティ設計
 - 電力の供給の十分性
 - 熱収支の成立性
 - 姿勢センサ視野や通信アンテナ視野（取付箇所等）
- 6) レイアウト制約
 - 相対航法時は、相対航法センサの視線方向がターゲット方向に固定

地上 (Ground Segment)

- 1) SSAサービス
 - 高頻度・スピーディなオンデマンドconjunctionスクリーニング
- 2) シビアなマニューバ計画・実施管理
 - 高頻度・連続で発生するマニューバの実施管理運用

運用 (Operation)

- 1) 運用・不具合対処
 - ランデブフェーズのマニューバ計画・実施管理には設計側関係者の関与要（運用成熟度による）

(1) 昇交点通過地方太陽時。サービス衛星の軌道LTANはターゲットの軌道に依存

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

RPO(ランデブ・近傍運用)シーケンスごとの技術要素・機能要件(非協力接近・一例)

| | | 打上げ前～打上げ | 遠方域接近 | 近傍接近 | 近接運用 |
|---------------|--------------------------------------|--|--|---|--|
| 技術要素 | | <ul style="list-style-type: none"> クライアント軌道の子測 適切な目標軌道の設定(サービサー、クライアントの位相差等の考慮) サービサーの初期軌道投入(LS) 初期チェックアウト運用 | 絶対航法(下記要素含む) <ul style="list-style-type: none"> 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サー誘導) サービサー、クライアントの軌道決定 マニユーバ計画立案・実行 絶対航法から相対航法への接続 | 相対航法(下記要素含む) <ul style="list-style-type: none"> 航法センサによるクライアント捕捉 クライアント捕捉後の航法誘導制御 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 サービサー、クライアントの軌道決定 マニユーバ計画立案・実行 | <ul style="list-style-type: none"> 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 |
| 主要サブシステム機能要件等 | 地上システム等 | <ul style="list-style-type: none"> (打上げ前)クライアント軌道情報取得、軌道決定・予測 初期投入軌道決定 サービサー及びクライアントの軌道決定、相対位置・速度の算出 | <ul style="list-style-type: none"> SSA軌道情報取得 サービサー及びクライアントの軌道決定、相対位置・速度の算出 マニユーバ計画立案・Uplink～マニユーバ実績評価 | <ul style="list-style-type: none"> センサ取得画像から方位角、相対位置・速度の算出 サービサーの軌道決定 マニユーバ計画立案・Uplink(地上 or OBC) | <ul style="list-style-type: none"> 相対位置・速度、相対姿勢・角速度の推定 |
| | 航法センサ | | | <ul style="list-style-type: none"> クライアント捕捉・画像取得 測定レンジに応じたセンサ切替(VISCAM-T, W等) | <ul style="list-style-type: none"> 定点観測(画像取得)(VISCAM, Lidar等) |
| | オンボードコンピュータビジョン(CV) | | | <ul style="list-style-type: none"> 航法センサ取得データの画像化 クライアントとサービサー間の相対位置ベクトル抽出 | <ul style="list-style-type: none"> 航法センサ取得データの画像化 3Dモデル構築処理 運動推定(画像フィッティング等) |
| | 航法誘導制御系(GNC)-姿勢決定/角速度計測用センサ, アクチュエータ | <ul style="list-style-type: none"> 初期チェックアウト | <ul style="list-style-type: none"> RCS:軌道(修正)マニユーバ実行 Gyro, STT等:絶対姿勢, 絶対位置速度, 角速度取得 RW等:姿勢制御 | <ul style="list-style-type: none"> RCS:軌道(修正)マニユーバ実行 Gyro, STT等:絶対姿勢, 絶対位置速度, 角速度取得 RW等:姿勢制御 | <ul style="list-style-type: none"> RCS:相対位置の保持制御, 周回等, アポート(衝突回避)等 他AOCS |
| | 航法誘導制御系(GNC)-オンボードコンピュータ | | <ul style="list-style-type: none"> 姿勢・軌道決定制御(相対姿勢と相対軌道算定) 軌道マニユーバ判断・実行 | <ul style="list-style-type: none"> 姿勢・軌道決定制御(相対姿勢, 相対軌道算定) 相対位置・速度算出(地上orOBC) (常時)絶対軌道伝搬 軌道マニユーバ判断・指示(地上orOBC) 軌道上プログラムUpdate(必要時) FDIR | <ul style="list-style-type: none"> 同左(安全面を含め各種判断・実行はオンボードが基本) |

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

RPO(ランデブ・近傍運用)シーケンスごとの技術要素・動向



- ✔ フライト実績あり
- フライト計画あり

国内

| ミッション/機体 | 打上げ | 遠方域接近 | 近傍接近 | 近接運用 |
|---|----------------|---|---|--|
| ETS-7⁽¹⁾ (JAXA) 協力RPO 全般 LEO | ✔ 打上げ (1997年) | ✔ 相対接近フェーズ (1998年) (10km-500m):GPS相対航法 (同一位衛星からの電波を受信して同時に測位を行い、その差をとって相対位置を測定) | ✔ 最終接近フェーズ (1998年) (500-2m):レーザーレーダー(RVR), (2m-30cm)画像センサ ・ 中継衛星利用(TDRS, COMETS) | ✔ ドッキングフェーズ(1998年): PXS (近傍センサ) 6DoF ・ 2m及び12km(GPS相対航法併用)から |
| ELSA-d (Astroscale) 準協力RPO LEO デブリ除去 | ✔ 打上げ (2021年) | (クライアント・サービサー間の相互通信は無し) (捕獲実証実施後) ✔ 絶対航法による1,600kmから159mへの移動(2021年) ・ SSA軌道情報及びGPSの利用 (軌道決定は1-2回/日程度) | | ✔ 模擬デブリの分離と捕獲 (2021年) (マーカーを用いた接近) ✔ (再分離後) 30mで相対位置維持 (2021年) |
| DRUMS (KHI) 準協力RPO LEO デブリ除去 | ✔ 打上げ (2021年) | (光学カメラ等チェックアウト中 (as of 2022年12月 ⁽²⁾)) | | ● 模擬デブリ捕獲実証予定(計画) (捕獲機構と保持機構) |
| ADRAS-J (Astroscale) 非協力RPO LEO デブリ除去 | ● 打上げ (2023~年) | ● 絶対航法による遠方域接近(2023~年) | ● 相対航法(2023~年) (VISCAM, LIDAR等) | ● ロケット上段デブリの観測点検 (2023~年) ● クライアントの3Dモデル作成 (2023年~) |
| CRD2 フェーズ2 (事業者TBD) 非協力RPO LEO デブリ除去 | ● 打上げ (TBD) | ● 絶対航法による遠方域接近(TBD) | ● 相対航法(TBD) (VISCAM等) | ● ロケット上段デブリの捕獲(TBD) ● 同デブリの曳航・軌道降下(TBD) |

(1) <https://www.eoportal.org/satellite-missions/ets-vii#space-robotic-experiments-rbt>
https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicej/1962/38/11/38_11_682/_pdf
 (2) JAXA第10回スペースデブリワークショップ

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

22-004-R-011

RPO(ランデブ・近傍運用)シーケンスごとの技術要素・動向

航法センサ観点



- ✔ フライト実績あり
- フライト計画あり

国外

| ミッション | 打上げ | 遠方域接近 | 近傍接近 | 近接運用 |
|--|---|-------------------------------------|--|---|
| Orbital Express⁽¹⁾ (米国/DARPA/NG等) 協力RPO LEO 燃料補給 他衛星(NEXTSat)への燃料(ヒドラジン)輸送 | ✔ 打上げ(2007年) | ----> ✔ (不明) | ----> ✔ ・ 赤外カメラ(IR) ・ 光学カメラ(複数) ・ レーザー測距計(LRF) ・ NASA's advanced video guidance system (リフレクタへのレーザー照射で高度推定) | ✔ ヒドラジン燃料補給(2007年) |
| AVANTI⁽²⁾ (独/DLR) 準協力RPO LEO 全般 地球観測衛星(BIROS)を用いてCubesat(BEESAT-1)へのRPO実証 | ✔ 打上げ(2016年) | ----> ✔ 10km~1kmまでの自律制御による接近(2016年) | ----> ✔ ・ 2.5km~50m後方までの自律制御による接近(2016年) ・ Star Tracker(光学カメラ)のみによるAON(Angle-Only Relative Navigation) ・ Realtime自律相対航法(マニューバ計画計算等) | |
| MEV-1⁽³⁾ (米国/Space Logistics) 協力RPO GEO 寿命延長 通信衛星インテルサット901へのドッキングと軌道維持・寿命延長 | ✔ 打上げ(2019年) ・ 地上局(複数)からの測距による軌道決定 ・ GTOからGSO arcまで150日程度(EP) | ----> ✔ 2000km~センサ補足距離まで | ----> ✔ ・ 光学カメラ(Narrow→Wide)から取得される相対位置・高度・方位をもとに接近 ・ センサ取得データを地上処理でEPによるマニューバ計画を計算 | ✔ ヒドラジン(CP), LIDARによる6DoF最終接近 ・ インテルサット901へドッキング(2020年) ・ 80,15,1m waypoint設定 |
| MEV-2⁽³⁾ (米国/Space Logistics) 協力RPO GEO 寿命延長 通信衛星インテルサット1002へのドッキングと軌道維持・寿命延長 | ✔ 打上げ(2020年) ・ (MEV-1同様) | ----> ✔ (上記MEV-1同様) | ----> ✔ (上記MEV-1同様) | ✔ インテルサット1002へドッキング(2021年) ・ 80,15,3,1m waypoint設定 |
| MRV/MEP⁽³⁾ (米国/DARPA/SL) 協力RPO GEO 寿命延長 MRVがMEPにドッキングクライアントへRPO-D後、MEPがサービス提供をしMRVは離脱(分散型システム) | ● 打上げ(2024年) | ----> ● (上記MEV-1同様) | ----> ● (上記MEV-1同様) | ● Optus社のD3衛星(通信衛星)にドッキングし寿命延長サービス(2025年) |

(1) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/78/Orbita_Express_fact_sheet.pdf
 (2) <https://elib.dlr.de/112920/1/issfd2017.pdf>; <https://elib.dlr.de/112652/1/56Gaias.pdf>
 (3) <https://www.eoportal.org/satellite-missions/mev-1#mev-1-and-mev-2mission-extension-vehicle-1-and-2>

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

22-004-R-011

RPO(ランデブ・近傍運用)シーケンスごとの技術要素・動向

航法センサ観点



- フライト実績あり
- フライト計画あり

国外

OTTER PUP⁽¹⁾
(米国/Starfish Space)
非協力RPO LEO
デブリ除去
寿命延長

デブリの除去と寿命延長実証。世界初のEPによる最終接近・ドッキング実現を計画。クライアント(Launcher社のOTV)同時打上げ。

OSAM-1⁽²⁾
(米国/NASA/Maxar)
協力RPO LEO
燃料補給
組立

Landsat7へのRefueling(ヒドランジ)及びSPIDERと呼ばれるrobotによる新規 structural components建造

OSAM-2⁽³⁾
(米国/NASA/RedWire/Motiv)
協力RPO LEO
燃料補給
組立

将来の貨物打上げコスト削減を見据えた実証(梁状構造物の軌道上3Dプリント等)

ClearSpace-1⁽⁴⁾
(欧州/ESA/Clear Space)
非協力RPO LEO
デブリ除去

小型デブリ(100kgクラス)の除去

| 打上げ | 遠方域接近 | 近傍接近 | 近接運用 |
|---------------|---|--|---|
| ● 打上げ(2023年) | ● (不明) | ● 双眼ビジョンシステムによりクライアントの相対位置把握 ● 自律航法誘導ソフトウェア(数kmの距離から人を介することなくドッキング位置まで接近) | ● クライアントに対し自律的に接近・ドッキング ● 電気推進を用いて最終接近・ドッキング |
| ● 打上げ(2025~年) | ● 100km~光学カメラ(narrow)による接近(AON)(2025~年) | ● 数十km~IRカメラによる接近(方位・距離) ● 数km~数mまでのLiDAR,光学カメラ(wide)による接近(方位・距離)(2025~年) | ● 数十m以内でのIRカメラによる極近傍接近(AON) ● 数km~数mまでのLiDAR,光学カメラ(wide)(2025~年) |
| ● 打上げ(2024~年) | ● (不明) | ● (不明) | ● ビームの軌道上3Dプリントと太陽電池パネルの展開実証等 |
| ● 打上げ(2025年) | ● 光学カメラ (far range) | ● 光学カメラ (near range) + RADAR, LIDAR, その他センサ (検討中) | ● ロケット上段デブリの捕獲(Vega upper stage 112kg) |

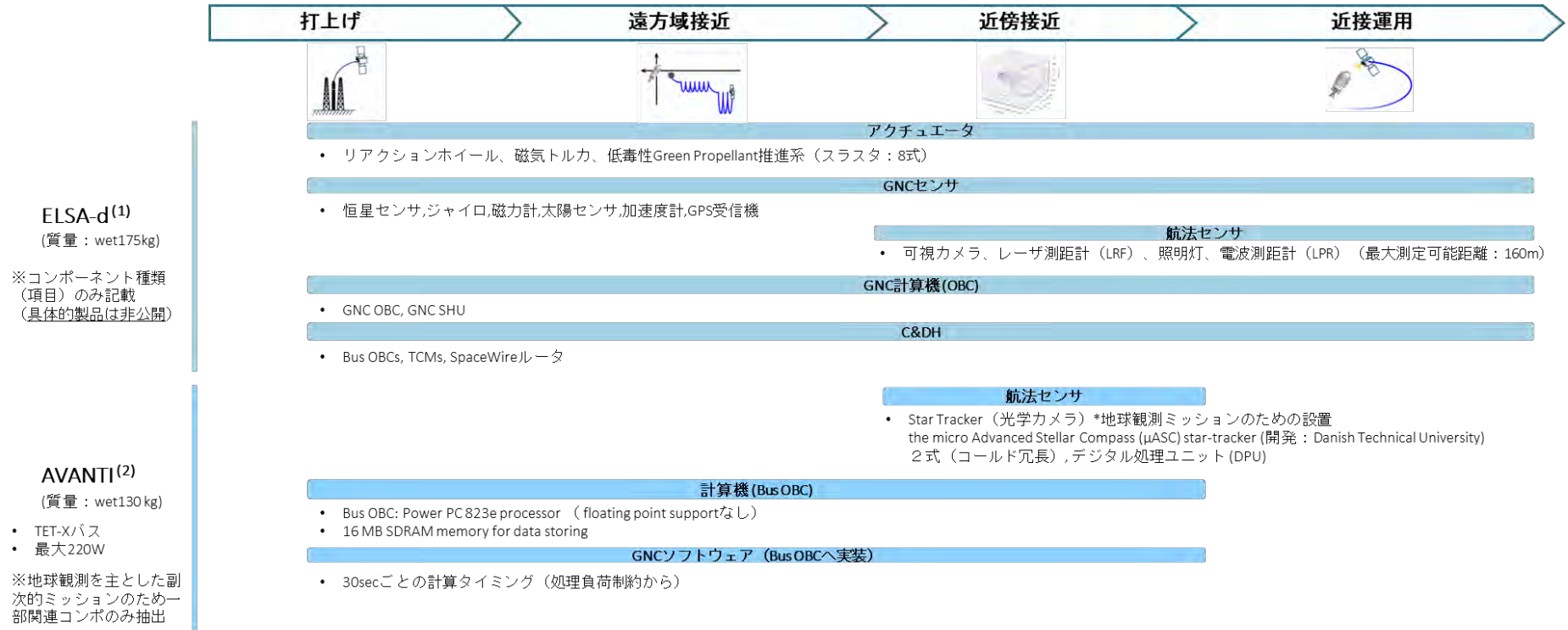
(1) <https://www.youtube.com/watch?v=QLWut6TFJBs>
 (2) <https://www.eoportal.org/satellite-missions/osam-1>
 (3) https://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/osam-2.html
 (4) <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc8/paper/320/SDC8-paper320.pdf>

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

22-004-R-011

RPO(ランデブ・近傍運用)ユースケース/プロジェクト別コンポ・計算機等実装調査結果

公開情報ベースでの調査結果を示す。なお特に民間の衛星は具体的機器名までの情報公開はほぼ無く、機器の種類までの記載に多くが留まる。



(1) ELSA-dプロジェクトのステータス-運用・実証実験について-第66回宇宙科学技術連合講演会

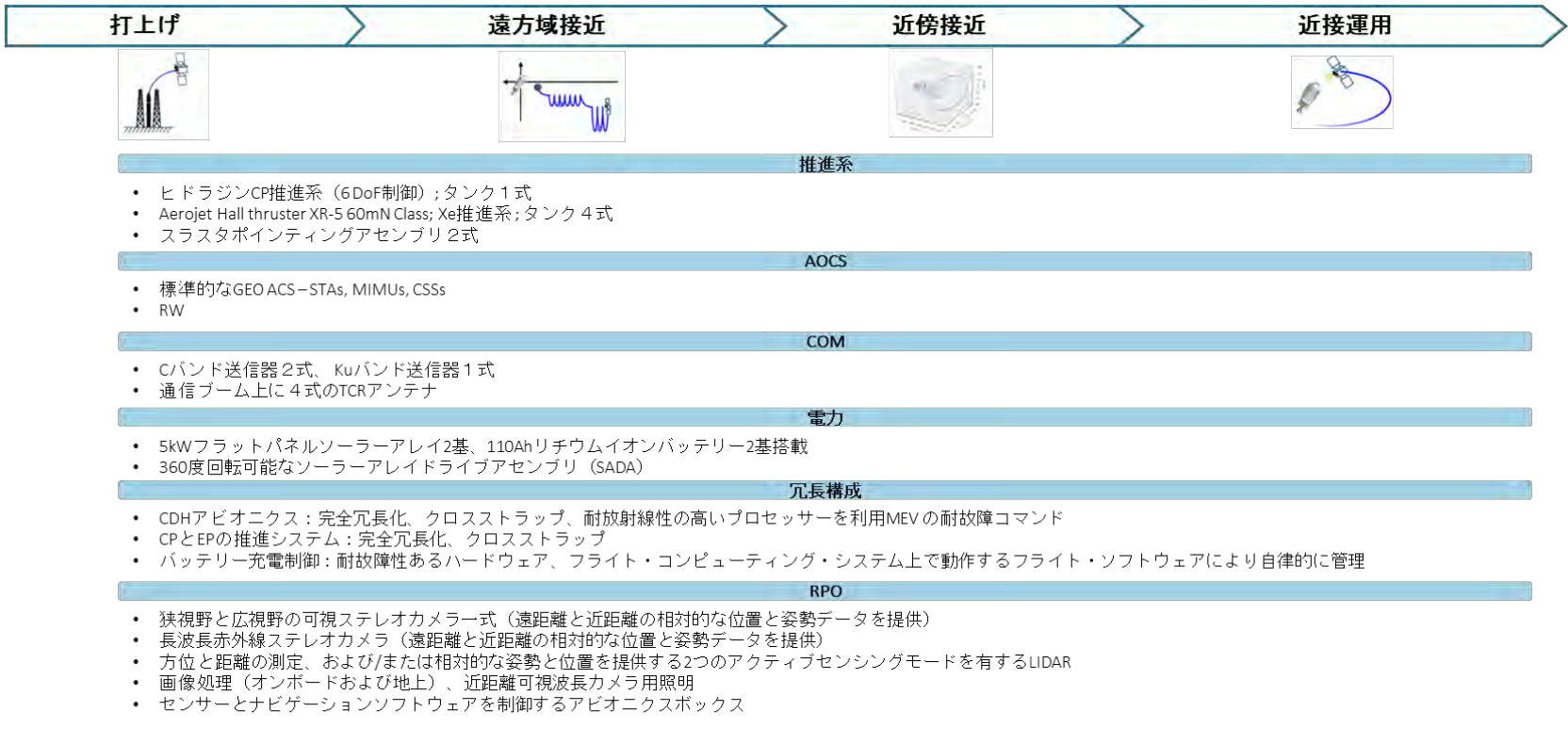
(2) <https://elib.dlr.de/112652/1/56Galias.pdf>

