

**令和5年度 文科省 委託調査
宇宙探査・軌道上サービスに関する技術調査**

**2024年 3月
委託業務成果報告書(公開版)**

(財) 衛星システム技術推進機構

1.1 はじめに

2.1 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

<付録>

- 定常調査・動向分析
 - Global Satellite Servicing Forum 出張報告
 - SpaceCom Space Congress・Space Mobility Conference 出張報告
- 適時調査・事実確認
 - (事実確認)編隊飛行(フォーメーションフライト)の技術開発動向について
 - 適時調査については期間中の対応はなし

はじめに

1.1 はじめに

1.1.1 はじめに

1.1.2 中間報告への対応状況

1.1.3 これまで頂いたコメントへの対応状況

2.1 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

本書は、文科省殿よりASTECが受託した「将来宇宙探査・軌道上サービスにかかる技術調査」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・軌道上サービスにかかる技術調査」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、今後の宇宙探査や軌道上サービス等における研究開発計画検討のため、世界の宇宙探査や軌道上サービス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。

令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査内容

| 調査要求 | 調査内容 | 本報告書における記載 |
|---|---|-----------------|
| 3-1 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析 | | |
| (1) 令和4年度に実施した「将来宇宙探査にかかる技術調査」の各項目について、最新の技術動向調査を行い、情報の最新化を行うこと | 令和4年度に実施した「将来宇宙探査にかかる技術調査」の各項目について、最新の技術動向調査を行い、情報の最新化を行う。 | 2.1.1 - 2.1.4 章 |
| (2) 各項目において、情報の最新化を踏まえ、改めて強み・弱みの分析を行うこと | 後述「3.16. [3-10 調査方法]に関するご提案(日本の強み・弱み分析)」に示す手法により、日本の強み弱みを分析する。 更に、本年度も最新動向をもとに強み弱み分析を行い、日本にとって重要なユースケース・技術開発項目等の候補(ロングリスト)を抽出する。 | |

デブリ監視及び回避技術の調査内容

| 調査要求 | 調査内容 | 本報告書における記載 |
|---|---|------------------|
| 3-2 デブリ監視及び回避技術の調査分析 | | |
| (1) 国内外におけるスペースデブリの監視を行う事業者の動向について、地上からの監視または衛星による監視の仕組み、検出精度及び観測頻度等を含め、調査分析し、まとめること。 | 国内外におけるスペースデブリの監視を行う事業者の動向について、地上からの監視または衛星による監視の仕組み、検出精度及び観測頻度等を含め、調査分析し、まとめる。 | 2.2.1章 2.2.3章 |
| | 更に、地上からの監視と衛星からの監視の長所短所を調査し、利用者にとってより効率的に安全な運用を可能とする組み合わせを考察する | 2.2.1章 2.2.3章 |
| (2) 国内外の衛星事業者において、スペースデブリの衝突回避対応に用いられる技術の動向を調査分析の上、まとめること | 国内外の衛星事業者において、スペースデブリの衝突回避対応に用いられる技術の動向を調査分析の上、まとめる。 | 2.2.2章 2.2.3章 |
| | 更に、現在の回避システムの課題を抽出し、改善に向けた各事業者の取り組みと動向を深掘する。 | 2.2.3章 |
| (3) 本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析すること。また、本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること | 後述「3.16. [3-10 調査方法]」に関するご提案(日本の強み・弱み分析)」に示す手法により、日本の強み弱みを分析し(3) 本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析すること。また、本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること | 2.2.4-2.2.5章 |

デブリ除去サービス技術の調査内容

| 調査要求 | 調査内容 | 本報告書における記載 |
|---|--|--------------|
| 3-3 デブリ除去サービス技術の調査分析 | | |
| <p>(1) 能動的なスペースデブリ除去技術 (Active Debris Removal (以下、ADR))、及び自律的な脱軌道によりデブリ化を防ぐ技術 (Post Mission Disposal (以下、PMD)) について、国内外における技術動向を調査分析し、まとめること。特に、技術達成レベル、除去する場合の費用、導入時の課題等を調査に含めること。</p> | <p>能動的なスペースデブリ除去技術 (Active Debris Removal (以下、ADR))、及び自律的な脱軌道によりデブリ化を防ぐ技術 (Post Mission Disposal (以下、PMD)) について、国内外における技術動向を調査分析し、まとめる。技術達成レベル、除去する場合の費用、導入時の課題等を調査に含める。</p> | 2.3.1章 |
| <p>(1) について、物理的なインタフェース等の技術的な標準化、運用・安全管理の標準化の動向、国際規格化に向けた状況等について調査分析し、まとめること。</p> | <p>更に、日本のデブリ除去に対する実証は世界をリードしているが、すでに進められているCRD2 Phase2以降のデブリ除去に対する在り方を調査する。</p> | 2.3.1章 |
| <p>(2) (1) について、物理的なインタフェース等の技術的な標準化、運用・安全管理の標準化の動向、国際規格化に向けた状況等について調査分析し、まとめること。</p> | <p>(2) (1) について、物理的なインタフェース等の技術的な標準化、運用・安全管理の標準化の動向、国際規格化に向けた状況等について調査分析し、まとめること。</p> | 2.3.1章 |
| <p>(1) について、物理的なインタフェース等の技術的な標準化、運用・安全管理の標準化の動向、国際規格化に向けた状況等について調査分析し、まとめること。</p> | <p>更に、デブリ除去の分野において日本が世界をリードし続ける為に必要な標準化について深掘する。</p> | 2.3.1章 |
| <p>(3) 本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析すること。また、本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること。</p> | <p>後述「3.16. [3-10 調査方法]」に関するご提案 (日本の強み・弱み分析)」に示す手法により、日本の強み弱みを分析し本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析すること。また、本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること。</p> | 2.3.2-2.3.3章 |

推進薬補給技術の調査内容

| 調査要求 | 調査内容 | 本報告書における記載 |
|---|---|--------------|
| 3-4 推進薬補給技術の調査分析 | | |
| (1) 国内外における軌道上での推進薬補給サービスに関する技術動向、技術開発課題、開発コスト等について調査分析を行い、まとめること | 国内外における軌道上での推進薬補給サービスに関する技術動向、技術開発課題、開発コスト等について調査分析を行い、まとめる 上記をもとに推薬補給に関する事業動向を整理し分析する。 | 2.4.1章 |
| (2) (1) について、物理的なインタフェース等の技術的な標準化、運用・安全管理の標準化の動向、国際規格化に向けた状況等について調査分析し、まとめること | (2) (1) について、物理的なインタフェース等の技術的な標準化、運用・安全管理の標準化の動向、国際規格化に向けた状況等について調査分析し、まとめること | 2.4.1章 |
| | 軌道上での推進薬補給サービスの拡大に繋がる標準化の国際協調について、具体的に例示する。 | 2.4.1章 |
| (1) 本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析すること。また、本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること。 | 後述「3.16. [3-10 調査方法]に関するご提案(日本の強み・弱み分析)」に示す手法により、日本の強み弱みを分析する。(1) 本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析すること。また、本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること。 | 2.4.2-2.4.3章 |

軌道上製造技術の調査内容

| 調査要求 | 調査内容 | 本報告書における記載 |
|--|---|---------------|
| 3 - 5 軌道上製造技術の調査分析 | | |
| (1) 軌道上において部品等の製造を行うことを念頭に、国内外において Additive Manufacturing (以下、AM) 等の技術開発を行っている企業等を調査し、各社における技術動向、将来展望、技術課題等を調査分析し、まとめること | 軌道上において部品等の製造を行うことを念頭に、国内外において Additive Manufacturing (以下、AM) 等の技術開発を行っている企業等を調査し、各社における技術動向、将来展望、技術課題等を調査分析し、まとめる。 | 2.5.1章 |
| (2) 本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析すること。また、本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること | 更に、日本ではまだ軌道上でのAMに関する実証は確認できない為、上記海外事例をもとに、日本における事業化の課題について深堀する。 | 2.5.1章 |
| (2) 本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析すること。また、本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること | 後述「3.10. [3 - 7 調査方法]に関するご提案(日本の強み・弱み分析)」に示す手法により、日本の強み弱みを分析する。また本分野において、今後日本が取るべき戦略や取り組むべき研究開発計画について提案する。 | 2.5.2章-2.5.3章 |

COTSの利用に関する調査分析

| 調査要求 | 調査内容 | 本報告書における記載 |
|---|---|-------------|
| <p>3 – 6 COTSの利用に関する調査分析</p> <p>(1) 国内外の衛星開発において、民生品（以下、COTS）を導入する場合の判断基準について、調査分析を行い、まとめること。特に、軌道や装置等の割合、設計パラメータの判断基準等について、調査に含めること。</p> | <p>国内外の衛星開発において、COTSを導入する場合の判断基準について、調査分析を行い、まとめる。特に、軌道や装置等の割合、設計パラメータの判断基準等についても含めて、調査を行う。</p> <p>また、財団員の有する、衛星設計・製造に係る知見を活用し、COTS利用において考慮すべき事項や経済性に関する考察も加える。</p> | <p>2.6章</p> |

官民連携による研究開発に関する調査内容

| 調査要求 | 調査内容 | 本報告書における記載 |
|---|--|------------|
| 3-7 官民連携による研究開発に関する調査分析 | | |
| <p>(1) 研究開発機関（国際間協力も含む）、研究開発機関と民間企業、または民間企業間における国外の協力枠組みについて調査分析し、まとめること。その中で、参考となる事例を3件以上重点的に調査し、日本が参考にすべき事項を提案すること。</p> | <p>研究開発機関（国際間協力も含む）、研究開発機関と民間企業、または民間企業間における国外の協力枠組みについて調査分析し、まとめる。その中で、参考となる事例を3件以上重点的に調査し、日本が参考にすべき事項を提案する。</p> <p>参考になる重点調査事例として、NASAにおけるSpace Act Agreement, NextSTEP-2 OmnibusやESA Ambassador Platformの3件を抽出する。</p> <p>上記に加えて、欧州のARTES等の、特定分野における官民協力の枠組みについて、調査を実施する。</p> | 2.7章 |
| <p>(2) 非宇宙分野で開発された先端技術を宇宙分野に取り組むための国外の仕組みを調査の上でまとめること。その中で、参考となる事例を3件以上重点的に調査し、日本が参考にすべき事項を提案すること。</p> | <p>非宇宙分野で開発された先端技術を宇宙分野に取り組むための国外の仕組みを調査の上でまとめる。その中で、参考となる事例を3件以上重点的に調査し、日本が参考にすべき事項を提案する。</p> <p>参考になる重点調査事例として、NASAのSBIR/STTR、ESAのTechnology Brokers制度、EUのGlobal Action on Spaceを抽出する。</p> <p>上記に加えて、NASAにおける、Innovative Advanced Concept等の、民間企業・大学等から技術を幅広く収集する枠組みについて調査する。</p> | |

中間報告会における御指摘への対応状況

23-003-T-014

調査方針に関してこれまでいただいたコメントに関して必要箇所は反映済

| 日付 | 文科省殿/有識者殿コメント | 御回答 | 資料反映 |
|------------------|--|---|------------------------------|
| 9/28 中間 報告 | ARTESにおいて補助率が変わるというのはすべてが対象なのか、政府負担割合が発生しているのはごく一部ではないか。 (Strategic Program LineとGeneric Program Lineがあり、Generic Program Lineのcore competitivenessだけにおいて段階に応じた補助率/政府負担割合の設定があると考えている、他は政府負担はないのではないか) | ✓ ARTESプログラムの内、官民費用負担の対象は「ARTES Competitiveness & Growth」及び「Business Applications Space Solutions」である。なお、「Strategic Program Line」についても官民費用負担が推測される。 | ✓ 2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析を参照 |
| | 入り口では持ち出しを求められるが、開発完了までいくと持ち出し分も還付されるという話を聞いたことがあるが実態をご存じか？ | ✓ ARTESプログラムでは、事業者の事業化目標の達成状況に応じて、ESAから費用償還（インセンティブ提供）を受けることができる。本スキームによって、事業者は総コストの実質負担額を低減することができる。なお、費用償還に係る契約制度は、ESA契約の一般条項・条件において規定される。 | ✓ 2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析を参照 |
| | 知財の扱いについてルールがどうなっているのか？複数のプレイヤーが参加しており複雑と推察している。 | ✓ ESAでは、国プロ参加企業の知的財産権保護を最優先としたルールを採用。参加企業は、ESAに対して、無条件かつ無償のライセンスが義務付けられたものの、その他の機関については、対象によって使用条件や課金等の調整が可能となる。 | ✓ 2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析を参照 |
| | 官民連携について、官側の注目分野や投資領域の選定プロセス、民側から出てきたものからどれを優先的に採用するか、どういう評価基準で決めているのか、これらのプロセスに関する情報があると参考になる。だれがどういう風に、トップダウン型でやる部分、ボトムアップ型でやる部分を分けているか。ボトムアップでないと萌芽的な領域はくみ取れないはず(海外の事例があるとわかりやすい) | ✓ 各官民連携プログラムの上位政策・戦略文書や実際の入札・公募資料等を深堀調査から調査を実施。 | ✓ 2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析を参照 |

これまでに頂いたコメントへの対応状況（1/4）

23-003-T-014

調査方針に関してこれまでいただいたコメントに関して必要箇所は反映済

| 日付 | 文科省殿コメント | 御回答 | 資料反映 |
|------------|--|---|-------|
| 4/17 KO | 今回の軌道上サービスについては、デブリ除去や燃料補給以外に3Dプリンタを活用した軌道上製造技術や実験サービス等も対象と考えているので、デスクトップリサーチやカンファレンス等を通じて、幅広く調査を実施すること。 | ✓ 多様な軌道上サービスに関して、インタビュー先について推奨頂けるものを文科省殿よりご連絡頂ければ、対応する方向で調整していく。 | ✓ 報告済 |
| 6/1 定例 | 本業務と内閣府業務との関係についてはどのようになっているのか？ | <ul style="list-style-type: none"> ✓ 安全保障関連の調査は内閣府業務、安全保障関連以外の調査は本業務で実施することを基本としているが、軌道上サービスについては境界が明確ではないところも多いため、本調査では調査の対象とする計画である。 ✓ 実証小委や産業基盤WGの事務局支援業務については内閣府業務として実施しているため、文科省殿がデジタルプラスト殿に委託している分野については、内閣府事務局の代理として調査結果を確認し、宇宙技術戦略等に反映していくことになる。 | N/A |
| | 資料①P7（調査項目対応の図）では、昨年度調査項目における寿命延長技術と燃料補給技術が、今年度は推進薬補給技術として、調査されると整理しているが、対象衛星をけん引するような寿命延長技術は含まれるのか？ | ✓ 資料①P7の「推進薬補給*1技術の調査分析」には、けん引して寿命延長を行う技術も含んでいる。 | N/A |
| | 調査の項目としては、仕様書・提案書・キックオフで設定された内容を網羅されていると考える。中身として、請負先のKPMGとの所掌分担はどうなっているか？ | ✓ 項目としては全項目KPMG/ASTECの体制で対応。調査の方法の分担を想定しており、請負先のKPMGはデスクトップリサーチを担当し、ASTECはカンファレンス参加等によってやわらかい情報を収集して分析する計画である。 | N/A |
| | Starlinkのような大規模コンステでは、再突入に伴い大気中にアルミナが拡散することが問題になり、その対応として木製衛星などが検討されていると承知しているが、今回の調査には含まれるか？ | <ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道上での作業とは異なるため、調査スコープではないが、宇宙サステナビリティの文脈でカンファレンス等の発表があれば、アンテナを張って適宜御報告する。 ✓ JAXA設計標準では落下時の影響・被害に関する確率的評価を求められているが、地球環境への影響までは現状評価してはいないと認識。 ✓ アルミナ粒子が大気中に残る問題は承知しているが、大きな問題としてはまだ聞いたことがない。影響度の大きさを含めた事実確認が必要だと認識。 | N/A |
| | 軌道上サービスの担当者は内閣府調査と同じか？ 技術戦略との整合性は担保可能か？ | ✓ 担当は文科省殿調査・内閣府調査ともに吉田・矢野が担当であるため、調査結果の整合性は保たれる。 | N/A |

これまでに頂いたコメントへの対応状況（2/4）

23-003-T-014

調査方針に関してこれまでいただいたコメントに関して必要箇所は反映済

| 日付 | 文科省殿コメント | 御回答 | 資料反映 |
|------------|---|--|-------|
| 6/29 定例 | SSPSとシスルナの軌道上サービスの調査にフォーカスしている理由は何？ いわゆるシスルナの軌道上サービスにフォーカスした調査になるのか？ | <ul style="list-style-type: none"> ✓ 昨年度の軌道上サービスの調査項目のうち、2.1.1 宇宙探査や軌道上作業の動向調査において、SSPSとシスルナや宇宙探査に係る動向、ユースケースがピックアップされていたため、昨年度調査のアップデートの項（2.1）にて本日は報告させて頂いている。 ✓ 軌道上サービスとしては月および月周辺といういわゆるシスルナ以外に低軌道のものも含まれる。ただし、シスルナであっても無人作業が対象になり、有人の活動は調査には含まれない。 | ✓ N/A |
| | SSPSは全て静止軌道を対象としているのか？ | ✓ 実際のSSPSシステムは地上の受電設備を考えると静止軌道に構築されるものと考えている。ただし、実証試験などは低・中軌道でも実施されている。 | ✓ N/A |
| | SSPSの受電設備には開発要素はないのか？ | ✓ 受電設備にも開発要素はあり、経産省等で伝送に関する実証実験も実施されている。ただし、今回の調査は軌道上サービスという視点で実施しているので、軌道上のシステム構築に焦点を当てたものとなっている。 | ✓ N/A |
| | SSAに関して、米国はCSPoCのデータを各国に提供しており情報の発信している一方、日本は取得した情報を展開していないと認識しているが、本当のところはどうなのか？また、米国・日本以外の各国のSSAデータの獲得状況や提供状況（ロシアはH2Aのデブリもリスト化しているとの話もある）にも興味があるが、温度感やスケール感の調査は可能か？ | ✓ 日本も米国に協力しているという一般的な話はあるが、安全保障上の問題もあるため、各国のデータの提供状況について詳細を確認することは難しいところがある。一方、商用SSAデータについては調査できる可能性があるため、可能な範囲で調査してみる。また、システムやセンサ毎に得意領域が異なるため、断定はできずとも分析はできると考えられる。 | ✓ N/A |

これまでに頂いたコメントへの対応状況（3/4）

23-003-T-014

調査方針に関してこれまでいただいたコメントに関して必要箇所は反映済

| 日付 | 文科省殿/有識者殿コメント | 御回答 | 資料反映 |
|------------------|---|--|------------------------------|
| 9/28 中間 報告 | FCCも5年ルールを始めるが、適合性の判定に軌道上での実績を重視するのではないか？どのように審査をするのか。 | ✓ 設計のうえで成り立つか否かと判断していると考えている。審査の方法は後半で調査していく。 | ✓ 2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析に反映する |
| | ARTESにおいて補助率が変わるというのはすべてが対象なのか、政府負担割合が発生しているのはごく一部ではないか。 (Strategic Program LineとGeneric Program Lineがあり、Generic Program Lineのcore competitivenessだけにおいて段階に応じた補助率/政府負担割合の設定があると考えている、他は政府負担はないのではないかと) | ✓ ARTESプログラムの内、官民費用負担の対象は「ARTES Competitiveness & Growth」及び「Business Applications Space Solutions」である。なお、「Strategic Programm Line」についても官民費用負担が推測される。 | ✓ 2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析を参照 |
| | 入り口では持ち出しを求められるが、開発完了までいくと持ち出し分も還付されるという話を聞いたことがあるが実態をご存じか？ | ✓ ARTESプログラムでは、事業者の事業化目標の達成状況に応じて、ESAから費用償還（インセンティブ提供）を受けられることができる。本スキームによって、事業者は総コストの実質負担額を低減することができる。なお、費用償還に係る契約制度は、ESA契約の一般条項・条件において規定される。 | ✓ 2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析を参照 |
| | 知財の扱いについてルールがどうなっているのか？複数のプレイヤーが参加しており複雑と推察している。 | ✓ ESAでは、国プロ参加企業の知的財産権保護を最優先としたルールを採用。参加企業は、ESAに対して、無条件かつ無償のライセンスが義務付けられたものの、その他の機関については、対象によって使用条件や課金等の調整が可能となる。 | ✓ 2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析を参照 |
| | 官民連携について、官側の注目分野や投資領域の選定プロセス、民側から出てきたものからどれを優先的に採用するか、どういう評価基準で決めているのか、これらのプロセスに関する情報があると参考になる。だれがどういう風に、トップダウン型でやる部分、ボトムアップ型でやる部分を分けているか。ボトムアップでない萌芽的な領域はくみ取れないはず(海外の事例があるとわかりやすい) | ✓ 各官民連携プログラムの上位政策・戦略文書や実際の入札・公募資料等を深堀調査から調査を実施。 | ✓ 2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析を参照 |

これまでに頂いたコメントへの対応状況（4/4）

調査方針に関してこれまでいただいたコメントに関して必要箇所は反映済

| 日付 | 文科省殿/有識者殿コメント | 御回答 | 資料反映 |
|-------------|---|--|-------|
| 12/22 定例 | 寿命延長と燃料補給は別という定義か？ | ✓ 燃料を補給するものと、寿命延長としてドッキングして姿勢制御等をするものや外付けの推進エンジンのようなものを取り付けて、姿勢を制御するもの。 | ✓ N/A |
| | LEOのSSAが増加する理由は?? | ✓ 混雑する軌道上で安全な運用をする為に市場が増えると思込んでいる。 | ✓ N/A |
| | NSRの市場予測で、GEOの衛星数が伸びていないにも関わらず、寿命延長売り上げが伸びているのはなぜか？ | ✓ 静止軌道はスロットが既にいっぱいになっており、機数に関しては頭打ちになっている。コロケーションという方法も取って一つの経度に数機配置する場合もあるが、静止軌道は赤道上の経度0.5度、1度ごとにスロットが決められており、人口密集地の経度を中心として一杯になっている。 | ✓ N/A |
| | 日本が今後打上げようとする場合に、そこにすでに他国の衛星があるとそれは置けないのか？ | ✓ →同じ国の中で同一軌道に置くことはあるが、違う国の衛星と同一軌道に置くことは現実劇には困難。何らかの電波を出すことになり、軌道位置とその電波の周波数とが軌道権益となり、それはITU(国連の機関)で国際的に決められている。 | ✓ N/A |
| | 静止軌道でのタグの実績はあるのか？ | ✓ Space Logistics社のMEV-1、-2で実績がある。 | ✓ N/A |

1.1はじめに

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

3.1まとめ

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.1 宇宙探査や軌道上作業の動向調査

2.1.2 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

2.1.3 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

2.1.4 遠距離高速通信システムの調査

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析 エグゼグティブサマリ 23-003-T-014

2.1.1 宇宙探査や軌道上作業の動向調査

◆ 太陽光発電

- クリーンエネルギー問題や安全保障の観点から研究開発が進み始めている。**無線送電技術はドローンへの電力供給やIoTセンサーへの適用など非宇宙分野での活用が見込まれる。**日本は自己展開方式の採用やシンプルな構造による低廉な運用コストを強みとしたSSPS構築を目指し、他軌道上サービスとの連携についても検討を進めていくことが重要。

2.1.1 宇宙探査や軌道上作業の動向調査

2.1.2 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

◆ 軌道遷移、再配置や寿命延長

- 軌道遷移、再配置や寿命延長において我が国からサービスを提供する企業はまだ出ていない。**Northrop Graman社がMRV (Mission Robotic Vehicle) とMEP (Mission Extension Pods–Fuel pods) を使った寿命延長の契約を3社(Optus社、Telsat社、不明な1社)と締結。**
- **Obruta Space Solutions (RPOD Kit) やBenchmark (Cola Kit) 等、ターンキーソリューション (RPOやドッキング、推進系) を衛星に実装することで、開発・運用コスト低減を図る動きがある。**

2.1.3 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

◆ 月測位

- 日本の強みである高精度測位を用いた測位補強サービスの構築、及び、欧米が構築しつつあるシステムとの相互補完技術の獲得を目指す必要がある。**2023年9月に発行した「LunaNet Interoperability Specifications (Draft v5)」において、NASA/ESAに加えJAXAで国際協力することとなった。**対等な立場での欧米連携に加わるため、日本の月測位に関する技術実証のプログラム化推進が必要である。

◆ 次世代GNSS

- 我が国はGNSSの抗たん性向上に向けた研究開発を進めながら、世界に先駆けた高精度補強サービスを提供。LEOコンステラ通信衛星を活用した新たなPNTの検討を促進する。

2.1.4 遠距離高速通信システムの調査

- 欧米ではLunaNetを中心にインターオペラビリティの検討が進みつつある。**また、2023年11月NASAの深宇宙光通信(DSOC) 実証にて約1,600万キロメートルでの光通信の実証に成功する等、月以遠での通信にむけた開発が進んでいる。**日本の強みである「大容量通信」を活かして「通信」や「小型・軽量化」の技術開発を進めながら、国際連携を継続していく。

軌道上サービスに係る調査分析（1.1及び1.2該当箇所）

－アプローチ－

23-003-T-014

- 調査項目1.1及び2.～5.の間で内容が重複する際は、調査項目2.～5.の中で具体的な調査を実施する。
- 一方で、「軌道遷移、再配置」、「寿命延長」及び「ロボティクス」は、調査項目1.1にて動向分析・強み・弱み分析を行う。
- なお、調査項目1.2（後述）は、情報最新化を調査項目1.2の中で実施しつつ、調査項目2.～5.の調査結果を活用。
- 戦略・研究開発計画に資するKSFの抽出は、調査項目1.1及び1.2を総括した整理を実施する。



※ 本調査では、今年度の新規調査項目（2.～5.）を先行的に実施したため、昨年度調査対象（1.）であった調査項目に関して分析のロジスティックが逆順となっている（2.～5.の分析を踏まえつつ、1.の分析を実施）。