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

22-004-R-011

RPO(ランデブ・近傍運用)ユースケース/プロジェクト別コンポ・計算機等実装調査結果

MEV-1,2⁽¹⁾
(質量 : 2330,2875kg)



(1) Application of Solar Electric Propulsion in the Emerging Satellite Servicing Industry, The 36th International Electric Propulsion Conference, September, 2019, Michael J. Glogowski¹, Joe D. Anderson², Northrop Grumman Space Systems Division <http://electricrocket.org/2019/753.pdf>, MEV-2 FCC Report Appendix <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20191210-00144/2098823.pdf>, Eoportals <https://eoportal.org/web/eoportalsatellite-missions/m/mev-1>, Delving deeper into in-orbit satellite servicing www.satellite-evolution.com | July/August 2018 <http://www.satelliteevolutiongroup.com/articles/SatelliteServicing.pdf>, Two commercial satellites link up in space for first time February 26, 2020 <https://spaceflightnow.com/2020/02/26/two-commercial-satellites-link-up-in-space-for-first-time/>, <https://news.northropgrumman.com/news/features/orbital-atk-on-track-to-launch-industrys-first-commercial-in-space-satellite-servicing-system-in-2018>, <https://www.nasa.spaceflight.com/2021/05/mev-success-ne-future-servicing/>

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

22-004-R-011

RPO(ランデブ・近傍運用) ユースケース/プロジェクト別コンポ・計算機等実装調査結果



(1) <https://www.maxar.com/press-releases/maxar-delivers-spacecraft-bus-for-nasa-s-psyche-mission>

(2) <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc8/paper/320/SDC8-paper320.pdf>

(3) <https://www.youtube.com/watch?v=QLWut6TFJBs>

<https://spacenews.com/starfish-books-launch-for-in-orbit-satellite-docking-mission-next-fall/>

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。

各社動向

Canada各社

Space Shuttle, ISSに搭載されたロボットアームCanadarm、同2, 3に様々なエンドエフェクタを取付け、船外活動支援、衛星の捕捉・修理・放出等を実現している。
(右上図に各適用例を示す)

DARPA/Space Logistics (Northrop Grumman)

MRVに国防高等研究計画局 (DARPA) が開発したロボットを取り付け、寿命延長用MEPのクライアント衛星への取付支援や、軌道上不具合の確認された衛星の修理作業等を行うMRVを計画している。
(右下図にMRVによる太陽電池の展開不良の救済案を例示)。

NASA/Maxar

OSAM 1 (Restore-L; 低軌道用)としてMRV同様の軌道上サービス機 (Landsat-7の対応から) を開発中である。なお、静止軌道用のRestore-Gも検討を開始している模様。

Canadarm



MRV



OSAM 1 (Restore-L)



3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

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寿命延長、ADRについて調査

寿命延長におけるロボティクス (1/2)

この内、中心的機能を有するRobot Arm, Tool Exchanger等については、次ページに詳述する

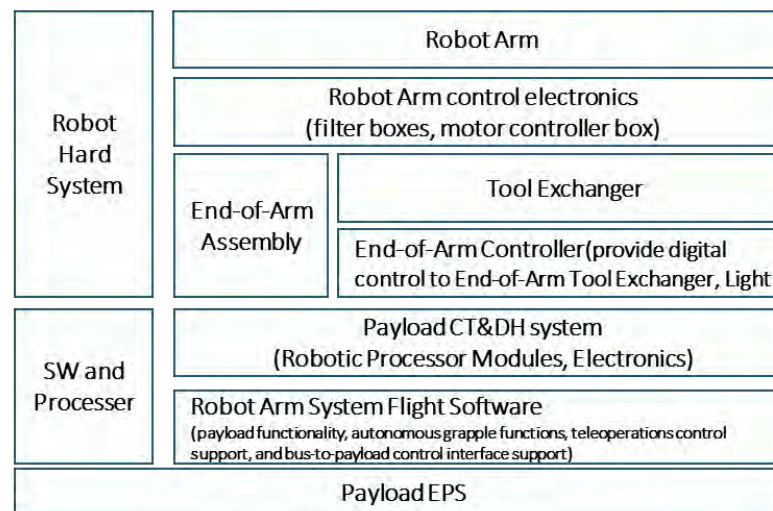
実績・動向例

ユースケース（実プロジェクトとして進んでいるもの）として代表例を以下に挙げる。

| Use Case | 実施主体 | 寿命延長方法 |
|-------------------------|-----------------------|-------------------|
| MRV/MEP | DARPA/Space Logistics | 軌道姿勢制御代行 推進剤補給 |
| OSAM-1 (旧 Restore-L) | ASA/MAXAR | 同上 |

技術要素（全体の統合設計及びインテグレーションは除く）

システムアーキテクチャの整理（左記に関する公開資料から整理）

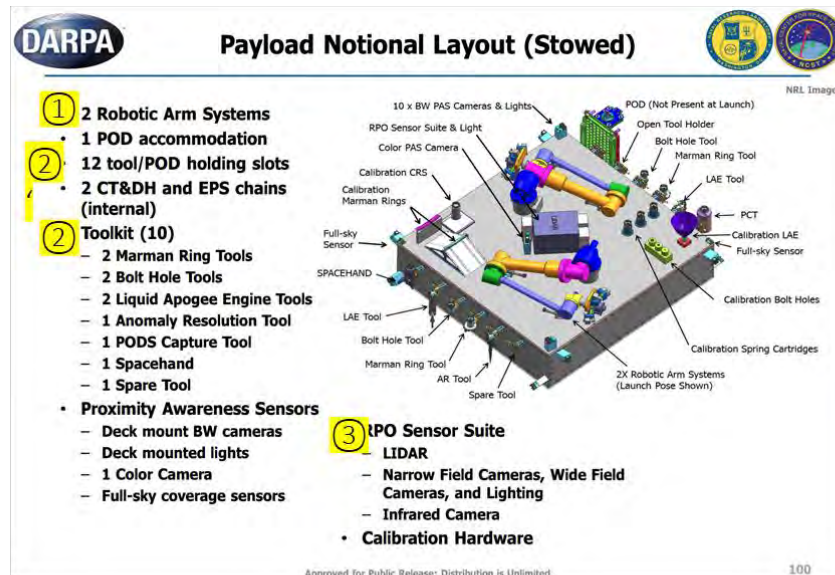


寿命延長におけるロボティクス(2/2)

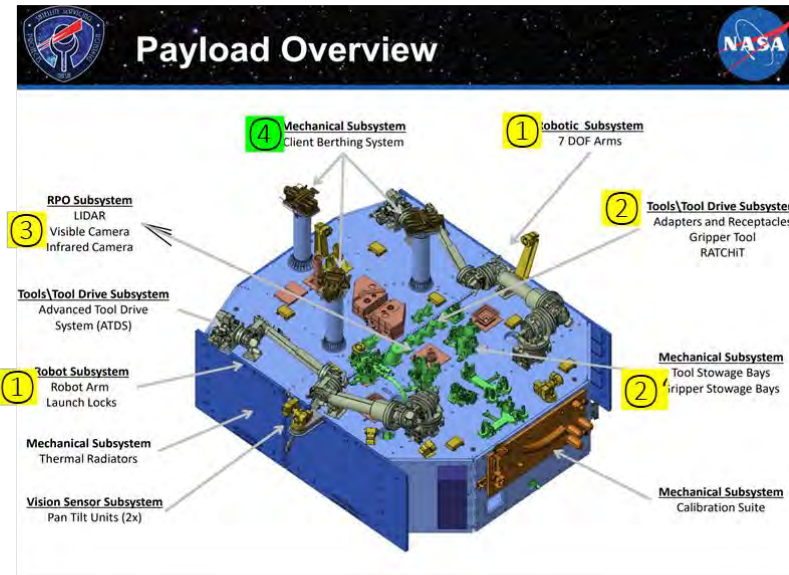
代表2例について、機能配分等を確認した。

- 基本構成は同じ ① 2本のロボットアーム、② 機能に応じたツール交換キット、② ツールスロット
- ③ PROセンサ群 (LIDAR, 可視/照明/赤外カメラ等)
- ADR用に衛星全体を固定し牽引する機能も有するOSAM-1では、④ パースシステムも装備。

DARPA/Space Logistics : MRV robotic module⁽¹⁾



NASA/MAXAR : OSAM-1 robotic module⁽²⁾



(1) Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites (RSGS) Proposers Day <https://www.darpa.mil/attachments/RSGSProposersDaySlideDeck.PDF>

(2) Satellite Servicing, Assembly and Manufacturing Update: Restore-Land and IRMA https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nac_april_2019_reed_dragonfly.pdf

3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

ADR (Active Debris Removal)におけるロボティクス(1/2)

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、非協力的な対象であり、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。

実績・動向

前記「寿命延長」ミッションの「軌道姿勢制御代行」延長上で、軌道変更を加えることで実現できるので、ロボティクスとしての視点では、ユースケースに大きな差異は少ない。

技術要素

前記「寿命延長」に必要な、ドッキング、衛星捕捉等のためのロボティクス技術に加えて以下赤字に示す技術要素が必要となる。

| | | |
|--|---|---|
| Robot Hard System | Robot Arm (Synchronization to Debris' Tumbling Behavior) | |
| | Robot Arm control electronics (filter boxes, motor controller box) | |
| | End-of-Arm Assembly | CAPTURE,TOWING & RELEASE interface (For heavy debris body) |
| | | End-of-Arm Controller (provide digital control to End-of-Arm Tool Exchanger, Light) |
| SW and Processor | Payload CT&DH system (Robotic Processor Modules, Electronics) | |
| | Robot Arm System Flight Software (CAPTURE,TOWING & RELEASE operation software) | |
| Firm docking Capability (For Orbit Transfer operation) | | |

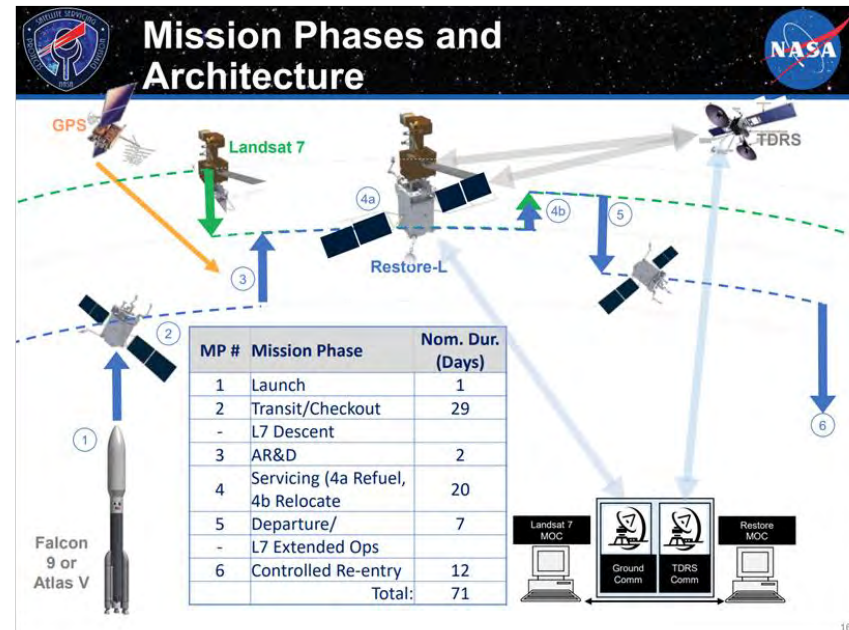
3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

ADR (Active Debris Removal)におけるロボティクス (2/2 Mission 運用例)

ESA (Clear Space)⁽¹⁾



NASA/MAXAR : OSAM-1 robotic module⁽²⁾



(1) <https://clearspace.today/clearspace-secures-a-major-uk-contract-to-help-clean-up-space/>

(2) https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nac_april_2019_reed_dragonfly.pdf

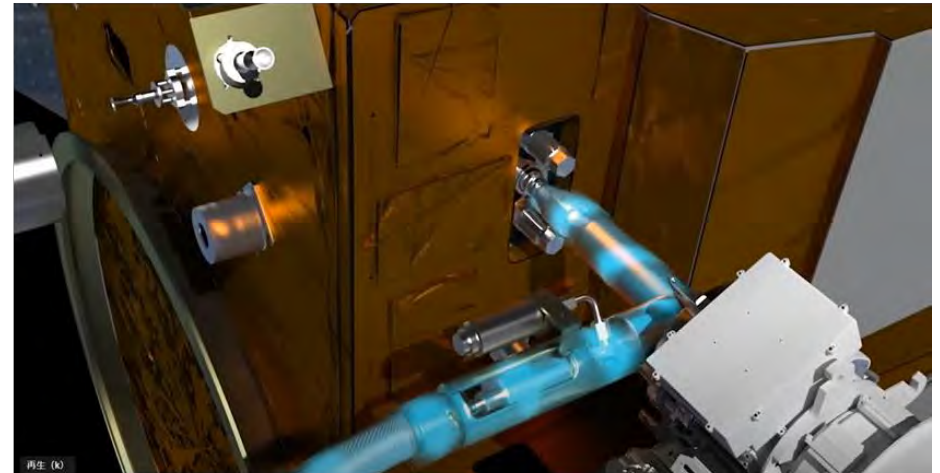
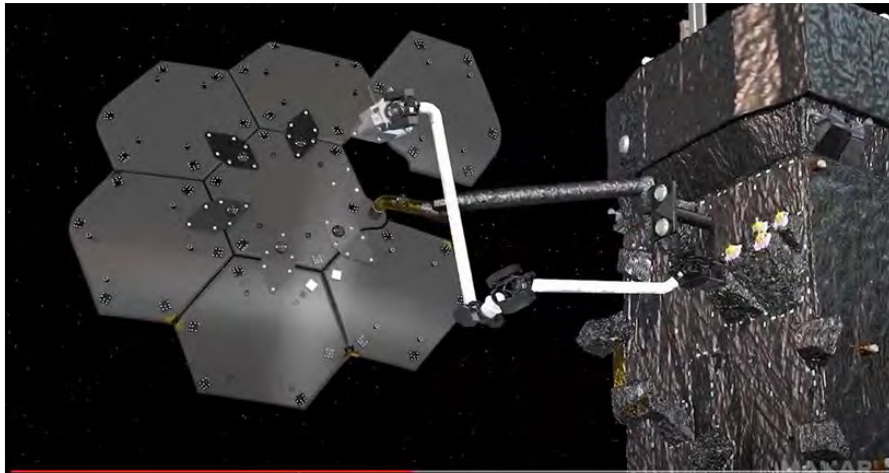
3. 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

22-004-R-011

Assembling in space、Refueling

宇宙ロボティクスの先駆けとして、軌道上での、大型搭載機器組立（大型アンテナ等）、推進剤補給、等の軌道上サービスのデモンストレーション検討も開始されている。

OSAM 1 and SPIDER On orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing ⁽¹⁾



(1) OSAM 1 and SPIDER On orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing Youtube動画より
<https://www.youtube.com/watch?v=gverlOYpf0k>

3. 宇宙探査や軌道上作業の動向 ～有識者のご意見～

22-004-R-011

◆ 調査結果を踏まえた有識者のご意見(サマリ)

- 今後の宇宙開発の検討においては、「**量が質を凌駕する時代**」であることを踏まえ、「**総花から数の集中**」、「**永続的な政府予算による開発の転換**」を戦略的に実現する必要がある。
- このために、官の支援による**量につながるミッションの実証(初期)**が重要であり、この実証を通じて、民間は日本政府含む世界中の政府関係、および民間企業へ製品・サービスを提供できる構造が理想。
- 「量につながるミッション」を検討するうえで、軌道上作業の役割が「通信」、「観測」、「測位」等の宇宙システムに対するサービス提供であること、かつ日本においてはこのユーザが少ないことを踏まえ、**宇宙利用の将来像において軌道上作業がどのように使われるかのビジュアルが重要**となる。
- このことを踏まえると、宇宙基本計画等で規定されている官が提供する実証機会が、**民間のニーズと適合しているか、評価も重要**となる。
- 技術的な観点においては、「日本」としてみると技術蓄積はあるものの、実態はJAXAとプロジェクトを担った企業に技術が分散されて蓄積されており、**横断的・統合的利用が現実的には困難**である。米国ではAerospace Corp.が実証技術の蓄積とそれらを伝承するハブ機能を担っており、日本においても、**今後積み上げる実証が量として有効にカウントするための仕組み**が必要となる。

3. 宇宙探査や軌道上作業の動向、ユースケース、標準化

～強み・弱み分析～

22-004-R-011

➤ RPO技術の成熟と、サービスの幅を広げることにより、軌道上作業の分野での競争力を高める

| 動向分析サマリ | | 重要項目 |
|---|--|---|
| Fact Finding及び海外動向分析 | 現状の日本における動向分析 | |
| | | 強み弱み |
| <p>米国が軌道上作業の拡大に必要な開発、技術実証、政策をリード</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Space Logistics社は2020年よりドッキングによる寿命延長技術を世界に先駆けて実証、サービスを開始 ✓ Orbit Fabの軌道上燃料補給計画が進み、インターフェイスとなる給油バルブの標準化への動きもみられる ✓ OSAM-1/OSAM-2による軌道上の製造・組立の計画が進む ✓ 米国は、官民双方によるISAM関連の技術開発を促進すべく、2022年4月に宇宙におけるサービス・組立・製造（ISAM）に関する国家戦略を発表。技術開発、産業界の育成や国際協力を含む米国のISAM能力開発の上での戦略的なゴールや課題を特定し、官民一体で国際的なリーダーシップの確立を狙う | <ul style="list-style-type: none"> ✓ ETS-VII及びHTVを通じた技術実証(RPO技術を含む基盤技術を保有) ✓ Astroscale社がELSA-d衛星を通じてデブリ除去の技術を実証 ✓ JAXAがAstroscale社を採択しCRD2フェーズIの実証を通じて、軌道上での点検・観測技術も近く実証予定 ✓ J-SPARCの枠組みでJAXAとAstroscaleにて燃料補給サービスの事業コンセプトの共創が始まる | <p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ デブリ除去分野の実証と開発では世界をリードしている <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ デブリ除去以外の軌道上作業に関するユースケースの実証の実績は少ない ✓ 官主導、官民協力での実証計画、標準化への取り組みは欧米に比して遅れている |
| | | <p>[考察]</p> <p>商業的な世界市場の獲得には世界に先駆けて多様なユースケースを実用化（顧客が安心して使える環境を整備）する必要がある。直近では、日本が先行しているデブリ除去以外にも燃料補給や組立・製造が有望であり、この分野において競争していく為に下記の方策を推進していく必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> • 日本保有のRPO技術を強化し安全性(ミッション確実性)を高める • 複数物体の除去や自律的航法誘導灯のコストダウンに資する技術の実証 • 燃料補給、および組立/製造に必要なとなるロボットアームを含めたロボティクスの開発 <p>また、官民が一体となり、軌道上サービスの分野に係る能力の開発を進めるとともに、ユースケースの幅を広げながら、軌道上サービスの利用の拡大につながる投資、政策に関する戦略的策定が必要ではないか。</p> |

3.宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査 ～強み・弱み分析～

22-004-R-011

- 協力物体のみならず非協力物体に対するRPO技術においては世界をリード
- これらを活かした多様なユースケースを実用化し、市場を拡大することが重要

| 動向分析サマリ | | |
|---|--|---|
| Fact Finding及び 海外動向分析 | 現状の日本における動向分析 | |
| | 強み弱み | |
| <p>軌道上作業の基盤となるRPO技術、ロボティクス技術の開発と実証が進む</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 協力物体に対するRPOの実証、および、これと組み合わせたロボティクス技術による以下のようなユースケースが拡大している • アームを使った燃料補給 ✓OSAM-1(米) • アームを使ったクライアントへのドッキングとアームを使ってポッドをドッキングさせる寿命延長 ✓MEV-1/MEV-2(米) • アームを使った組立・製造 ✓OSAM-1/-2 (米) ➤ 上記以外にも、Starfish、Kall Morris、Motive等で安価で汎用的なロボットアームの開発が進められている。 ➤ Starfish Spaceが電気系推進のみで軌道上作業(デブリ除去等)を実施すると発表 | <p>協力物体でのRPO技術やロボティクスはETS-7(1997年)で実証</p> <p>ELSA-d(2021年)により、準協力物体(ドッキングプレート搭載)へのRPO技術を実証</p> <p>CRD2において非協力物体へのRPO技術が実証される計画</p> | <p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 協力物体と準協力物体へのRPOを実証し、非協力物体へのRPO技術の開発においては世界をリード <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 汎用的で安価なロボットアームと用途に応じたエンドエフェクターの開発 ✓ 安価に軌道上作業を提供できる推進系技術 |

| 重要項目 |
|--|
| <p>[考察]</p> <ul style="list-style-type: none"> • 日本においては協力物体のみならず非協力物体に対するRPO技術の開発もリードしており、これらを活かした多様なユースケースを実現するためには、米国が先行しているロボティクス技術を組立・製造、検査、修理等(本ユースケースはSSPS組み立てとも共通要素)が行えるまで進める必要がある。 • 非協力体とロボティクスの技術を獲得することにより、非協力のデブリ除去、故障機の修理・再利用の分野へとサービスを拡大できる。 |

日本の強みを強化し、軌道上作業の拡大を進める為に必要な方策を3つの軸でロングリストを整理

目的/方向性

ユースケース拡大に資する技術の研究開発

- 軌道上での燃料補給や、組立・製造等へとサービスの幅を拡大するには、強み(RPO技術)を強化することで軌道上作業の基盤を確立し、安全性と軌道上サービスへの信頼を向上させて、開発と実証のスピードを上げる。
- コストダウンで競争力を強化し、ロボティクスの開発でサービスの対象を拡大することが重要と考えられる。

法規制、政策

- 法規制・政策により、需要と実証機会の創出をする
- 商業的な軌道上サービスの透明性、安全性を確保し、サービスに対する懸念を払しょく

技術の標準化

- 健全な競争を進め、軌道上作業の安全を確保する運用標準と技術標準を推進し、軌道上サービスを拡大する

ロングリスト

- 強み(RPO技術)の強化
 - ✓ 光学センサー、IR、LiDAR技術、組み合わせ技術
 - ✓ 電気、化学、それらのハイブリッド、水などの推進系の開発
- コストダウン
 - ✓ 低コスト化の為の研究開発
(例:複数物体除去や自律的航法誘導)
 - ✓ 汎用化(作業汎用性、搭載汎用性)の為の宇宙ロボティクス開発
- ロボティクス
 - ✓ 汎用的なロボットアームと用途に応じたエンドエフェクターの開発

- 市場の創設・拡大を後押しするため、官民が一体となり軌道上作業の利用を促進するための政策(規制、インセンティブ)を進める

- 官需の後押しを含めたベストプラクティスの積み上げにより、競争領域でのデファクト化による優位性の確保とともに、サービスの価値につながらない分野の標準化を戦略的に進める
競争領域の例)
 - デブリ除去を広げるドッキングプレートの標準化
 - 用途により交換するロボットアームのエンドエフェクターの標準化

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
6. 定常調査業務
 - 6.1. 定常調査・動向調査
 - 6.2. 適宜調査・事実確認

(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。
- (3) 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。

4.1. 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-011

【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(LCRNS^{*1}/LNS^{*2})、Moonlightを中心に調査、考察を行った。
- 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。LCRNSとして、2024～2026年に2機配備予定。上述とは別な方式とはなるが、NASA(米)、ASI(伊)が共同で進めるLuGREにて月面にてGNSS信号を直接受信する計画がある。
- Moonlight(ESA)も同様であり、2027年に1機配備でIOC^{*3}を開始、2030年頃に計4機配備でFOC^{*4}予定。これに先立ち、Lunar Pathfinderを実証機として、GNSSの信号を月周回軌道で受信する取り組みが計画されている。
- NASA/ESA(民間含む)ともにシステムの共存を前提に、相互運用を行うためにLunaNet Interoperability Specification Document(LNIS)の規定を進めている。(NASA/ESA主導)
- 日本においても、LNSS(Lunar Navigation Satellite System)の構想を検討しており、NASA/ESAと協調を目指し、協議を進めている。
- **上記を踏まえた「強み・弱み」分析**
月周回軌道上に独立した月測位システムを構築することは、スピード・コスト・技術面のハードルが高く、NASA/ESAともに最低限の機能から拡張させる志向が見受けられる。この場合、複数のシステムが機能やカバー領域等を相互に補完しあって共存することになると見込まれ、この中で日本の立ち位置の確保(リージョナル高精度測位サービス等)と他システムとの共存・親和性の確保(システム間の相互補完等)が必要か。

◆ 月近傍の測位方式(代表例)

初期の構想は固まりつつあるが、今後も発展・枝分かれする可能性は十分にあり

現地生成方式

- 月周回軌道に月測位衛星コンステレーションを構築する。航法メッセージは、地球、もしくは月からの測距(レンジング等)により月測位衛星の軌道を決定し生成する方式。
- 現時点で明確な計画はなし

- 月活動が定常化した後、**精度や可用性の観点から構築が進む可能性**がある
 - ✓ 月図に対する精度は他案より良い(座標変換の影響が小さくできる)
 - ✓ 月測位衛星の測距(月面インフラ、衛星機数等)に課題あり

直接受信方式

- 月面、および月周回軌道においてGNSSを直接受信する方式
- LuGRE(NASA(米)/ASI(伊))にて技術実証が試みられる予定(2023年)

- 技術が確立した場合は利用が拡大する可能性はある(ただし、地理的条件で使用できないエリアは存在)
 - ✓ 新たなインフラが不要な点で優位
 - ✓ 微弱電波を受信する必要があり、アンテナ大型化、精度劣化が懸念

中継方式

- 月周回軌道に月測位衛星コンステレーションを構築する。月測位衛星(一部のみも含む)はGNSSを直接受信することで位置決定を行い基準となり、月測位衛星間の相対測位に基づき、航法メッセージを生成する方式。
- **LCRNS/LNS, MoonLight, JAXA検討等のコンセプト**で採用されている

- 現状(月面活動開始フェーズ)の構想としては有力(欧米日ともに選択)
 - ✓ **月周回軌道からの信号でありDoPが良く、かつ新たなインフラが少ない**
 - ✓ 衛星機数でサービスエリアの調整ができ**拡張性が良い**
 - ✓ システム構成は他案より複雑になり新たな技術要素が多い

4.1.1 月測位システムの概要 ~LunaNet~

22-004-R-011

NASAは、南極域周辺からサービス提供をはじめグローバル領域への領域拡大を志向



- 地球との通信、および南極等特定地域向けの中継サービスが主
- PNTは初期サービスを提供
- Interoperabilityは初期フェーズから確立
- ✓ 50Mbps/10Mbpsの高速通信
- ✓ 測位機能を持つ衛星は2機以上
 - 測位精度は100m程度
 - 衛星サイズは150-300kg

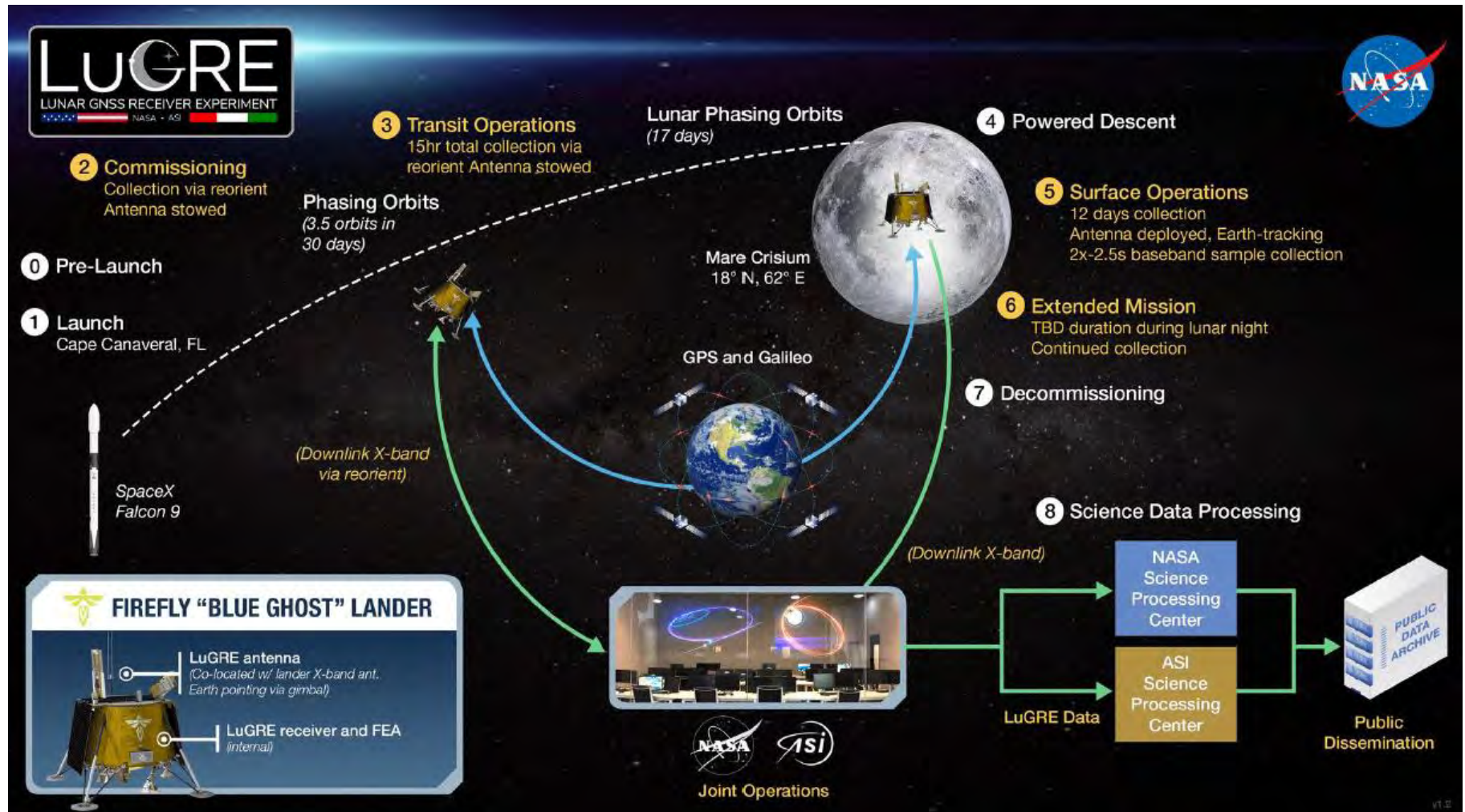
- 南極等特定地域以外のいくつかのポイントで中継サービスを提供
- LNSサービスを提供(Global展開)
 - *GNSSと同等のサービス
- 光通信の導入
- ✓ 150Mbpsまで通信速度向上
 - *リアルタイムロボティクス制御

- 複数の事象者が連携したネットワークとして通信サービスを提供
- 基幹線として光通信を利用
- 月面ネットワークが複数の場所で利用可能

4.1.1 月測位システムの概要 ~LunaNet~

22-004-R-011

- 月遷移軌道、月面でのGNSS受信データを取得(公開予定)
- 月周回軌道のデータは取得しない見込みであり、Lunar Pathfinderとあわせる必要あり



4.1.1 月測位システムの概要 ~MoonLight~

22-004-R-011

➤ Moonlight Initiativeの概念検討のために2つのコンソーシアムを選定

概要

概要

- **ESAの月活動を支える信頼性の高いナビゲーションと通信能力の獲得が目的**
 - ✓ 多様な用途で使われるため、独自に構築することは非効率
 - **産業界のコンソーシアムに委託し個々のミッション費を削減(対費用高価の効率化)**
 - 航法・通信をサポートできれば、**各衛星のミッション(科学機器など)のスペースが拡大**
 - ✓ 今後10年程度で250もの月へのミッションがあり、1000億ユーロの月市場経済(地球上に雇用を生み出す)が生まれると予想(Northern Sky Research社)
- ビジネス、およびサービスモデルやシステムコンセプトの検討に基づいて、次の詳細設計に向けた最大で2つのESA全額出資契約を想定
- ESAは固定客となりシステムの利用・対価の支払いを行うことを担保するとともに、コンソーシアムメンバーはESA以外にもサービス等の販売が可能
- 月着陸船(Argonaut等)において、ゲートウェイとの視線通信がなくても着陸が可能するために利用するなど、多様な用途での利用を想定



©ESA

SSTLを中心としたコンソーシアム

- **月周辺における通信・航法商用月データ中継サービスの調査リーダー**
 - インフラを形成/サービス提供するフェーズA/B1調査を実施
 - 2026年にLunar Pathfinderにて技術実証を計画
- **メンバー**
SSTL, Airbus, SES, KSAT, GMV等

Telespazioを中心としたコンソーシアム

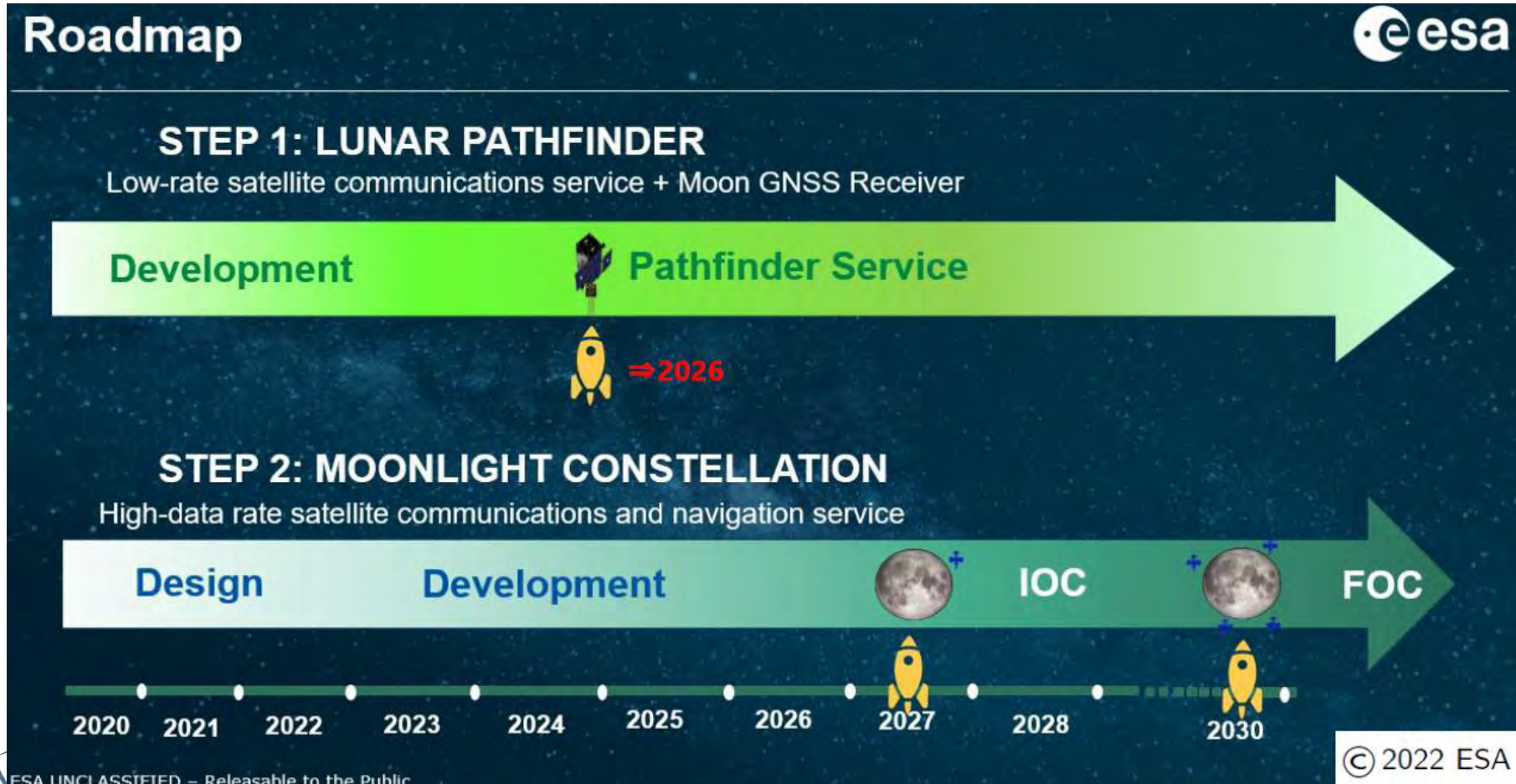
- **月軌道上や月面上にあるローバー、ランダー、月面基地など様々なプラットフォームへのサービスを保証することを目的としたシステム検討**
 - End to Endシステムのアーキテクチャ、コスト、サービスモデルを定義
- **メンバー**
Telespazio, TAS, OHB, Inmarsat, Hispasat, MDA, Algotec, ALTEC, Nanoracks Europe, SEE LAB SDA Bocconi, Politecnico di Milano等
出所)ESA, Moonlight, UK, Telespazio



4.1.1 月測位システムの概要 ~MoonLight~

22-004-R-011

- 2027年に1機配備で初期サービスを開始、2030年頃に計4機配備で開発完了を見込む
- 通信が主であり、測位(PNT)は他のCapability(DEM, IMU等)と組み合わせて使用することを想定
- PNTサービスは、グローバル展開ではなく南極域に限る



4.1.1 月測位システムの概要 ~MoonLight~

22-004-R-011

- NaviCom×2機、Navi×2機の4機体制が基本
- 衛星は米国、日本より大型と見込まれる(RFの通則速度の目標値は欧州が一番高い)



NASAが150~300kg, JAXAも同程度を想定しており、他より大型

© 2022 ESA

4.1.1 月測位システムの概要 ~MoonLight~

22-004-R-011

- ESAのダウンストリーム創出に向けた取り組み
- 商業的とビジネスの量観点を評価、実装に向けたロードマップを作成するための機会・知識・資金を提供

概要

MoonLightのシステム設計進展に伴い、ダウンストリーム創出にも取り組む

ダウンストリーム創出の
取り組み

● ビジネスアイデアを募集

- ✓ 商用として実行可能なサービスコンセプト
- ✓ 市場機会、および顧客/ユーザとの関係性(サービス受益者：月のユーザ, 地上のユーザ)
- ✓ 技術的に実現可能なソリューション
- ✓ MoonLightの通信・測位の付加価値
- ✓ ビジネスとドメインの専門知識を持つチーム

- 通信/測位サービスによるサービスコンセプトを含むビジネスケースの開発および成熟化
- **ビジネスケースの顧客による要望、技術的実現可能性、ビジネス成立性の評価**
- サービスの需要、実現可能性、実行可能性に関する仮説を地上でテストするための概念実証
- **サービスの実装と商業展開のためのロードマップ作成**

ESAが提供するモノ

- 1件あたり最大20万ユーロの資金提供
- ESAの個別コンサルタント、技術/商業的なガイダンス
- ESAが有するパートナーへのネットワークへのアクセス
- ESAブランドの信頼性

TRANSPORT & LOGISTICS



Transport vehicles: artist's impression of Moon base concept. © ESA-P. Carril

HABITATS



Astronaut in front of habitat: artist's impression of Moon base concept. © ESA-P. Carril