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.1 宇宙探査や軌道上作業の動向調査

2.1.2 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

2.1.3 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

2.1.4 遠距離高速通信システムの調査

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

2. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.1 宇宙探査や軌道上作業の動向調査

【宇宙太陽光発電システム】

昨年度（22年度）の調査サマリ①

23-003-T-014

- 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。**

昨年度（22年度）の調査サマリ②

23-003-T-014

- 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

各国が検討している宇宙太陽光発電システムの一覧

23-003-T-014

各国独自の特徴をもった独自のSSPS構築に向けて研究開発を推進している。

⇒各国最新情報を収集し、今後の日本としての戦略・研究開発計画立案に資する示唆抽出をしていく。

| | 体制 | キー技術※ | 予算 | 特徴 |
|--|---|--|---|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"> 元NASA職員Mankins氏中心に構想を検討 | <ul style="list-style-type: none"> モジュール構造 駆動式太陽指向の反射鏡アレイ（重力勾配安定） 発送電一体サンドイッチパネル | <ul style="list-style-type: none"> 2011～2012年にNASA Innovative Advanced Conceptsのフェーズ1プロジェクトとして採択され10万\$獲得 | <ul style="list-style-type: none"> 古くから検討されており、現在検討されているSSPSのひな形的存在 数多くのコンセプト検討を実施 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> カリフォルニア工科大学が主導 Northrop Grummanとは引き続き協力関係（推定） | <ul style="list-style-type: none"> 柔軟で軽量の発送電一体型パネル 自己展開機構 モジュール構造 | <ul style="list-style-type: none"> Donald Bren氏より1億\$以上の寄付 Northrop Grummanより2017年まで3年間で12.5M\$獲得 | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙から地球への送電に初めて成功 柔軟で軽量の発送電一体型パネル 自己展開機構 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> AFRL Northrop Grumman Above Space | <ul style="list-style-type: none"> 発送電一体サンドイッチタイル 可変放射率材料 | <ul style="list-style-type: none"> 主要コンポーネントの開発にAFRLからNorthrop Grummanへ1億\$以上の契約 | <ul style="list-style-type: none"> 基幹電力供給網の側面よりも、前線作戦基地への電力供給等、軍事利用を目的とした実証プログラム |
|  | <ul style="list-style-type: none"> Virtus Solis Orbital Composites | <ul style="list-style-type: none"> 送電アイデア（技術不詳） | <ul style="list-style-type: none"> 英投資会社Seraphim Spaceからアクセラプログラムを受賞（金額不明） 月面での電力確保を目的としたNASAのアイデアコンペで20万\$獲得 | <ul style="list-style-type: none"> 送電アイデアを強みとし、軌道上製造企業との連携も実施 打ち上げからシステム構築までの一連の構想を提示（技術部分不詳） |
|  | <ul style="list-style-type: none"> ESA中心に2025年までの詳細な計画が提示されている。 Arthur D. LittleとThales Alenia Space Italyが実現可能性を検討 | <ul style="list-style-type: none"> モジュール構造（SolarisではSSPSの基本的な技術検証の計画が提示されている。） | <ul style="list-style-type: none"> 65M\$（フィージビリティスタディ） GSTP（ESA・産業界との協力の下、最先端の技術を開発支援していくためのプログラム）を活用した技術開発 | <ul style="list-style-type: none"> 2025年までの最初の3年間について詳細な計画を提示 官民を巻き込んで欧州全体でのSSPS実現への姿勢がうかがえる |
|  | <ul style="list-style-type: none"> Space Energy Initiative UK宇宙庁 ビジネス・エネルギー・産業戦略省 IECL社 | <ul style="list-style-type: none"> 螺旋状の送電アンテナによる360°のマイクロ波ビームステアリング 5種類の標準的モジュール構造 反射鏡と螺旋状太陽電池による集光システム | <ul style="list-style-type: none"> 3.8M\$（主要技術の研究開発助成金） イノベーション促進のため英国大学、企業へ5.4M\$ | <ul style="list-style-type: none"> UK全体で研究開発を推進 5種類の標準モジュール構造 螺旋状の集光／送電システム |
|  | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙技術研究院 | <ul style="list-style-type: none"> 太陽電池パネルを支える太陽指向用回転可能なジョイント構造 増設可能なモジュール構造 | <ul style="list-style-type: none"> 不詳（2019年の重慶での無線電力伝送施設の初期投資として14M\$） | <ul style="list-style-type: none"> 太陽電池パネルを支える太陽指向用回転可能なジョイント構造 増設可能なモジュール構造 |

出所)

Physics World、カリフォルニア工科大学、AFRL、Virtus Solis、ESA、中国空間技術研究院

※キー技術にはSSPSの共通的なキー技術である高効率・軽量太陽電池、高効率・軽量RF-DC変換機、高指向性電力送電技術、高電力管理技術は除く

宇宙太陽光発電システムの個別事例 –SPS-ALPHA(米)–

23-003-T-014

- 米国ではSPS-ALPHAは古くから検討されており、現在検討されいるSSPSのひな形的存在
- これまでに数多くのコンセプト検討を実施

【海外SSPSプログラム一覧（1/7）】

| | |
|--------|---|
| プログラム名 | ● SPS-ALPHA(米) |
| 構造的特徴 | ● 軌道上製造方式/ロボット構築方式(推定) |
| 軌道 | ● 静止軌道 |
| 発電規模 | ● 2GW |
| 体制 | ● 元NASA職員Mankins氏中心に構想を検討 |
| キー技術 | <ul style="list-style-type: none"> ● モジュール構造 ● 駆動式太陽指向の反射鏡アレイ（重力勾配安定） ● 発電電一体サンドイッチパネル |
| 予算 | ● 2012年にてNASA Innovative Advanced Conceptsのフェーズ1プロジェクトとして採択され10万\$獲得 |
| 送電方式 | ● マイクロ波 |
| 実現予定 | ● 2030年（最初の実用システム） |

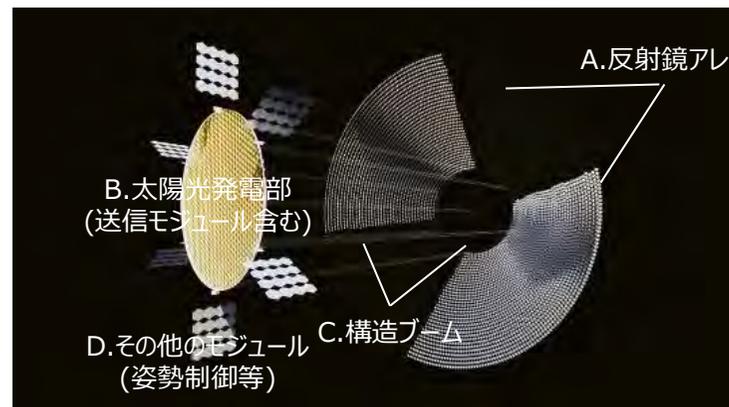


図 SPS-ALPHA (Credit : John C Mankins) [2]

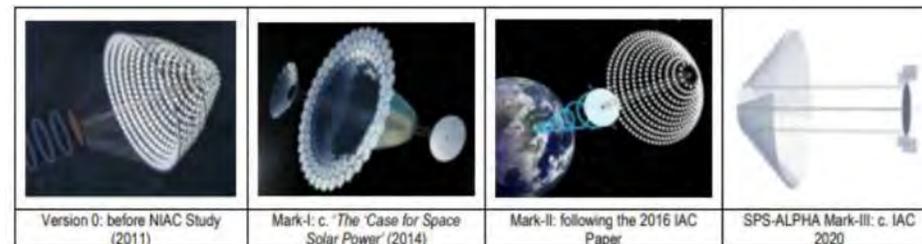


図 SPS-ALPHA Various Versions (Credit : John Mankins) [1]

※キー技術にはSSPSの共通的なキー技術である高効率・軽量太陽電池、高効率・軽量RF-DC変換機、高指向性電力送電技術、高電力管理技術は除く

出所)

1. MRI
2. Physics World

宇宙太陽光発電システムの個別事例 –SSPD(米)–

23-003-T-014

- カリフォルニア工科大学のSSPDは宇宙から地球への送電に初めて成功したSSPS実証機
- 柔軟で軽量な発送電一体型パネルを持ち自己展開機構を有していることが特徴

【海外SSPSプログラム一覧（2/7）】

| | |
|--------|---|
| プログラム名 | ● SSPD (米) |
| 構造的特徴 | ● 自己展開方式 |
| 軌道 | ● 静止軌道 |
| 発電規模 | ● 900kW(ただし軌道上での発電規模) |
| 体制 | ● カリフォルニア工科大学が主導 ● Northrop Grummanとは引き続き協力関係（推定） |
| キー技術 | ● 柔軟で軽量な発送電一体型パネル ● 自己展開機構 ● モジュール構造 |
| 予算 | ● Donald Bren氏より1億\$以上の寄付 ● Northrop Grummanより2017年まで3年間で12.5M\$獲得 |
| 送電方式 | ● マイクロ波 |
| 実現予定 | ● 2023年6月に実証実験に成功、その後の予定は不詳 |

※キー技術にはSSPSの共通的なキー技術である高効率・軽量太陽電池、高効率・軽量RF-DC変換機、高指向性電力送電技術、高電力管理技術は除く

出所)

1. カリフォルニア工科大学①
2. カリフォルニア工科大学②
3. IEEE①
4. IEEE②
5. MRI

①DOLCE
軌道上展開型超軽量複
合材実験

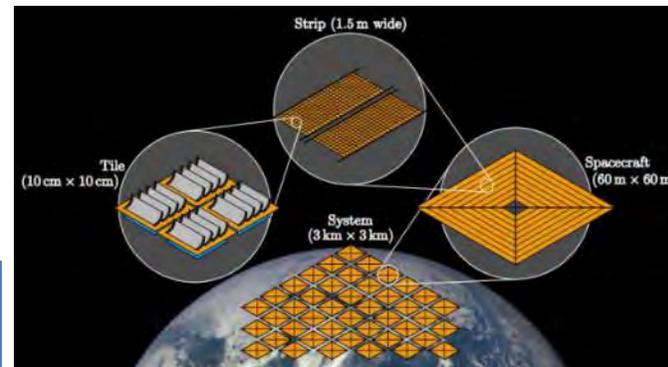


図 SSPS概念図 [3]

②ALBA
32種類の太陽電池を
評価



図 SSPDでの3つの実証目的 [1]

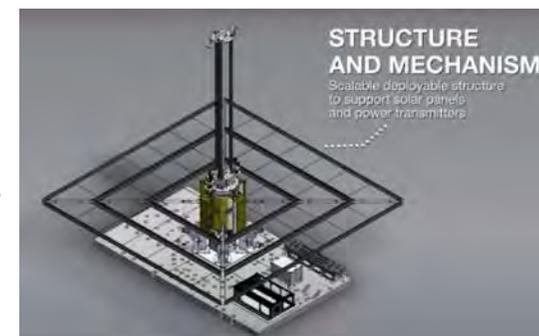


図 SSPD
DOLCE展開後概念図 [1]

宇宙太陽光発電システムの個別事例 –SSPIDR (米)–

23-003-T-014

- SSPIDRはインフラ電力供給網の側面よりも、前線作戦基地への電力供給など軍事利用を目的としたAFRLの実証プログラム（実証衛星：ARACHNE）

【海外SSPSプログラム一覧（3/7）】

| | |
|--------|---|
| プログラム名 | ● SSPIDR (米) |
| 構造的特徴 | ● 不詳 (SPINDLEにて実証予定) |
| 軌道 | ● 低軌道 |
| 発電規模 | ● 不詳 |
| 体制 | ● AFRL ● Northrop Grumman ● Above Space |
| キー技術 | ● 発電電一体サンドイッチタイル (ARACHNEにて実証) ● 可変放射率材料 (SPIRRALにて実証) |
| 予算 | ● 主要コンポーネントの開発にAFRLからNorthrop Grummanへ1億\$以上の契約 |
| 送電方式 | ● マイクロ波 |
| 実現予定 | ● 2025年に軌道上実証 |



図 SSPS 概念図 [1]

- 米軍にて必要なエネルギーを前線作戦基地など必要な場所へ供給することを目的にAFRLではSSPSの研究を実施。
- 2019年に10年後に大きな変化をもたらす可能性のある革新的技術の一つとしてSSPIDR が始動



図 ARACHNE 概念図 [2]



図 サンドイッチタイル (Northrop Grummanにて開発) [3]

【SSPIDRでの実証】

- SPIRRAL：極端な温度変化を抑える可変放射率材料のISSでの実験。2023年半ばに打ち上げ予定
- ARACHNE：サンドイッチタイルを用いた発電・送電実証。2025年に打上げ予定
- SPINDLE：展開可能な構造物の技術実証。地上での実証後、今後の方向性を検討

※キー技術にはSSPSの共通的なキー技術である高効率・軽量太陽電池、高効率・軽量RF-DC変換機、高指向性電力送電技術、高電力管理技術は除く

出所)

1. AFRL①
2. AFRL②
3. Northrop Grumman
4. Space NEWS
5. MRI

宇宙太陽光発電システムの個別事例 –Virtus Solis社 (米)–

23-003-T-014

- 商業用宇宙太陽光発電システムを開発する米Virtus Solisは送電アイデアが強み
- 技術的な情報は不詳であるが、打ち上げからシステム構築までの一連の構想を提示

【海外SSPSプログラム一覧 (4/7)】

| | |
|--------|--|
| プログラム名 | ● Virtus Solis(米) (プログラム名不詳) |
| 構造的特徴 | ● 軌道上製造方式/ロボット構築方式(推定) |
| 軌道 | ● モルニヤ軌道 |
| 発電規模 | ● 100MW-20GW |
| 体制 | ● Virtus Solis ● Orbital Composites |
| キー技術 | ● 送電アイデア (技術不詳) |
| 予算 | ● 英投資会社Seraphim Spaceによりアクセラプログラムを受賞 (金額不明) ● 月面での電力確保を目的としたNASAのアイデアコンペを受賞し20万\$獲得 |
| 送電方式 | ● マイクロ波 |
| 実現予定 | ● 不詳 |

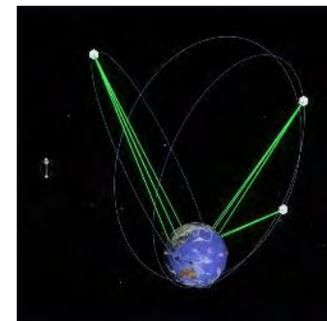


図 SSPS概念図[1]

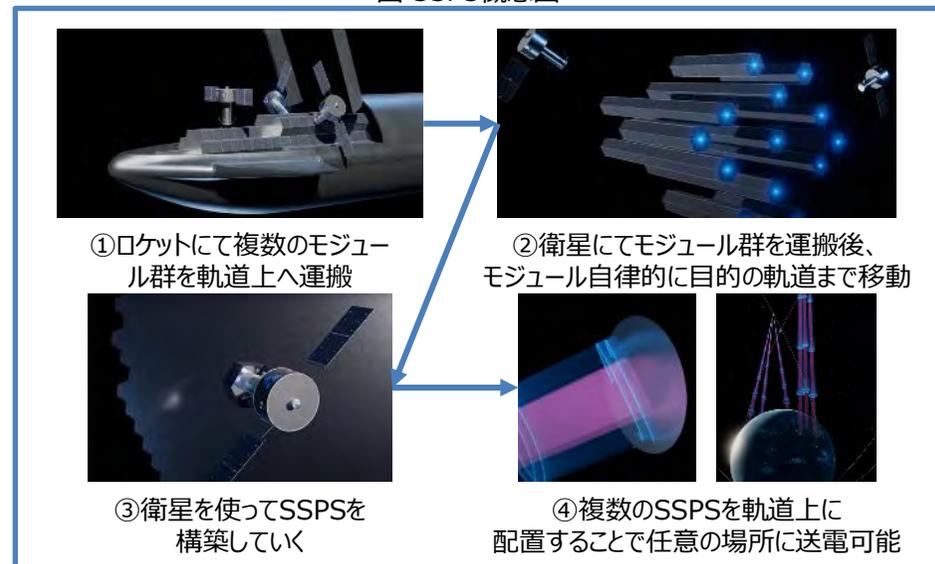


図 SSPS構築の流れ[3]

※キー技術にはSSPSの共通的なキー技術である高効率・軽量太陽電池、高効率・軽量RF-DC変換機、高指向性電力送電技術、高電力管理技術は除く

出所)

1. Virtus Solis①
2. Space News
3. Virtus Solis②
4. NASA
5. LinkedIn

宇宙太陽光発電システムの個別事例 –Solaris(欧)–

23-003-T-014

- ESAでは2025年までの最初の3年間についてSolarisプロジェクトの詳細な計画を提示
- 官民を巻き込んで欧州全体でのSSPS実現へ推進

【海外SSPSプログラム一覧（5/7）】

| | |
|--------|---|
| プログラム名 | ● Solaris(欧) |
| 構造的特徴 | ● 軌道上製造方式/ロボット構築方式(推定) |
| 軌道 | ● 不詳 |
| 発電規模 | ● 100MW~GWクラス |
| 体制 | ● ESA中心に2025年までの詳細な計画が提示されている。 ● Arthur D. LittleとThales Alenia Space Italyが実現可能性を検討 |
| キー技術 | ● モジュール構造 (SolarisではSSPSの基本的な技術検証の計画が提示されている。) |
| 予算 | ● 6500万\$ (フェーズビリティスタディ) ● GSTP (産業界との協力の下、最先端の技術を開発支援していくためのESAプログラム) を活用した技術開発 |
| 送電方式 | ● マイクロ波 |
| 実現予定 | ● 2040年 (商業規模での構築) |

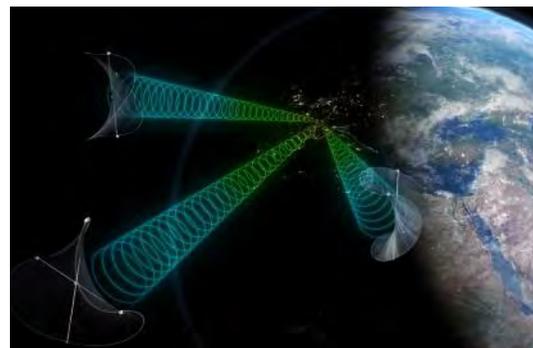


図 Solaris イメージ図^[1]

- ESAは2050年の欧州のネットゼロに貢献するクリーンエネルギーとしてSSPSに期待。

- 2023年からの3年間のSolarisプロジェクトによって、宇宙太陽光発電のメリット、技術的実現性、コスト、リスクを判断する。

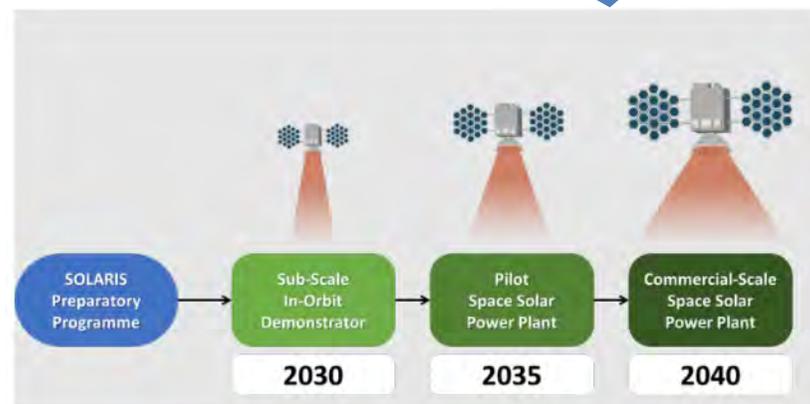


図 Solaris ロードマップ^[3]

※キー技術にはSSPSの共通的なキー技術である高効率・軽量太陽電池、高効率・軽量RF-DC変換機、高指向性電力送電技術、高電力管理技術は除く

出所)

1. ESA①
2. ESA②3. ESA③
4. Space News

5. ESA④

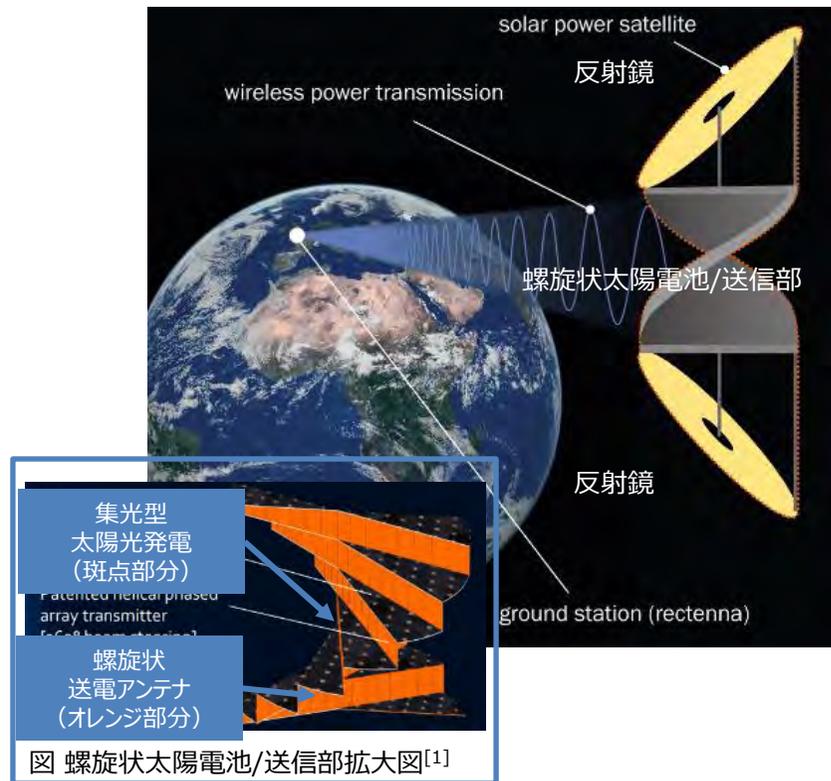
宇宙太陽光発電システムの個別事例 –CASSIOPeiA (英)–

23-003-T-014

- UK全体でSSPSプロジェクトCASSIOPeiA実現に向けて研究開発を実施
- 5種類の標準モジュール構造や螺旋状の集光/送電システムなどが特徴

【海外SSPSプログラム一覧 (6/7)】

| | |
|--------|--|
| プログラム名 | ● CASSIOPeiA (英) |
| 構造的特徴 | ● 軌道上製造方式/ロボット構築方式(推定) |
| 軌道 | ● 静止軌道 (ただし他の複数軌道にも展開可能) |
| 発電規模 | ● 2GW (サブMW～数GWの領域への拡張も可能) |
| 体制 | <ul style="list-style-type: none"> ● Space Energy Initiative ● UK宇宙庁 ● 英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省 ● IECL社 |
| キー技術 | <ul style="list-style-type: none"> ● 螺旋状の送電アンテナによる360°のマイクロ波ビームステアリング ● 5種類の標準的モジュール構造 ● 反射鏡と螺旋状太陽電池による集光システム |
| 予算 | <ul style="list-style-type: none"> ● 主要技術の研究開発助成金として3M £ (3.8M \$) ● イノベーション促進のため英国大学や英国企業へ英国宇宙庁等より4.3M £ (5.4M\$) が提供 ※1 £ = 1.25 \$ で計算 |
| 送電方式 | ● マイクロ波 |
| 実現予定 | ● 2039年 (2GWのシステムを軌道上で運用) |

図 CASSIOPeiA 概念図^[2]

※キー技術にはSSPSの共通的なキー技術である高効率・軽量太陽電池、高効率・軽量RF-DC変換機、高指向性電力送電技術、高電力管理技術は除く

出所)

1. MRI
2. Physics World
3. IECL
4. 英国政府
5. 英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省

宇宙太陽光発電システムの個別事例 –MR-SPS (中)–

23-003-T-014

- 中国では太陽指向用回転可能なジョイント構造や増設可能なモジュール構造を特徴とするMR-SPSを研究開発

【海外SSPSプログラム一覧 (7/7)】

| | |
|--------|---|
| プログラム名 | ● MR-SPS (中) |
| 構造的特徴 | ● 軌道上製造方式/ロボット構築方式(推定) |
| 軌道 | ● 静止軌道 |
| 発電規模 | ● 1GW |
| 体制 | ● 中国空間技術研究院 |
| キー技術 | <ul style="list-style-type: none"> ● 太陽電池パネルを支える太陽指向用回転可能なジョイント構造 ● 増設可能なモジュール構造 |
| 予算 | <ul style="list-style-type: none"> ● 不詳 (2019年の重慶での無線電力伝送施設の初期投資として1億元 (14M\$)) ※1元=0.14\$で計算 |
| 送電方式 | ● マイクロ波 |
| 実現予定 | ● 2050年 (1GWの商用運用) |

※キー技術にはSSPSの共通的なキー技術である高効率・軽量太陽電池、高効率・軽量RF-DC変換機、高指向性電力送電技術、高電力管理技術は除く

出所)

1. MRI
2. 中国空間技術研究院

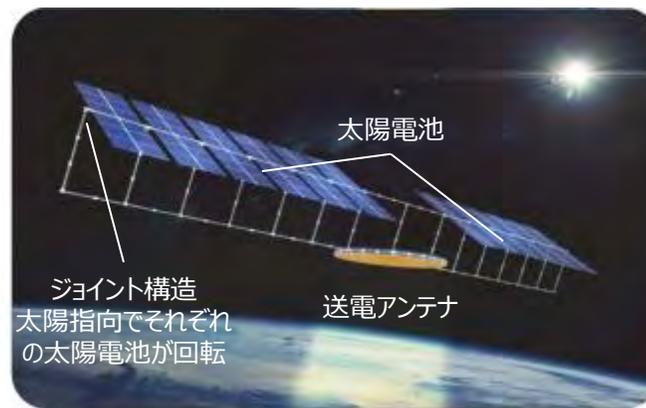


図 MR-SPS 概念図 [2]

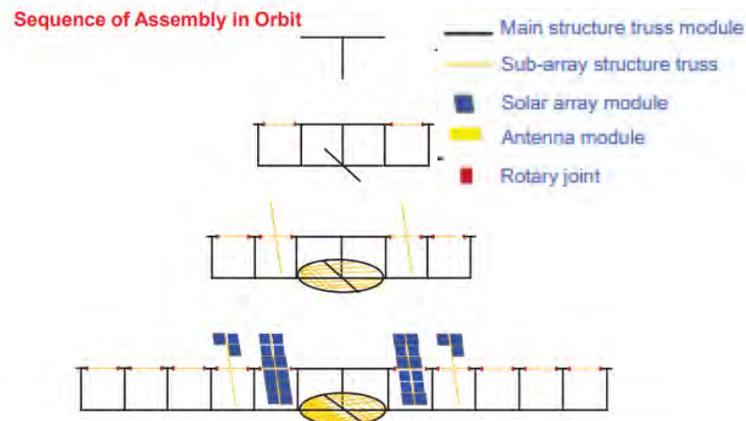


図 MR-SPS 軌道上構築イメージ [2]

宇宙太陽光発電システムに関する最新情報の更新 (1/7)

23-003-T-014

商業用宇宙太陽光発電システムを開発する米Virtus Solisが宇宙製造技術で注目されているOrbital Compositesと自社の強みである送電部分を掛け合わせることで宇宙太陽光発電システム実現を目指す。

Virtus SolisとOrbital Compositesが宇宙太陽光発電システム開発に向けてMOUを締結

実施主体：Virtus Solis（米）、
Orbital Composites（米）

- 2023年6月に世界初のメガワット・スケールの宇宙太陽光発電システム開発に向けてVirtus SolisとOrbital CompositesがMOUを締結した。今後18か月の内に概念実証段階から製造プロセスの開発段階に進む計画を示している。
 - Orbital Compositesは、2023年5月に英国の投資会社Seraphim Spaceのアクセラレータプログラムに選出されるとともに、USSFのSpaceWERXよりSBIRを獲得。\$1.7Mの開発資金にて、Axiom Space、Northrop Grumman、Southwest Research Instituteと共同で2つの重要なアプリケーション ①宇宙太陽光発電システムと②Satellite-based cellular broadbandに注力するため、軌道上でキロメートル級の巨大アンテナを3Dプリントし製造する技術開発に取り組んでいる。
- 宇宙太陽光発電システムの中核技術であるアンテナアレイ、パワーエレクトロニクス、モジュール構造はVirtus Solisが設計し、Orbital compositesはロボット製造の専門知識を活用してスケーラブルな製造プロセスを開発し、3Dプリント位相配列アンテナとターンキー衛星、および宇宙空間での保守・組立・製造（ISAM）部分を担う。
- Virtus SolisのCEOは、Orbital Compositeのサービスとしての製造機能は、Virtus Solisの衛星アーキテクチャの開発を加速し、36ヶ月間で100以上の衛星を使った最初の軌道上テストを行い、大量生産へと発展させるとしている。