FOOD & WASTE MANAGEMENT



Lunar food production and activities: artist's impression. © ESA-P. Carril

HEALTH



Preserving the health of inhabitants: artist's impression. © ESA-P. Carril

ENTERTAINMENT & EDUCATION



Connectivity on the Moon: artist's impression. © ESA-European Space Agency

SMART INFRASTRUCTURE



Smart infrastructure enabling Moon base activities: artist's impression. © ESA-P. Carril



出所) [ESA HP](#)

4.1.1 月測位システムの概要 ～欧米における月測位の連携～

22-004-R-011

➤ LUNAR COMMUNICATIONS RELAY AND NAVIGATION SYSTEMSプロジェクトの管理 文書として“LunaNet Interoperability Specification”を規定

概要

目的

- **相互運用可能なサービスを管理するための標準サービスとインターフェースを定義**するための文書
✓LunaNet
(対象)多くの月探査ユーザー
(システム形態)多様な商業および政府サービスプロバイダのサービスを提供
(アーキテクチャの思想)オープンで進化可能なアーキテクチャ
- 他ネットワークと相互運用が可能な月通信/測位ネットワークの運用のための包括的な仕様

特徴

- **NASAとESAによって作成・レビューされる**
- 個々のプロバイダは、この文書にあるすべてのサービスとインターフェースを提供する必要はないが、**プロバイダの集合体は、記述されているインターフェースとサービスを持つことになる**
→ LunaNet全体として提供するインターフェース、サービスを規定しており、個々のプロバイダは一部を担う
- プロバイダがこの**文書に記載されている以上のサービスやインターフェースを提供することも可能**

[補足]

LunaNetはArtemisプログラムを実現すると同時に、NASAが太陽系内でさらにネットワーク サービスを構築するためのプラットフォームとなることを目指している

構成

大きくは以下の4つのユーザーサービスに分けた章立て(下記に加えプロバイダ to ユーザのインターフェース、プロバイダ to プロバイダのサービス/インターフェースも記載されている)

- 通信サービス
- PNTサービス
→ 追加仕様が策定される予定：ユーザー信号構造の定義、メッセージ詳細定義、計測スキーム・パラメータ、月基準座標系定義、月基準時刻定義
*ユーザー向け位置情報サービス文書も定義予定
- Detection and Informationサービス
- サイエンスサービス



LCRNSのプロマネが承認

4.1.1 月測位システムの概要

～自律航法：JAM(Jervis Autonomy Module)/Rhea Space Activity(RSA)社～

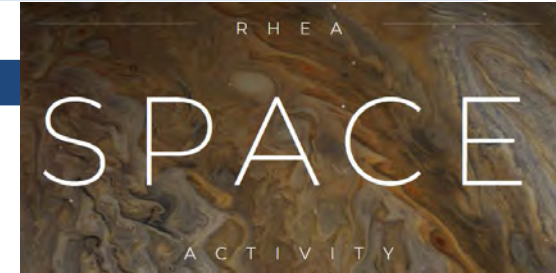
22-004-R-011

➤ 技術の詳細は不明だが、GPSが使えない環境でも自律的な航法が可能となる研究開発事例はあり

概要

概要

- 科学技術産業における天体物理学のスタートアップ企業(米国)
 - ✓安全保障をサポートするために、ハイリスク・ハイリターンの研究開発コンセプトを考案・創造
 - ✓技術分野：赤外衛星, 指向性エネルギー, AI, LIDAR, 宇宙粒子物理学, 小型衛星, シスルナオペレーション, 情報収集, 自律型水中ビークル, F35 Lightning II
 - ✓Techflights(2022年)に選定：9件採択され総額610万ドルを支援
 - 「月経済圏の構築を確実にするインフラと能力」、「地球低軌道(LEO)から静止軌道(GEO)までのサービスとインフラ」、「地球観測アーキテクチャおよび気候変動の監視と対処」の3テーマから9件採用
 - ✓実証内容
 - シスルナ空間での自律軌道決定能力を実証するため、宇宙船の誘導・航法技術を試験
 - Spaceflight社(米)の次世代型軌道間輸送システム「シエルパ(Sherpa)」で飛行予定



技術例

- JAM(Jervis Autonomy Module)
 - ✓宇宙機のオンボード自律航行を可能にするプラグアンドプレイの衛星サブコンポーネント
 - ✓Two-wayレンジングを必要としないため、シスルナ宇宙での操縦のための通信コスト、労力、頻度を大幅に削減
 - ✓シスルナでの衛星コンステレーションのスケラビリティを可能にし、GPSが使えない環境での衛星運用が可能
 - ✓SpaceMicro社とUSAFと空対空レーザ通信ソリューション開発プロジェクトにおいても提携
- LUNINT
 - ✓Lunar Intelligence(LUNINT)をゲートウェイへ提供(宇宙で起きていること、何が起きるかを提供)
- MOONINT
 - ✓月面の情報収集であり、LUNINTのサブセットとなる
- RUBY SKY
 - ✓「極超音速」の検知を支援するために考案されたプロジェクト(脅威に対する全体的な解決策)

4.1.2. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向 ～有識者のご意見～

22-004-R-011

◆ 調査結果を踏まえた有識者のご意見(サマリ)

- JAXAも日本の月測位・通信システムとして、**LNSS(Lunar Navigation Satellite System)の検討**を進めており、ESA/NASAとも協力体制を強化している。JAXAが軌道上実証(@2028年)を検討している計画では、NASA/ESAの衛星からの航法メッセージを日本の衛星からの航法メッセージとあわせて受信することも検討・調整している。
- 一方でInteroperabilityの観点では、NASA/ESAが進めるLNIS(LunaNet Interoperability Specification)の検討に加わるにあたり、日本は月に関する資産(月面リフレクター、レーザ地上局等)が少なく、ハードルの1つになっている。欧米が決めたことだけに従うだけでなく、**積極的に提言するためには、ソフト面の補強や実証を欧米に先行して進める必要がある**。
- また欧米は民間事業者も討議に加わっており、産業創出の観点で日本においても産学官が協力できる仕組み作り(月測位研究会等)が重要となってくると考えている。

4.1.2. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向 ～強み・弱み分析～

22-004-R-011

- 各国ともGNSS関連技術の拡張を志向しており、現段階で要素技術レベルに大きな差異はないと推察
- コンセプト検討からシステム実証までの時間短縮、対等な立場で欧米連携に加わる必要がある

動向分析サマリ

| Fact Finding及び 海外動向分析 | 現状の日本における動向分析 | |
|---|--|--|
| | | 強み弱み |
| <p><LunaNet(米)> 測位システムとしては、構想・技術実証を進めている段階</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 基本構想は中継型システムであるが、LuGREやCAPSTON等、多様な試みがなされている ✓ 座標系等の規格/標準は、LunaNet Interoperability Specification Documentに記載される見込み(NASA/ESA主導) <p><MoonLight(欧)> 基本構想はLunaNetと同様であり、協調路線</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Lunar Pathfinderにて、GNSSの微弱電波を月軌道で受信することを計画 ✓ システム検討と並行して、ダウンストリーム産業の創出、システムへの要求抽出に向けた取り組みが見受けられる ✓ 上述LuGREに搭載しているGNSS受信機はQascom社(伊)の製品を改修して使用 | <p><JAXA> スターダストプログラムを通じコンセプト検討を実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 基本構想はLunaNetと同様であるが、実証プログラム化までは見えていない ✓ NASA/ESAと協調を旨し、Interoperabilityの議論にも加わる見込み | <p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 準天頂補強信号サービスの経験を活かした、月周辺での測位補強信号も検討されている <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 標準化の議論はNASA/ESAが先行しており、遅れて参加する形となる |

重要項目

[考察]

現状は、NASA/ESAともに単独システムですべての需要を満たす計画とはなっていない。また米国がグローバル展開を志向する一方、欧州は南極エリアにとどまっている。(通信と異なり、**地球同様に月測位システムの商用化(システム使用に伴う課金)は不透明だが、ダウンストリーム産業は大きくなると推察**)
このため、**役割・特徴とこれを全体システムの中の一部として、他システムと相互運用・連携できることが重要**となる。

①リージョナル高精度測位サービス

- 月における測位補強技術 (基準点, オンボードPPP等)

②システム間の相互補完

- 配信信号の相互補完 (ソフトウェア制御, マルチシグナル含む)
- 故障対応の自律化

4.1.2. シスルナ周辺における新たな測位システムの動向 ～ロングリスト～

22-004-R-011

日本の研究開発に重要と思われる2つの軸で技術ロングリストを整理

目的/方向性

模倣困難・希少技術の獲得

LunaNetの思想が複数のシステムが共存することであることを踏まえ(機会)、日本の強みである「**高精度測位のための補強サービス**」を目指す。特に初期段階の活動領域となる南極域にサービス領域を限定することでスピーディ、かつ安価に実用の場を提供することが可能となる。

適合性の強化

欧米が構築しつつある相互補完関係(脅威)に加わるために、「**他システムとの相互補完技術**」の獲得を目指す。これは、複数のシステムが機能やカバー領域等を相互に補完しあって共存することを念頭に、正常時に協調するだけでなく、1システムの衛星が故障した場合に、システムを超えて補いあえることも含める。

キー技術の技術ロングリスト

リージョナル高精度測位サービス

電子基準点等を用いた補正(軌道・クロック・信号バイアス等)により精度・収束時間を短縮

- 月における測位補強技術
(基準点、補正方法/システム等)
- 補強サービスに適合した受信機(小型・軽量化)
- オンボードPPP等の自律軌道決定技術

システム間の相互補完

Software Defined技術による配信信号の柔軟性向上、システムレベルでの相互補完による共存・親和性を向上

- デジタルペイロード(配信信号生成のソフトウェア化)
- 月測位信号のマルチシグナル受信機
- システム相互運用・自律化技術

【注記】

上記技術のANDが必要という意図ではなく、目的・目標や優先順位に応じた取捨選択の参考(1例)となるロングリストとして提示

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
6. 定常調査業務
 - 6.1. 定常調査・動向調査
 - 6.2. 適宜調査・事実確認

(調査要求)

- 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を実現するためのパイロード技術について調査しまとめること。
- 現状のパ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。
- 上記調査結果に基づき、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

- 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。
- 上記調査結果に基づき、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

【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、GNSS喪失時の経済損失の大きさもあり、「脅威対策」の重要性が年々増加している。このため次世代GNSSにおいては抗たん性向上が1つのトレンドとなっている。
- さらに、Galileoがグローバルエリアに高精度測位の補強サービス(インターネット経由含む)を開始した。今後は、Horizon Europe(EUSPA)によるアプリケーションの開発とFundamental Elements(EUSPA)によるシステム強化により、利用の拡大がはかれる。
- これに加え、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、Xona, GeeSpaceのような民間企業だけでなく、Galileo, Beidou, NavIC等、レガシーGNSSにおいても低軌道衛星を構成要素に加えることを検討するなど、マルチレイヤー化の取り組みが見受けられる。
- 低軌道衛星を用いたPNTサービスにおいては、自衛星(低軌道衛星)の時刻・位置決定に既存のGNSSを用いる従属型と既存のGNSSから独立して測位サービスを提供する独立型が考えられ、革新的な機能拡張と社会インフラ維持・安全保障のレジリエンス向上の2つの目的に大別される。
- **上記を踏まえた「強み・弱み」分析**
欧米同様に測位システムの持続性向上は、特に社会インフラとして利用するためには必要な条件となる。これに加え、GalileoのHAS開始、レガシーGNSSにおける低軌道衛星の追加等の外部環境を踏まえ、**日本としては、「機能低下・低下時間の低減」に加え、利用拡大の観点では、リージョナル領域での差別化、ダウンストリーム産業と予見性を持った開発が必要か。**

4.2. 次世代GNSSの動向

22-004-R-011

GNSS(GPS)が停止した場合の経済的影響を試算

➤ 1日あたりおよそ10億ドル、30日間継続すると最悪450億ドルを超える損失と試算

Table 14-2. Potential Impact of a 30-Day GPS Outage

| Sector | Specific Analytical Focus | Potential Losses (\$ million) |
|-----------------------------|--|-------------------------------|
| Electricity | Electrical system reliability and efficiency | \$275 |
| Finance | High-frequency trading | Negligible |
| Location-based services | Smartphone apps and consumer devices that use location services to deliver services and experiences | \$2,859 |
| Mining | Efficiency gains, cost reductions, and increased accuracy | \$949 |
| Maritime | Navigation, port operations, fishing, and recreational boating | \$10,411 |
| Oil and gas | Positioning for offshore drilling and exploration | \$1,520 |
| Surveying | Productivity gains, cost reductions, and increased accuracy in professional surveying | \$331 |
| Telecommunications | Improved reliability and bandwidth utilization for wireless networks | \$9,816 |
| Telematics | Efficiency gains, cost reductions, and environmental benefits through improved vehicle dispatch and navigation | \$4,137 |
| Total, Excluding Ag. | If the outage were not to occur during critical planting seasons | \$30,298 |
| Agriculture | Precision agriculture technologies and practices | \$15,122 |
| Total, Including Ag | If the outage were to occur during critical planting seasons | \$45,420 |

【位置情報サービス】
スマホ等を通じたコンシューマサービス

【Maritime】
航法、港湾管理、漁業等

【通信】
無線通信、通信を通じた効率化(配車など)

【農業】
精密の農業等

Note: Range of potential losses is \$16 to \$35 billion, before accounting for losses of about \$15 billion if a 30-day outage were to occur during critical planting seasons for U.S. farmers.

*NIST試算

4.2. 次世代GNSSの動向

22-004-R-011

GPSに対する妨害・干渉は現実には発生、対策が劣後してしまう民生サービスは影響を受けている

ロシアによるウクライナ地域でのGPS信号妨害

事例概要

- 米宇宙軍によると、ロシアからの妨害によりウクライナ軍やウクライナ市民は4月時点でGPSによる正確な位置情報を受け取れていないとしている。[1]
- ロシアの妨害は衛星からの電波を妨害しているのではなく、GPSの精度向上に使われる地上局の電波を妨害しているとされる。[1]
- 欧州航空安全機関によると2/24以降紛争地帯の周辺ではGNSSへのジャミングとスプーフィングが激化しており[2]、その影響でリトアニアの航空会社の航空機が3日間運行中止の対応を取った。[3]
- **米軍はGNSSへの妨害行為に対する対応策を講じているため、東欧地域における偵察行動等の作戦に影響はない**としている。[4]
- ウクライナのハッカー集団はロシアのGNSS (GLONASS) への攻撃を最重要事項の一つにしている[5]一方で、ロシアは戦時中は衛星によるPNTは使えないことを想定して、Loran-Cの研究開発を進めている。ウクライナはロシアのLoran局に現状囲まれている。[6]



図 近隣国で発生したGPS干渉 (2022年3月5日) [7]

GPSにおいては、米軍が使用する軍用コードはジャミングやSpoofing攻撃に対して抗たん性を有しているため、特に妨害の影響を受けるのは民生用コードであり、民間航空機の運用等に支障が生じる。

出所

1. [Newsweek日本版](#)
2. [GPS World](#)
3. [GPS World](#)
4. [Breaking Defense](#)
5. [GPS World](#)
6. [GPS World](#)
7. [Space NEWS](#)
8. Finnish govt agency warns of unusual aircraft GPS interference, <https://www.bleepingcomputer.com/news/technology/finnish-govt-agency-warns-of-unusual-aircraft-gps-interference/>

民間の商用コンステレーションでも電波干渉をグローバルで把握することができるようになっている

HawkEye 360、ウクライナでGPS干渉を検知

事例概要^[1]

- HawkEye360はロシアによる2/24のウクライナ侵攻に先立ち、ウクライナ付近でGPS干渉が継続的かつ増加していることを指摘。
- ロシアの侵攻が始まる少し前にもチェルノブイリ北部のGPS干渉を検知し、「ウクライナの自衛能力をさらに低下させるため、ロシアの軍事作戦に電子戦の戦術が組み込まれていることを確認した」としている。
ただし、ロシアのGNSS「GLONASS」の信頼性が低いことから、ロシア軍自身がGPSによるPNTを必要としており、ウクライナへの侵攻に際してGPSへの電波妨害はさほど広範囲で行われていない、との見方もある。^{[2][3]}
- HawkEye 360は、RF信号を監視し、その位置をピンポイントで特定するために衛星のコンステレーションを運用しており、昨年からGPSの干渉を検知・監視する能力を実証し、現在は関連製品を販売している。
- **GPS干渉が発生を検知すると位置情報を含めてクライアントに通知するため、クライアントは影響を軽減するために迅速に対応することができる。**

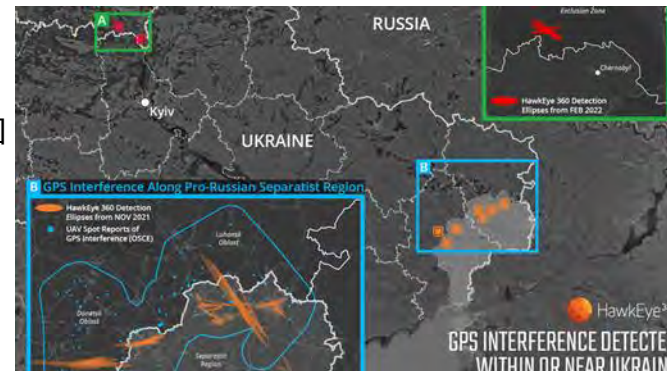


図 HawkEye360社が発表したウクライナ付近で発生しているGPS干渉^[1]

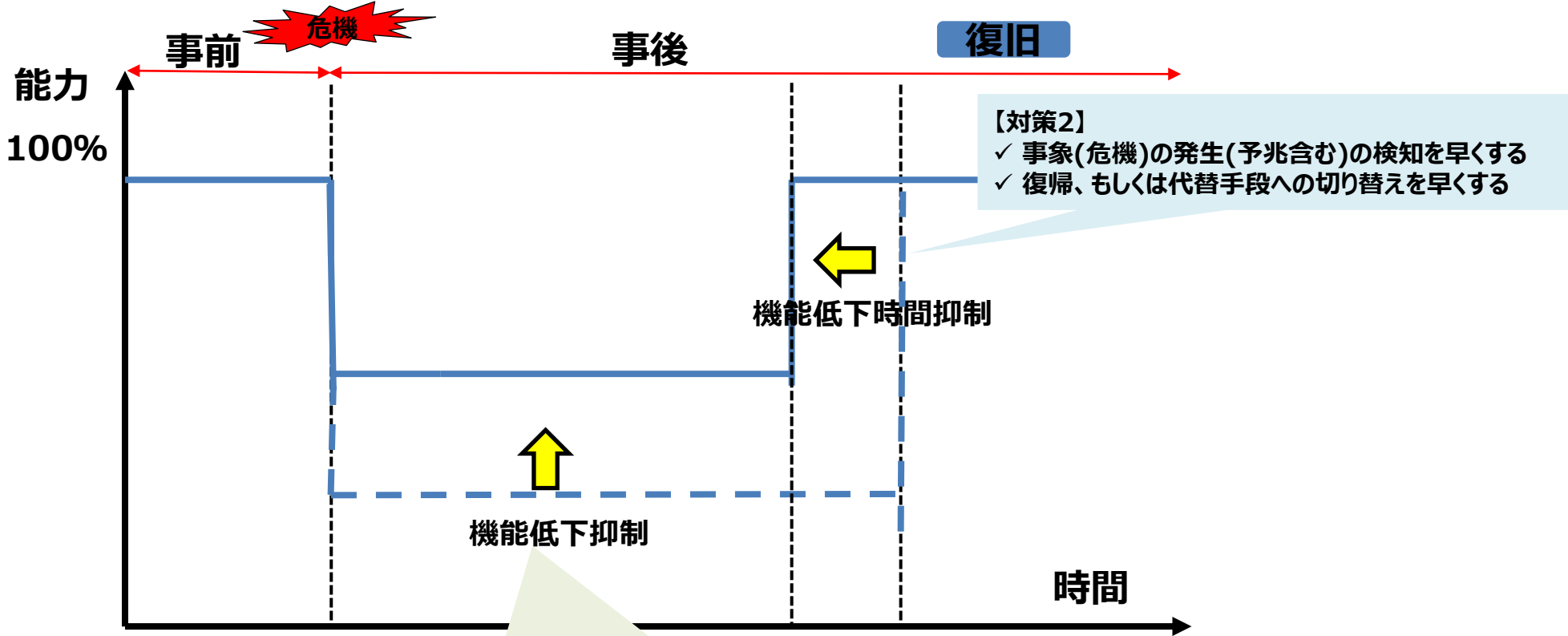
ドローンの誘導制御や航空管制等の社会インフラで広く利用されているGNSS信号に対する電波干渉や妨害をいち早く検出することは、安全保障だけでなく、民間サービスの安全性を確保するために重要な手段となる。