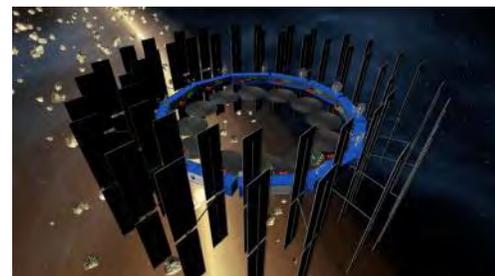


図 Orbital Compositesによって製造されるアンテナ基礎構造のイメージ図（コンテナ毎のユニット（青）をもとに、3Dプリンティング、最新のロボット工学および自律システム技術を用いて製造される^[2]

MOU：Memorandum of Understanding
USSF：United States Space Force

出所)

1. Payload, Orbital Composites, Virtus Solis Team on Space-Based Solar Power Station
2. CompositeWorld, Orbital Composites wins award from U.S. Space Force to build space factories for antennas

3. Global News Wire, NINE COMPANIES JOIN THE CATALYST ACCELERATOR'S ON-ORBIT SERVICING, ASSEMBLY, AND MANUFACTURING COHORT

宇宙太陽光発電システムに関する最新情報の更新 (2/7)

23-003-T-014

軌道上サービス提供を目指す米Above SpaceがUSSFのSBIRを獲得。AFRLが開発している、前線作戦基地などへエネルギーを供給するためのSSPS (SSPIDR)実現に向けた官民連携強化が伺える。

Above SpaceがSSPIDR実現に向けてSpaceWERXよりSBIRを獲得

実施主体：Above Space (米)

- 2019年に設立されたAbove Spaceは2023年3月に迅速に展開可能な軌道上での構造技術を開発し、多くの種類の電子機器をサポートするために、米国宇宙軍のSpaceWERXよりSBIRを獲得した (開発資金：1.7M\$) 。
 - 同社はこれまではOrbital Assemblyとして知られていたが、軌道上の構造物を組み立てるだけでなく、防衛や商業用途のための自動宇宙プラットフォームの開発にまで拡大したため企業名を変更している。
- 上記に加えて同社は、米空軍とAscent Solar Technologies, Inc.とのパートナーシップにより、薄膜太陽電池の軌道上製造に関する重要な契約を締結している。開発資金は\$75,000 (約11M円※) 。
 - Ascent Solar Technologies, Inc.は、軽量で柔軟性と耐久性に優れたCIGS薄膜太陽電池ソリューションの設計と製造における米国企業。
- Orbital Assemblyは前線作戦基地への電力供給など軍事利用を目的としたAFRLの宇宙太陽光発電システム実証プロジェクトであるSSPIDRにおいてビームエネルギー用の受信機のプロトタイプを設計および開発に従事している。

※1\$=145円で計算

AFRL : Air Force Research Laboratory



図 Orbital Assemblyの取り組み概要[2]

出所)

1. Space News, [Above: Orbital develops energy systems for spacecraft under recent awards](#)
2. Above Space, [1.7 Million Dollar Contract Awarded to Above: Orbital Inc.](#)

3. Satellite Evolution Group, [US Air Force awards contract to Above: Orbital and Ascent Solar Technologies for in-orbit solar fab](#)

宇宙太陽光発電システムに関する最新情報の更新 (3/7)

23-003-T-014

英国ではSSPS分野のイノベーション支援のために英国の大学や企業に資金提供を実施しており、SSPSの実現に向けた産学官の連携を強化している。

英国政府が英国の大学や企業に対してSSPS分野のイノベーションに向けて資金提供

実施主体：エネルギー安全保障・ネットゼロ省（英）、英国宇宙庁（英）

- 英国エネルギー安全保障長官によって、SSPS分野のイノベーションを推進するために、英国の主要な大学やテクノロジー企業が4.3M £ (787M円※)の政府資金の一部を受領したことが発表された。

※1 £ = 183円で計算

- 当該取り組みは英国政府より出されていたコンペティションで、SSPSに必要な技術、エネルギーシステム、ミッション アーキテクチャを開発するプロジェクトに助成金を提供するもの。
- 受賞した英国大学・企業の概要は以下の通り。
 - **ロンドン大学クイーンメアリー校**：フェーズドアレイアンテナを用いた高効率無線電力伝送システムの開発
 - **ブリストル大学**：無線電力伝送の性能、安全性、信頼性を明確にするためのツール開発
 - **ケンブリッジ大学**：高放射線環境での長期ミッションに耐え、寿命、エネルギー収率を向上させ、単位エネルギーあたりのコストを下げる事ができる集光型太陽光発電デバイスの開発
 - **インペリアル・カレッジ・ロンドン**：SSPSの実現可能性と脱炭素寄与に向けた定量的調査
 - **Satellite Applications Catapult**：CASSIOPeiAの送電用アンテナのための屋内実験及び、CASSIOPeiAのベースロード電力のための商業的で持続可能なSSPSの概念設計
 - **MicroLink Devices UK Ltd**：従来よりも優れた特徴を持つGaAsベースの太陽電池の開発
 - **EDF Energy R&D UK Centre Ltd**：SSPSに関連する地上施設で活用可能な技術的なレビュー、SSPSに関する自然リスクの調査、SSPSのエネルギーシステムとしての価値検討

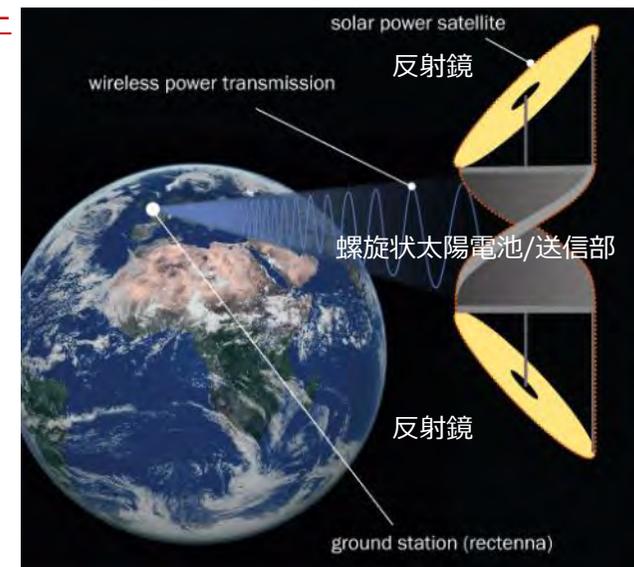


図 イギリスで検討されているSSPS CASSIOPeiA 概念図^[2]

出所)

1. GOV. UK, [UK shoots for the stars as space-based solar power prepares for lift-off](#)
2. GOV. UK, [Space Based Solar Power Innovation Competition: details of organisations awarded funding](#)

3. Physics World, [Space-based solar power: could beaming sunlight back to Earth meet our energy needs?](#)

宇宙太陽光発電システムに関する最新情報の更新 (4/7)

23-003-T-014

カリフォルニア工科大学はSSPD実証機にて、宇宙空間での無線送電及び地球への無線送電の実験に世界で初めて成功した。今後実施が予定されている軌道上展開技術についても注視していく必要がある。

カリフォルニア工科大学は宇宙空間での無線送電に初めて成功

実施主体：カリフォルニア工科大学(米)

- 2023年1月に打ち上げられたSSPD実証機が軌道上にて、宇宙空間での無線送電及び地球への無線送電の実験に成功した。
- 今回の実験では、SSPDでの実証目的の一つであるMAPLE (Microwave Array for Power-transfer Low-orbit Experiment) に搭載された柔軟で軽量なマイクロ波電力送信機から、約30cm離れた反対側にある受信機に到達した後、直流電力に変換されLEDが点灯したことが確認された。
- MAPLEは密閉されていない構造であるため、SSPS構築時に課題となる幅広い温度変動や耐宇宙環境性のテストも同時に実施できるとされている。
- また、MAPLEのマイクロ波電力送信機からMAPLEの窓から放射されたマイクロ波をカリフォルニア工科大学のキャンパスの受信機にて受信できたことも発表されている。
- 今後、軌道上展開実証が予定されているが時期不明

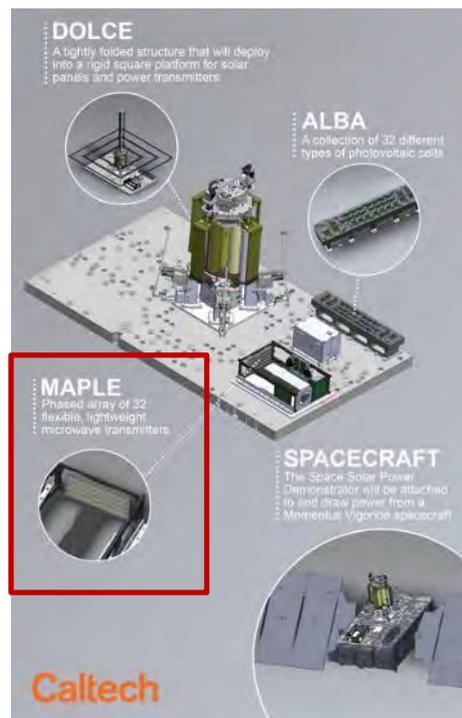


図 衛星コンフィギュレーション

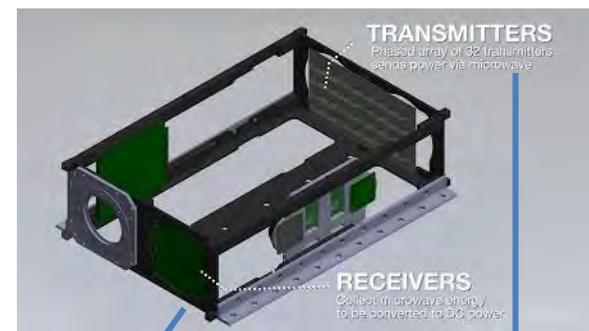


図 MAPLE拡大図

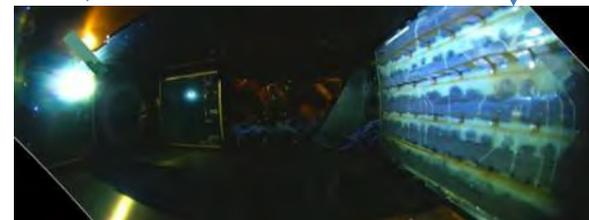


図 宇宙空間での実験の様子 (右が送電部分で左が受電部及びLED)

出所)

1. カリフォルニア工科大学、[In a First, Caltech's Space Solar Power Demonstrator Wirelessly Transmits Power in Space](https://www.caltech.edu/news/in-a-first-caltechs-space-solar-power-demonstrator-wirelessly-transmits-power-in-space)

宇宙太陽光発電システムに関する最新情報の更新 (6/7)

23-003-T-014

ESAではSolaris実現に向けて、産業界と協力する既存の予算枠組みの活用も予定されており、**官民を巻き込んで欧州全体でのSSPS実現への姿勢がうかがえる。**

ESA、宇宙太陽光発電の実現可能性に向けたSolariプロジェクトを始動 (2/2)

実施主体：ESA (欧)

- ESAでは、2022年11月に閣僚レベルのESA理事会で承認された資金以外にも、GSTP等様々な枠組みを使ってSolaris実現に向けた研究開発を進めていく予定。

※GSTP (General Support Technology Programme) : ESA・参加国・産業界で協力の下、将来ミッション等での利用を見据え、技術レベルが高くない最先端の技術を開発支援していくためのプログラム。 出資率は、100%の政府資金提供がなされるケースもあれば、一部官民での費用分担 (比率不詳) が生じるケースもある。

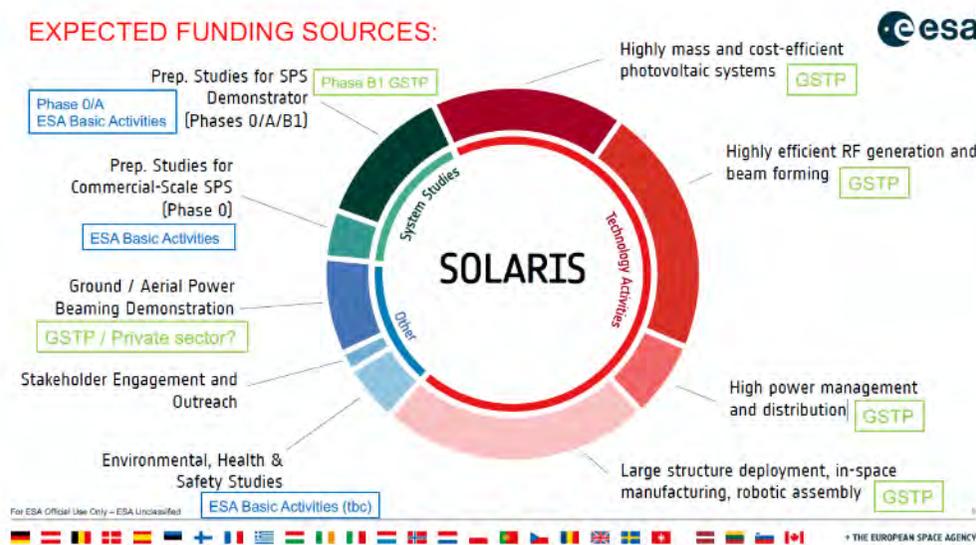


図 Solaris 活用予定予算

出所)

1. ESA, SOLARIS: Overview and current status Sanjay

宇宙太陽光発電システムに関する最新情報の更新 (7/7)

23-003-T-014

商業用宇宙太陽光発電システムを開発する米Virtus Solisは多くのNEW Space企業を支援しているSeraphim Spaceのアクセラレータープログラムに選出された。技術的な情報は不詳であるものの、打ち上げからシステム構築までの一連の構想が提示されており今後の動向が期待される。

Virtus SolisがSeraphim Spaceのアクセラレータープログラムに選出

実施主体：Virtus Solis（米）

- 商業用宇宙太陽光発電システムを開発する米Virtus Solis（2019年設立）は英国の投資会社Seraphim Spaceは2023年5月に最新のアクセラレータープログラムに参加する宇宙関連スタートアップ9社の一つに選定された。
- Seraphim SpaceはIceyeやHawkeye360、Astroscale、Spire Global等多くのNew Space企業への投資を実施している。
- Virtus Solisの構想では、複数のモジュールをロケットにて運搬。衛星を使ってモジュールをSSPSを構築する軌道まで運搬し、楕円形のモルニヤ軌道にてSSPSを構築して地上へマイクロ波にて送電。10万個の送電アレイで100MWの発電が可能で、アレイは20GW以上にまで拡大することができる。
- SSPSは1つまたは複数の衛星にて地上局の視線上に常時配置し、世界中の電力が必要な場所に電力を供給することができる。
- SSPS構築に関する技術的な詳細については公開されていないものの、動画にて打ち上げからSSPS構築までの一連の構想が示されており、今後の動向を注視していく必要がある。
- 送電技術に関しては、先行して技術実証を実施している。（送電距離100m程度と推察）
また、月面での電力安定確保を目的にしたNASAのアイデアコンペPhase 1を受賞し20万\$を獲得。次のPhaseではソリューションの主要部分の開発とテストが求められている。

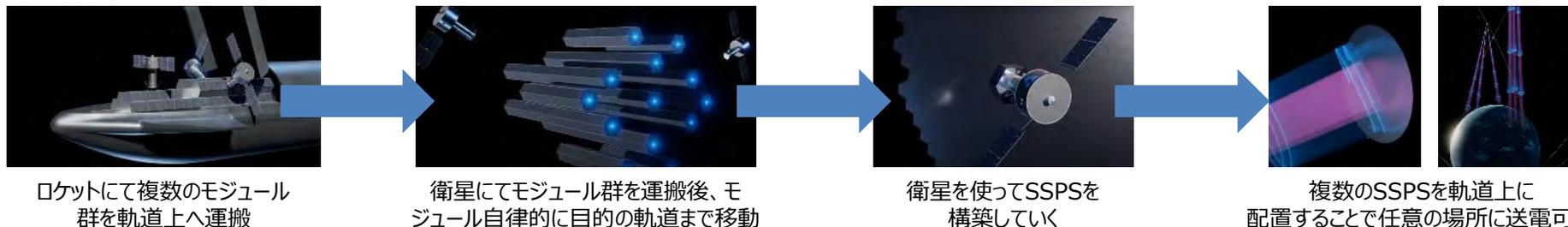


図 SSPPS構築の流れ^[2]

出所)

1. Space News, [Seraphim picks startups for eleventh accelerator program](#)
2. Virtus Solis, [HP](#)
3. NASA, [Seven Teams Advance in NASA's \\$5M Watts on the Moon Challenge](#)
4. LinkedIn, [Virtus Solis Technologies](#)

宇宙太陽光発電システムに関する各国の動向調査及び日本の強み弱み分析 23-003-T-014

- クリーンエネルギー問題や安全保障の観点から米欧を筆頭に研究開発が急速に進み始めている。
- 日本ではJAXAを中心に取り組みが進められているだけでなく、非宇宙企業の参画も始まっている。無線送電技術はドローンへの電力供給やIoTセンサーへの適用など非宇宙分野での活用が見込まれる。

海外動向



- ✓ 各国で検討されているSSPSのひな形的存在であるSPS-Alphaや前線作戦基地への電力供給を目指したSSPIDRなど複数の構想が検討されている
- ✓ 学術分野ではCALTECHのSSPDが2023年6月に宇宙から地球への送電に初めて成功
- ✓ ベンチャー企業であるVirtus Solisも検討を進めている



- ✓ ESAは2050年までのNet Zeroに貢献するためSSPSの実現可能性を調査するSolarisプロジェクトにて、技術的実現性やリスク等の判断を開始
- ✓ 2025年までの3年間で宇宙太陽光発電のフィージビリティスタディを実施



- ✓ UK全体でNet Zero戦略を進めるためにSSPSプロジェクトCASSIOPEIA実現に向けた研究開発を実施
- ✓ 5種類の標準モジュール構造などが特徴



- ✓ 2019年において無線電力伝送施設への14M\$の初期投資やCASTが主導してMR-SPSの構想を検討している一方で、技術状況や実証状況に関しての情報は不詳。

日本の強み弱み分析



強み

- ✓ 2023年6月に改定された宇宙基本計画にて、SSPSの実用化に向け着実に取組を進める旨が記載されており、当該技術の開発への政府からの強力な支援が期待される
- ✓ 長期的に研究開発を続けた結果として要素技術が蓄積されている
- ✓ 無線送電実証衛星プロジェクト^[2]にて計画されている
- ✓ 月面を対象にしたSSPSに関する検討における非宇宙企業の参画など、国内において幅広いプレイヤーの参画が始まっている^[1]

弱み

- ✓ 2010年代後半からはクリーンエネルギー問題、安全保障領域含む活動領域の拡大、および基礎技術の進展(特に輸送コスト)に伴い各国で検討が活性化されている。一方で、日本においては安全保障やネットゼロの観点等からのSSPSへの利用ニーズが欧米に比して相対的に低く、プロジェクト化が遅れている。
- ✓ 無線送電実証衛星プロジェクト^[2]の宇宙実証時期は2030年以降としており一部の海外動向に比べるとやや遅れをとっている
- ✓ 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

1. LUNA RING

2. J-Spacesystems:宇宙システム開発利用推進機構 (USEFモデル)

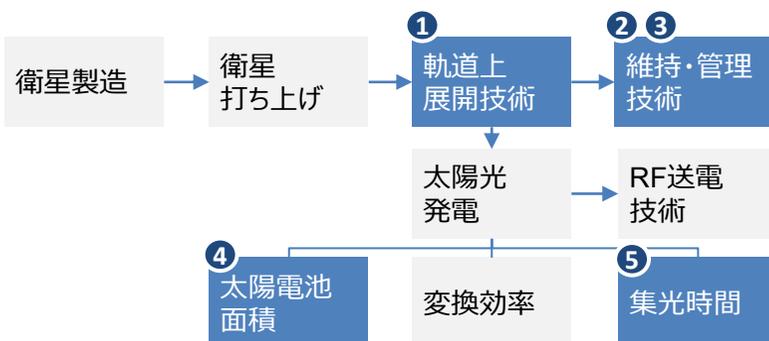
宇宙太陽光発電システムに関する研究開発項目の分析（1/2）

23-003-T-014

各国が基幹電力に資するエネルギー源として検討しているSSPS構想において、運用コストに係る技術的要素を比較して日本の特徴やこれから進めていくべき研究開発項目を分析。

SSPSにおける軌道上サービスに関連する重要要素（製造～運用）

- SSPSにおける軌道上サービスに関連する重要要素の中でSSPS固有の要素であり、運用コスト優位性を生み出す機能・性能を下記のように整理



※ただし、本検討では軌道上サービスにおける構造的部分に注目しているため、太陽電池やRF-DC変換等の高効率化に関しては検討外としている

運用コスト優位性をもたらす機能・性能（KPMG分析）

| | |
|--------|---|
| ①展開複雑性 | <ul style="list-style-type: none"> 自己展開方式 軌道上製造/ロボット構築方式 ⇒自己展開方式の方がシンプルであるため比較的安価 |
| ②運用複雑性 | <ul style="list-style-type: none"> 駆動部分無 駆動部分有 ⇒駆動部分が無方が構造的にシンプルであるため安価 |
| ③構造複雑性 | <ul style="list-style-type: none"> モジュール構造 モジュール構造以外 ⇒モジュール構造の方が、構造的にシンプルでかつ大量生産もしやすいため安価 |
| ④大きさ | 運用コスト優位性は太陽電池面積の大きさに比例 |
| ⑤集光効率 | <ul style="list-style-type: none"> 能動的集光システム 受動的集光システム ⇒能動的集光システムの方が、集光時間に対する発電効率が向上し発電コストが安価 |

世界各国の基幹電力として期待されているSSPS構想



※民間事業者が検討している構想以外で最新の構想として2008年に報告されたUSEFモデルを対象とする

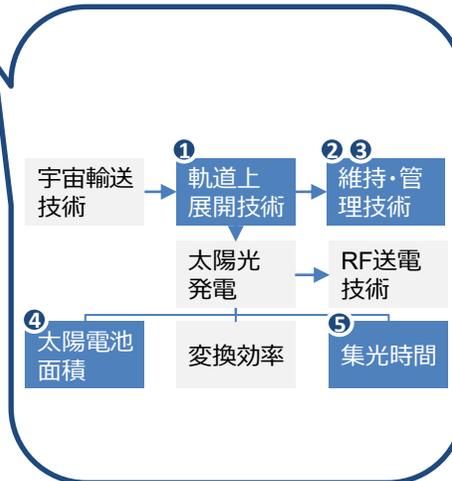
宇宙太陽光発電システムに関する研究開発項目の分析 (2/2)

23-003-T-014

日本は自己展開方式の採用やシンプルな構造による低廉な運用コストを強みとしたSSPS構築を目指しながら、他軌道上サービスとの連携についても検討を進めていくことが肝要ではないか。

RF送電技術は、非宇宙分野での活用も見据え民間での技術開発が進められているが、宇宙特有の軌道上展開技術や他分野での成果を軌道上で実証する機会の創出と推進が重要と考える。

| | コスト | ①展開複雑性 | ②運用複雑性 | ③構造複雑性 | ④大きさ (定量表記) | ⑤集光効率 |
|--|-----------------|--------------------------|--------------|---------|----------------|--------------------|
|  | 8.7円/kWh | 軌道上製造/ロボット構築方式 (推定) | 駆動部有 | モジュール構造 | ~3.3km×~4.5km | 集光効率性向上施策有 |
|  | 7.84-24.96円/kWh | 軌道上製造/ロボット構築方式 (推定) | 駆動部無 (推定/不詳) | モジュール構造 | 1辺1.7km(面積不詳) | 集光効率性向上施策無 (推定/不詳) |
|  | 6.96円/kWh | 軌道上製造/ロボット構築方式 (推定) | 駆動部無 (推定) | モジュール構造 | 直径1.7km | 集光効率性向上施策有 |
|  | 21.75円/kWh | 軌道上製造/ロボット構築方式 (推定) | 駆動部有 | モジュール構造 | 11.8km×0.6km | 集光効率性向上施策有 |
|  | 9.3-15.9円/kWh | 自己展開式 (主要な発電電一体型パネル部分) ※ | 駆動部無 (推定) | モジュール構造 | 約2.5km四方 | 集光効率性向上施策無 |



1\$=145円、
1€=160円で計算
オレンジセル：コストの観点で安価になると考えられる機能・性能

※一部構造についてはロボットによる組立についても検討が行われている

【参考】2030年の電源別発電コスト試算結果 (円/kWh)

石炭火力：13.6~22.4、LNG火力：10.7~14.3、原子力：11.7~、石油火力：24.9~27.6、陸上風力：9.8~17.2、洋上風力：25.9、太陽光 (事業用)：8.2~11.8、太陽光 (住宅)：8.7~14.9

研究開発項目 (キー技術、 KSF)

- ✓ **宇宙大型構造物展開技術**
HTV-Xによる展開実証のような軌道上における宇宙大型構造物展開実証を進めることで、日本のSSPS (USEFモデル) の特徴の一つでもある自己展開技術の早期成熟を目指す
- ✓ **他軌道上サービス技術との連携**
SSPSを軌道上サービスの1つのユースケースとして考慮しつつ、RPOやロボット等の軌道上サービス全般の技術を要する他のユースケース(デブリ除去、燃料補給等)と協調して実証を進めていく

出所)
昨年度報告書、Physics World、AFRL、ESA①、ESA②、IECL、中国空間技術研究院、佐々木進、資源エネルギー庁

2. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.1 宇宙探査や軌道上作業の動向調査

2.1.2 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

【軌道上サービスに係る調査分析】

昨年度（22年度）の調査サマリ①

➤ RPO技術の成熟と、サービスの幅を広げることで、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 | <p>現状の日本における動向分析</p> <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> |

昨年度 (22年度) の調査サマリ②

23-003-T-014

- 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 | |
| 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 <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 <ul style="list-style-type: none"> • アームを使った燃料補給 <ul style="list-style-type: none"> ✓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 <ul style="list-style-type: none"> ✓MEV-1/MEV-2(米) • アームを使った組立・製造 <ul style="list-style-type: none"> ✓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 | 協協力物体でのRPO技術やロボティクスはETS-7(1997年)で実証 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 CRD2において非協力物体へのRPO技術が実証される計画 | 強み <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 弱み <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

[考察]

- 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。

昨年度（22年度）の調査サマリ③

23-003-T-014

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

軌道上サービスの動向概要（1/2）

23-003-T-014

- 軌道上サービス市場への新規商業プレーヤー参入が見られており、今後10年で市場規模が大きく成長すると見込まれる。政府の資金提供や複数分野にわたる技術開発を通じたサービスの多様化等により、資金確保・収益獲得が想定される。
- 他方で、技術開発・実証スケジュールや技術実証の成否等に応じて今後の市場性が変動する不確実性を有している。

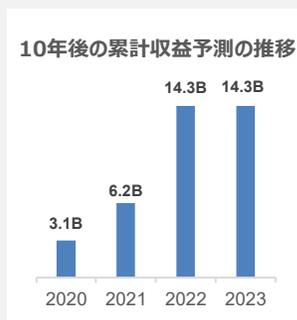
軌道上サービスの開発状況

- 政府の資金提供による技術開発から、商業プレーヤーの軌道上サービス市場への参入障壁が小さくなってきている。
- また軌道上サービス市場において、特定の分野に絞った開発ではなく、複数の分野（再配置、寿命延長、デブリ除去等）にまたがった技術開発を進めるプレイヤーが増えてきている。サービスの多様化が行われることで、ポートフォリオ性を持たせた収益獲得を目指していると考えられる。
- 軌道上サービスのビジネスはロボティクス分野の発展も見込まれており、ロボティクス技術が開発段階に入ったことから、衛星の点検や修理・機器の交換といったサービスの需要が今後高まると想定される。