出所

1. Space NEWS
2. C4ISR net, <https://www.c4isrnet.com/opinion/2022/07/22/why-isnt-russia-jamming-gps-harder-in-ukraine/>
3. Business insider, <https://www.businessinsider.com/russia-su34-jets-basic-gps-receivers-taped-to-dashboards-uk-2022-5>

◆ GNSS妨害・干渉発生時の影響と対策のイメージ

極端な宇宙天気現象がもたらす最悪シナリオにおいては通信・放送が2週間断続的に途絶（総務省「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」）



【対策2】
✓ 事象(危機)の発生(予兆含む)の検知を早くする
✓ 復帰、もしくは代替手段への切り替えを早くする

【対策1】
✓ 耐性を強化する
✓ システム内の冗長性により影響を小さくする
✓ 複数システム併用により影響を軽減する



◆ 次世代GNSSを実現するためのパイロード技術の動向

パイロードはSDPによる柔軟性向上に加え、システムレベルでの抗たん性強化が見受けられる

対策動向

機能低下抑制

【耐性を強化する】

- 多周波利用：S帯(NavIC)等の他周波利用
- 非公開信号：ミリタリコード(GPS), PRS(Galileo), 公共専用信号(QZSS)
- 認証サービス：Chimera(GPS), OSNMA(Galileo), 航法メッセージ認証(QZSS)

【システム内の冗長性により影響を小さくする】

- 機数冗長：Galileo, GPS等GNSSは30機程度で衛星の冗長性を確立, NavICは11機体制を目指す
- 軌道冗長：GNSSでは、MEOとIGSO, GEOの組み合わせがあるが役割分担の目的が主
*NTS-3(米)は静止軌道に投入し軌道組み合わせの効果も検証予定

【複数システム併用により影響を軽減する】

- Alternative PNT/低軌道衛星群, 5G測位等を併用(米・欧)

機能低下時間抑制

【事象(危機)の発生(予兆含む)の検知を早くする】

- 干渉の検知・警報システム：Harmonious Rook(米), Hawkeye360等
- ユーザによる早期検知・通報・情報共有

【復帰、もしくは代替手段への切り替えを早くする】

- デジタルペーロードによる照射領域・強度・周波数・変調方式の変更(GPS-IIIF、Galileo第二世代)
- Software Defined受信機(NTS-3(米))

◆ 次世代ペイロードの動向

Navigation Technology Satellite3 (NTS-3) (米国)^[1]

- 次世代GPSに向けた高度な技術を実証するための研究プロジェクト (2023年の打上予定)

<特徴>

- L3Harrisが開発する、ORDWG (On-Orbit Digital Waveform Generator) とされる軌道上で再プログラム可能なデジタル信号発生器を含むフルデジタルペイロードにて、電子的な脅威に遭遇したときにオペレーターが新しい信号を迅速に展開できるように実証
- リアルタイムで同時に複数のエリアに異なるレベルの信号送信が可能



NTS-3のイメージ図^[1]

Galileo 2nd Generation (欧州)^[2]

- 2021年12月にThales Alenia Space(伊)とAirbus Defence & Space(独)の2社と14.7億ユーロ(それぞれ6基ずつ計12基の契約)で契約し2024年に打ち上げ予定。

* 1st : 1機あたり40M€(750kg) → 2nd : 1機あたり120M€(2.0t)

<特徴>

- フルデジタルペイロードにて軌道上再構成が容易にでき、素早く変わるユーザーニーズに対応



Galileo 2nd Generationのイメージ図^[2]

[1] <https://afresearchlab.com/technology/space-vehicles/successstories/nts-3>

[2] https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/05/Galileo_Second_Generation

4.2. 次世代GNSSの動向

22-004-R-011

◆ 次世代GNSSを実現するためのパイロード技術の動向 – QZSS(7機体制)1機喪失に対して

➤ 衛星レベルでは対応が困難であり、予兆検知に加え、システムレベルでの補強が重要

次世代で特に重要となる施策であるものをピックアップして青文字としている。

| 想定されるリスク | 影響 | 考えられる抑制策 | |
|--|---|----------|--|
| <p>太陽活動 ジャミング/スプーフィング その他衛星異常</p> <p>↓</p> <p>衛星1機喪失</p> <p>↓</p> <p>QZSS/認証付きPNT 機能低下</p> | <p>1. DOP*1およびアベイラビリティ劣化</p> <p>2. 再配置される衛星の軌道遷移に伴う劣化</p> | 機能低下抑制 | <p>【耐性を強化する】：NA(衛星信頼性向上等)</p> <p>【システム内の冗長性により影響を小さくする】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 衛星数確保と軌道配置 -NavIC : 7機から11機に衛星数を増やし、4つの8字を形成 -GPS : 3軌道面に8機をベースラインとし計30機稼働 -Galileo : 3軌道面に8機+予備2機配置予定 |
| | | 機能低下時間抑制 | <p>【複数システム併用により影響を軽減する】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 他の認証付きサービスの利用(受信機による対応) <p>【事象(危機)の発生(予兆含む)の検知を早くする】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 異常の予兆検知(宇宙天気予報なども含む) <p>【復帰、もしくは代替手段への切り替えを早くする】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 再配置不要とするデジタルパイロード(ビームフォーミング等) ● 推力の大きな推進系等による軌道遷移時間の短縮*2 ● 軌道遷移中も継続したPNT信号配信 |
| <p>太陽活動 ジャミング/スプーフィング その他衛星異常</p> <p>↓</p> <p>衛星1機喪失</p> <p>↓</p> <p>CLAS機能低下</p> | <p>1. アベイラビリティの劣化大</p> | 機能低下抑制 | <p>【耐性を強化する】、【システム内の冗長性により影響を小さくする】：同上</p> <p>【複数システム併用により影響を軽減する】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 補正情報のインターネット配信(Galileo/HASインターネット配信) |
| | | 機能低下時間抑制 | <p>【事象(危機)の発生(予兆含む)の検知を早くする】：同上</p> <p>【復帰、もしくは代替手段への切り替えを早くする】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● MADOCAやHAS(Galileo)への切り替え(受信機による対応) <p>*サービスレベルのインターオペラビリティ</p> |

*1) DOP(Dilution of Precision) : 軌道配置による劣化指数)

*2)Galileo第二世代は、デジタルパイロード+電気推進による再配置で効率化と推察

4.2. 次世代GNSSの動向

22-004-R-011

➤ Galileoも準天頂システムに続き、無償で高精度測位サービス提供を開始

概要

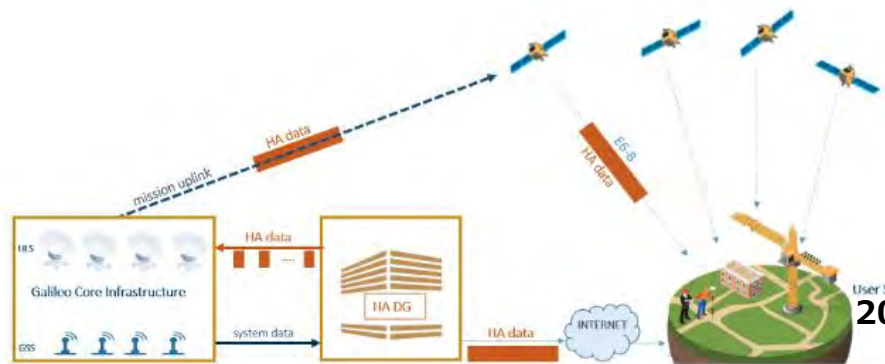
トピック

- 世界初のグローバルエリアを対象としたPPP(Precise Point Positioning)サービスであるHASの無償サービスを開始(2023.1, Phase.1)
- 一般的な使用条件下で水平25cm未満以下の精度と公表

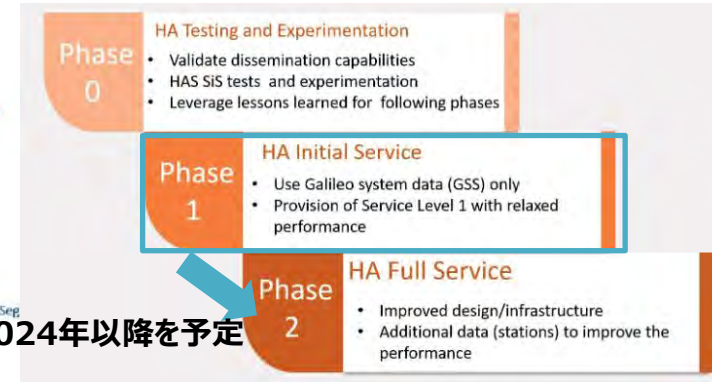
特徴

- Galileo信号(E6-B)に加えインターネットを通じた情報は配信(無償)
- EUSPA主導で、**Horizon Europe**や**Fundamental Elements**プログラムにより、**ダウンストリームの活性化、およびシステム強化両側面で開発**が進められている
- 現状はService Level.1であり、**水平20cm, 垂直40cm(95%), 収束時間300sec**であるが、**Phase.2(フルサービス)**となると、**収束時間が100sec程度**と劇的に短くなる計画

構成



*インターネットを通じた配信



4.2. 次世代GNSSの動向

22-004-R-011

- Galileo/QZSSの比較：仰角が落ちる日本以外ではQZSSが性能が劣後
- 国内の優位性確保とアジア圏含む伊グローバルエリアの観点でインタオペラビリティ等の協調が重要か

| | Galileo*1 | | QZSS*2 | | |
|---------------------|--|-----------------------------------|----------------|------------------|----------------------------|
| | Phase I 2022+*4 Initial Service | Phase II 2024+ Full Service | Domestic | Overseas | |
| | | | | Phase I 2024~ | Phase II 2028~ |
| Coverage | Global | Global | Japan | Asia Oceania | Asia Oceania |
| Authentication | × | ○ | × | ○ | ○ |
| Accuracy(H) | 20cm (95%) | 20cm (95%) | 6cm (95%) | 30cm (95%) | TBD |
| Accuracy(V) | 40cm (95%) | 40cm (95%) | 12cm (95%) | 50cm (95%) | TBD |
| Convergence Time | 300sec | 300sec 100sec*3 | 60sec (95%) | 1800sec (95%) | 600sec*2 (95%) (TBC) |
| Internet Service | ○ | ○ | × | × | × |

4.2. 次世代GNSSの動向

22-004-R-011

◆ 新しいPNTサービスの動向調査

➤ 民間システムに加えGNSSの一部としてサービスを補完・補強する動きが見受けられる

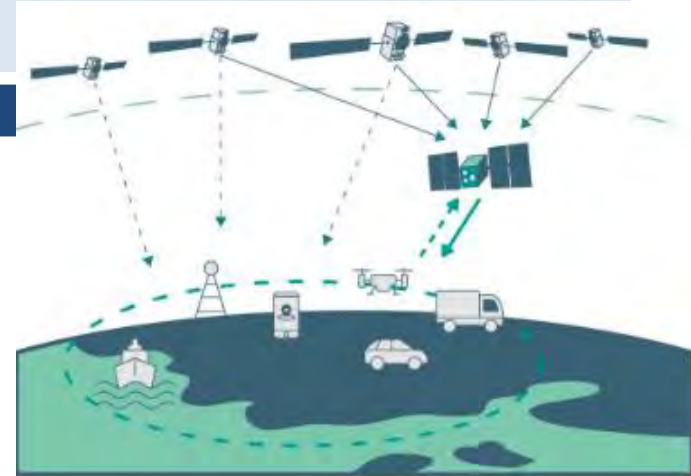
| LEOコンステレーション利用形態 | | 特徴 | 備考 |
|-----------------------------|---|---|--|
| a)GNSSの一部としてPNTサービスを補完・補強 | BeiDou | <ul style="list-style-type: none"> ● 既存GNSSとの適合性・相互運用性 ● GNSS補完 (DOP向上) ● 通信機能を利用したGNSS補強 (精度、インテグリティ、セキュリティの向上) | <ul style="list-style-type: none"> ● L/S/C帯などを検討 ● 実証衛星打ち上げ済。整備計画中 |
| | Galileo | | <ul style="list-style-type: none"> ● L帯に加え新たな周波数を検討中 ● 実証衛星打ち上げを計画 |
| | NavIC | | <ul style="list-style-type: none"> ● OneWebの利用も検討 ● 構想段階 |
| b)民間独自システムによるサービス | PULSAR/Xona(米) (PNT/測位補強) | <ul style="list-style-type: none"> ● 高精度・セキュリティ ● オートノミー向け専用端末/グローバルリーダ(Hexagonと提携) (小型・軽量・低消費電力・低価格) | <ul style="list-style-type: none"> ● 独自周波数 (C帯) に加え、L帯も利用し既存GNSSとの互換性を持たせる計画 ● 実証段階(実証機打ち上げ済み) |
| | GeeSAT/Geespace(中) (測位補強) | <ul style="list-style-type: none"> ● 高精度+通信 | <ul style="list-style-type: none"> ● 自動運転などをターゲット ● 実証段階(実証機打ち上げ済み) |
| c)民間通信コンステレーションを利用したPNTサービス | Iridium-Satellite Time and Location (STL) | <ul style="list-style-type: none"> ● 専用サービス端末 | <ul style="list-style-type: none"> ● L帯, 精密時刻同期サービス ● サービス提供中 |
| | OneWeb第二世代 | <ul style="list-style-type: none"> ● 専用通信端末 | <ul style="list-style-type: none"> ● Ku帯 精度 1 m程度 ● 構想段階 |
| | 5G衛星 (Starlink Gen.2等) | <ul style="list-style-type: none"> ● スマホによる5G測位 | <ul style="list-style-type: none"> ● S帯 ● 構想段階 |
| | 通信衛星等の信号利用 (5Gや通信衛星の信号等を利用するSoOp) | <ul style="list-style-type: none"> ● 専用端末 | <ul style="list-style-type: none"> ● 精度は 10 m程度 ● 構想段階 |

◆ 新しいPNTサービスの動向調査(Galileo/ESA, EU, EUSPA等に関する動向)

➤ LEO-PNTの技術実証に加え、通信とのシナジーをはかる動きあり

概要

- **LEOコンステレーションを利用したPNTプランを発表(2022.10)**
 - ✓GNSS(Galileo)の補完、補強
 - L帯ではない新たな周波数帯を利用
 - 地上端末との2Way通信機能
 - 原子時計は搭載せずGalileo信号を利用
 - ✓6機程度の試験衛星を打ち上げる計画
 - 70kg以下の衛星を3年以内に打上げ予定
- **LEO-PNTを含むナビゲーションポートフォリオを承認(2022.11)**
 - ✓ESA加盟国から3億5100万ユーロ拠出(FutreNAVプログラム)
- **IRISS*1とのシナジーを活用し、LEO-PNTに関する新たなミッション開発も検討(2022.12)**
 - ✓IRISS : EUSPAのプログラムであるGOVSATCOMをベースに開発を進める
 - 欧州域内に対して、セキュアで抗たん性のあるインターネットサービスを提供 (EUの重要インフラとして合意, GEO/MEO/LEO含むマルチオービット)
 - 24億ユーロの予算を計上
 - 2025~2027年に低軌道衛星170機程度を打ち上げる予定



— LEO PNT satellites will operate in low Earth orbit

トピック



IRISS, the new satellite constellation based on GOVSATCOM, will provide secure satellite

*1) IRISS:Infrastructure for Resilience, Interconnection & Security by Space



4.2. 次世代GNSSの動向

22-004-R-011

◆ 新しいPNTサービスの動向調査(GNSSによるLEO-PNT構想)

➤ PNTの配信から双方向伝達により、自動運転等の分野では特に利便性が向上

| | | LEO-PNTサービスの特長 | |
|------------|----------|---------------------------------------|--|
| | | L帯サービス（従来型） | +通信チャンネルサービス |
| 性能 | 精度 | ○ ✓ DOP向上 ✓ 収束時間短縮 ✓ マルチパス除去 | ◎ ✓ +大容量補強情報 |
| | 可用性 | ○ ✓ 可視衛星数増 | ◎ ✓ +電波強度大（屋内浸透） |
| | 耐スプーフィング | △ ✓ 1WAY認証サービス | ◎ ✓ 2WAY認証 |
| | 耐ジャミング | △ ✓ 複数の周波数利用 | ◎ ✓ +電波強度大 |
| 端末 | | ✓ 従来端末と互換性 | ✓ 専用端末（電力消費大） |
| 想定されるマーケット | | ● Mass Market スマートフォン… | ● Safety of Life 船舶/鉄道/航空… ● Professional 農業/土木建設/時刻利用… |

△：従来レベル ○：改善 ◎：著しく改善

4.2. 次世代GNSSの動向

◆ 新しいPNTサービスの動向調査(XONA Space Systems/PULSAR)

➤ ダウンストリーム産業のグローバルリーダーと提携して進めている点が大きな特徴

概要

概要

- 低軌道衛星を用いた測位サービス提供を目指す民間企業
- 2022.5 : 実証機(Huginn)を打上げ
- 2022.8 : 2号機開発にむけてLockheed Martin含むベンチャーキャピタル等から1500万ドルを調達 (TOYOTAも一部出資)
- HEXAGONと提携してオート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)

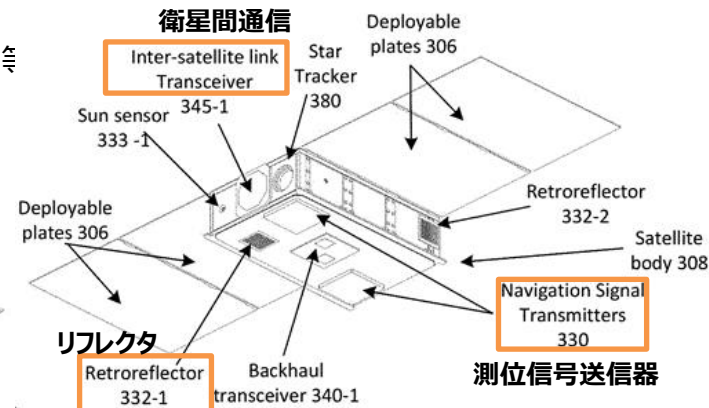
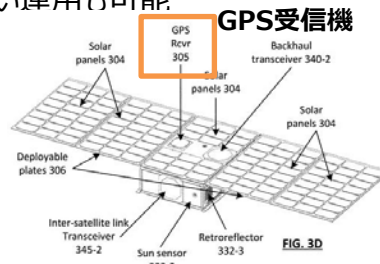
マイルストーン

- 2022年 : 試験測距、時刻同期、軌道決定を軌道上実証
- 2024+年 : Block I (視野に衛星1機) ⇒ GNSS補正と強化、高精度時刻、粗位置決定
- 2026+年 : Block II (視野に衛星多数) ⇒ 高精度測位、GNSS補正と強化

特徴

- Resilience and Accuracy, GNSS Enhancements
- Affordable, Security, GNSS Independent
- 低軌道を活かした信号強度(信号強度はGNSSの100倍で10倍程度精度向上が見込まれる)
- GNSSのエラー補正, 捕捉支援(収束時間短縮), セキュリティモニタ
- Low SWaP-C(衛星だけでなく受信端末含む)
- スプーフィング・ジャミング耐性強化に加え、最新のサイバーセキュリティ
- 2周波、マルチスペクトル信号
- 必要に応じて既存GNSSに依存しない運用も可能

出典) XONA1, XONA2



◆ 新しいPNTサービスの動向調査(Synchrocube)

➤ PNTのうち、通信などクリティカルな影響を与えるタイミングサービス(時刻同期)のみ提供

概要

概要

- GNSS航法信号が使用できないときに同期機能を提供するために、航法システム（GNSS：GALILEO；GPS）の補完的なソリューションを提供することを目的(GNSSを補完する高精度セキュア時刻基準を提供)
 - ✓ フランスによる低軌道からの高精度・高信頼度時刻基準提供プロジェクト
⇒ 6Uサイズの低軌道衛星でサービスの技術実証を行う(2023年打上げ予定)
 - ✓ ターゲットは、電気通信、エネルギー、高度交通システム、ファイナンス業界等

プレイヤー

- Syrlinks社 : 衛星ペイロード、および地上受信機(フランス, プルターニュ)
*2022.11 : Safran Electronics&Defenseに買収
- U-Space社 : 超小型衛星プラットフォーム&軌道上デモ(フランス, トゥールーズ)
- ANYWAVES社 : 衛星コンステ用アンテナ(フランス, トゥールーズ)
- Comat社 : 宇宙機用機器(フランス, トゥールーズ)

出典 <https://www.syrlinks.com/en/spatial/synchrocube>
<https://www.u-space.fr/?lang=en>
<https://anywaves.eu/>
<https://comat.space/en/about/who-are-we/>






ペイロード基盤イメージ

4.3. 基準時刻システムの動向

多様な原子時計によるクロックアンサンブル

- Galileo第二世代：ルビジウム(Orolia社)×3, 水素メーザ(Leonardo社)を統合した原子時計×2
- NTS-3：ルビジウム, セシウム, 電圧制御水晶発振器を搭載(GPSはルビジウム, セシウム)

GNSSが使用している原子時計

| NAVSTAR GPS  | GALILEO  | ГЛОНАСС  | 北斗衛星導航系統  | 準天頂衛星システム IS-QZSS  | IRNSS इसरो isro  |
|--|--|---|--|---|---|
|  |  |  |   |  |  |
| Rubidium Cesium | Hydrogen Maser Rubidium | Cesium H-Maser* | Rubidium (1) Rubidium (2) | Rubidium | Rubidium (1) Rb (indigenous) |

絶対数は多くないが、GNSSに搭載品以外にも製品、および研究開発がなされている

● miniRAFS(Orolia社)

➢ 高信頼性ルビジウム原子周波数基準

Key Product Spec

- Volume
- Thermal sensitivity over -20°C to 60°C
- Stability
- Long term stability
- Power supply with DC-DC optional conv.
- Output frequency

0.39 liters
 $< \pm 7 \times 10^{-13} / ^\circ\text{C}$
 $< 2 \times 10^{-12} / 1000\text{sec}$
 $< 3 \times 10^{-11} / \text{month} / < 1 \times 10^{-9}$ over 10 years
 compatible with 28V or 50V power bus
 10MHz

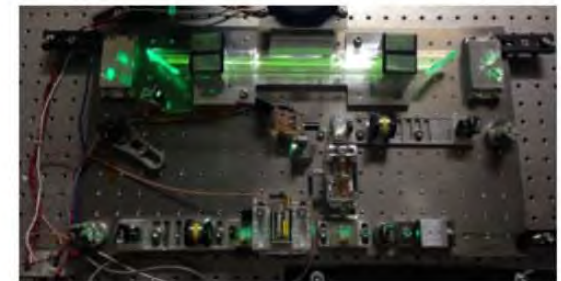
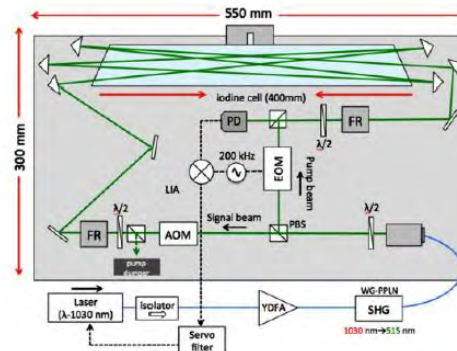


iSpace+™ miniRAFS Spec
 High-Reliability Rubidium Atomic Frequency Source



● ヨウ素安定化レーザー(電通大)

- 衛星搭載光周波数基準
- ✓ BBMにて放射試験等を実施
- ✓ 熱・構造設計に着手済み



4.4. 次世代GNSSの動向 ～強み・弱み分析～

- 抗たん性、システムレジリエンスの強化は社会インフラとしての利用拡大には重要
- 産業振興の観点からは、Galileo相互運用やダウンストリーム産業との連携が必要か

動向分析サマリ

| Fact Finding及び 海外動向分析 | 現状の日本における動向分析 | |
|---|---|--|
| | | 強み弱み |
| <p><抗たん性> 各国ともに安全保障に加え、機能低下時の経済損失の大きさもあり、次世代GNSSにて強化、代替手段確保を推進</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ GNSSが失われた場合1日あたり10億ドル程度の損失が見込まれている ✓ GPS/Galileoともに、フルデジタルペイロード、認証機能等により機能低下、および低下時間の抑制をはかる <p><高精度測位> GalileoがHAS*1を配信開始(測位信号(E6-B)に加え、インターネットを通じた補正情報を配信)</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ グローバルシステムとしては初の高精度補強サービス。受信機開発も顕著。 <p><新たなPNTサービス> 低軌道衛星を用いた、測位と通信の融合による価値創造が見受けられる</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 民間の取り組みに加え、Galileo, Beidou, NavIC等の現存システムでも検討が進められている | <p><抗たん性> 7機体制化に加え、認証システムの開発を推進</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 7機体制による常時単独測位実現に向けた開発を推進 ✓ 抗たん性/信頼性強化に向けた開発を中長期的に取り組む <p><高精度測位> 世界に先駆け高精度補強サービスを提供、日産、NEXCO東日本のASNOS等、CLASを用いた運転支援システムを実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 活用事例はあるもののユーザ数は限定的 <p><新たなPNTサービス> 顕著な取組みは見受けられない</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 低軌道衛星を用いる場合は、グローバルサービス化が前提 ✓ 国内通信コンステが不在 | <p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 高精度補強サービスの提供・運用実績 ✓ 災危通報、安否確認などのユニークなサービス <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 市場規模の小ささ、およびグローバルリーダの参入が少ない(端末・アプリの競争力不足) |

重要項目

[考察]

「衛星測位に関する取組方針(内閣府)」記載の方針を前提とし、下記3つの観点で重要項目に対する考察を示す。

①社会インフラサービス

社会インフラを担うには衛星1機故障に伴いサービスレベルが低下する7機体制ではリスクが大きい。諸外国が進める個々の機能強化に加え、衛星機数増加等によるシステムレジリエンスの強化が必要か。

②高精度測位サービス

先行者利益があるとはいえ、Galileoの高精度・短い収束時間のサービスにユーザが流れる可能性がある。リージョンナルの特性を活かした、差別化、もしくはGalileoとの協調(相互運用)が必要か。

③新たなPNTサービス

測位だけでなく、通信も含めダウンストリーム産業(自動車等)との連携・予見性を持った開発の可能性を検討することが必要か。

*1) HAS:High Accuracy Service

4.4. 次世代GNSSの動向 ～ロングリスト～

22-004-R-011

日本の研究開発に重要と思われる3つの軸で技術ロングリストを整理

目的/方向性

社会インフラサービス

常時単独測位が可能となる7機体制以降を想定し(機会)、衛星単機の機能・性能向上に加え、測位システムとしての抗たん性、レジリエンスを強化することで社会インフラとしての定着を目指す。

高精度測位サービス

GalileoのHAS開始を1つの機会とし、Galileo等の他システムも1つとした多様なチャンネルでの補強情報の配信・連携により、精度向上、および利用の拡大(ユーザ便益向上)を目指す。

新たなPNTサービス

複数のシステム検討で測位と通信の融合が見受けられることも視野に入れ、自動車・建設業等の人口密集地以外でも通信×測位を必要とするダウンストリーム産業と連携した、災危通報、安否確認に次ぐ新たなPNTサービスを目指す。

キー技術の技術ロングリスト

機能低下・低下時間の低減

- デジタルパイロード(柔軟性向上)
- ジャミング・スプーフィング検知・通報技術
- 衛星間通信等の運用関連技術
- 時刻・位置決定技術
- 衛星機数の増加、Alternative PNT

リージョナル差別・グローバル協調

- ソフトウェア受信機/チップ(グローバルスタンダード化)
- 地上システム(5G網等)との連携技術
- 競争力のあるアプリケーション

予見性を持ったサービスの拡大

- 公共信号含む配信信号の増加
- 5Gや通信コンステの信号等を利用するSoOp^{*1}技術
- サイバーセキュリティ技術

*1) SoOp : Signal of opportunity

【注記】

上記技術のANDが必要という意図ではなく、目的・目標や優先順位に応じた取捨選択の参考(1例)となるロングリストとして提示

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
6. 定常調査業務
 - 6.1. 定常調査・動向調査
 - 6.2. 適宜調査・事実確認

(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

【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(LCRNS)、Moonlightを中心に調査、JAXA殿の検討結果も踏まえ考察を行った。
- 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。
- NASAにおいてはLADEEから継続してORION(ARTEMIS II)へ搭載する光通信端末を開発している。
- また、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。
- Lunanetの構想がNetwork of Networkであること踏まえると、多様な商用プレイヤー、政府が構想立ち上げ、実証を繰り返しながらアーキテクチャの改定が行われるのではないかと考えられる。
- **上記を踏まえた「強み・弱み」分析**
欧米ともに商業市場化を見据え、サービス調達を含む商用プレイヤーの利用が特徴としてある。一方で、需要は官需が先行しており、かつ開発に際してはNASA/ESAの技術が中心として見受けられており、この中で**日本が保有するシステムの特徴を活かした立ち位置の確立(大容量通信等)、もしくは産業基盤の強化(小型・軽量化)や自律性の確保(インターオペラビリティ技術)等の米国のArtemis計画、欧州の産業競争力強化に準ずる目的に応じた開発が必要か。**

5. 遠距離高速通信システムの調査 ~LunaNet~

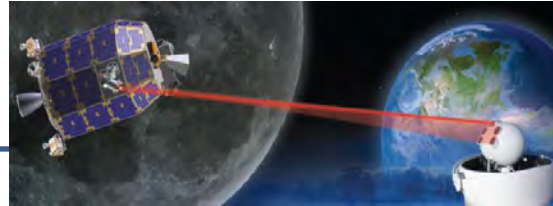
22-004-R-011

◆ 光通信端末(MIT LL/NASA) LINCOLN LABORATORY MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

- 継続的な開発による技術蓄積が見受けられる(2009年から開発が継続している)
- モジュール化・スケーラブル化による再利用性向上・設計効率化が見受けられる

【LLCD*1】 2009~2013年(打上げ)

- MAX622Mbpsの通信(月周回-地上)を実現
- 光学部、モデム、制御部の3モジュール構成
- 重量は約30kg



(*1)Lunar Laser Communications Demonstration

【MAScOT*3】 2013~

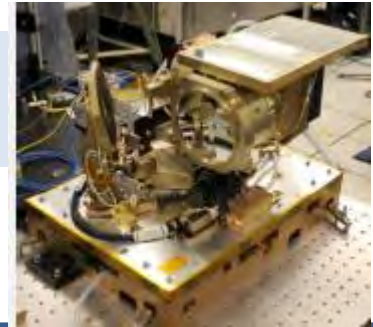
- LEO(ILLUMAT-T*4)、シスルナ(O2O*5)と幅広い用途(モジュール化, スケーラブル)
- 光学部、モデム、制御部の3モジュール構成(光学部の構成要素をモジュール化)

(*3) Modular, Agile, Scalable Optical Terminal

(*4) Integrated LCRD Low Earth Orbit User Modem and Amplifier Terminal

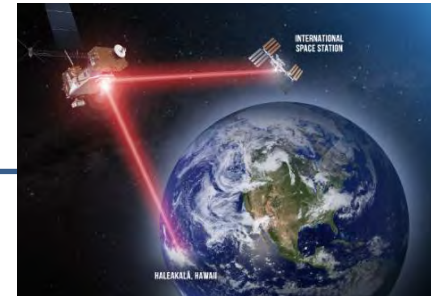


出所) [1]MIT LL, [2]LADEE



2011~2021年(打上げ) 【LCRD*2】

- STPSat-6に搭載されて打上げ済み
- 1.2Gbpsのデータ中継ミッション(GEO衛星搭載端末)
- マルチレートモデムを新たに実装



(*2)Laser Communications Relay Demonstration

NASAとしては、高感度(火星等)に適するHPE(LADEE)と高速化に適するHDR(LRRD)両方とも技術を保有

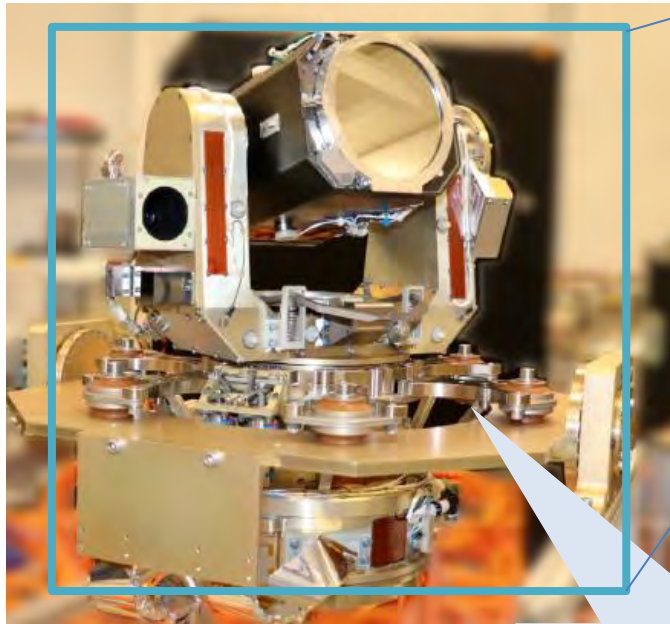
5. 遠距離高速通信システムの調査 ~LunaNet~

22-004-R-011

◆ 光通信端末(MIT LL/NASA) LINCOLN LABORATORY MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

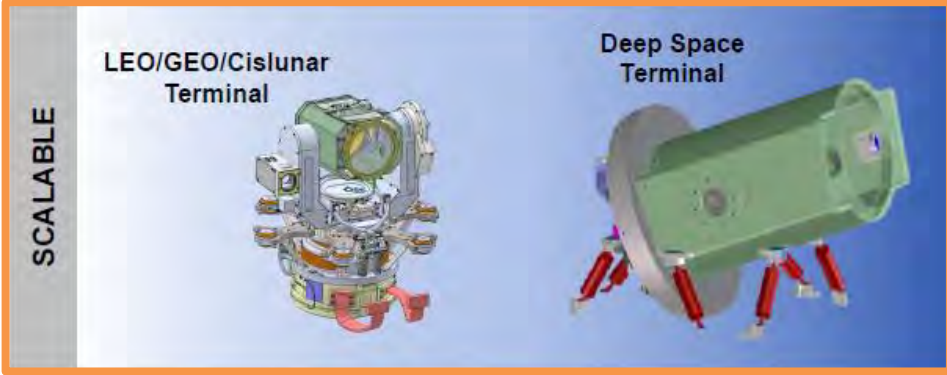
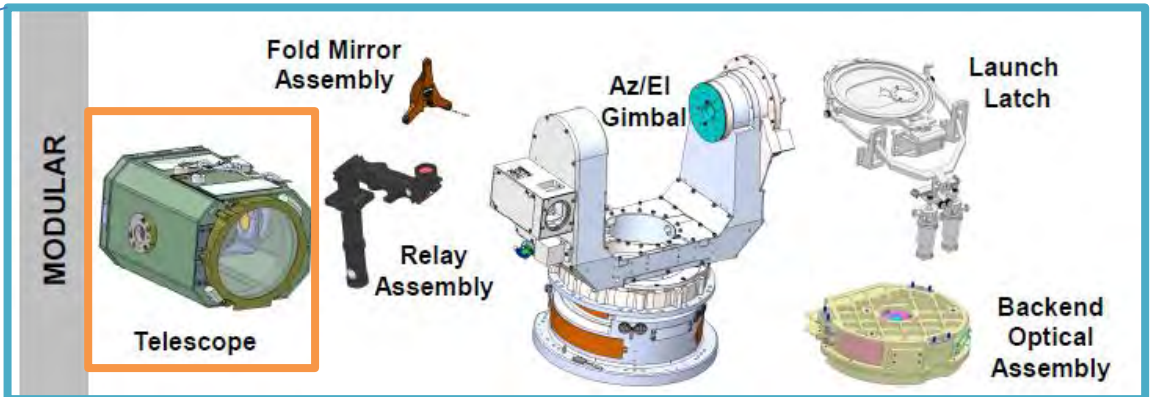
- 米国の背景として、LEO/GEO/シスルナに加え深宇宙の通信技術が必要(意思)
⇒ それぞれを個別に開発すると非常に非効率であり、モジュール化・スケーラブル化の思想が適すると推察

構成要素をモジュール化し再利用性を向上



MASCoT光学部の外観

- ✓ 重量：16kg
- ✓ 半球の視野範囲を有する



構成要素をラインナップ(スケーラブル)化して用途を拡大

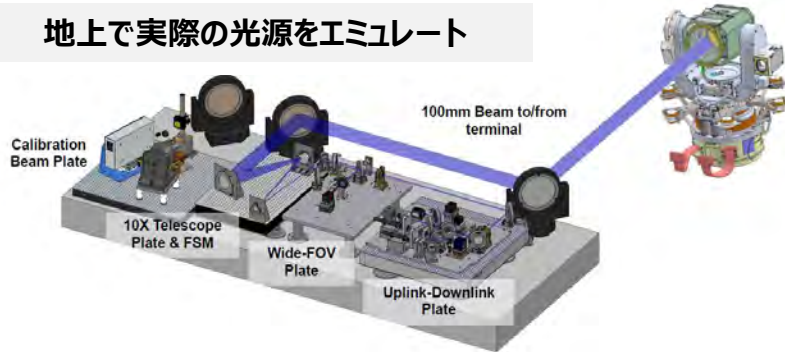
5. 遠距離高速通信システムの調査 ~LunaNet~

22-004-R-011

◆ 光通信端末(MIT LL/NASA) LINCOLN LABORATORY MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

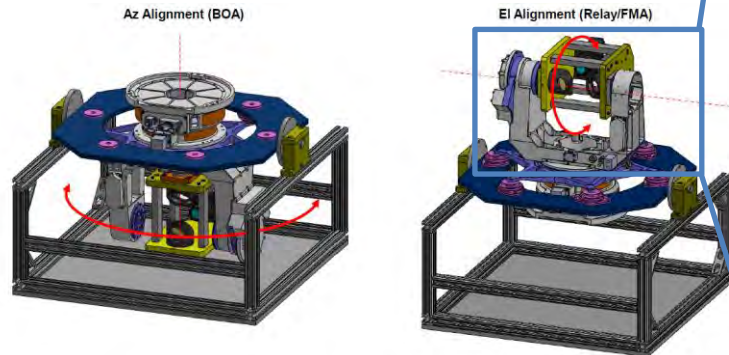
➤ 設計が共通化されているため試験設備もILLUMA-T/O30で共有できると推察