市場規模予測

- NSR社のIn-Orbit Service: Satellite Servicing, ADR and SSA 6th Editionによると、今後10年の累計収益の予測額は、昨年同様に2021年時の予測値を大幅に更新した、\$14.3Bと予測している。但し、技術開発・実証スケジュールの遅延等を背景に、数年単位での収益化の遅れも見込まれる。
- GEO/LEOにおいて、それぞれの収益上昇の要因が存在する。

| 収益増加の要因 | |
|---|--|
| GEO：寿命延長サービスの広がり | LEO：衛星コンステレーションの増加 |
| <ul style="list-style-type: none"> ● 複数機（のクライアント衛星）への寿命サービス開発と拡大が見込まれる。（累計収益が\$7.6Bに到達する予測） ● 一方で、MEV-1/MEV-2のような寿命サービスは価格面で拡大が限定的。 | <ul style="list-style-type: none"> ● 衛星打上数の増加に伴い、LMD*の需要増大、SSAサービスの開発と拡大が見込まれる。（累計収益が\$6.6Bに到達する予測） ● ADRは技術実証の結果により市場動向が変化すると予測されている。 |



今後10年間の市場規模予測から想定される軌道別の衛星数



出所)

1. NSR社, In-Orbit Service: Satellite Servicing, ADR and SSA 6th Edition

※LMD：Last Mile Delivery

軌道上サービスの動向概要（2/2）

23-003-T-014

今後の軌道上サービス市場において、政府・安全保障機関による投資増加及び技術実証ミッションや商業化を通じた新規顧客開拓の拡大が見込まれる。市場の更なる拡大のためには、技術成熟度の向上、サービスコストの低下政策・法規制によるビジネス環境の整備への対応が重要となる。

今後の動向

- 政府・安全保障機関による投資増加に伴い、新規商業プレーヤー（スタートアップ等）の参入が見込まれる。また、技術実証ミッション及び商業化に向けた動きが加速することで、新規顧客開拓等（需要側）の広がりも見込まれる。
- 米国を拠点とする事業者が、運用終了後5年以内に軌道離脱を求めるガイドラインへの追従することで、軌道離脱市場の需要は高まると予想されている。

軌道上サービス市場の更なる拡大のために

- 技術開発・実証に向けたスケジュールや実証に係るリスク、国際的なルール形成の継続的な検討等、軌道上サービスを実現するための懸念が存在する。
- 市場拡大における懸念事項を、技術成熟・サービスコスト・政策・法規制の観点で集約する。

現状の懸念

| | |
|---------|--|
| 技術成熟 | <ul style="list-style-type: none"> ● 軌道遷移・再配置、寿命延長に比べると、それ以外の分野（燃料補給、SSA（衛星ベース）、ADR、軌道上製造、修理・交換等）は、比較的低い技術成熟度にある（技術開発や軌道上実証に向けた取り組みが進められている段階）。 ● サービスコスト削減が求められている一方で、各サービスにおける技術開発が遅れ、実証及びミッションの延期が生じる。 ● 軌道上での技術実証にあたっては、軌道上サービス固有のリスク（RPOや把持、ドッキング等の失敗による衝突等）に対する懸念から、実証機会・スケジュール等に制約が生じ得る。 |
| サービスコスト | <ul style="list-style-type: none"> ● 政府機関によるプログラムが多く、商業化するにはサービス価格が高いため、サービスを利用するユーザとなり得る事業者の導入に至っていない。 |
| 政策・法規制 | <ul style="list-style-type: none"> ● 保険等の市場確立にむけたビジネス環境の整備が進んでいない。 ● デブリ低減に向けたガイドライン等が政府や民間から発表されているものの、軌道上サービスの各分野に関わる政策・法規制について各国・民間等で継続的な検討が行われている状況。 |

出所)

1. NSR社, In-Orbit Service: Satellite Servicing, ADR and SSA 6th Edition

軌道遷移、再配置に関する最新情報

23-003-T-014

「★」の記載がある事例は、一件一葉形式にて詳細を後述

軌道遷移、再配置

寿命延長

ロボティクス

- **Momentumは、水推進システムを利用した軌道上昇実証に成功**（化学推進よりも安全性が高く、電気推進よりも大きな推力を発生可能）。将来的に月・小惑星から抽出した水を衛星へ補給することを視野に入れている。
- **Rogue Spaceは、自律的な近接・回避システムをコア技術として、AWSのアクセラレータプログラム参加や宇宙軍Orbital Prime等の後押しを受けながら、自社の技術力を高めている**

| # | プログラム名 | ASTEC殿昨年度調査 | 最新情報（昨年度調査からの特記事項等） | 出所 |
|--|--|--|--|--------------------|
| 運用開始後の再配置サービス | | | | |
| 1 | Life Extension Service (Astroscale社) | <ul style="list-style-type: none"> 2020年代半ばのサービス開始を予定。GEO通信衛星等を墓場軌道や他の軌道へ移動させる。対象衛星の軌道維持や姿勢制御、傾斜角の修正も対応可能。 サービスは4本のアームで対象衛星ヘドッキングする。軌道離脱可能であり複数機へのサービスを想定している。 | (大きな動きなし) | — |
| 2 | MEV-1、MEV-2 (Space Logistics社/Northrop Grumman社) | <ul style="list-style-type: none"> MEV-1がIntelsat-901ヘドッキングを実施し、当該衛星に対する寿命延長サービスを提供中（2020年2月より）。 サービスの推進力により軌道変更を可能としている。 | (最新情報は「寿命延長」にて記載) | — |
| Last One Mile Service（打上げ時の目的軌道までの移動） ※Last One Mile Serviceは下記以外にも多数存在（D-Orbit、Exotrail等）しているものの、直近動きのあった事例を記載。 | | | | |
| 3 | Reliant (Exolaunch社) | <ul style="list-style-type: none"> グリーンプロパント推進システムを使用予定。 3Dプリンティングを使用したダウンサイズ（軽量化）を図っている。 将来は搭載衛星放出後にデブリ除去を実施する。 | ※左記で調査対象であった「Reliant」と異なる製品ラインであるものの、「EXOpod」の動きを参考記載 2023年5月 ：Exolaunchは、16Uクラスの小型衛星として初めてGEO上への投入（SpaceX/Falcon Heavy）を成功させた。同社のEXOpodに搭載された各衛星の展開も実施された。 | Exolaunch |
| 4 | Vigoride (Momentum社) | <ul style="list-style-type: none"> Momentumは、Microwave Electrothermal Thrusters (MET) を採用。2022年サービス開始。 Made In Space社のロボットアームを用いた寿命延長サービスも視野に入れている。 | 2023年3月～5月 ：Vigoride-5のが採用している 水推進システム であるMET（マイクロ波で水を気化させ、特定方向に噴出させることで推力を発生させる方式）により、衛星の軌道上昇（約2～3km）に成功。3月の実証開始後、 累計140分以上のスラスタ噴射を実施 。将来的には月や小惑星から抽出した水を、METを搭載した宇宙船に補給することも視野に入れている。 | Space News Uchubiz |
| 5 | Orbots (Rogue Space Systems Corporation) ★ | (対象外) | Rogueは 自律的な近接・回避システムをコア技術 として、点検や軌道遷移・再配置サービス展開を目指す。 同社はAWSのアクセラレータプログラム参加や宇宙軍Orbital Primeを介したSTTR資金を活用して、自社の技術力を高めている。 | Rogue |

軌道遷移、再配置に関する個別事例

23-003-T-014

Rogueは自律的な近接・回避システムをコア技術として、点検や軌道遷移・再配置サービス展開を目指す。同社はAWSのアクセラレータプログラムや宇宙軍傘下のプログラムにも選出され、自社の技術力を高めている。

Rogue Spaceは、AWSのアクセラレータプログラム等を通じて自社の技術力を高めている

実施主体：

Rogue Space Systems Corporation
(米)

- 米国スタートアップであるRogueは、**軌道上サービス（点検、軌道遷移・再配置等）を提供するサービス「Orbots」**を開発中。
 - Orbotsは、①LAURA（12U衛星）：点検、②FRED（OTV）：軌道遷移・再配置、③CHARLIE（16U衛星）：点検※¹の3つで構成^[1]。
- 同社は、**自律的な対象衛星への近接運用や他物体との衝突回避を自動的に判断するプラットフォームAESOP**（AI-Enabled Sensory Observation Platform）を開発しており、全てのOrbotsラインナップへ搭載予定^[1]。2023年10月に、SpaceX/Transporter-9を介して、AESOPの実証等を実施予定^[2]。
 - 米国宇宙軍SpaceWERX Orbital PrimeイニシアチブのSTTR（Small Business Technology Transfer）フェーズ1において、Rogueは13の提案を行い、全てが採用され、そのうち11提案が合計2,750万米ドルの資金調達に成功した^[4]。
- また、2023年4月には、**AWSが主催する宇宙アクセラレータプログラムの14社の中の一つに選ばれた^[4]**。4週間のプログラムにおいて、最大10万米ドル相当の技術サービスの提供含むクラウドを活用した技術的及びビジネス的なサポートが提供される。
 - 今年で3年目となる当プログラムでは、これまでHawkEye360やD-Orbit、LeoLabs、Ursa Space等多くのNew Space企業が参加。
- 軌道遷移・再配置サービスを提供する**「FRED（OTV）」**は、ロケット打上時にクライアント衛星を搭載するサービスに加え、**軌道上でクライアント衛星を捕獲し、周回軌道（LEO、MEO、GEO）やシスルナ間の移動サービスを提供する**。
 - 同OTVは、ロボティクス機構を装備しており、衛星の修理機能を有する。
 - OTVの推進方式として電気推進を予定。
 - 2024年Q1にサービス開始予定。



図 軌道上サービスロボット衛星「LAURA」、「FRED」、「CHARLIE」のイメージ図^[5]

※1：対象衛星に対する修理作業等のサポートに特化

出所)

1. Rogue Space Systems Corporation, [Orbots - Rogue Space Systems Corporation](#)
2. LinkedIn, <https://www.linkedin.com/company/rogue-space-systems-corporation>
3. Rogue Space Systems Corporation, <https://rogue.space/news/1337/rogue-space-systems-completes-and-delivers-major-milestone>

4. SpaceNews, <https://spacenews.com/aws-chooses-14-startups-for-its-third-space-accelerator-program/>
5. Satsearch, <https://satsearch.co/products/rogue-space-fred-orbital-transport-vehicle-otv>

寿命延長に関する最新情報

23-003-T-014

「★」の記載がある事例は、一件一葉形式にて詳細を後述

軌道遷移、再配置

寿命延長

ロボティクス

- Space LogisticsのMEV後継機のMRVは、クライアント衛星へMEP（推進ポッド）を取付けることで寿命延長を実施予定。GEO通信衛星事業者（Optus社、Intelsat社）が寿命延長ミッションの発注を発表している。
- Seraphim Spaceのアクセラレータープログラムに選出されたKURS Orbitalは、ソユーズ宇宙船等のドッキングで技術成熟がなされたKursランデブーシステムをコア技術として活用することで、他の事業者との差別化を図っている。

| # | プログラム名 | ASTECC殿昨年度調査 | 最新情報（昨年度調査からの特記事項等） | 出所 |
|---|---|---|--|--|
| 1 | MEV-1、MEV-2 (Space Logistics社/Northrop Grumman社) | <ul style="list-style-type: none"> MEV-1がIntelsat-901へドッキングを実施し、当該衛星に対する寿命延長サービスを提供中（2020年2月より）。 今後は、2024年以降にMRV（Mission Robotic Vehicle）のロボットアームを用いてMEP（Mission Extension Pods-Fuel pods）をクライアント衛星へ取り付ける実証を行う予定。2024年に打上予定。 MEP1機は2025年にOptus社のD3衛星に供給する予定となっている。 | 2023年4月： <ul style="list-style-type: none"> MRVに搭載される3機のMEPの内、Optus社とIntelsat社がそれぞれ1機づつ発注した。残りの3機目の顧客は明らかになっていない。 MRVとMEPは、SpaceXのロケットによりGTOへ投入され、それぞれ電気推進にてGEO軌道へ上昇した後、推進剤を必要とする衛星に移動する。 | Spacenews |
| 2 | Space Tug (Starfish社) | Starfish社が開発するSpace Tugを使った寿命延長とデブリ除去衛星を開発中 | 2023年3月： Starfishは衛星の推進剤に化学推進ではなく電気推進方式を採用することで、Northrop GrummanやAstroscaleのサービサーよりも、小型かつ安価な衛星製造を目指している。 | Spacenews Uchubiz |
| 3 | ClearSpace-1 (Clearspace社) | (対象外) | 2022年11月： ClearSpaceは、Intelsatへの寿命延長ミッションを発表。2026年～28年にかけてIntelsatの推進剤枯渇前にミッション実施を予定。ClearSpaceはLEOにおけるデブリ除去に加えGEO衛星のサービス提供へと事業を拡大している。 | ClearSpace |
| 4 | ARCap Module (Kurs Orbital) (伊/ウクライナ) ★ | (対象外) | KURS Orbitalは、多くのNEW Space企業を支援している Seraphim Spaceのアクセラレータープログラムに選出。 ソユーズ宇宙船等のドッキングで技術成熟がなされた Kursランデブーシステムをコア技術として活用し、衛星の再配置等のサービスを提供予定。 | Kurs Orbital |

※本章では対象衛星の推進系を代替する衛星をドッキングさせる（間接補給）ミッションを対象とする。
 対象衛星に推進薬を直接補給する（直接補給）ミッションは、調査項目4(推進薬補給技術)にて調査を実施

寿命延長に関する個別事例

23-003-T-014

伊Kurs Orbitalは多くのNEW Space企業を支援しているSeraphim Spaceのアクセラレータープログラムに選出された。ソユーズ宇宙船等で成熟したKursランデブーシステムをコア技術として活用し、衛星の再配置等のサービスを提供予定。

Kurs OrbitalがSeraphim Spaceのアクセラレータープログラムに選出

実施主体：Kurs Orbital（伊）

- 軌道上サービサーを開発する伊Kurs Orbital（2022年にウクライナで設立）は、英国投資会社Seraphim Spaceによるアクセラレータープログラムに選出された（2023年5月発表）^[1]。
 - Seraphim SpaceはIceyeやHawkeye360、Astroscale、Spire Global等多くのNew Space企業への投資を実施している。
- Kurs Orbitalは、300回以上の豊富なドッキング実績（ミールやソユーズ宇宙船）を有するKursランデブーシステムをコア技術として、マシンビジョンやセンシング機能（レーダー）、ロボティクス機能を新たに追加したサービサーを開発中。
 - 同社が開発した標準的モジュール「ARCap」の採用により、衛星やその他非協力物体のランデブー、ドッキング、把持を自律的に実施可能。
- Kurs Oneが提供する軌道上サービスは以下の通り：
 - 衛星の再配置、軌道離脱（主にGEO）、遠隔&近傍からの点検（LEO&GEO）^[3]

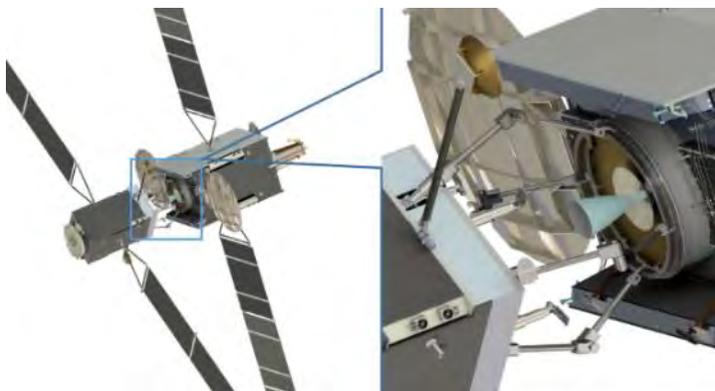


図 左のKurs Oneが右の衛星を捉えているイメージ図^[4]

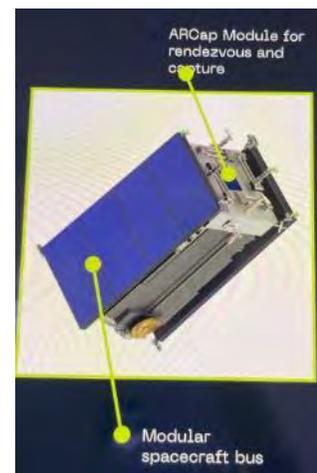


図 Kurs One全体^[2]

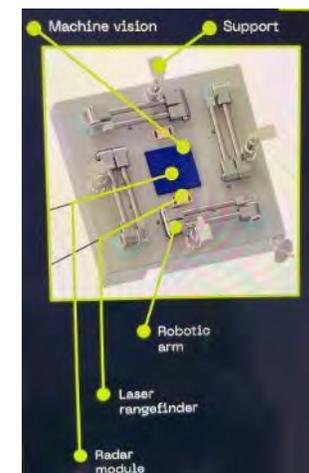


図 ARCapの構造^[2]

出所)

1. Space News, <https://spacenews.com/seraphim-picks-startups-for-eleventh-accelerator-program/>
2. Kurs Orbital, <https://kursorbital.com/>

3. SatelliteConfers, <https://satelliteconfers.org/wp-content/uploads/2021/06/Kurs-Orbital-One-Pager.pdf>
4. Kurs Orbital, <https://www.factoriesinspace.com/kurs-orbital>

ロボティクスに関する最新情報

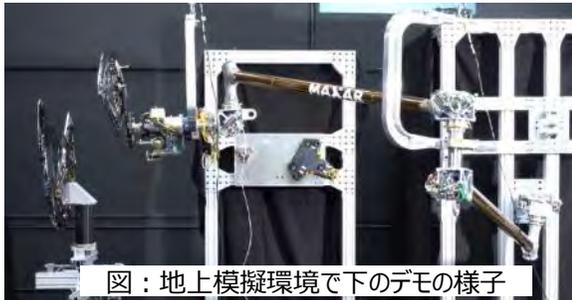
23-003-T-014

軌道遷移、再配置

寿命延長

ロボティクス

- Lockheed Martinは計画していた軌道上サービス実証（近接飛行）を成功させ、**同社が開発中のドッキングアダプターの軌道上実証に向けたマイルストーンを進めている。**
- また、Maxarが開発中のNASA・OSAM-1ミッション向けロボットアームについて、**地上での組立実証を実施し、地上模擬環境下でのend-to-endのロボットアームに関する動作確認に成功している。**

| # | プログラム名 | ASTEC殿昨年度調査 | 最新情報（昨年度調査からの特記事項等） | 出所 |
|---|---|---|--|---------------------------|
| 1 | Mission Augmentation Port (MAP) Lockheed Martin | <ul style="list-style-type: none"> ● Lockheed Martinは、ドッキングを容易にする機械的なインターフェースAugmentation System Port Interface (ASPIN)を開発中。MAP標準に適合しており、電氣的、データ移送を可能とし、打上げ後に軌道上でミッションを拡張させる。 ● 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衛星は寿命が長いこと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、既存のアセットを有効活用する。 | 2023年4月： <ul style="list-style-type: none"> ● Lockheed Martinは、軌道上サービスに近接飛行実証を成功させた。2機のCubesatをGEO上で約750kmの距離を空けて展開され、1か月後には互いに400kmの距離を航行していた。1基は軌道上サービス衛星の役割を果たし、もう1機は常駐宇宙物体の役割を担った。 ● SDAカメラの実証及びASPINを用いた将来のドッキング活動をサポートするために必要な飛行ソフトウェアを実証した。 ● 次のステップは宇宙環境で実際に飛行してASPINドッキングアダプターを使用する。 | Spacenews |
| 2 | NASA主導 OSAM-1、OSAM-2 SPIDER (Maxar Technologies) | <ul style="list-style-type: none"> ● NASAは、ロボットアームを用いた燃料補給や組立・交換、衛星部品製造等の実現を目指すミッションを計画中（OSAM-1、OSAM-2） | 2023年4月3日： <ul style="list-style-type: none"> ● Maxarが開発中のOSAM-1ミッション向けロボットアームを用いた地上での組立実証が実施された。 ● ロボットアームの個々の要素実証だけでなく、システム全体（地上模擬環境下でのend-to-end）として動作できることを初めて確認した。  | Maxar HP |

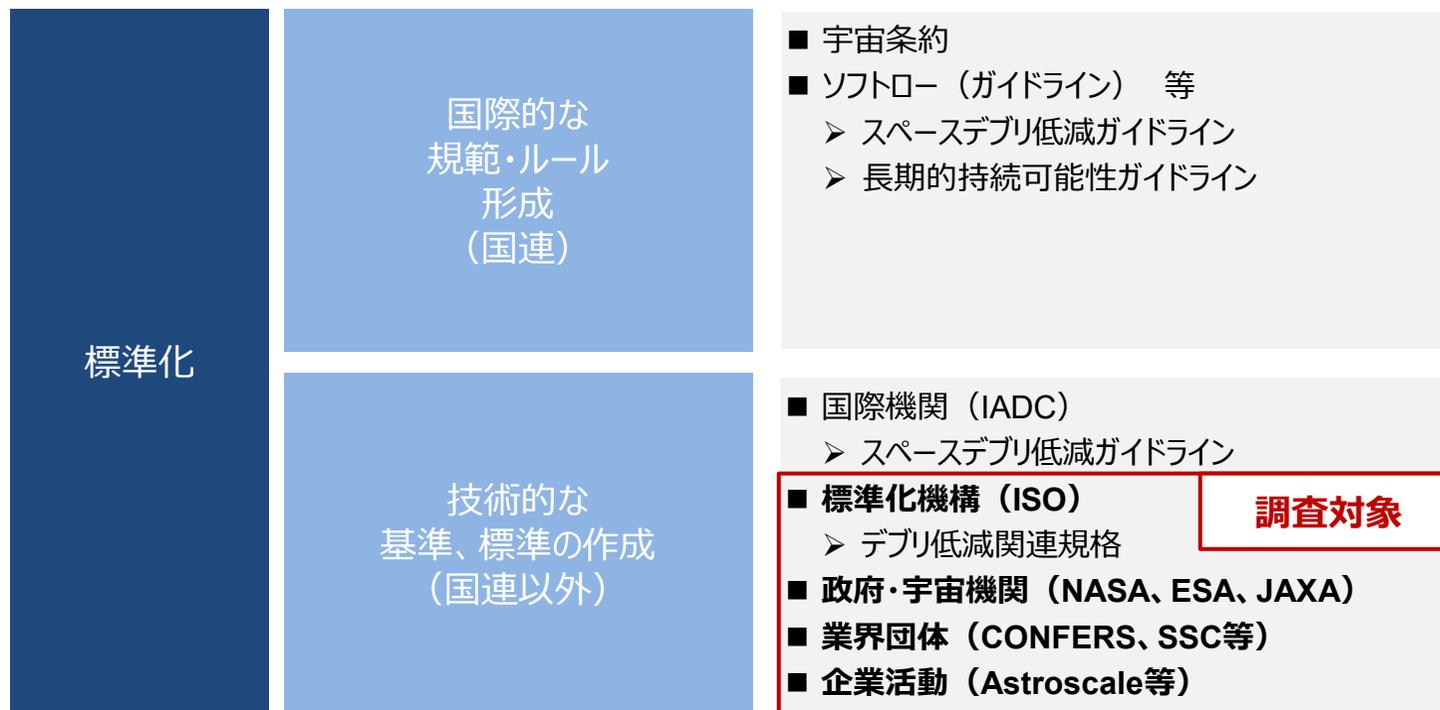
図：地上模擬環境下でのデモの様子

ISAM技術全般に関する標準化動向 –アプローチ– (1/2)

23-003-T-014

標準化動向について、技術的な観点にフォーカスした調査を行う。特に、「標準化機構」や「政府・宇宙機関」、「業界団体」、「企業活動」における取り組みを中心に調査分析を行っていく。

【調査スコープ】



調査対象

※内閣府の軌道上サービスガイドラインについては、規範・ルールに関連する文書であるためスコープ外としている。

ISAM技術全般に関する標準化動向 -アプローチ- (2/2)

23-003-T-014

- 軌道上サービスの全体的な標準化動向を俯瞰した上で、「ISAM全般」、「デブリ除去サービス」、「推進薬補給」の各論点にフォーカスした分析を実施する。(デブリ除去、推進薬補給に関しては後段にて詳述)

【調査対象一覧】

「3. デブリ除去サービス技術の調査分析」
パートにて詳述

| 軌道上サービスに関する標準化 | | 取り組み内容 | 昨年度調査対象 |
|----------------|----------------------------------|--|---------------|
| 標準機構 | ISO | ISO-24113 : Space debris mitigation requirements | 対象 |
| | | ISO-24330 : RPO/OOS principles and practices | 対象 |
| 政府・ 宇宙機関 | NASA | Cooperative Service Valve開発 | 対象 |
| | | 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 | 対象 |
| | NASA COSMIC (ISAMコンソーシアム) | (新規追加) | |
| | EU | EU PERASPERA (The European Operations Framework EOF 他) | 対象 |
| | ESA | ESPRIT燃料補給システム、バルブ | 対象 |
| | JAXA | プログラム管理要求：スペースデブリ発生防止標準 (JMR-003) | 対象 |
| | | 技術要求、ガイドライン：軌道上サービスミッションに係る安全基準 (JERG-2-026) | 対象 |
| 業界団体 | CONFERS | 商業的なRPO及び軌道上サービスの基本原則、推奨設計と運用プラクティス等 | 対象 |
| | SPACE SAFETY COAUTION | 宇宙での持続利用可能な行動指針 | 対象 |
| | World Economic Forum | 産業界によるデブリ低減に関する推奨事項 | (新規追加) |
| 企業 | Astroscale | ドッキングインターフェース、捕獲機構 | 対象 |
| | Orbit Fab | 燃料補給システム、バルブ | 対象 |
| | Northrop Grumman | 燃料補給、電源、機械的電氣的IF | 対象 |
| | ALTIUS | 機械的電氣的IF、データ移送 | 対象 |
| | iBOSS | 機械的電氣的IF、データ移送 | 対象 |
| Lockeed Martin | 機械的電氣的IF、データ移送 | 対象 | |

ISAM技術全般に関する標準化動向 一 個別事例一覧

23-003-T-014

- ISSでのロボットアームに関する標準化が進んでいる一方で、ISS以外での軌道上サービス全般に関する技術の標準化は進んでいない。(#1)
- 民間主導でロボティクス操作を想定したデータ・電力移送が可能なインターフェースの技術開発が進められている。(#2,3)

| | # | プログラム/技術 | 実施主体 | 概要 |
|---------|---|---|-----------------|--|
| ISS | 1 | ISSにおけるロボットアームの標準化 ^[1] | NASA等 | ISSでは各機関のロボットアームを用いた遠隔の軌道上作業が行われてきており、 <u>標準的なインターフェイスやエンドエフェクターの開発が進んでいる。</u> |
| 技術 | 2 | iSSIMジュラーカップリングキット ^[2] [TRL=7~8] | iBOSS | <u>衛星間で機械的・データ・電力移送を可能にするモジュール化されたインターフェイス</u> である。ISAMサービスを拡張できる宇宙用USBと例えられている。 <u>ISSのKIBOUにて軌道上実証された。</u> |
| | 3 | ASPIN ^[3] [TRL=3~6] | Lockheed Martin | Lockheed Martin社が <u>MAP (Mission Augmentation Port) の技術データを公開</u> しており、この標準を満たす"ASPIN"を開発している。 <u>USBポートのように衛星間で電気・データ移送を可能とする。</u> |
| 運用・安全管理 | 4 | 軌道上サービスミッションに係る安全基準 (JERG-2-026) ^[4] | JAXA | 接近、接触、結合を有する軌道上サービスが、 <u>他の人工衛星の管理に悪影響を及ぼす事象 (衝突によるスペースデブリの発生等) を防止するための安全基準</u> を示している。 |
| | 5 | 科学衛星等電気設計基準テンプレート ^[5] | JAXA | JAXAの宇宙機システム全般の電気設計において、 <u>電氣的インタフェースなどの共通的に要求される事項と、電力、EMC (電磁適合性) に関する基本的な電気設計基準</u> をまとめている。 |
| | 6 | 商業的なRPO及び軌道上サービスの基本原則、推奨設計と運用プラクティス等 ^[6] | CONFERS | 持続可能で安全かつ多様な宇宙経済に貢献するサービスのため、業界主導の標準と国際的な指針を策定するための独立・自立した業界フォーラムであるCONFERSが、 <u>ISAMサービスやランデブーの技術及び運用基準を発表した。10か国62団体が加盟</u> している。 |

出所)

1. ESA
2. iBOSS3. Lockheed Martin
4. 軌道上サービスミッションに係るサービス基準5. 科学衛星等電気設計機運テンプレート
6. CONFERS

宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査に関する最新情報

23-003-T-014

技術成熟が進んでいるOTV事業者は、サービスの幅を広げていくために、**新たな推進方式の実証**に取り組んでいる。**ロボットアーム・エンドエフェクターの汎用性向上（モジュール化）**を進めている。また、**小型SSA運用事業者の一部で、ターンキーソリューション（RPOやドッキング、推進系）を衛星に実装**することで、**開発・運用コスト低減を図る動きがある。**

ASTEC殿昨年度調査

最新情報の更新・拡充

ランデブ・ 近傍運用技術 (RPO技術)

- RPO技術の強化
 - 光学センサー、IR、LiDAR技術、それらの組み合わせ技術
 - 電気、化学、それらのハイブリッド、水などの推進系の開発
 - ・ 例：Exolaunch（グリーンプロペラント推進系）

- RPO技術の強化
 - SSA衛星センサーデータ（光学、LIDAR、RF等）の統合によるデータの忠実性向上
 - ・ 例：SCOUT Space
 - OTVにおける水推進方式の実証
 - ・ 例：Exolaunch

ロボティクス技術

- 汎用的(作業汎用性、搭載汎用性)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
 - 例：Starfish、Kall Morris、Motive等

- 汎用的(作業汎用性、搭載汎用性)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
 - 米国DIUにおけるモジュール式のロボティクス技術開発を通じた軌道上サービスにおける汎用性向上に向けた動きがある。主に、燃料補給ミッションへの転用を想定。
 - GITAI、アストロスケールの汎用ロボティクス技術開発を実施し、軌道上サービス分野への転用を目指す動きがある。

コストダウン (RPO技術、ロボティクス技術の観点含む)

- 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

- 低コスト化の為の研究開発
 - 汎用性の高いRPOD※1キットの開発・実装
 - ・ 例：Obruta Space Solutions（RPOD Kit）
 - 衝突回避キット（スラスタや推進剤タンク、電装類等をモジュール化）の開発・実装。また、運用者の推進薬消費量に応じて従量課金とすることで、運用者側のコストを低減。
 - ・ 例：Benchmark（Cola Kit）

※1：Rendezvous Proximity Operations and Docking

宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査に関する個別事例（1/3）

23-003-T-014

DIUではGEO以遠ミッションを想定した燃料補給ミッションに向けてロボットアームの開発を目指している。3社を選定し2024年プロトタイプ納入を要求している。

| | | | | |
|--------|---------------------------------|------|-------|---|
| ミッション名 | Modularity for Space System (米) | 実施主体 | オーナー | 米国防イノベーションユニット(DIU) |
| | | | メーカー | Motiv Space System, Maxar Technologies, Tethers Unlimited |
| TRL | 3~6 | 想定軌道 | GEO以遠 | |

【事例概要】^[1]

- DIUはGEOやより遠方での将来的な宇宙開発のコスト削減を目指している。本ミッションでは運用される衛星の性能向上や燃料補給を容易にするために衛星用の3つのロボットアームのプロトタイプを開発して、軌道上燃料補給を実証する。システム開発はDIUが選定した3社が行っている。
- DIUは2024年にプロトタイプ納入を要求している。(2022年7月時点)^[1]

【開発コスト・資金源】

- Maxar社はDIUより930万\$で契約を締結^[3]した一方で、他の2社についての資金援助の金額は不詳^[1]

表 DIUに選定された3社

| Motiv Space Systems ^{[2][3]} | Maxar Technologies ^[4] | Tethers Unlimited ^{[5][6]} |
|---|--|---|
| 2つのロボットアームを備えたModuLinkと呼ばれるモジュール式のコンポーネントを開発。ロボットアーム自体は燃料補給に特化したものではなく、様々な軌道上サービスを想定している。 | 2つのロボットアーム（約2m）を開発しており3年以内に設計・テストされDIUへ納入。 ^[3] 劣駆動マニピュレータを特徴としたロボットアームで重量とコスト低減につながっている | KRAKENと呼ばれるロボットアームを開発中。同社で構想している軌道上組立や燃料補給用の衛星にも活用される予定（ミッション詳細不明） |
|  |  |  |

出所)

1. Spacenews [DoD signaling demand for satellite support services in geostationary orbit - SpaceNews](#)2. Motiv, [Modular robotics for the new era](#)3. Motiv, [Motiv Space Systems and Blue Origin Announce ModuLink](#) 6.4. Maxar Technologies, [DIU selected Maxar](#)5. Tethers Unlimited, [TU's In-Space Servicing Technologies](#)6. Tethers Unlimited, [KRAKEN](#)

宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査に関する個別事例（2/3）

23-003-T-014

- GITAIは、NASAとの共同開発や経産省の「宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術開発」に関する受託開発や等を通じて、汎用的な自律ロボットアームの開発に取り組んでいる。
- 今後ISS船外作業でのロボットアームの自律制御に係る技術実証を予定（ISS内での技術実証は成功している）。

GITAIによる宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンドの技術開発

実施主体：GITAI

- GITAIは1mから10mまでのロボットアームを開発しており、独自のツールチェンジャーによってISAMサービスを高精度で実行することができる。また、ロボットアームにエンドエフェクタを結合することで、機械作業やデータ通信も可能になる。^[1]
- 2020年に国立研究開発法人NEDOによる宇宙機器開発ベンチャー支援事業に選ばれ、経済産業省より令和2年度補正宇宙開発利用推進研究開発（宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術開発）（初年度予算：最大2.7億円）を受託した。具体的な研究開発項目は以下の4点^[2]
 - ① 汎用作業ロボットアーム・ハンド技術
 - ② 高度かつ低負荷な自律制御技術
 - ③ ロボット手先の転換を可能とするインターフェース技術
 - ④ 軌道上サービスの市場動向や標準化動向等を開発計画に反映させるとともに開発成果を標準化活動機関にインプットする活動
- また、NASAと共同開発したGITAI S1ロボットアームは、8自由度のアームを2本備え、3次元空間において様々な姿勢や動きを取ることが出来る。重要なチェックポイントまで自律的に動き、そこからさらにオペレーターが承認した動きをする。^{[3][4]}
 - 2022年にISS内での技術実証を成功させ、TRLが7となった。
 - 2023年にISS船外作業実験を予定しており、宇宙空間での保守、組み立て、製造作業の自律制御について技術実証する。
- 三菱UFJや日揮などが出資するシリーズB投資エクステンションラウンドで総額40億円を調達し、開発や事業拡大に充てられる。^[5]

図 GITAIのキー技術^[1]図 1.5m級双腕自律ロボットアーム^[3]

出所)

1. GITAI, ISAM Service
2. PR Times, GITAI, 経済産業省より宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術開発を受託

3. MONOist, ロボット開発ニュース
4. NASA, GITAI S1 Robotic Arm Tech Demo
5. UchuBiz, 宇宙作業ロボット開発のGITAI、40億円を調達-三菱UFJや日揮などが出資

宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査に関する個別事例（3/3）

23-003-T-014

Astroscaleは、GITAI同様に、経産省の「宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術開発」に関する受託開発等を通じて、汎用的な自律ロボットアームの開発を推進し、軌道上サービスの実現に不可欠な要素技術の確立に取り組んでいる。

Astroscaleによる宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンドの技術開発

実施主体：Astroscale

- Astroscaleは、持続可能な宇宙環境を目指し、デブリ除去サービスを含む軌道上サービスに取り組んでいる。
- 令和2年度補正宇宙開発利用推進研究開発から継続して経済産業省より令和3年度補正宇宙開発利用推進研究開発（宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術開発）を受託した。^[1]
- 具体的な研究開発項目は以下の4点^[1]
 1. 汎用作業ロボットアーム・ハンド技術
 2. 高度かつ低負荷な自律制御技術
 3. ロボット手先の転換を可能とするインターフェース技術を含むロボットシステム
 4. 軌道上サービスの市場動向や標準化動向等を継続的に把握・分析し、開発計画に反映させるとともに、開発成果を標準化活動機関へ共有
- JAXA宇宙イノベーションパートナーシップ（J-SPARC）の枠組みのもとJAXAと連携して、開発中の技術を燃料補給作業へ適用し、「衛星への燃料補給サービス」の事業性や海外拠点との国際連携を見据えた検討を実施する。^[2]
- Astrospace-UKでは、デブリ除去のためのロボットアームを開発する方向性を示している。^[3]



図 Astroscale-UKで構想されているロボットアームのイメージ図^[3]

出所)

1. Astroscale, 経済産業省より 宇宙船外汎用作業ロボットアーム・ハンド技術開発を継続受託
2. JAXA, アストロスケールとJAXA、衛星への燃料補給サービスに関するコンセプト共創活動を開始

3. BCC, Robot arm would grab defunct British satellite from orbit

軌道遷移・再配置、寿命延長、ロボティクスに関する強み・弱み分析結果

23-003-T-014

- 軌道遷移、再配置や寿命延長に係るサービスは、AstroscaleのLEXIミッションにて計画中であるものの、日本として軌道上サービスに関する多様なユースケース（研究開発計画）が十分に打ち出されていない状況にある。
- ロボティクスは、汎用ロボティクスアームの軌道上実証が一部実施されているものの、軌道上サービス衛星にアームを搭載した状態での軌道上実証にはまだ至っていない。軌道上サービスのサービサーとアーム機構の開発連携が今後重要となる。

海外動向

軌道遷移、再配置

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。

- Momentusは、水推進システムを利用した軌道上昇実証に成功。将来的に月・小惑星から抽出した水をMET搭載衛星へ補給することを視野に入れている。
- Rogue Spaceは、AWSのアクセラレータプログラム参加や宇宙軍 Orbital Prime等の後押しを受け、技術力を高めている

寿命延長

寿命延長について、Space logisticsを中心に技術成熟が見られる。

- Space LogisticsのMEV後継機のMRVは、クライアント衛星へMEP（推進ポッド）を取付けることで寿命延長を実施予定。GEO通信衛星事業者が寿命延長ミッションの発注を発表している。
- Seraphim Spaceのアクセラレータプログラムに選出されたKURS Orbitalは、ソユーズ宇宙船等のドッキングで技術成熟がなされた Kursランデブーシステムをコア技術として活用することで、他の事業者との差別化を図っている。

ロボティクス

特定ミッションに限定しない汎用性を有するアーム機構開発が進行中。

- Maxarが開発中のNASA・OSAM-1ミッション向けロボットアームについて、地上での組立実証を実施し、地上模擬環境下でのend-to-endのロボットアームに関する動作確認に成功している。
- また、Lockheed Martinは計画していた軌道上サービス実証（近接飛行）を成功させ、同社が開発中のドッキングアダプターの軌道上実証に向けたマイルストーンを進めている。

日本の強み弱み分析



強み

- ✓ AstroscaleのLEXIミッションの中で対象衛星の再配置を想定。
- ✓ デブリ除去技術の獲得を見据えたミッション（ELSA-d, CRD2等）を通じて、運用開始後の衛星の軌道維持・変更を実施するための要素技術（RPO・アーム機構等）の確立を目指している。

- ✓ AstroscaleのLEXIミッションの中で対象衛星の寿命延長を想定。
- ✓ 2023年6月改定の宇宙基本計画にて、デブリ低減の一環としての軌道上サービス例として寿命延長が示されている。

- ✓ GITAI、Astroscaleは汎用ロボティクス技術開発を実施し、軌道上サービス分野への転用を目指す動きがある。
- ✓ Astroscaleでは、ドッキングプレートのクライアント衛星への具備やアームを用いたデブリ除去を計画中。

弱み

- ✓ 運用開始後の衛星の軌道維持・変更に関わるサービス事業者は限定的。
- ✓ OTVにかかる明確な取り組みは示されていない。

- ✓ 寿命延長サービス提供を想定している事業者は限定的。

- ✓ GITAIはISSでの軌道上実証を進めているものの、軌道上サービス衛星にアームを搭載した状態での軌道上実証にはまだ至っていない。
- ✓ 軌道上サービス衛星へのアーム機構具備に対して衛星製造事業者（バス部等）との開発連携やエンドユーザーの確保が十分に立ち上がっていない。

- ✓ 現在、デブリ除去等の特定のユースケースに特化している。
- ✓ 研究開発の初期段階からの、ユーザとしての政府の参画

軌道上サービス全般に関する分析－KSFの抽出 ロングリスト－

23-003-T-014

RPO技術・ロボティクス技術は軌道上サービスの各分野共通的な**キー技術**である。分野共通的な**キー技術**の開発を通じて、個別サービスに係る**開発・運用コスト**を低減していく方策も重要となる。また、**開発事業者の後押し**（資金面、技術面、事業環境面等）及び軌道上サービス分野間での**開発・実証連携**、**インターフェース等の標準化**等が重要となると考えられる。

軌道上サービス全般に関するロングリスト

技術

- ✓ **RPO技術の強化**
 - コンピュータービジョン、自律制御・航法誘導及びリアルタイムオペレーティング
 - AI/MLによる画像航法の高度汎用化
 - センサーデータ（光学、LIDAR、RF等）の統合によるデータの忠実性向上
 - 高効率な推進系技術（水、電気等）
 - RPO技術のターンキーソリューション化
- ✓ **ロボティクス技術**
 - 汎用的(作業汎用性、搭載汎用性)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
 - 複雑な機構を最小化し、安全性・確実性を優先したアーム・ハンド設計
- ✓ **開発・運用コスト低減**
 - 一度に複数機へサービス提供を行う技術（複数物体除去等）
 - 他の軌道上サービス分野（燃料補給、寿命延長等）への技術活用
- ✓ **軌道上サービスを受ける前提の設計**
 - ドッキングプレート、推進薬補給口等の装備

技術以外

- ✓ **開発事業者の後押し（資金面、技術面、事業面等）**
 - 研究開発の初期段階からの、ユーザとしての政府の参画
 - VC等との結節促進、アクセラレータプログラムを通じた開発事業者の支援
- ✓ **多様なユースケース創出に向けた横断的な連携**
 - 軌道上サービス衛星へのアーム機構具備等に対する軌道上サービス事業者と衛星製造事業者（バス部等）の開発連携
 - 軌道上サービス分野間での実証連携
- ✓ **技術の標準化**
 - デブリ除去を広げるドッキングプレートの標準化
 - 安全性・確実性を優先したアーム・ハンド機構を起点とした、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
 - 修理・交換を可能とするモジュール化

2.令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.1宇宙探査や軌道上作業の動向調査

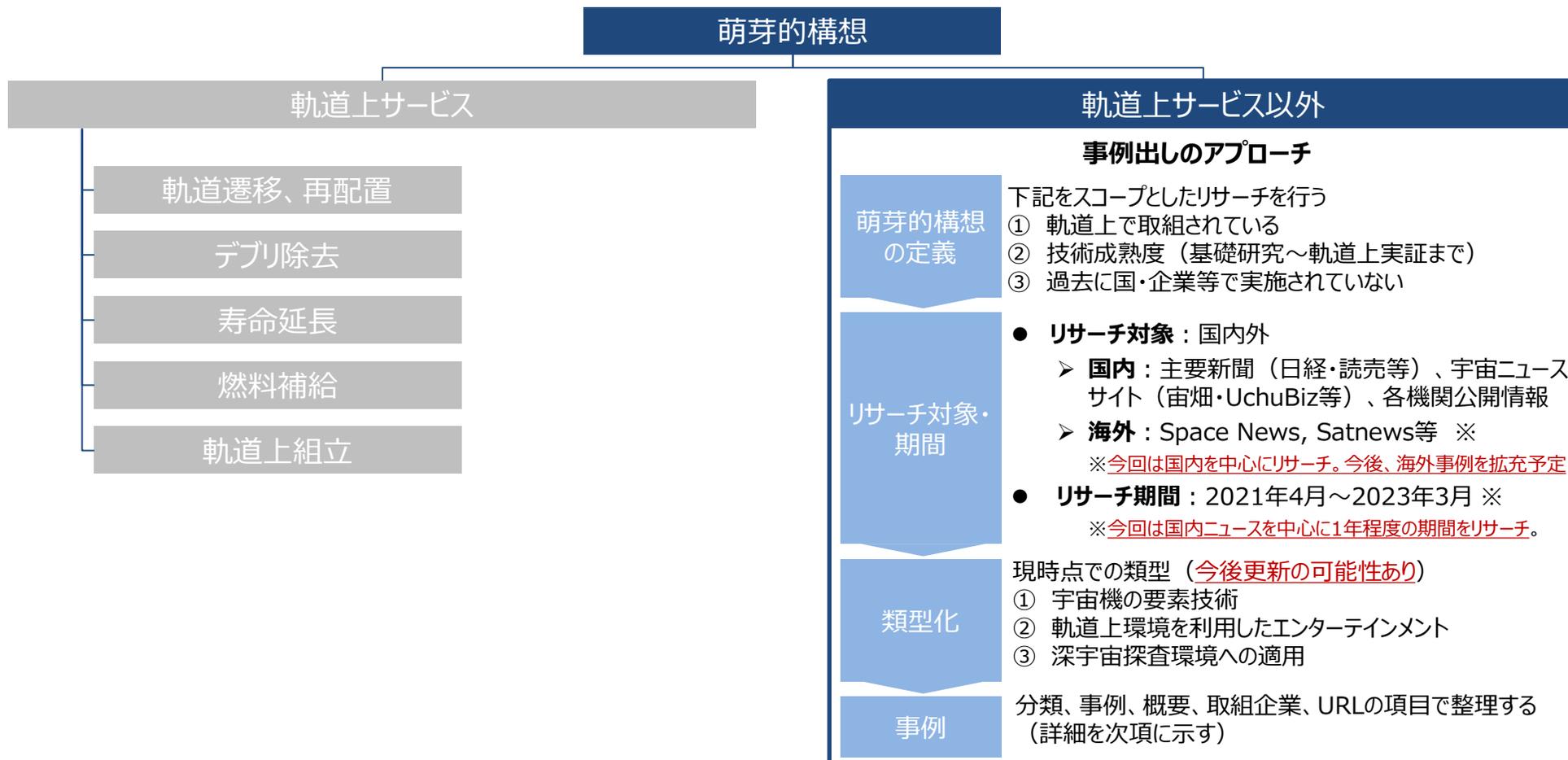
【萌芽的観点の事例出し】

萌芽的観点の事例出し -アプローチ-

23-003-T-014

本調査における萌芽的構想は、軌道上サービスに限定しない幅広い事例出しを行う。

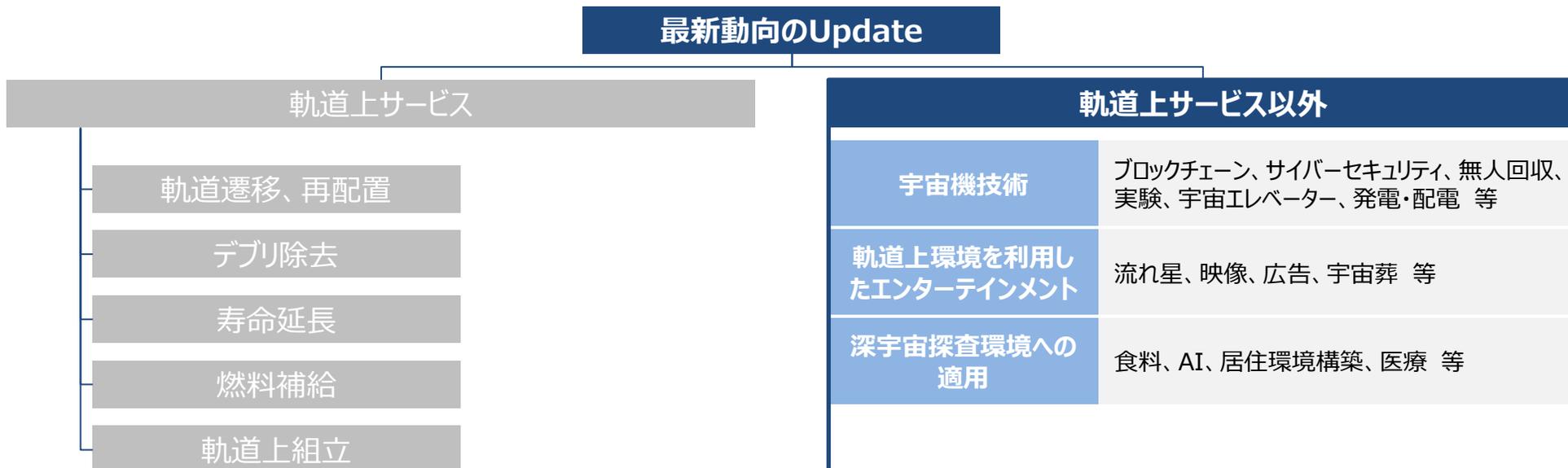
→ 事例出しのアプローチを整理した上で、事例を調査していく。



萌芽的観点の事例出しに関する調査結果

23-003-T-014

萌芽的観点の事例として、「**宇宙機技術**（ブロックチェーン、サイバー、無人回収実験、宇宙エレベーター、発電・配電等）」や「**軌道上環境を利用したエンターテインメント**（流れ星、映像、広告、宇宙葬等）」、「**深宇宙探査探査環境への適用**（食料、AI、居住環境構築、医療等）」を抽出した。詳細を事項に示す。



萌芽的観点の事例出しに関する調査結果（1/6）

23-003-T-014

国内・海外（2020年4月～2023年6月）の萌芽的構想を各種記事等を元にリストした。

| 分類 | 事例 | 概要 | 取組企業 | URL |
|-------|----------|--|---|---|
| 宇宙機技術 | ブロックチェーン | <ul style="list-style-type: none"> Lockheed Martinはファイルコイン財団と協力して宇宙でのブロックチェーンネットワークに関する実証実験を発表した。低軌道衛星コンステレーションを活用した分散型ストレージシステム構築を目指す。 | (米) Lockheed Martin | Space News (22.5.23) |
| | ブロックチェーン | <ul style="list-style-type: none"> JPモルガンが衛星間通信を利用した軌道上のブロックチェーン決済の試験に成功。 2018年2月に打ち上げられたGomSpaceの「GOMX-4」と呼ばれる2機の衛星が用いられて試験は実施された。6Uサイズで、衛星間通信機能、船舶監視システム（AIS）と航空管制・監視システム（ADS-B）、ハイパースペクトルカメラなどが搭載されている。 2つの衛星間でブロックチェーンの決済を行う試験が行われ、地上との通信が不要な分散型ネットワーク技術の検証が行われた。<u>災害時などに地上のデバイスが故障するといった事態を見据えたりリスク分散に役立てられることが期待されている。</u> | <ul style="list-style-type: none"> (米) JPモルガン・チェース (デ) GomSpace | 宙畑 (21.2.22) |

萌芽的観点の事例出しに関する調査結果（2/6）

23-003-T-014

国内・海外（2020年4月～2023年6月）の萌芽的構想を各種記事等を元にリストした。

| 分類 | 事例 | 概要 | 取組企業 | URL |
|-------|-------------------------------|--|---|---|
| 宇宙機技術 | サイバーセキュリティ | <ul style="list-style-type: none"> 3U CubeSatを用いたリアルタイムのハッキング実証を行う。サイバー耐性の高いアーキテクチャに貢献する。 | <ul style="list-style-type: none"> (米) Aerospace Corporation USSF、等 | ISS National Lab (23.5.30) |
| | サイバーセキュリティ (ハッキング演習) | <ul style="list-style-type: none"> ESAの実証用ナノ衛星に対して、Thalesがサイバー攻撃をしかける世界初のサイバー演習を実施。 衛星の測位および姿勢制御システム、搭載カメラを管理するシステムへ悪意のあるコードを挿入し、ESAからの検出を避けつつ、衛星カメラで撮影された画像の変更や画像内の一部地域をマスクするなどのハッキングに成功。 演習の成果は今後の衛星や軌道上アプリケーションのセキュリティ強化に活用され、宇宙システムのサイバーレジリエンス向上に役立つ。 | <ul style="list-style-type: none"> (仏) Thales | Satnews (23.04.26) |
| | サイバーセキュリティ (ゼロトラストアーキテクチャ) | <ul style="list-style-type: none"> SpiderOak社のは、衛星のサイバーセキュリティを強化するために設計された暗号化技術を用いたゼロトラストソリューション（OrbitSecure）を開発した。 同ソリューションはBall Aerospace社のペイロードにて軌道上のゼロトラストアプリケーションテストに成功した。衛星の各データは暗号化され、暗号キーを持つユーザのみがデジタル台帳にアクセス可能。ハッカーが解読した場合は直ちに検知し、新たな暗号鍵が発行される仕組みになっている。 | <ul style="list-style-type: none"> (米) SpiderOak | Space News (23.01.12) |

萌芽的観点の事例出しに関する調査結果（3/6）

23-003-T-014

国内・海外（2020年4月～2023年6月）の萌芽的構想を各種記事等を元にリストした。

| 分類 | 事例 | 概要 | 取組企業 | URL |
|-------|-----------|--|--|--------------------------------------|
| 宇宙機技術 | 回収 | <ul style="list-style-type: none"> ElevationSpaceとJAXAは、LEOから物資を地球へ持ち帰る手段として、高頻度に大気圏再突入して回収できる技術の実用化に共同で取り組む。 | <ul style="list-style-type: none"> (日) ElevationSpace JAXA | Uchubiz (23.4.27) |
| | 回収 | <ul style="list-style-type: none"> Outpost Technologiesは効率的な人工衛星の回収と再利用、デブリ軽減などに向けて、再利用可能な人工衛星の開発を進める。特に帰還プロセスを①大気圏再突入時の減速と②滑空による飛行という2段階に分けることで、コスト効率の改善を図る。同社は710万\$(約10億円)の資金調達を実施した。 具体的な方法として、大気圏に突入する際は軽量のヒートシールドを膨らませて人工衛星を熱から保護。減速後パラグライダーを広げて滑空して、正確な位置へ着地することが考えられている。 2023年に打ち上げ試験を実施予定。 | <ul style="list-style-type: none"> (米) Outpost Technologies | UchuBiz (22.9.16) |
| | 宇宙エレベーター | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙エレベーターの構成要素であるケーブル素材について、ISSを利用した耐久性実験を行っている。2025年から着工を開始し、工期を25年とし、2050年には静止軌道ステーションの共用開始を想定している。 | (日) 大林組、他 | 大林組 (2012～) |
| | 発電・配電システム | <ul style="list-style-type: none"> Westinghouse社とAstrobotic社は月や火星、軌道上で発電可能な小型原子炉を共同開発している。 Westinghouse社は出力5MWeの原子炉「eVinci」をベースとした小型の原子炉を開発している。また2022年には、月面で使える原子力発電システムのコンセプトデザイン検討企業として、NASAと米エネルギー省に選定されている。 Astrobotic社は月の南極でも電力供給可能な「LunaGrid」も開発中。 | <ul style="list-style-type: none"> (米) Westinghouse (米) Astrobotic | UchuBiz (23.6.7) |