地上で実際の光源をエミュレート

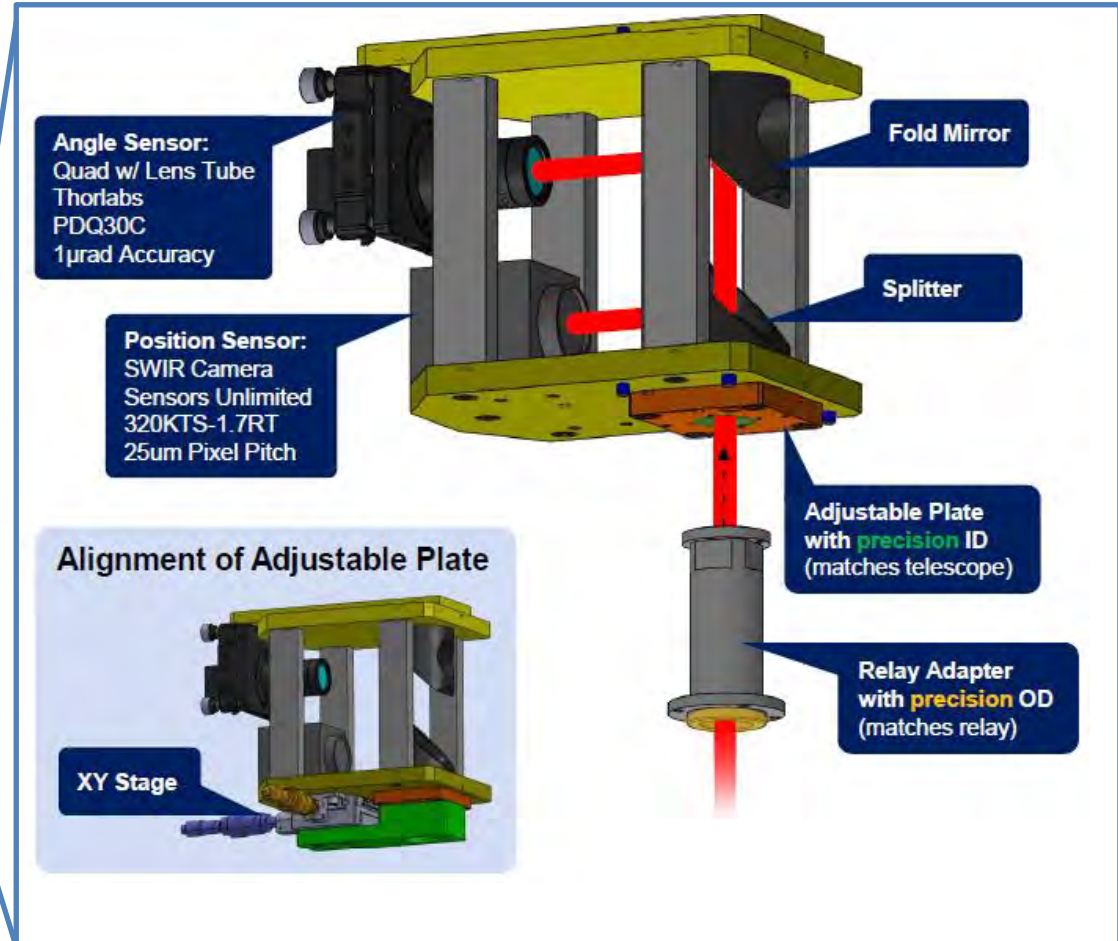


MAScOT Optical Test Set(MOTS)

アライメント計測/調整



アライメントセンサシステム



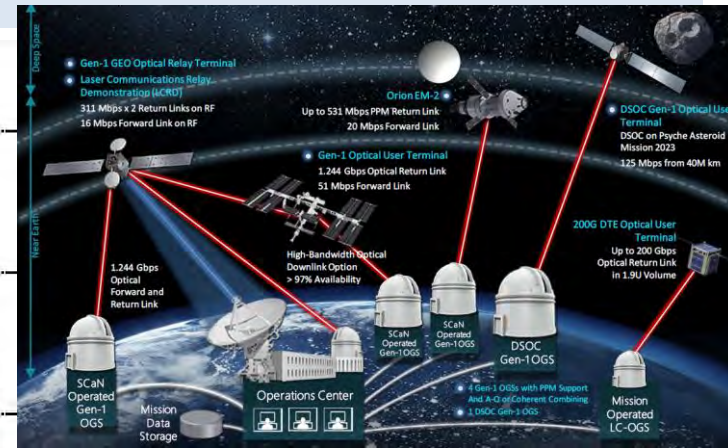
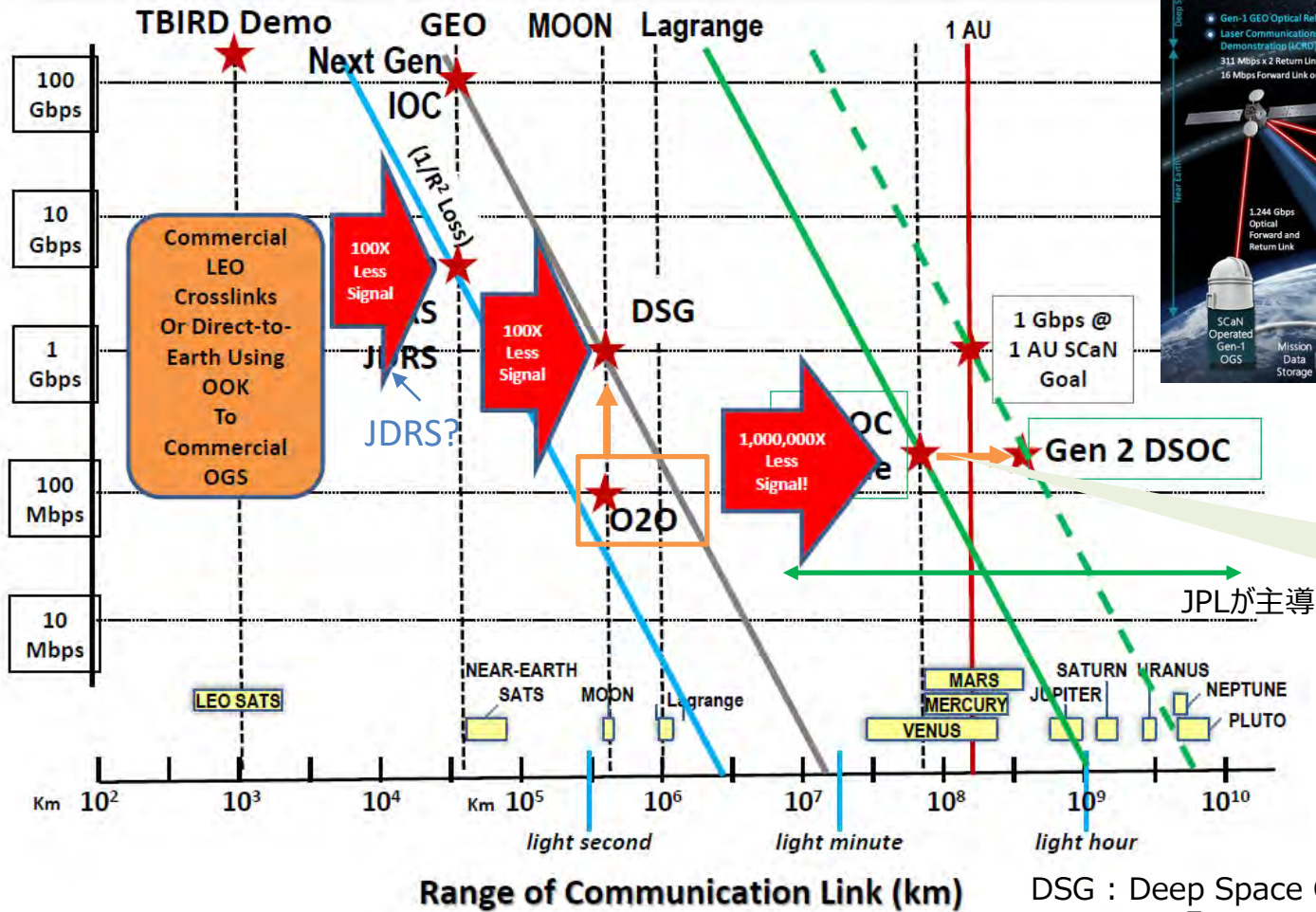
5. 遠距離高速通信システムの調査

~LunaNet~

22-004-R-011

◆ シナリオ/用途別に整理した通信容量のトレンド

- 月周辺通信：O2Oでは100Mbps級(下図青線)に対して次世代では月周辺で1Gbps級が目標
- 他惑星周辺通信：JPL主導でDSOCを開発



- Psycheに搭載 (2023.10打上げ予定)
- 次世代は通信距離を向上

DSG : Deep Space Gateway
 *現:Lunar Orbital Platform-Gateway
 DSOC : Deep Space Optical Communications



出所) [1]NASA,

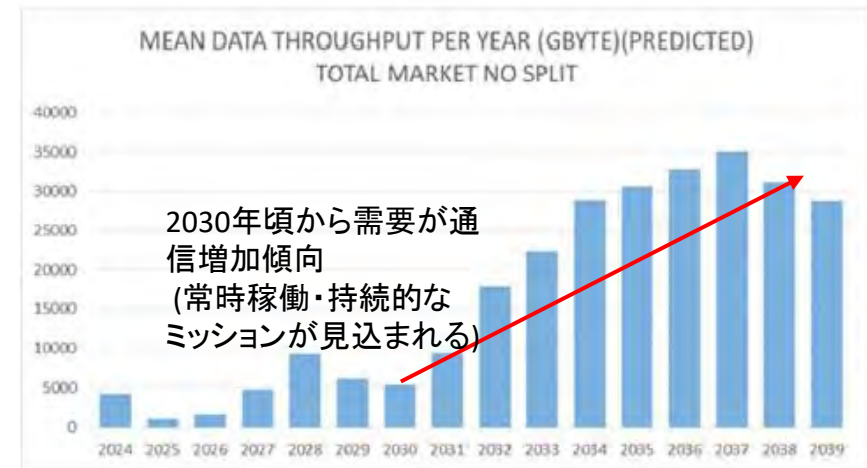
5. 遠距離高速通信システムの調査 ~MoonLight~

22-004-R-011

◆ 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

5. 遠距離高速通信システムの調査 ～JAXA検討～

22-004-R-011

◆ 月-地球間光通信に関するトレードオフ

- 1Gbpsを超えるような通信実現にはLUCAS/JDRSで採用しているPSK/HDR方式が必要
- 技術課題：レーザー、高出量光増幅器、大口径光アンテナ(GEO中継の場合)

概要

両ケース共に設定通信レートの達成するための条件を検討。送信電力、および大口径光アンテナ(Type-2の場合)が既存技術からの発展が必要。Type-1については、サイトダイバーシティ(現状の光地上局(国内)3局では75%程度との検討結果あり)の課題が残る。

トレードオフ (サマリ)

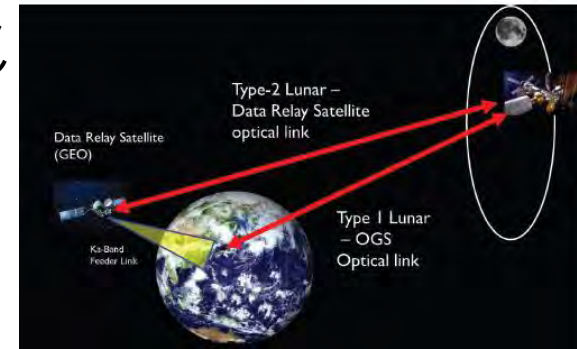
- Type-1：月-光地上局のダイレクト通信
 - 月 ⇒ 光地上局：2.5Gbps(マージン:1.5dB), 受信系開口径：1m
 - 光地上局 ⇒ 月：39.1bps(マージン:0.7dB), 受信系開口径：0.09m
- Type-2：月-静止衛星中継-地上(RF通信)
 - 月 ⇒ 静止衛星：2.5Gbps(マージン:0.4dB), 受信系開口径：0.35m
 - 静止衛星 ⇒ 月：39.1bps(マージン:7.0dB), 受信系開口径：0.09m
- 共通条件
 - 1.55 μ m帯のPSK/HDR方式を前提, 通信距離：380,000km

技術課題分析

- レーザー/誤り訂正符号
 - 高性能な前方誤り訂正符号(FEC)が必要(現状TRL=4で宇宙環境下での実績はなし)
 - *DTNを併用する場合は宇宙機でのデコードが必須となり技術的ハードルが高くなる
- 高出力光増幅器
 - 検討に用いた送信電力の前提10W(+40dBm)が必要(JAXA主導で開発中)
- 大口径光アンテナ
 - 検討に用いたアンテナ径:35cmが必要(静止衛星搭載)(LUCAS実績:14cm(GEO))

運用性検討

Type-1は日本が実現しようとした場合、全世界に10台程度(1台あたり数百万ドルの試算)の光地上局が必要となる。一方、Type-2は静止中継衛星の整備が必要(1機あたり1億ドル以上の試算)となる。コスト面ではType-1が優位であるが、サイトダイバーシティの観点でリンクの切り替えは多くなる。(静止衛星は不確定な要素が少なく計画的なリンク切り替えが可能)



(ASTEC分析)

月通信が国際的なインフラであることも考慮し、技術面に加えて外部環境も要考慮

| SOWT | Type-1 | Type-2 |
|------|------------|--------------|
| 強み | 光地上局(既存設備) | コストパフォーマンス |
| 弱み | 地理的条件 | 静止衛星のQCD |
| 機会 | 米国の地上-月通信 | 欧州の動向(月通信低調) |
| 脅威 | 気象条件の変化 | 実証には静止衛星が必要 |

5. 遠距離高速通信システムの調査 ～有識者のご意見～

22-004-R-011

◆ 調査結果を踏まえた有識者のご意見(サマリ)

- 月-地球間の遠距離・高速通信においては、NASA・MIT LL, CNESとともにJAXA/NICTがCCSDSに提案・予備検討規格として規定されているHDR(High Data Rate)方式が有力と考えており、LUCASで培った技術の発展となる。(米国には、通信の分野は民間主体で進めるべきであり、宇宙用の規格(CCSDS)ではなく地上で用いられている規格を採用すべきとの意見もある)
- そのため技術の観点では、**DTN(Delay Tolerant Networking)**や**符号化方式の強化に伴う、オンボード処理技術の向上がキー要素**となる。
- またこれまでISS等の国際協力を進める宇宙開発において、**「通信」は主に米国が担っていることに伴い、活動が制約されてきた背景**もあり、月活動においてはWarpspaceやSpacecompass等の**民間事業者も含め、産学官で協力したインフラ構築**が重要。
- さらに国内で全体アーキテクチャの議論が進んでいることも踏まえ、月-地球間の遠距離だけではなく、月面間や月面-月軌道間等の通信も含めRF技術も重要な要素であり、月面での多数ユーザを想定した**近距離高速通信の実証等**も含め、**産学官が実証について討議できる場**が今後は重要となる。

5. 遠距離高速通信システムの調査

～強み・弱み分析～

22-004-R-011

- 米国はArtemis計画、欧州は産業競争力強化を主軸として、商用プレイヤーも活用し開発が進む
- 欧米の連携はLunaNet中心にインターオペラビリティの検討が進みつつある状況

動向分析サマリ

| Fact Finding及び 海外動向分析 | 現状の日本における動向分析 | |
|--|--|---|
| | 強み弱み | |
| <p><LunaNet(米)> Artemis計画の主導を通じ、インターオペラビリティに関する仕様書を規定するなど全体をリード。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Network of Networkの思想が特徴で、官民システムの共存を推進 ✓ Artemis II (O2Oミッション)にて光通信技術実証(宇宙機-地上)を計画(MAX:250Mbps@2023年) ✓ 官の開発もあるが、Commercial Lunar Payload Services(CLPS)を代表とした民間利用も活発 <p><MoonLight(欧)> ESA/民間が協力する形で産業創出を目的とした検討・実証を進める。 LunaNetとは協調路線。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ SSTL, Telespazioそれぞれを中心としたコンソーシアムにて、産業化に資するシステム検討・実証を進める ✓ Lunar PathfinderにてS帯の月周辺通信、X帯中継サービスの実証(月周辺の宇宙機-中継衛星-地上)を計画(MAX:5Mbps(中継衛星-地上間)) | <p><JAXA> プロジェクト化はなされていないが、JAXA主導で検討・要素技術開発に着手。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ スターダストプログラム等にて、JAXA主導でアーキテクチャを検討 ✓ 要素技術(捕捉追尾センサ, 大口径光学系, 補償光学等)の研究は進む。 ✓ 宇宙基本計画において、プロジェクトは未規定。民間主体の取り組みも顕著ではない。 | <p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 月-地球間の大容量通信に必要な要素技術が識別され、いくつかの開発計画がある <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 民間活用の試行はあるものの実績は少ない(実証までのスピードが劣後) ✓ 官主導も含めた実証計画は欧米に比して遅れており先行者利益獲得は難しい |

重要項目

[考察]

米国はArtemis計画に必要な技術(未保有、もしくは調達不可)は基本的に国内で開発すると推察。欧州はこれに対して、産業基盤の強化に資する技術実証(小型・軽量化等)を進め既開発化し、LunaNetの一翼を担う(光通信技術も保有している点は要考慮)。また、欧米は静止通信衛星を多数保有している点もデータ中継の観点では強みとして利用できる。日本の立ち位置は、「模倣困難」、「産業基盤強化」(欧州追従)、「自律性確保」などが考えられる。(次頁に詳細分析/技術ロングリストを示す)

①Artemis計画に必要な、かつ現状不足している技術

- 通信容量の向上
- インターオペラビリティ(接続・協調)

②産業基盤強化に必要な技術

- 小型・軽量化
- End to End(ユーザ-地上)の接続性
- 稼働率(Capability)の向上

5. 遠距離高速通信システムの調査 ～ロングリスト～

22-004-R-011

JAXA殿の検討を参考に日本の研究開発に重要と思われる3つの軸で技術ロングリストを整理

目的/方向性

模倣困難技術の獲得

LunaNetの思想が複数のシステムが共存することであることを踏まえ(機会)、日本の強みである「**大容量通信**」を活かした**バックホール通信、PtoPの専用通信**等を目指す。(欧米とも最低限は自国インフラとして整備することが想定されるため、**圧倒的な大容量化**等が必要となる。)

産業基盤の強化

海外民間企業の活動領域拡大に取り残されないよう(脅威)、産業競争力/収益の源泉となる「**小型・軽量化**」技術を推進し、**ユーザ利便性の高い端末を活かした民間主導の通信システム構築**を目指す。

*国内実例が少ない点(制度含む)が実行上の課題

自律性の確保

将来の月周辺活動にて欧米へのインフラ依存を避けるため(脅威)、既存技術を活用した実証を早期に推進し、「**インターオペラビリティ(接続・協調)**」に関する**技術の研究開発、および国際連携**を継続する。

キー技術の技術ロングリスト

通信容量の向上

- 高出力光増幅器
- 高感度復調技術
- 通信多重化技術
- 誤り訂正符号技術
- 1.55μm帯以外の波長利用

【留意点】

- ✓ 定常的な需要より大幅な容量で差別化することとなり稼働率が下がりが産業化には不向き

小型・軽量化

- RF関係
 - 遠距離用トラポン
 - 地上局
 - NW制御技術
- 光通信関係
 - モジュール化
 - 小型捕捉追尾機器
 - 光フォトデバイス
 - 光中継技術
(マルチアクセス/光マルチプレクサ等)

インターオペラビリティ(接続・協調)