萌芽的観点の事例出しに関する調査結果（4/6）

23-003-T-014

国内・海外（2020年4月～2023年6月）の萌芽的構想を各種記事等を元にリストした。

| 分類 | 事例 | 概要 | 取組企業 | URL |
|-------|------------|---|--|--|
| 宇宙機技術 | 実験 | <ul style="list-style-type: none"> Thales Alenia Spaceは無人宇宙機が今後の軌道上製造業を実現する鍵となるとの見通しから、<u>再利用可能で加圧された小型車サイズのREV1「宇宙工場」の設計・開発を進める。</u> LEOで数か月間最大1,000kgのペイロードを運ぶように設計されており、別途開発中の再利用可能な軌道サービスモジュール（10年程度軌道上に留まる予定）とドッキングする予定。 | <ul style="list-style-type: none"> （仏）Thales Alenia Space （欧）Space Cargo Unlimited | Space News (22.12.28) |
| | 実験 | <ul style="list-style-type: none"> ElevationSpaceは<u>2025年に打ち上げる小型衛星のペイロード搭載量が積載可能上限に到達し、搭載枠の販売を終えたと発表。</u> 同社はISSに代わる宇宙環境利用プラットフォーム「ELS-R」を開発中。2025年打ち上げ初号機では軌道離脱や大気圏再突入、回収などの技術実証が主目的。 | <ul style="list-style-type: none"> （日）ElevationSpace | UchuBiz (23.6.21) |
| | 実験 | <ul style="list-style-type: none"> 指先に乗せられるほどの小さなチップで顕微観察が可能な技術を開発するIDDKは人工衛星で微小重力環境を利用した製造実験プラットフォームを開発するSpace Forgeと民間主導による微小重力環境での宇宙バイオ実験の実証に関する業務提携を締結。 <u>ISSの運営に携わっていない国の企業にとって宇宙実験環境へのアクセスが容易になる他、無人のプラットフォームとなることから、従来よりも安価で緩和された手続きとなり、実験可能な範囲の拡大も期待できる。</u> | <ul style="list-style-type: none"> （日）IDDK （英）Space Forge | UchuBiz (22.12.20) |
| | 低軌道からの物資移送 | <ul style="list-style-type: none"> <u>低軌道での実験で得られたサンプルを地上へ移送するため、</u>ElevationSpaceでは高頻度再突入・回収技術をJAXAと共創している。 | <ul style="list-style-type: none"> （日）ElevationSpace | UchuBiz (23.4.27) |

萌芽的観点の事例出しに関する調査結果（5/6）

23-003-T-014

国内・海外（2020年4月～2023年6月）の萌芽的構想を各種記事等を元にリストした。

| 分類 | 事例 | 概要 | 取組企業 | URL |
|----------------------|--------|--|---|--|
| 軌道上環境を利用したエンターテインメント | 流れ星 | <ul style="list-style-type: none"> ALEは流れ星を人工的に再現し、エンターテインメントコンテンツを提供する。 | <ul style="list-style-type: none"> (日) ALE | ALE (2011～) |
| | 映像 | <ul style="list-style-type: none"> ソニーグループの衛星が宇宙からの写真撮影に成功。ユーザーがカメラワークなどを指定し宇宙から静止画や動画を撮影できるサービスの提供を予定している。 | <ul style="list-style-type: none"> (日) ソニー | Uchubiz (23.2.20) |
| | 映像（広告） | <ul style="list-style-type: none"> ロシアのスコルコボ科学技術大学とモスクワ物理工科大学の研究チームは<u>50機以上のキューブサットの編隊に太陽光を反射させて空に浮かぶ広告として地上から見えるようにするアイデア</u>について、技術的かつ経済的に実現可能だとする論文を発表。 衛星の移動や軌道維持に必要な燃料の量、広告掲示の経費などから、1回のミッションで6500万ドル（約94億2175万円）のコストが必要との試算。一方、広告を見せることのできる都市の人口や天候、季節などを考慮し、1つの都市に対して広告を1分間掲示する場合、1日当たり平均200万ドル（約2億8990万円）ほどの広告収入が見込めるとしている。 | <ul style="list-style-type: none"> (露) スコルコボ科学技術大学 (露) モスクワ物理工科大学 | UchuBiz (22.10.07) |
| | 宇宙葬 | <ul style="list-style-type: none"> Celestis Inc.では<u>4つの宇宙葬サービスを提供</u>している：①遺骨やDNAサンプルを乗せたサブオービタル飛行②地球低軌道上で周回し続け一定期間後に再突入③月軌道および月面への打ち上げ（1998年に第一回が実施。第二回は2023年後半予定）④月以降の深宇宙での宇宙葬（2023年後半予定）。 | <ul style="list-style-type: none"> (米) Celestis Inc. | <ul style="list-style-type: none"> Scripps News Celestis (1977～) |

萌芽的観点の事例出しに関する調査結果（6/6）

23-003-T-014

国内・海外（2020年4月～2023年6月）の萌芽的構想を各種記事等を元にリストした。

| 分類 | 事例 | 概要 | 取組企業 | URL |
|-------------|--------|--|---|---------------------------------------|
| 深宇宙探査環境への適用 | 食料 | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙で地産地消を目指すユーグレナは、<u>宇宙での長期滞在に備えた「宇宙食3.0（宇宙で食材を育て宇宙で調理する宇宙食）」に該当するインスタントラーメンを開発を進める。</u> | <ul style="list-style-type: none"> （日）ユーグレナ | Forbes (23.3.24) |
| | AI | <ul style="list-style-type: none"> AI Insideと東北大学は、月面・宇宙など極限環境で稼働する高耐久・高性能・省エネルギーな次世代型AIの共同研究を開始。 | <ul style="list-style-type: none"> （日）AI Inside （日）東北大学 | AI Inside (23.3.2) |
| | 居住空間構築 | <ul style="list-style-type: none"> ロチェスター大学は1970年代に提案された回転するスペースコロニー「オニール・シリンダー」の概念に基づき、<u>小惑星を回転させて人工的に重力を生み出し、宇宙都市にする構想を発表。</u> <u>資材として小惑星を巨大なナノファイバー製の網で包み、円筒状の居住空間を構築する</u>としている。直径300mの小惑星を拡張し、マンハッタンとほぼ同じ面積（約57Km²）の居住環境を生み出せると試算している。 <div style="text-align: center;">  <p>小惑星の内側にある都市を示したイラスト Credit : University of Rochester illustration/Michael Osadciw</p> </div> | <ul style="list-style-type: none"> （米）ロチェスター大学 | UchuBiz (22.12.15) |
| | 医療 | <ul style="list-style-type: none"> <u>ISSに外科手術用の小型ロボットが2024年にも搭載される。</u>これまでのテストでは、外科医がこの装置を使って結腸を切除することに成功している。また、NASAの元宇宙飛行士が遠隔地から模擬手術を行うなどの応用もおこなわれている。 | <ul style="list-style-type: none"> （米）ネブラスカ大学 （米）Virtual Incision | Uchubiz (22.8.23) |

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.1 宇宙探査や軌道上作業の動向調査

2.1.2 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

2.1.3 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

2.1.4 遠距離高速通信システムの調査

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

2. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.3 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 【月測位】

昨年度（22年度）の調査サマリ①

【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。**

昨年度（22年度）の調査サマリ②

- 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と協調を目指し、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

月測位に関する最新情報の更新 (1/5)

23-003-T-014

LunaNet

MoonLight

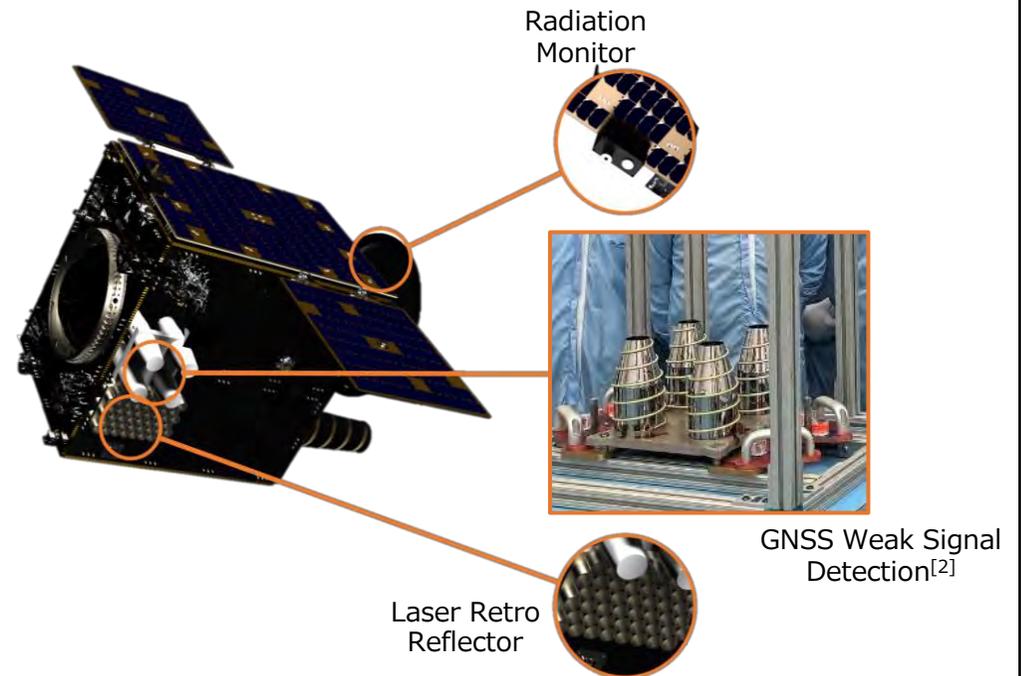
システム間の相互補完

MoonLightにて中継サービスの実証を行うLunar Pathfinderの開発が、2026年の技術実証に向けて順調に進捗している。

【参考】 Luna Pathfinderへの搭載に向けて月周回軌道上で動作するように設計された最初の衛星ナビ受信機が衛星メーカーに納入

実施主体：Surrey Satellite Technology Ltd. (欧)

- MoonLight計画の元、Lunar Pathfinderの2026年の打ち上げに向けて、衛星ナビゲーション受信機がSurrey Satellite Technology Ltd. (SSTL) に納入された。
- Lunar Pathfinderは、高速通信/測位サービスを提供して月周辺の活動を支援することを目的としており、SSTL社が小型衛星を開発している。
- 衛星ナビ受信機は、距離減衰によって強度が低下するGNSS信号を受信する高感度受信アンテナであり、小型衛星に搭載され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に用いられる。



☒ Lunar Pathfinder hosted payload^{[1][2]}

出所)

1. ESA, [Satnav from Earth to Moon](#)2. Small Satellite Conference, [SSC22-II-08_SLIDES.pdf](#)

月測位に関する最新情報の更新 (2/5)

23-003-T-014

LunaNet

MoonLight

システム間の相互補完

米国防総省が月面経済の実現可能性に関する研究計画、LunA-10を発表した。
ナビゲーションや通信機能をサポートするインフラ整備に重点を置いている。

DARPAが月開発計画「LunA-10」を発表

実施主体：DARPA

- 米国国防高等研究計画局（DARPA）は、月の商業経済確立に向けた、「10-Year Lunar Architecture（LunA-10）」と呼ばれる月開発のための10か年計画計画を発表した。
- この計画は、月面無線送電所等といった月面でのマルチミッションを実現するソリューションの構築を目的としており、特に月面における科学的研究や商業開発を支えるための、共有可能で拡張性のあるインフラ整備に重点を置いている。^[1]
 - 月面上でのナビゲーションの提供をサポートする（通信機能を含む）。
- 参加企業は計画書を提出し、選ばれた企業は2023年10月の「Lunar Surface Innovation Consortium」（LSIC）で14社が発表された。^[3]
 - power development
Blue Origin, Fibertek and Honeybee Robotics
 - mining expertise
Sierra Space, Helios and Cislunar Industries
 - market analysis / communication research
Firefly, Crescent, Nokia Bell Labs and Redwire
 - transit and mobility
Northrop Gumman and SpaceX
 - construction and robotics
Gitai and ICON



図 構想されている月面開発のイメージ図 [1]

出所)

1. Space News, [DARPA to study integrated lunar infrastructure](#)
2. UchuBiz, [月面でのエネルギーや通信インフラ整備など支援](#)

3. [Pittsburgh Post-Gazette](#)

月測位に関する最新情報の更新 (3/5)

23-003-T-014

LunaNet

MoonLight

システム間の相互補完

Lockheed MartinはLunaNetとも準拠する月探査に通信およびナビゲーションサービス提供のための子会社を設立。同社は今後勃興が期待される月面探査ミッションに向けて他社に先行したサービス展開を目指す。

Lockheed Marthinが月面通信・ナビゲーション用の子会社を設立

実施主体：Lockheed Martin（米）

- Lockheed Martinは、政府および民間の月探査に通信およびナビゲーションサービス「Parsec」を提供する子会社「Crescent Space Services LLC」の設立を発表した。
- ParsecはNASAが進める通信と航行のための月面の相互運用ネットワーク構想LunaNetに準拠し、企業や政府が計画する他のシステムとも連携することも期待されている。
- 同社は衛星1機でサービスを提供できるが、最初は2機でスタートし、需要を満たすために必要であればさらに追加することができるとしている。
- Parsecは、Lockheed Martinが設計・製造した衛星を使用し、最初の衛星は2025年に打ち上げられる予定。
- Crescent Space Services LLCのCEOは今後10年間で月へのミッションは100回以上行われると見積もっており、加えて火星の通信ネットワークが必要となったときに同サービスの利用の可能性も見込んでいる。



図 Parsec system (Credit: Lockheed Martin) [1]

出所)

1. Space News, [Lockheed Martin subsidiary to offer commercial lunar communications and navigation services](#)

月測位に関する最新情報の更新 (4/5)

23-003-T-014

LunaNet

MoonLight

システム間の相互補完

NGAでは月面におけるPNTサービスの基盤となる月面測地系の開発を行い、LunaNet含む今後参入してくる月面ミッションにおけるレファレンスシステムになることを目指していると考えられる。

NGAが月面測地系の開発を発表

実施主体：NGA等（米）

- NGAは2023年5月に開催されたGEOINT2023にて月面における測地系の必要性を訴え、NASA、米国地質調査所、米国宇宙軍、米国宇宙司令部と協力して、地球におけるWGS84の月面バージョンの開発を実施していることを発表した。
 - WGS 84 (World Geodetic System 1984) は、ナビゲーションやポジショニングのための緯度、経度、高度を確立するための3次元座標レファレンスフレーム。地図作成、測位、ナビゲーションに使用される地球のグローバルな測地基準系で、GPSや国際民間航空機関(ICAO)の位置座標についてもWGS84を採用している。
- この月面基準システムは、明言自体はないものの、NASAが開発を進めているLunaNetでのフレームワークとして機能する可能性もある。
- また、このモデルは米軍だけでなく、世界中の民間機関や民間事業者等一般にも利用される可能性を公表している。

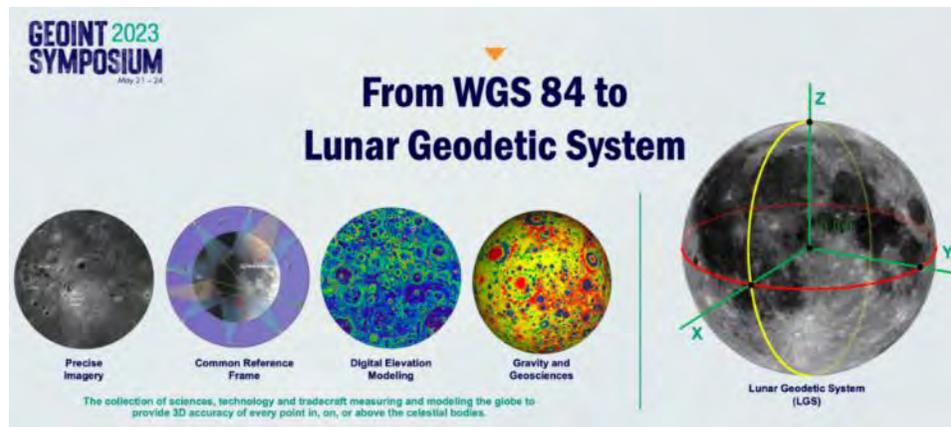


図 GEOINT2023におけるNGAの月面測地系概念 (Credit: NGA) [1]

出所)

1. Space News, [NGA to map lunar geography to enable GPS on the moon](#)
2. MoGIST, [WGS84](#)

3. NGA, [NGA Leads Development of Navigational Reference System for the Moon](#)
4. Breaking Defense, [NGA emphasizing space GEOINT mission, developing lunar model for operators: Director](#)

月測位に関する最新情報の更新 (5/5)

23-003-T-014

LunaNet

MoonLight

システム間の相互補完

NASAはランドマーク（岩やクレーターなどの地形的特徴）を利用した月面をナビゲーションするAIを開発中。LunaNetの使えない環境でのバックアップシステムの研究開発もNASAでは並行して進められている。

NASA、LunaNetのバックアップとして月面ナビゲーション用AIを開発中

実施主体：NASA（米）

- NASAは、LunaNetを開発している一方で、月面で通信できない場所での探査、特に有人探査での信頼できるバックアップシステムとして月周回衛星に搭載されたレーザー高度計「LOLA（Lunar Orbiter Laser Altimeter）」が計測する地形図を利用し、月面の特徴を再現するようAIに学習させている。探査機や宇宙飛行士が撮影した画像を同システムに照合すれば、正確な位置を特定できる。概念的には外に出て、地平線と周囲のランドマークを調べることで、現在地を把握するのに似ているという。
- まずは地球上で9m以内の精度で位置を特定できるかを実証することを目標に開発が進められている。
- また、画像を分析して目標物までの距離を測定するゴダード宇宙飛行センターのナビゲーションツール「GIANT（Goddard Image Analysis and Navigation Tool）」も活用して月面での位置把握を行うことも検討されている。
 - GIANTは画像を素早く正確に解析し、目に見えるランドマークまでの距離やランドマーク間の距離を計測する。

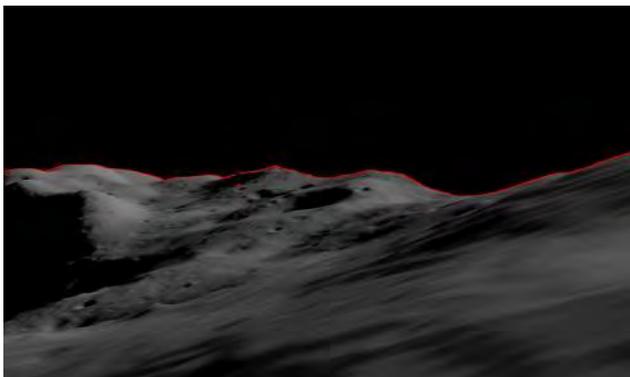


図 月面の岩やクレーターデータ等をAIが収集している概念図^[1]

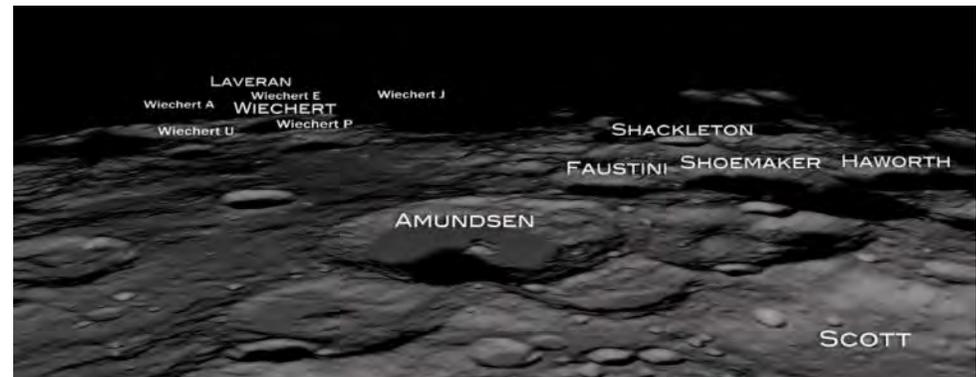


図 LOLAのデータが活用された作成された月面3Dモデリング図^[2]

出所)

1. NASA, [NASA Developing AI to Steer Using Landmarks – On the Moon](#)
2. NASA, [LRO/LOLA Lunar South Pole Flyover](#)

月測位に関する各国の動向調査及び日本の強み弱み分析

23-003-T-014

各国ともGNSS関連技術の拡張を志向しており、要素技術の開発・実証を着実に進めている。
日本はコンセプト検討からシステム実証までの時間短縮、対等な立場での欧米連携に加わる必要がある。

海外動向



LunaNet

測位システムとしては、**構想・技術実証を進めている段階**

- ✓ **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。
- ✓ 座標系統系の**規格/標準は、LunaNet Interoperability Specification Documentに記載**される見込み。(NASA/ESA主導)



esa

Moon Light

基本構想はLunaNetと同様であり、**協調路線**

- ✓ Lunar Pathfinderにて**GNSSの微弱信号を月軌道で受信**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**を改修して使用される。



Queqiao(鵲橋)コンステレーション^[1]の構築を構想

- ✓ **月面基地計画を推進**し、通信・ナビゲーション・リモートセンシングサービスの実現に向けた動きがみられている。
- ✓ **2024年初めに月中継衛星「Queqiao-2」の打ち上げが計画^[2]**されている。

1. [lunar satellite constellation](#)
2. [Queqiao-2](#)

3. [月版GNSS \(LunarAugmented NavigationService\) における欧米日の連携と実証ミッションについて](#)

LNIS : LunaNet Interoperability Specification
LNSS: Lunar Navigation Satellite System

日本の強み弱み分析



強み

- ✓ 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が検討**されている。
- ✓ インターオペラビリティの議論への参加を見込み、LINSの制定に向けた作業にJAXAが参画し**NASA/ESAとの協調を目指している^[3]**。
- ✓ JAXAはLANSの相互運用性・月測位の実証ミッションを2028年に実施することで検討を進めており、ESA・NASAとの共同実証を目指して調整を進めている。
- ✓ スターダストプログラム『月面活動に向けた測位・通信技術開発』にてLNSSの実現に向けた研究開発が行われている

弱み

- ✓ **技術開発及び標準化の議論はNASA/ESAが先行**しており、後れを取っている。ESAにおいては産業提案を2023年9月から開始し、2023年度4Qにも評価を行い、2024年初頭からMoonlight実証フェーズを開始するとしている。
- ✓ 基本構想はLunaNetと同様としているが、**実証プログラム化には未だ至っていない**。

月測位に関する研究開発項目の分析

23-003-T-014

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。日本の強みである高精度測位を用いた測位補強サービスの構築及び、欧米が構築しつつあるシステムとの相互補完技術の獲得を目指す必要がある。対等な立場での欧米連携に加わるため、日本の月測位に関する技術実証のプログラム化推進が必要である。

| 目的・方向性 | 概要 | 研究開発項目（KSF・キー技術） |
|--------------|---|---|
| 模倣困難・希少技術の獲得 | LunaNetの構想では複数のシステムが共存していることを踏まえ、日本の強みである「 <u>高精度測位</u> 」を用いた測位補強サービスの構築を目指す。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、迅速かつ安価に実用の場を提供することが可能となる。 | 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。 <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>月における測位補強技術</u> (基準点、補正方法/システム等) ・ <u>補強サービスに適合した受信機(小型・軽量化)</u> ・ <u>オンボードPPP等の自律軌道決定技術</u> |
| 適合性の強化 | 欧米が構築しつつある相互補完関係に加わるため、「 <u>他システムとの相互補完技術</u> 」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共存することを念頭に、正常時の協調だけでなく、1システムの衛星が故障した場合にもシステムを超えて補完し合うことを含める。 | 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・親和性の向上。 <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>デジタルペイロード(配信信号生成のソフトウェア化)</u> ・ <u>月測位信号のマルチシグナル受信機</u> ・ <u>システム相互運用・自律化技術</u> |

【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舍選択の参考(1例)となるロングリストとして提示

2. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.3 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 【次世代GNSS】

昨年度（22年度）の調査サマリ①

23-003-T-014

- 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。**

昨年度（22年度）の調査サマリ②

- 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、フルデジタルパイロード、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。



次世代GNSSに関する最新情報の更新 (1/6)

23-003-T-014

抗たん性強化

高精度測位

新たなPNT

ESAはGalileo 2nd Generationの2025年の打ち上げに向けてセキュリティ強化を実施しており、欧州においてもGNSSの抗たん性向上の取り組みが進んでいる。

ESAがGalileo 2nd Generation構築に向けてセキュリティ性能を強化

実施主体：ESA（欧）

- 2023年6月にESAはGMVに対してGalileo 2nd Generationの軌道上制御と検証のための地上システム開発のため200M€（32B円）以上の契約を実施した。
 - これらの活動は、2023年半ばから2026年末までの42カ月間にわたって実施され、2028年まで延長するオプションが想定されている。地上システムは最初のGalileo 2nd Generation衛星が打ち上げ予定されている2025年に運用が開始される予定。
- GMVとの取り組みによりシステムのセキュリティが強化されるだけでなく、Galileoの既存技術とサービスを強化し、精度を向上させメンテナンスコストを削減している。
- また2023年7月にESAはThales Alenia Spaceとのパートナーシップを契約しGalileo 2nd Generationにおけるサイバーセキュリティ強化に向けて連携していくことを発表した。（契約金総額60M€※）
 - Thalesは新しく打ち上げるGalileo 2nd Generation衛星12機の内6機を提供する予定になっている。
- 当該パートナーシップによってGalileo 2nd Generationのサイバー脅威を検出して対応する能力を強化することができるとしている。



図 Galileo 2nd Generation イメージ図 [5]

※1€=160円で計算

出所)

1. [Inside GNSS](#)
2. [Via Satellite](#)
3. [GPS World](#)
4. [Thales Alenia Space](#)
5. [ESA](#)

次世代GNSSに関する最新情報の更新 (2/6)

23-003-T-014

抗たん性強化

高精度測位

新たなPNT

米オハイオ州立大学にてLEO通信衛星コンステレーションの信号を活用した実験が実施された。空軍科学研究所などの支援の下で測位と通信の融合を視野に入れた新たなPNTサービスの実現に向けた検討が進んでいる。

オハイオ州立大学によるLEO通信衛星コンステレーションを活用した測位実験

実施主体：オハイオ州立大学（米）

- 米オハイオ州立大学において、Starlink、OneWeb、Orbcomm、および Iridium衛星の機会信号(SoOp)を用いた測位の実験が実施された。
 - SoOp (Signals of opportunity) を用いた測位とは測位目的で発信されていない信号を用いた測位方法
- 実験では、4種類のLEO通信衛星の信号を用いたドップラーシフトや慣性航法システム (INS) を用いて地上局の静止地点における測位および移動車両の測位が実施された。
- 実験の結果、静止地点における測位では平面で5.1 m、3次元で5.8mの誤差となる結果となり、移動体における測位においても約4m程度の誤差に留まることが分かった。
- 当該研究は、空軍科学研究所や米国運輸省等からの支援で実施された。

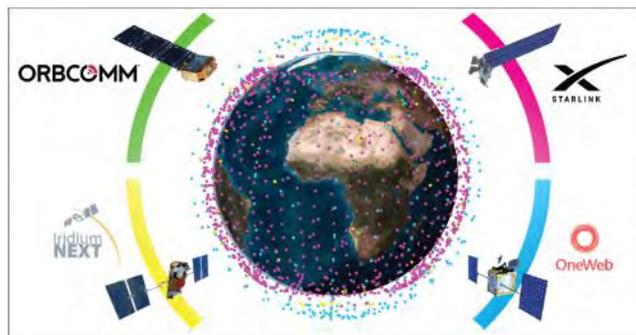


図 実験で活用された4種類の通信衛星 (Starlink、OneWeb、Orbcomm、Iridium)

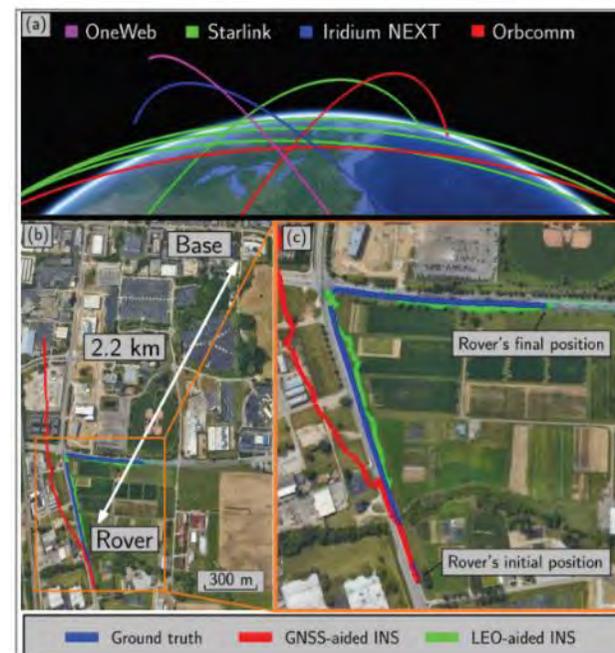


図 移動車両の測位に関する実感結果
 (a)実験で活用された4種類の衛星の軌道
 (b)地上基準点と移動体の距離
 (c)測位の軌跡 [1]

出所)

1. Inside GNSS, [A Look at the Stars: Navigation with Multi-Constellation LEO Satellite Signals of Opportunity](#)

次世代GNSSに関する最新情報の更新 (3/6)

23-003-T-014

抗たん性強化

高精度測位

新たなPNT

Xona Spaceは米宇宙軍等や防衛関連企業とのパートナーシップを複数締結しており、安全保障分野における自社LEO PNTサービスの活用を目指している。

Xona Spaceが安全保障分野への利用に向けパートナーシップを構築

実施主体：Xona Space（米）

- Xona Spaceは、XonaのPULSARサービスを活用したLEO PNTアーキテクチャに向けた取り組みを進めるために、1.2M\$のSBIR Phase IIの契約に基づきAFRLおよび米宇宙軍との連携を2023年8月に発表した。
- AFRL側は当該パートナーシップが将来の防衛計画において敵対的脅威に強い柔軟で多様な衛星に商業宇宙資産をうまく活用できると考えている。
- Xona SpaceのCEOは「本パートナーシップによってXonaはPULSARを米国の国家安全保障における宇宙システムのアーキテクチャにシームレスに統合するために必要な専門知識を得ることができる」としている。また、「DOD独自のPNT要件を早期に評価することで、運用サービスへの移行を成功に導くことができる」ともしている。
- また同月にXona SpaceはLockheed Martinとの連携も発表した。
- この協力により、Lockheed MartinとXonaは、軍レベルのセキュリティ基準に従ってXonaのPULSARサービスを保護するために協力をしていく。具体的には、2024年のXonaの最初のプロダクション衛星打ち上げに備えて、信号セキュリティやライセンス管理などの重要なPULSAR機能の開発を目指す。
 - 2022年8月にLockheed Martinのベンチャーキャピタル部門からの資金調達されている。本ラウンドはFirst Spark Venturesが主導し、Lockheed Martin Venturesの他に、SRI Ventures、Velvet Sea Ventures、Gaingels、Airstream Venture Partners、およびSpace.VCなど多数のVCが参加し、計2,500万\$（約3.6億円）の資金調達を確保した。

※1\$=145円で計算

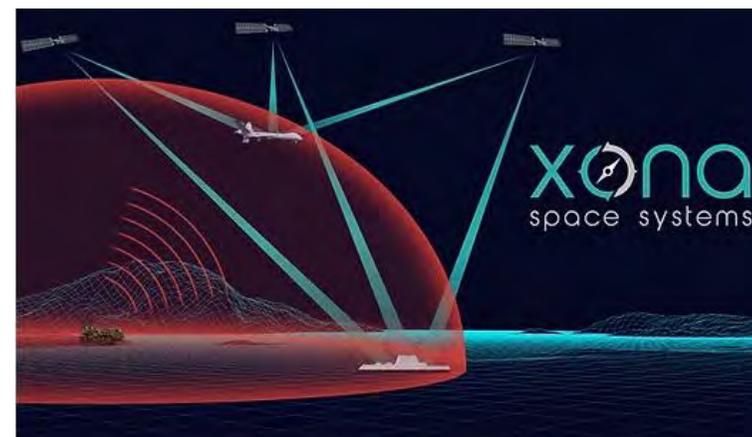


図 Xona Space サービス概念図^[1]

出所)

1. Inside GNSS, [Xona Partners with AFRL, U.S. Space Force on LEO PNT Architecture](#)

2. GPS World, [Xona accelerates commercial LEO PNT service with AFRL and USSF investments](#)

3. Space NEWS, [Lockheed invests in Xona's GPS-alternative constellation](#)

4. Xona Space, [Xona and Lockheed Martin Strengthen PULSAR™ Through Enhanced Collaboration](#)

次世代GNSSに関する最新情報の更新 (4/6)

23-003-T-014

抗たん性強化

高精度測位

新たなPNT

LEO PNTを進めるXona Spaceは実証衛星による高精度のLEO PNT信号の伝送に成功。同社はAWSのアクセラレータプログラムにも選出され、LEO PNT事業者として先行した存在となっている。

Xona Space、世界で初めて商業低軌道測位衛星の実証実験に成功

実施主体：Xona Space（米）

● 2023年5月、Xona Spaceは昨年打ち上げを実施した史上初の商業出資によるLEO PNT実証衛星Huginnにおいて下記成果を上げたことを発表。

- ① 宇宙から地上への高精度LEO PNT信号の伝送に成功
- ② 自社開発のハードウェア/ソフトウェアスタックを使用して、cmレベルのユーザーポジショニングを提供する能力の検証
- ③ 独自のデジタルナビゲーション波形ジェネレーターの軌道上での再プログラム可能性の実証
- ④ 低コストのCOTSした精密衛星ナビゲーション機能の実証
- ⑤ 大型の原子時計を搭載せずに高精度PNTを実現する重要な要素である特許取得済みクロックアーキテクチャの検証

※ただし、①以外については「成功」という文言はなく、6月のION Joint Navigation Conferenceにて詳細を報告するとしている。

● また、2023年4月には、AWSが主催する宇宙アクセラレータプログラムの14社の中の一つに選ばれた。今後当4週間のプログラムにおいて、最大10万\$（14.5M円※）相当の技術サービスの提供含むクラウドを活用した技術的及びビジネス的なサポートが提供される。

➤ 今年で3年目となる当プログラムではこれまで、HawkEye360やD-Orbit、LeoLabs、Ursa Space等多くのNew Space企業が参加している。

※1\$=145円で計算

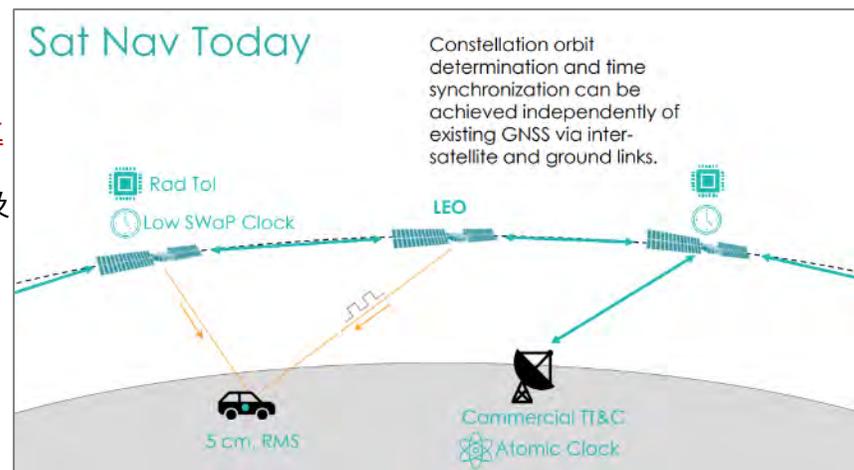


図 Xona衛星 測位方法概念図^[4]

出所)

1. Space News, [AWS chooses 14 startups for its third space accelerator program](#)
2. Xona Space, [Xona Broadcasts Demo PNT Signals From Low Earth Orbit](#)

3. Space News, [Space startups selected for Amazon Web Services accelerator](#)
4. Xona Space, [A New Space Approach to Commercial LEO PNT](#)

次世代GNSSに関する最新情報の更新 (5/6)

23-003-T-014

抗たん性強化

高精度測位

新たなPNT

Satellesは欧州プログラムにてGNSSのバックアップ手段のタイミングソースとして高い評価を獲得。同社は米運輸省の同様の調査でも高評価を受けており、Alternative PNTサービスとしての期待が大きい。

Satelles、DEFISのAlternative PNT研究において信頼できるタイミングソースとして評価

実施主体：Satelles（米）

- LEOからのグローバルPNTを提供するSatellesは2021年、欧州委員会の防衛産業・宇宙総局（DEFIS）から、Alternative PNTの研究に米国企業として唯一参加し、信頼できるタイミングソースであることが再び証明されたとしている。
 - DEFISのプログラムの目的は、GNSSから独立して測位やタイミング情報を配信できる技術を分析し、GNSSが途絶えた場合のバックアップおよびGNSSが配信できない環境下でPNTを提供できるようにすること。
- 屋内外の両方の実験においてSatellesのタイミング精度は基準（GNSS停止時に少なくとも1日間、UTC（3σ）に対するタイミング精度が1ms未満であること。）に対して364nsという高パフォーマンスと評価された。
- 測位関しても水平方向17m、垂直方向10mと位置精度の基準（100m未満）内の成果を出した。
- 2021年の米運輸省のPNTとGPSの補完的なバックアップ技術に関する報告書の中でもSatellesのPNTに対して高評価が与えられている。



出所)

1. Inside GNSS, [STL From Satelles Exceeds Expectations in JRC A-PNT Study](#)
2. EC, [Assessing Alternative Positioning, Navigation and Timing Technologies for Potential Deployment in the EU](#)

次世代GNSSに関する最新情報の更新（6/6）

23-003-T-014

抗たん性強化

高精度測位

新たなPNT

CubeSatベースでのグローバルPNTサービス提供を目指す米TrustPointが最初の衛星を打ち上げた。同社はGPSIIIの数分の1のコストでPNTサービスを提供できるとして米空軍プログラムなども受賞している。

TrustPoint が PNT cubesat を打ち上げ

実施主体：TrustPoint（米）

- CubeSatベースのGNSS開発を目指すスタートアップ企業TrustPointは2023年4月にSpaceXのライドシェアフライトにて最初の衛星を打ち上げた。
 - It's About Timeと呼ばれる最初のミッションで、TrustPointはペイロード技術のテスト等を実施する。
- TrustPointはLEOコンステレーションにてGPSの代替手段ではなく、バックアップ・補完的技術を提供することを目指しており、2022年9月に米空軍の中小企業イノベーション研究契約「SpaceWERX Orbital Primeプログラム」を獲得。
 - SpaceWERX Orbital Primeプログラムは空軍のイノベーション部門であるAFWERXにより運営されるSmall Business Technology Transfer（STTR）プログラムの下で行われ5ヶ月の契約期間で25万\$を提供
- 他にも同社は2021年にCapella SpaceやRocket Labにも投資しているベンチャーキャピタルDCVC200万ドルを調達している。
- 小型衛星の製造エコシステムと手頃な価格および打ち上げの可用性を組み合わせることで、TrustPointはPNTコンセプトを迅速かつ手頃な価格で実証できるようになったとしている。CEOはGPSIII衛星の数分の1のコストでグローバルなPNTサービスを提供できるとしている。



図 TrustPoint サービス提供分野

出所)

1. Space News, [TrustPoint launches PNT cubesat](#)
2. Space News, [TrustPoint raises \\$2 million for GPS alternative](#)

3. TrustPoint, [HP](#)
4. AFRL, [SpaceWERX awards 124 Orbital Prime contracts](#)

次世代GNSSに関する各国の動向調査及び日本の強み弱み分析

23-003-T-014

各国GNSSの抗たん性向上に向けた研究開発を実施していることに加えて、日本では世界に先駆けた高精度補強サービスを提供している。一方で、LEOコンステや通信衛星を活用した新たなPNTの検討では他国に比して検討が遅れている。日本では月測位研究会において月測位（Lunar PNT）に加え、低軌道衛星による測位（LEO PNT）も研究対象とする方針となっている^[1]。

海外動向



- ✓ 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（NTS-3）にて軌道上で再プログラム可能なフルデジタルペイロードの実証を進められている。また、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としている。
- ✓ LEOコンステレーションや通信衛星の電波を活用した新たなPNTの検討も官民で実施されている。



- ✓ Galileoはグローバルシステムとしては初の高精度補強サービスHAS (High Accuracy Service)を配信開始^[3]
- ✓ Galileo 2nd Generationが2024年に打ち上げ予定^[2]であり、従来のGalileoからのセキュリティ性向上や軌道上にて再構成が容易にできユーザーニーズに対応できるフルデジタルペイロードの搭載などの特徴を有する。



- ✓ 既存のGNSSとの適合性・相互運用性を持ったLEO PNTとの連携について検討が進んでいる。



- ✓ 軌道冗長性の観点よりMEO軌道での従来のGLONASSに加えてIGSO軌道でのGLONASSも検討されている

1. 第6回月測位研究会

2. SpaceX to Launch Galileo Satellites Next Year

3. Galileo HAS

日本の強み弱み分析



強み

- ✓ 高層ビルの陰や山間部も含めてGPSに依存することなく24時間測位データを入手するために11機体制に向けた開発を推進している
- ✓ 認証システムの開発など抗たん性/信頼性強化に向けた開発を中長期的に取り組んでいる
- ✓ 世界に先駆け高精度補強サービスを提供している。（日産、NEXCO東日本のASNOS等CLASを用いた運転支援システムの実証）

弱み

- 市場規模が小さく、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）
- LEOコンステレーションや通信衛星の電波を活用した新たなPNTの検討については顕著な取り組みが見受けられない
- 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が進んでいない

次世代GNSSに関する研究開発項目の分析

23-003-T-014

- **抗たん性及びレジリエンスの強化を実施していき、社会インフラとしての利用拡大を目指していく。**
- **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ではないか。**
- **地上受信アンテナの技術開発も重要であり、ジャミング・スプーフィング検知技術やLEO PNTを使用した際の精度向上につながるアルゴリズム開発やシミュレーションが必要である。**

| 目的・方向性 | 概要 | 研究開発項目（KSF・キー技術） |
|------------|---|---|
| 社会インフラサービス | 常時単独測位が可能となる11機体制以降を想定し、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していく。 | 機能低下・低下時間の低減 <ul style="list-style-type: none"> デジタルペイロード(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 |
| 高精度測位サービス | GalileoのHAS※1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)を目指していく。 | リージョナル差別・グローバル協調 <ul style="list-style-type: none"> 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 |
| 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サービスを目指していく。 | 予見性を持ったサービスの拡大 <ul style="list-style-type: none"> 公共信号含む配信信号の増加 5Gや通信衛星の信号等を利用するSoOp※2技術 サイバーセキュリティ技術 |

※1 HAS : High Accuracy Service

※2 SoOp : Signals 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舍選択の参考(1例)となるロングリストとして提示

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.1 宇宙探査や軌道上作業の動向調査

2.1.2 宇宙探査や軌道上作業に必要な技術調査

2.1.3 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

2.1.4 遠距離高速通信システムの調査

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

2. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.1.4 遠距離高速通信システムの調査

昨年度（22年度）の調査サマリ①

23-003-T-014

【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。**

昨年度（22年度）の調査サマリ②

23-003-T-014

- 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、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

遠距離高速通信システムに関する最新情報の更新（1/4）

23-003-T-014

LunaNet

MoonLight

その他

米国の民間企業CREANが、月面および月周回軌道での広帯域通信サービスを提供する「CelestNet」を計画している。Artemis計画に合わせて2025年のサービス提供開始を目指す。

月面・月周回軌道上を見据えた通信サービスCelestNetを計画

実施主体：CREAN, Inc.

- CREAN, Inc.は航空宇宙工学とスマート製造を手掛けており、月での広帯域通信サービスを提供する「CelestNet」の構築を計画している。^[1]
- CelestNetはLunaNet含むArtemis計画やMoonLight等の月面ミッションを見据えた、月面などで通信インフラストラクチャを提供する、月周回軌道上の衛星ネットワークである。^[1]
- システムは中継衛星とPNT衛星により、リアルタイムデータや音声、高解像度動画の中継通信サービスと、月面または月周辺軌道でのミッション向けに月面GPSのようなナビゲーションサービスを提供する。^[2]
- 2025年にのサービス提供開始を目指している。^[3]
- CelestNetの開発戦略の一環として、Aquarian Spaceを買収した。^[4]



図 CelestNetの概要図 [1]

出所)

1. CREAN, [CREAN Announces Lunar Communication & Navigation Servicer Development](#)
2. CREAN, [How CREAN is Creating Interplanetary Communication and Navigation to Drive the Lunar Economy](#)

3. CREAN, [CelestNet – Nextgen Lunar Communication System](#)
4. PRESSWIRE, [CREAN's CelestNet™ System Fueled by Acquisition of Aquarian Space](#)

遠距離高速通信システムに関する最新情報の更新 (2/4)

23-003-T-014

LunaNet

MoonLight

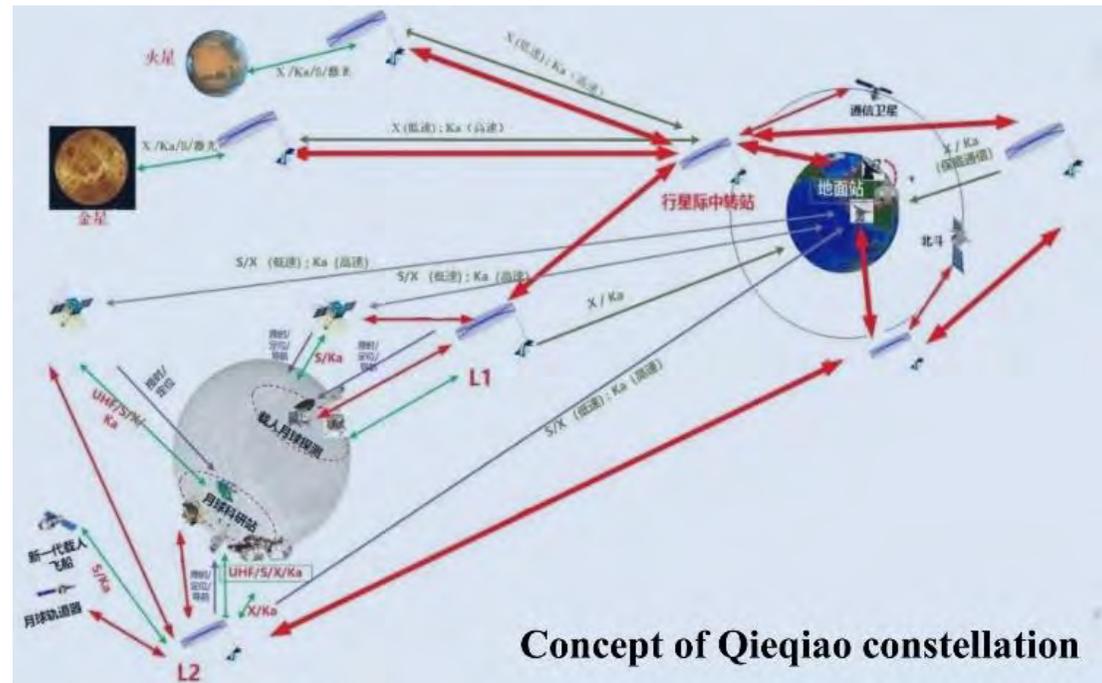
その他

中国は国際月研究ステーション (ILRS) の構築を計画している。計画の一環として、月での通信やナビゲーションを提供するコンステレーション構築を目指し、2024年以降に月中継衛星の打ち上げを予定している。

中国が国際月研究ステーションの設立を発表

実施主体：中国

- 中国当局は、中国政府が2030年までに宇宙飛行士を月面に着陸させる月面基地計画を発表している。4月にはこのプロジェクトを進める国際月研究ステーション協力機構 (ILRSCO) を設立すると発表した。^{[1][2]}
- 中国国家航天局 (CNSA) 傘下の深宇宙探査研究所 (DSEL) の発表によると、中国は今年10月までに設立メンバー向けの、宇宙機関や組織との協定や覚書の締結完了を目指している。^[2] 2023年には新たに、ベネズエラ、南アフリカ、パキスタン、アゼルバイジャン、ベラルーシ、エジプトが加盟した。なお、創設メンバーの最終的なリストについては12月11日時点では未発表^[3]。
- また、中国の月面および深宇宙探査計画のために、Queqiaoコンステレーションの構築を構想している。通信・ナビゲーション・リモートセンシングサービス機能が搭載される予定。
- 2024年初めに月中継衛星「Queqiao-2」の打ち上げが計画されている。さらに、2024年5月に打ち上げ予定のChang'e 6号では、月の裏側でのサンプル採取ミッションが予定されている。^[2]



Concept of Queqiao constellation

図 Queqiaoコンステレーションの概要図 ^{[1][2]}

出所)

1. NSF, [China outlines ambitious plans for Moon landing](#)
2. Space News, [China attracts moon base partners, outlines project timelines](#)

3. [エジプト、中国のILRS月面基地計画に参加](#)

遠距離高速通信システムに関する最新情報の更新 (3/4)

23-003-T-014

LunaNet

MoonLight

その他

LunaNetにおけるレーザー通信端末O2Oが2023年の打ち上げに向けて順調に進捗している。

【参考】 LunaNetのレーザー通信端O2Oが2023年の打ち上げに向けてケネディ宇宙センターへ納入

実施主体：NASA、MIT-LL※1（米）

- Artemis計画の元、「Orion」宇宙船に搭載される通信端末O2O（Orion Artemis II Optical Communications System）が、2023年の打ち上げに向けてケネディ宇宙センターに納入された。^[1] (2023/12現在 打ち上げ予定は2024年となっている^[4])
- O2OはNASAのSpace Communications and Navigation (SCaN) プログラムから資金提供を受けて、ゴダード宇宙飛行センターとMIT-LLが主導となり開発されている。^[1]
- NASAで使用されている従来の電波システムと比較して、1回の送信でより多くの情報を送受信できるようになり、宇宙飛行士がほぼリアルタイムで月の状況を報告することが期待されている。^[2]
- 通信速度は260Mbpsで、月から4K高解像度ビデオを送信できる。^[1]
- ケネディ宇宙センターへ納入される前に、O2Oレーザー通信端末は宇宙環境下での動作確認のために環境テストを受けている。^[1]



図 ケネディ宇宙センターに到着したO2Oペイロード^[1]

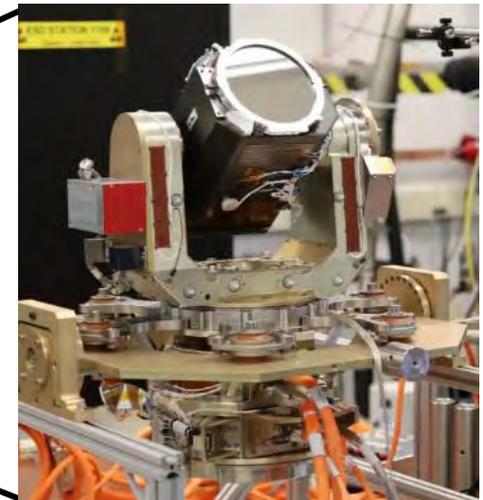


図 O2Oレーザー通信端末^[3]

※1 : Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory

出所)

1. NASA, [NASA Laser Communications Terminal Delivered for Artemis II Moon Mission](#)
2. UchuBiz, [NASA、月軌道から電波ではなくレーザーでハイビジョン映像を伝送へ](#)

3. NASA, [Lasers Light the Way for Artemis II Moon Mission](#)
4. [Orion Artemis II Optical Communications System \(O2O\)](#)

遠距離高速通信システムに関する最新情報の更新 (4/4)

23-003-T-014

LunaNet

MoonLight

その他

2023年11月NASA の深宇宙光通信 (DSOC) 実証にて約1,600 万キロメートルでの光通信の実証に成功^[1]。

NASAの深宇宙光通信実証がこれまでで最も遠い光通信を成功

実施主体：NASA

- NASA の深宇宙光通信 (DSOC : Deep Space Optical Communications)は小惑星プシュケへ向かう探査機に搭載された技術実証ミッション
- DSOCは、近赤外線レーザーを、地球から月までの約 40 倍の距離である 1,600 万キロメートル 近く離れたところからカリフォルニア工科大学パロマー天文台のハイル望遠鏡に照射し、月(約38万キロメートル)のはるか彼方との間でレーザーを介してデータの送信を初めて成功させた。これまでで最も遠い光通信の実証となった。
- 火星の宇宙飛行士に動画を届けるという、NASAの光通信に対するビジョンを実現するための技術。
- 課題として、光が目的地に到達するまでに時間がかかり、技術デモの最も遠い距離では 20 分以上の遅れが生じる。そのため、地上受信機と探査機の位置は送信された光が移動するにつれて常に変化するため、地上受信機 と飛行探査機がどこにあるかを補正する必要がある。



Credit: NASA/JPL-Caltech

図 探査機およびDSOC^[3]



Credit: NASA/JPL-Caltech/Palomar Observatory

図 カリフォルニア工科大学パロマー天文台^[3]



出所)

1. NASA's Deep Space Optical Comm Demo Sends, Receives First Data
2. Deep Space Optical Communications (DSOC)

3. [DSOC fact sheet](#)

各国の動向調査及び日本の強み弱み分析

23-003-T-014

各国は主軸を持った上で、商用プレーヤーも加わった技術開発が進んでおり、欧米連携はLunaNetを中心にインターオペラビリティの検討が進みつつある。日本ではワープスペースを筆頭に、技術開発が進み始めている。

動向分析サマリ



LunaNet

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

- 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@2024年)
- 月以遠の深宇宙探査に向けて遠距離高速通信を光通信で行う実証を開始している



MoonLight

ESA/民間が協力を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

- 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^[2]。(MAX: 5Mbps (中継衛星-地上間))



Queqiaoコンステレーションの構築を構想

- 月面基地計画を推進する国際月研究ステーション協力機構(ILRSCO)を設立し、[通信・ナビゲーション・リモートセンシングサービスの実現を目指す](#)。
- 月面だけでなく、深宇宙探査への活用も見据えている。