- 通信プロトコルのソフトウェア化(デバイス含む)
- 途絶補償ネットワーク技術
- 基盤技術(増幅器等)の継続開発

【注記】

上記技術のANDが必要という意図ではなく、目的・目標や優先順位に応じた取捨選択の参考(1例)となるロングリストとして提示 109

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
6. 定常調査業務
 - 6.1. 定常調査・動向調査
 - 6.2. 適宜調査・事実確認

下記シンポジウム・カンファレンスに参加し情報収集と分析を行い、結果に関して報告書を作成した。次頁以降に報告書を示す。

1. Small Satellite Conference(2022.8.6-11)
2. GLOBAL SATELLITE SERVICING FORUM(2022.10.19-22)

将来宇宙探査にかかる技術調査

『Small Satellite Conference(2022.8.6-11)』 調査概要

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

2022年 8月25日

- ▶ 例年に比してTechnical Sessionにおける個別技術の発表は低調であった。一方で個別企業/団体が30min～1hour程度参加者と討議するSide Meeting、および個別アポイントによる打合せは活発であり、「**全体周知(存在感の誇示)**」の場から「**商用・実用化に向けた課題解決**」の場への成熟が感じられた。
- ▶ 小型衛星分野のトレンドとしてはAFRL^{*1}の発表にあった下記の3フェーズが印象的(軍事分野に限らずすべての領域で共通的な兆候あり)、活動領域もLEO～GEOではなく、**VLEO^{*2}～XGEO^{*3}へと拡大**することは全体的な傾向と推察される。
 - 0～5年後(Today) : Stovepiped Mission(戦術要求に基づいた開発)
 - 5～15年後(Mid-term) : Hybrid Architecture(融合(国際・商用・DoD)するための開発)
 - 15～30年後(Far-term) : Heterogeneous Architecture(自律化・ユビキタス化(マルチドメイン))
- ▶ 2022年度のテーマが“Out of this World!”ということも関連があるのか、小型衛星(6U～12Uが中心)を用いた月やNear-Earth Object観測の発表が多数あり。軌道上作業など**活動領域拡大に必要な要素技術(軌道制御、通信(データ中継)/ナビゲーション、衛星自律化など)の実証**が進んでいる。
- ▶ 加えて、**シスルナ圏の商業化(国家の調達コストを軽減することを目的としたアンカーテナント)**の動向も具体化しており、需要の喚起と実証から実用(国家調達)に向けた活動が進む。

*1) AFRL : Air Force Research Laboratory

*2) VLEO(超地球的軌道) : Very Low Earth Orbit

*3) xGEO : 静止軌道を超えたシスルナ圏などの軌道

将来宇宙探査にかかる技術調査

『Global Satellite Servicing Forum (2022.10.18-19)』調査概要

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

2022年 11月4日

- 加盟が10か国62団体に増加し、軌道上作業について、ユースケース、ファイナンス、保険、規制・ガイドライン、政策などの観点について150名程が2日間にわたり22のセッションを聴講。
- 詳細な技術的な情報共有よりも、政策、規制、標準、軌道上サービスの運用やユースケースに関するトピックがメイン。
- CONFERSは来年からはDARPAより独立し活動する事が公に発表。
- 新規参入の会社はさらに増加しており、加盟団体は増加傾向。しかし、実際の通信業者等の運行会社の参加はなく、今後は運行会社の参加が増えることにより、受益者側の立場に立った議論がさらに活発になると考えられる。
- Space LogisticのMEV、AstroscaleのELSA-d、Orbit FabのTenzing、MDAのDextre、ExoAnalyticのMEV projectの支援などにおける、実際の運用上でぶつかった困難に関する情報共有もなされている。
- 日本からは内閣府、JAXA、Astroscaleがセッションに参加。内閣府とJAXAは同じセッションにて規制や標準作りについて、別のセッションではAstroscaleがELSA-dの実証で直面した困難について言及した。

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
6. 定常調査業務
 - 6.1. 定常調査・動向調査
 - 6.2. 適宜調査・事実確認

文科省殿からのご指定に基づき、下記に示す適宜調査、事実確認を実施した。

<事実確認>

1. 軌道上燃料補給に関し、過去の実績、現在計画されているプロジェクトについて、Web等の公開情報を以って調査・整理を行う。
2. 「推進系以外」を使用しての軌道離脱方法について、公開情報を以って調査・整理を行う。

将来宇宙探査にかかる技術調査

事実確認報告

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

2022年 11月18日

軌道上燃料補給に関し、過去の実績、現在計画されているプロジェクトについて、Web等の公開情報を以って調査・整理を行う。



軌道上燃料補給の開発状況

1. 米国
2. 欧州
3. 中・露

軌道上燃料補給の開発状況

1. 米国


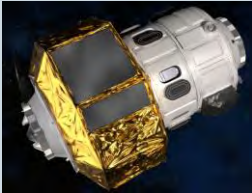
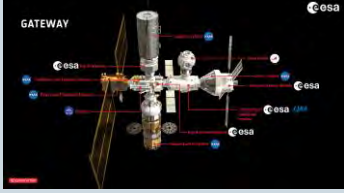

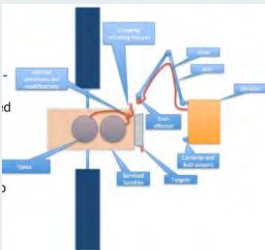
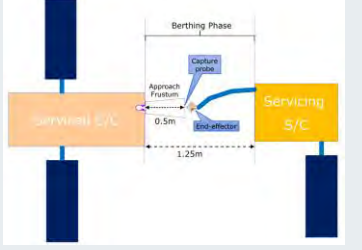
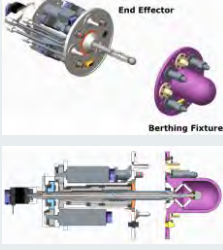


22-004-R-011

| プログラム名 | 実施主体 | 事例概要 | 出所 |
|--|---|---|--|
| <p>Orbital Express</p>  | <p>DARPA主導 Boeing, Ball Aerospace, Northrop Grumman等に参加</p> | <ul style="list-style-type: none"> 2007年打ち上げ LEOに於いてBoeingのASTROからBallのNEXTSatに無重力状態でヒドラジンを移送 自動推進薬移送装置はNorthrop Grumman製 自動制御のレベルを変えて15回の移送を実施 ヒドラジン31.97lbm(pound mass)を移送(32lbmが目標)。ポンプの実証で19.2lbm(目標17lbm)を移送し、ASTROへ戻すことにも成功。 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="634 539 934 753"> </div> <div data-bbox="934 539 1255 753"> </div> <div data-bbox="1255 539 1545 753"> </div> </div> <p style="text-align: center;">ASTROとNEXTSatの概要</p> <p style="text-align: right;">移送のためのドッキングの様子</p> | <p>Boeing_OE_2007_AIAA https://fiso.spiritastro.net/telecon07-09/Friend_11-28-07/Boeing_OE_2007_AIAA.pdf</p> <p>Fostering Sustainable Satellite Servicing Orbital Express program Summary June 26, 2012 https://swfound.org/media/87149/leiz-orbital_express_summary.pdf</p> <p>Orbital Express: Testing On-Orbit Servicing https://www.defenseindustrydaily.com/orbital-express-is-that-a-new-battery-or-are-you-just-glad-to-see-me-03220/</p> |
| <p>OSAM-1</p>  | <p>NASA主導 MAXA社等に参加</p> | <ul style="list-style-type: none"> 2024年にLANDSAT-7(事前準備がない衛星)へ115kgのヒドラジンを給油する計画 MAXAR社が衛星バスとアームを供給。3つのアームのうち2つを燃料補給ミッションに使用 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="696 996 955 1153"> </div> <div data-bbox="955 996 1234 1153"> </div> </div> <p style="text-align: center;">ロボットアームを用いてラインを使用した給油イメージ</p> <p style="text-align: right;">Youtube 動画より https://nexis.gsfc.nasa.gov/osam-1.html</p> | <p>How NASA Will Grapple and Refuel a Satellite in Low Earth Orbit https://spectrum.ieee.org/how-nasa-will-grapple-and-refuel-a-satellite-in-low-earth-orbit</p> |

軌道上燃料補給の開発状況

2. 欧州

22-004-R-011

| プログラム名 | 実施主体 | 事例概要 | 出所 |
|--|--|---|--|
| <p>ESPRIT European System Providing Refueling Infrastructure and Telecommunication</p>  | <p>ESA主導 Thales Aleniaが契約</p> | <ul style="list-style-type: none"> • ESPRIT Refueling Module • Lunar Gatewayの構成モジュールの一つ。Gatewayへキセノンとヒドラジン を補給する。2028年打上げ目標。   | <p>ESPRIT refueling module https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2022/09/ESPRIT_refueling_module</p> <p>THALES ALENIA SPACE: AT THE HEART OF LUNAR INDUSTRIAL CHALLENGES https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/thales-alenia-space-heart-lunar-industrial-challenges</p> |
| <p>ASSIST</p>  | <p>ESA主導 GMV、Moog、The National Technical University of Athens、DLRが参加</p> | <ul style="list-style-type: none"> • GEO衛星に給油するシステムを開発するプロジェクト • アーム先のエンドエフェクターをBerthing Fixtureへ差し込み給油をする    <p style="text-align: center;">給油システム概要 結合部の構造</p> | <p>HARMONISED SYSTEM STUDY ON INTERFACES AND STANDARDISATION OF FUEL TRANSFER (ASSIST) https://indico.esa.int/event/128/attachments/733/861/10_GMV-ASSIST-CleanSpace.pdf</p> |
| <p>Automated Transfer Vehicle (ATV)</p>  | <p>ESA主導 EADSアストリアム・スペースシステム・スペースストラテジ（現Airbus Defence and Space）が中心となってコンソーシアムを結成</p> | <ul style="list-style-type: none"> • ESAが運用するISSAへの補給船で2008年-2015年に運用 • 860 kg の推進役を積載可能でタンクとインターフェイスはロシアのProgressと同じ • 約30分で280kgのRussian UDMH推進薬と530kgのN2O4を移送した  | <p>Automated Transfer Vehicle (ATV) European servicing and logistics vehicle https://esamultimedia.esa.int/docs/ATV/FS003_12_ATV_updated_launch_2008.pdf</p> <p>Automated Transfer Vehicle (ATV) Structural and Thermal Model Testing at ESTEC https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet111/chapter17_bul111.pdf</p> <p>Premiere for Europe: Jules Verne refuels the ISS https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/ATV/Premiere_for_Europe_Jules_Verne_refuels_the_ISS</p> |

| プログラム名 | 実施主体 | 事例概要 | 出所 |
|--|------------------|--|--|
| <p>PROGRESS Space Craft</p>  | <p>ROSCOSMOS</p> | <ul style="list-style-type: none"> ロシアが運用する補給船 M1 Refueling Moduleは8個のタンクを持ち最大で1,740 kgの推進薬を積載できる。  | <p>International Space Station https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/progress_about.html</p> <p>SPACEFLIGHTNOW November 15, 2022 https://spaceflightnow.com/2017/02/24/progress-ms05-docking/</p> |
| <p>Tianzhou-1 (Space Craft) Tiangong-2 (Space Lab)</p>  | <p>CNSA</p> | <ul style="list-style-type: none"> 2017年、Tianzhou-1 (Space Craft) から Tiangong-2 (Space Lab) へ燃料補給を実施 3回目の実施で250kgを移送した。  <p>Animation of the Tiangong 2 space lab (left) and Tianzhou spacecraft (right) docked in orbit. Credit: CCTV</p>  <p>Tianzhou-1 approaches Tiangong-2 after a fast-track rendezvous – Photo: CCTV</p>  <p>Fluid Transfer System – Image: CNSA via ChinaSpaceflight.com</p> | <p>SPACEFLIGHTNOW November 14, 2022 https://spaceflightnow.com/2017/04/27/tianzhou-1-freighter-achieves-chinas-first-in-space-refueling-demo/</p> <p>Chinese space station freighter concludes refueling demo mission https://spaceflightnow.com/2017/09/17/chinese-space-station-freighter-concludes-refueling-demo-mission/</p> <p>https://spaceflight101.com/tianzhou-1-cargo-craft-re-joins-tiangong-2-space-lab-after-express-rendezvous-demo/</p> |

将来宇宙探査にかかる技術調査

事実確認報告

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

2022年 11月28日

「推進系以外」を使用しての軌道離脱方法について、公開情報を以って調査・整理を行う。

「推進系以外」を使用しての軌道離脱方法

1. SKY Perfect JSAT - レーザーアブレーション方式
2. ALE – ElectroDynamic Tether
3. KHI - DRUMS
4. AXELSPACE – D-SAIL
5. Tethers Unlimited Inc. - Tether / Terminator Tape
6. Airbusをはじめとする欧州企業 - Net、Harpoon、Drag Sail

1. SKY Perfect JSAT

レーザーアブレーション方式



- レーザーを用いてデブリを除去。理化学研究所、JAXA、名古屋大学、九州大学と共同開発中。2026年のサービス提供を目指す。
- 衛星と地上システムについては、JAXA 宇宙イノベーションパートナーシップ (J-SPARC) の枠組みを通じた検討を共同で実施。
- 「接触しないため安全性が高い」「スペースデブリ自身が燃料となり、移動させる燃料が不要なため経済性が高い」が利点。
- 物質にレーザー光を高エネルギーで照射した際、物質がプラズマ化や気化することにより、物質が表面から放出される「レーザーアブレーション」が起きる。この現象を利用して推進を発生させる

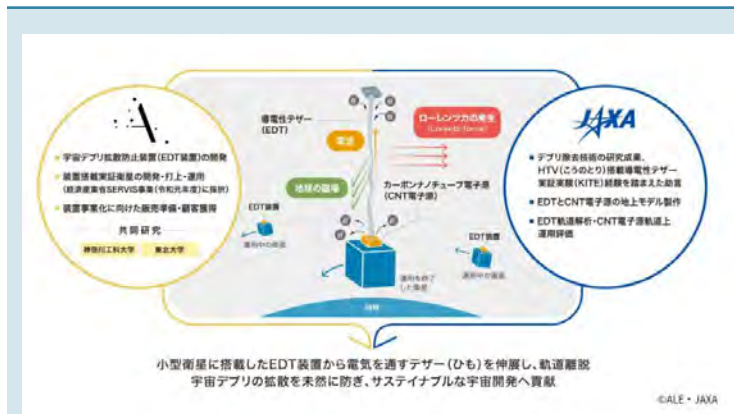
出典

https://www.skyperfectjsat.space/news/files/pdf/0ae62a003cc6b73e745f81c1d4e0c739_4.pdf

2. ALE

EDT

(ElectroDynamic Tether)



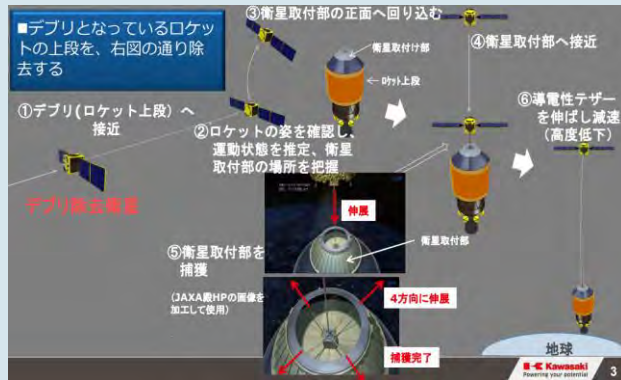
- JAXA宇宙イノベーションパートナーシップ (J-SPARC) において、導電性テザー技術を開発中。
- 大気抵抗の力と地球磁場によるローレンツ力を利用して軌道離脱させる。

出典

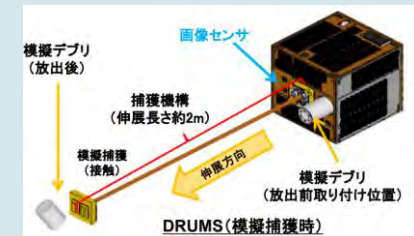
https://ap-northeast-1-02860049-view.menlosecurity.com/https://www.jaxa.jp/press/2020/03/20200325-1_j.html

3. KHI (Kawasaki Heavy Industries)

DRUMS (Debris Removal Unprecedented Micro Satellite) デブリ捕獲システム超小型実証衛星



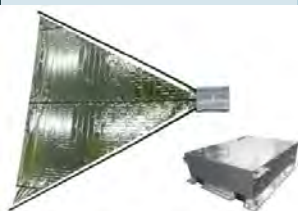
- JAXAの革新的衛星技術実証2号機の実証テーマとして選定され、2021年にイブシロンロケット5号機により打上げられた。DRUMSは無事に軌道投入され、地上局との間で正常にデータが送受信され、衛星の基本的な作動が確認された。
- 今後、仮想デブリを軌道上に放ち、自律的に追尾・接近、アームを伸展してデブリを模擬捕獲する一連の実証を行う予定。
- 衛星取付部へ接近、独自の捕獲機構で衛星取り付け部で捕獲、通電性テザーを伸ばし減速・高度低下させる



出典
https://www.khi.co.jp/news/detail/20211111_1.html

4. AXELSPACE

D-SAIL



提供：株式会社アクセルスペース

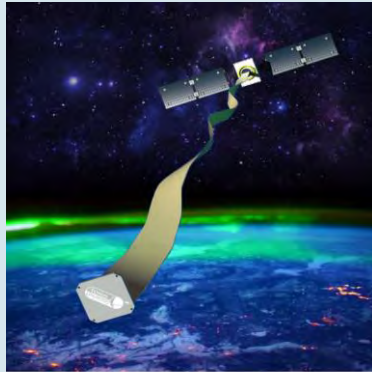
- 折り畳んだ約2㎡のポリイミドフィルムの膜面を展開し、わずかな大気抵抗を利用して衛星の高度を下げ、短期間のうちに大気圏に再突入させる機構。地球低軌道上の薄い大気がドラッグ(抵抗)として働き、衛星の軌道運動にブレーキをかける。運用を終えた100kg前後の超小型衛星を軌道上から確実に離脱させることを目的とした装置。
- 宇宙航空研究開発機構(JAXA)の革新的衛星技術実証3号機の実証テーマに選定されている。

出典
<https://www.axelspace.com/ja/sustainability/>
https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/interview/03/interview03_08.html
<https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/kakushin03.html#dsail>



5. Tethers Unlimited Inc.

Tether / Terminator Tape



The Terminator Tape Deorbit Module interacts with the space environment to rapidly drag a satellite out of orbit.

- 大気抵抗の力と地球磁場によるローレンツ力を利用して軌道離脱させる。2020年1月に実証を成功させた。
- 2ポンドに満たないノートほどの大きさのTerminator Tape Moduleから230 feetの通電性のテープを展開する。

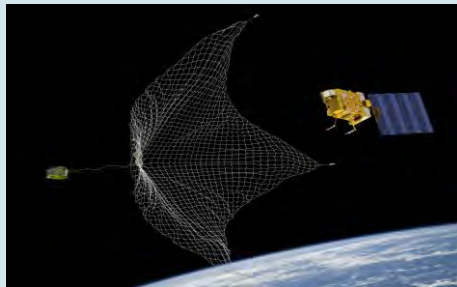
出典

<https://www.tethers.com/taking-out-the-space-trash-tethers-unlimited-announces-successful-operation-of-space-debris-removal-device/>

<https://sorabatake.jp/10082/>

6. Airbusをはじめとする欧州企業

Net、Harpoon、Drag Sailによる軌道離脱研究



- 2018年、EUの出資によるAirbus Bremen, Germanyを中心とした開発により、数メートル離れた場所からネットでCubeSatを捕獲、軌道離脱に成功。
- ネットだけでなく、Harpoon、Sailについても開発中。

出典

<https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc7/paper/78>

<https://www.youtube.com/watch?v=P1fRPTlgXuw>

<https://www.airbus.com/en/products-services/space/in-space-infrastructure/removedebris>

<https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc7/paper/78/SDC7-paper78.pdf>



(財)衛星システム技術推進機構