日本の強み弱み



強み

- 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。
- 要素技術(補足追尾センサ・大口径光学系・補償光学等)の研究が進められている。
- ワープスペースが、[アーキテクチャの検討](#)及び[衛星捕捉追尾用の超高感度センサーとその制御技術の開発をJAXAより受託^{\[1\]}](#)し、今後の技術成熟が期待される。

弱み

- 宇宙基本計画ではプロジェクトが未規定。
- [民間活用の試行はあるものの顕著ではなく、実績は少ない](#)。
- 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](#)。
- 具体的なユースケース(NASAの火星の宇宙飛行士に動画を届ける等)を見据えた、技術開発モチベーションの醸成が必要

1. [ワープスペース：月と地球を結ぶ光通信システムの実用化に向けた検討・開発業務](#)
 2. [Lunar-Pathfinder-Service-Guide](#)

遠距離高速通信システムに関する研究開発項目の分析

23-003-T-014

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。日本の強みである「大容量通信」を活かして「通信」や「小型・軽量化」の技術開発を進めながら、国際連携を継続していく。

| 目的・方向性 | 概要 | 研究開発項目（KSF・キー技術） |
|-----------|--|---|
| 模倣困難技術の獲得 | LunaNetの構想では複数のシステムが共存していることを踏まえ、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。(欧米ともに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。) | 通信容量の向上 <ul style="list-style-type: none"> 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 |
| 産業基盤の強化 | 海外民間企業の活動領域拡大に後れを取らないよう、 産業競争力/収益の源泉となる「小型・軽量化」技術の開発を推進 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。 *他国と比較して劣後であり、事実上の課題といえるものの、国内の研究開発事例が出始めてきている。 | 小型・軽量化 【RF関係】 <ul style="list-style-type: none"> 遠距離用トラポン 地上局 NW制御技術 【光通信関係】 <ul style="list-style-type: none"> 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) |
| 自律性の確保 | 将来の月周辺活動において、欧米への依存を避けるため、 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」に関する技術の研究開発、および国際連携を継続 する。 | インターオペラビリティ（連携・協調） <ul style="list-style-type: none"> 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 |

【留意点】

定常的な需要より大幅な容量で差別化するため、稼働率が下がり産業化には不向き

【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

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

現状

- デブリ監視は、地上レーダー及び光学センサが主流。各センサーの短所を他のセンサーで補いあっている。
- 軌道上の物体が増える中、より正確なデータを求め商用SSA事業者のセンサーデータの重要性が高まる。
- 米国ではSSNに加え商用SSAが進み、センサー（光学、レーダー、RF）の違いで差別化をしている。更に、センサーをグローバルに展開しカバレッジ拡大している。欧州は、米国との連携を維持しつつも、欧州の自律性を強化。
- デブリ回避においては、米国では様々なセンサーデータをクラウド上で統合し、回避技術の精度向上、回避判断支援システムの構築、自動化を進めている。ESAでは官民連携の下で、米国と同様な回避行動の意思決定支援技術の研究開発を進める

分析

- 軌道混雑で更なる回避行動が必要となる中、スムーズで効率的なデブリ回避を実現するシステムが求められる
- デブリ回避技術における課題として、システムに取り込む観測データの正確性、膨大なデータの処理、回避の行動など運用における意思決定への支援に課題があると考えられる
- デブリの監視・回避の基本となるデータの収集においては、米国との強固な関係を基軸とすることが必要ではないか。日本独自のデータを持つことにより、安定的にデータを入手できるように相互関係を構築する
- デブリ監視・回避技術は、軌道上の状態把握と同様に宇宙利用の基本的なインフラであるという点、更に、安全保障の観点からも重要であり、相互関係の維持に必要な技術の確保を目指す。

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）

2.2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）

2.2.3 デブリ監視及び回避技術の事例調査

2.2.4 強み・弱み分析

2.2.5 戦略・研究開発計画

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

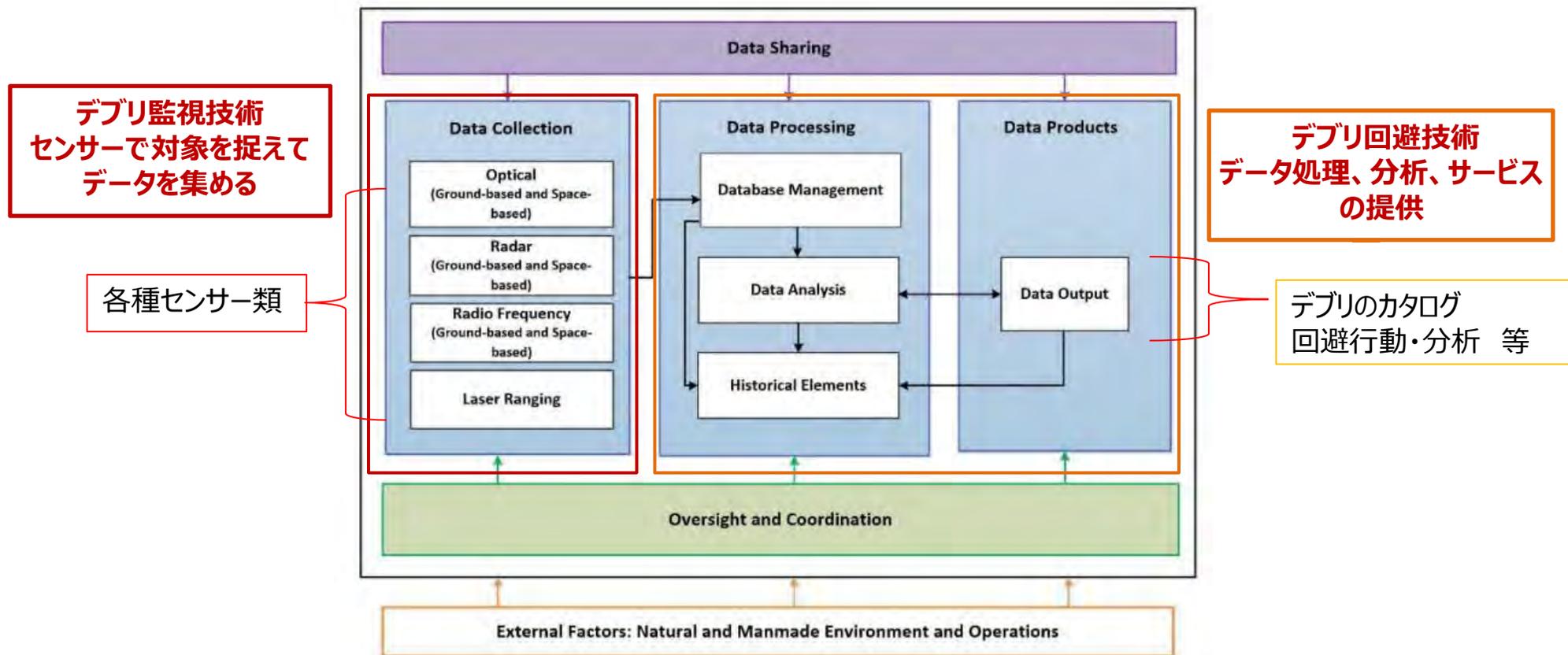
2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

- デブリ監視技術とは各センサーでデブリを捉えデータを収集する技術である。
- デブリ回避技術は、デブリのカタログ化、回避行動の分析など、データ取得後のデータ処理・データを解析したサービスである。



☒ Space Traffic Systemのフレーム [1]

出所)

1. IDA, [Global Trends in Space Situational Awareness \(SSA\) and Space Traffic Management \(STM\)](#)

デブリ監視及び回避技術の調査分析 – デブリ監視 –

23-003-T-014

- 米国では、政府・軍が主体となり**センサーの高出力化や小型化を図る動きがある**。また、**商用SSA事業者はセンサーをグローバルに展開しカバレッジ拡大している**。また、各社は**センサー（光学、レーダー、RF）の違いで差別化**をしている。
- 欧州は、米国との連携を維持しつつも、**欧州の自律性を強化する動きがある**。また、**商用センサーを調達することで、欧州事業者への依存性を高める方向性も出てきている**。
- 中国やロシアは、一国ではカバレッジ確保が難しいため、**国際的な連携体制を構築している**。

| 体制 | キー技術 | 資金源 | 特徴 | |
|-----|---|--|--|---|
| 米国 | <ul style="list-style-type: none"> ● DoD SSNのSpace Fenceは、熱伝導率や放熱性に優れた半導体を用いることで、地上ベースのセンサーの高出力化を実現。 ● SSA衛星（ORS-5）は、固定光学センサー搭載による低コスト化・小型化を実施。移動物体を高速かつ高感度で撮像するセンサー技術を採用している。 ● LeoLabsは、LEOに特化したレーダーを用いることで、2cm級のデブリ検出を実現。複数のレーダーをグローバルに展開することで、カバレッジを確保する。 ● ExoAnalyticは、各センサーの運用は自動化され、薄暗い物体検出機能を有する。 ● Kratosは、昼夜・天候条件に依存しないRFセンサーを利用したサービスを提供。 | <ul style="list-style-type: none"> ● DoD SSNは米国政府・軍からの資金提供に基づいた運用である。 ● 商用SSA事業者は、衛星事業者へサブスクリプション型の衛星追跡・監視サービスを提供しており、企業間での資金の流れが発生している。（LeoLabsやExoAnalyticは利用料金を公開）。 | <ul style="list-style-type: none"> ● 地上ベースのセンサーの高出力化や衛星搭載センサーの低コスト化・小型化する動きがある。 ● LEO向けに特化した地上センサーをSSA専用でグローバルに展開することで、LEOコンステレーション事業者を顧客として確保する。 ● また、商用SSA事業者において、光学やレーダー以外にRFセンサーを利用したSSAサービスも始まっている。 | |
| 欧州 | <ul style="list-style-type: none"> ● 米国 DoD SSNによるグローバルな監視体制を構築しつつも、欧州の自律性を強化していく動きがある。 ● EUSSTでは、軍用センサーが95%を占める中、商用センサーを調達することで、欧州事業者への依存性を高めていく狙いがある。 | <ul style="list-style-type: none"> ● ESAでは、新たな地上ベースのレーザーを構築した。今後、レーザーの高出力化やレーザーサイトの自律制御によるデブリ監視が期待されている。 | <ul style="list-style-type: none"> ● EUSSTの予算が不足しているため、民生と安保の相乗効果を活用していく動きがある。（EUのSSA活動とGOVSATCOMの連携） | <ul style="list-style-type: none"> ● 米国との連携を維持しつつ、欧州の自律性を強化して、商用センサーを調達することで、欧州事業者への依存性を高めていく動き。 ● レーザーを用いたデブリ監視を先駆的に実施している。 ● 民生・安保予算の相乗効果を期待している。 |
| 中国 | <ul style="list-style-type: none"> ● 中国は、アジア太平洋宇宙協力機構の枠組みにおいて、中国主導で国際的な地上ベースの光学SSA体制構築を推進。（バングラデシュ、イラン、モンゴル、パキスタン・ペルー、タイロク） | <ul style="list-style-type: none"> ● （完全なセンサーネットワークが構築された場合でも、LEOで10cm程度の物体監視能力であることから、米欧と比べ監視精度は劣る） | <ul style="list-style-type: none"> ● APSCOによる支援 | <ul style="list-style-type: none"> ● 一国ではカバレッジ確保が難しいため、国際的な連携体制を構築している。 |
| ロシア | <ul style="list-style-type: none"> ● ロシアは、各国の天文台や研究所等（チェコ、中国、アメリカ、欧州他）と国際的な地上ベースの光学SSA体制を構築 | <ul style="list-style-type: none"> ● 各国の天文台・研究所のセンサーと連携することで、グローバルなカバレッジを確保している。 | <ul style="list-style-type: none"> ● 不詳 | <ul style="list-style-type: none"> ● 一国ではカバレッジを確保は難しいため、国際的な連携体制を構築している。 |
| 日本 | <ul style="list-style-type: none"> ● 日本では、米国SSNと連携しつつ、地上センサー（レーダー・光学）を運用中。衛星ベースのSSA体制を構築する見込み。 | <ul style="list-style-type: none"> ● SSA衛星と地上レーダーによる高精度の監視が期待（現行レーダーは、LEOで10cm程度の物体監視能力であることから、米欧と比べ監視精度が劣る）。 | <ul style="list-style-type: none"> ● 政府予算にて運用中 | <ul style="list-style-type: none"> ● 今後、防衛省を含めた衛星・地上ベースのSSA体制構築により、現行よりも高精度な物体監視が可能となる。 |

デブリ監視及び回避技術の調査分析 –地上・衛星の監視 長所短所–

23-003-T-014

- デブリ監視は、地上レーダー及び光学センサが主流。米国は衛星搭載の光学センサが具備されている。
- 各センサーの短所を他のセンサーで補うことで効果を最大化している。また、RFやレーザーによるSSAサービスは未成熟であるものの、今後補完的に実装されることで、より正確な検出が可能となると考えられる。

| | センサータイプ | 対象軌道 | 長所 | 短所 |
|-------|----------------------|-------------|--|--|
| 地上ベース | レーダー 例：LeoLabs | LEO/MEO | <ul style="list-style-type: none"> ● 対象物体の速度・距離を能動的に測定可能 ● 一度に複数の物体を検出可能 ● 天候状態に影響を受けない ● 非アクティブな物体を検出可能 ● 直径1~2cm程度の小さな物体を検出可能 | <ul style="list-style-type: none"> ● GEO上の物体検出可能なレーダーは限定的 ● 複数の物体が近接や密集している場合、区別ができない |
| | 光学 例：ExoAnalytic | LEO/MEO/GEO | <ul style="list-style-type: none"> ● GEOの物体を検出可能 ● 非アクティブな物体を検出可能 | <ul style="list-style-type: none"> ● 悪天候や曇り、日中、物体が太陽に近すぎる場合、利用できない ● 複数の物体が近接や密集している場合、区別ができない |
| | RF (受動的) 例：Kratos | LEO/MEO/GEO | <ul style="list-style-type: none"> ● 昼夜問わず、全天候状態で物体を検出可能 ● (RF信号を測定できる場合) 複数の物体が近接や密集している状態でも区別可能 | <ul style="list-style-type: none"> ● 非アクティブな物体は検出できない (検出対象がアクティブな状態でRF信号を発信している必要がある) |
| | レーザー | LEO/MEO/GEO | <ul style="list-style-type: none"> ● 対象物体の正確な速度・距離、小さな物体測定が可能 | <ul style="list-style-type: none"> ● 天候条件により利用できない ● 対象物体情報 (軌道パラメータ等) が必要 |
| 衛星ベース | レーダー | LEO/MEO/GEO | (宇宙ベースのSSAサービスは実現されていない) | |
| | 光学 | LEO/MEO/GEO | <ul style="list-style-type: none"> ● 地上ベースの光学センサーに比べ、気象/大気条件が問題とならず、宇宙ベースの方が地上よりもセンサー感度が高くなる | <ul style="list-style-type: none"> ● 衛星規模によるものの、地上ベースの光学センサーよりもコストが高くなる |
| | RF (受動的) | LEO/MEO/GEO | (地上のRF監視衛星サービスが拡大しているものの、宇宙ベースのSSAサービスは未成熟) | |
| | レーザー | LEO/MEO/GEO | (軌道上サービス進展に伴いLIDAR技術の発展があるものの、宇宙ベースのSSAサービスは未成熟) | |

出所)

1. IDA, [Global Trends in Space Situational Awareness \(SSA\) and Space Traffic Management \(STM\)](#)
2. Kratos, [Space Domain Awareness](#)

3. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, [Network performance analysis of laser-optical tracking for space situational awareness in](#)

(参考) 米国における地上ベースのセンサー比較

23-003-T-014

- GEOの物体監視は、米国SSNにおいて定常的・網羅的にカバーされている。
- LEOの物体監視は、近年商業SSA事業者（LeoLabs）による独自センサー構築の加速に伴い、cm級の常時監視が実現可能となっている。

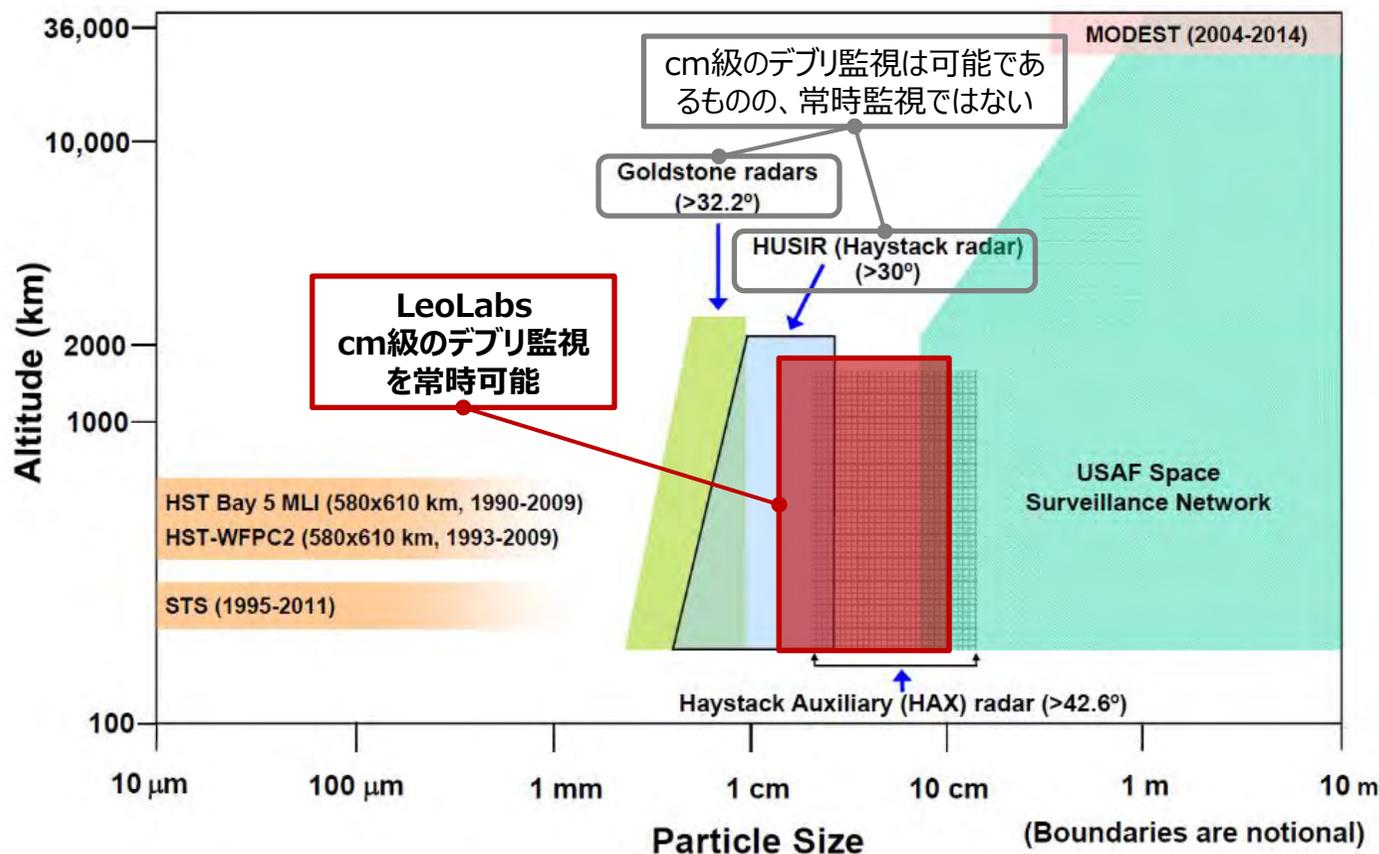


図 軌道上デブリ個数に関する測定データ (NASA Orbital Debris Program Office) [1]

出所)

1. NASA, [Debris Measurements](#)

（参考）米国における衛星ベースのSSA・SDAセンサー比較

23-003-T-014

米国では、大型SSA衛星を開発・運用しつつ、小型SSA衛星の開発を進め、低コスト・迅速な衛星配備を試みる動きがある。

| 衛星ベースのSDAセンサー | 性能・指標等 | | | |
|---|---|--|--|---|
| | 性能 | コスト | 時間軸 | 備考 |
| SDA衛星開発（1,000kg級） （LEO→GEO） 例：SBSSを想定  | <ul style="list-style-type: none"> LEO（SSO）からGEO上物体を監視。 機械式ジンバルの光学部を装備している。 | <ul style="list-style-type: none"> 米国SBSSは、\$823M程度と見られる | <ul style="list-style-type: none"> 不詳 | <ul style="list-style-type: none"> 衛星開発は、Ball Aerospace, Boeing 光学系：Northrop Grummanが担当 |
| SDA衛星開発（500kg級） （GEO→GEO） 例：GSSAPを想定  | <ul style="list-style-type: none"> GEO上でRPO可能な衛星バスを有する。 固定光学・駆動式光学部の有無は不詳 | <ul style="list-style-type: none"> 米国GSSAPは、\$700M程度と見られる | <ul style="list-style-type: none"> 不詳 | <ul style="list-style-type: none"> 衛星開発は、Northrop Grummanが担当（光学系の担当は不詳） |
| SDA衛星開発（100kg級） （LEO→GEO） 例：ORS-5  | <ul style="list-style-type: none"> 固定光学、自律的なGEOスキャン・連続観測 設計寿命3年 | <ul style="list-style-type: none"> 米国ORS-5は、\$87.5M | <ul style="list-style-type: none"> 3年程度 | <ul style="list-style-type: none"> 光学系の開発はMITリンカーン研究所が担当 |
| 衛星搭載2次ペイロード開発 （QZO→GEO） 例：準天頂衛星搭載センサーを想定  | <ul style="list-style-type: none"> 固定光学、自律的なGEOスキャン・連続観測 | <ul style="list-style-type: none"> 不詳 | <ul style="list-style-type: none"> 不詳 | <ul style="list-style-type: none"> 光学系の開発はMITリンカーン研究所が担当 |

大

開発規模

小

地上・衛星の監視技術に関する長所・短所分析結果

23-003-T-014

- デブリ監視は、地上レーダー及び光学センサが主流。米国は衛星搭載の光学センサが具備されている。
- 各センサーの短所を他のセンサーで補うことで効果を最大化している。また、RFやレーザーによるSSAサービスは未成熟であるものの、今後補完的に実装されることで、より正確な検出が可能となると考えられる。

| | センサータイプ | 対象軌道 | 長所 | 短所 |
|-------|---------------------|-------------|--|--|
| 地上ベース | レーダー 例：LeoLabs | LEO/MEO | <ul style="list-style-type: none"> ● 対象物体の速度・距離を能動的に測定可能 ● 一度に複数の物体を検出可能 ● 天候状態に影響を受けない ● 非アクティブな物体を検出可能 ● 直径1~2cm程度の小さな物体を検出可能 | <ul style="list-style-type: none"> ● GEO上の物体検出可能なレーダーは限定的 ● 複数の物体が近接や密集している場合、区別ができない |
| | 光学 例：ExoAnalytic | LEO/MEO/GEO | <ul style="list-style-type: none"> ● GEOの物体を検出可能 ● 非アクティブな物体を検出可能 | <ul style="list-style-type: none"> ● 悪天候や曇り、日中、物体が太陽に近すぎる場合、利用できない ● 複数の物体が近接や密集している場合、区別ができない |
| | RF（受動的） 例：Kratos | LEO/MEO/GEO | <ul style="list-style-type: none"> ● 昼夜問わず、全天候状態で物体を検出可能 ● （RF信号を測定できる場合）複数の物体が近接や密集している状態でも区別可能 | <ul style="list-style-type: none"> ● 非アクティブな物体は検出できない（検出対象がアクティブな状態でRF信号を発信している必要がある） |
| | レーザー | LEO/MEO/GEO | <ul style="list-style-type: none"> ● 対象物体の正確な速度・距離測位が可能※1 | <ul style="list-style-type: none"> ● 天候条件により利用できない ● 対象物体情報（軌道パラメータ等）が必要 ● 反射板が必要※1 |
| 衛星ベース | レーダー | LEO/MEO/GEO | （宇宙ベースのSSAサービスは実現されていない） | |
| | 光学 | LEO/MEO/GEO | <ul style="list-style-type: none"> ● 地上ベースの光学センサーに比べ、気象/大気条件が問題とならず、宇宙ベースの方が地上よりもセンサ感度が高くなる ● 観測頻度が高くなる | <ul style="list-style-type: none"> ● 衛星規模によるものの、地上ベースの光学センサーよりもコストが高くなる |
| | RF（受動的） | LEO/MEO/GEO | （地上のRF監視衛星サービスが拡大しているものの、宇宙ベースのSSAサービスは未成熟） | |
| | レーザー | LEO/MEO/GEO | （軌道上サービス進展に伴いLIDAR技術の発展があるものの、宇宙ベースのSSAサービスは未成熟） | |

※1：ESAの構想では、レーザーによる10cm程度（600km）の物体検出を想定^{[4][5]}。同構想では、40kWのレーザー出力を前提とした場合、微小デブリや数百kgデブリ、ロケット本体等の幅広い物体に対するレーザー照射を対象としている一方で、レーザー損失や高精度追跡・検出を考慮していく必要がある^[6]。また、高出力レーザーに加え、複数の追跡レーザーを併用による高精度追跡・検出の実現が必要となる^[6]。

出所)

1. IDA, [Global Trends in Space Situational Awareness \(SSA\) and Space Traffic Management \(STM\)](#)
2. Kratos, [Space Domain Awareness](#)
3. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, [1](#)

4. DiGOS, [Izana-1](#)
5. DiGOS, [Space Debris Laser Ranging](#)
6. DLR, 他, [LARAMOTIONS: a conceptual study on laser networks for near-term collision avoidance for space debris in the low Earth orbit](#)

デブリ監視及び回避技術に係る動向調査状況 – デブリ監視 –

23-003-T-014

- 近年米国では、地上ベースの一部レーダーにおいて次世代半導体を用いた高出力化が進んでいる。
- また、衛星ベースにおいて、固定光学センサー搭載による衛星自体の小型化や移動物体を高速かつ高感度で撮像するセンサー技術の採用例がある。

| # | 実施主体/プログラム名 | センサ場所 | 監視仕組 | 対象軌道 | 検出精度 | 観測頻度 | 資金 | 体制 | キー技術 |
|-----|---|--------------------------------|------------------|-------------|---------------------|-------------|----------------------------------|--|---|
| 1 | DoD/Space Surveillance Network (一部センサを例示) | | | | | | | | |
| 1-1 | Ground-Based Electro-Optical Deep Space System (GEODSS) (1980年代初頭～) | 地上 /3サイト | 光学 | GEO | 口径1m | 4,600観測/8時間 | \$119M (既存センサー更新及び新規センサー設置に係る契約) | 米国のSDA体制構築に向け、L3 Harrisにてシステム更新・拡張を請負 | |
| 1-2 | Space Surveillance Telescope (2020年 初期運用～) | 地上 | 光学 | GEO | 口径3.6m | 不詳 | \$150M (プログラム予算) | オーストラリアのSDA能力開発。SSNセンサーの南半球配置によるカバレッジ改善 | ● CCDを用いた検出感度向上及びモーター制御技術向上による高速・機敏な観測の実現。 |
| 1-3 | Space fence (2020年 初期運用～) | 地上 /2サイト ※2サイト目は将来計画 | フェーズドアレイレーダーSバンド | LEO/MEO/GEO | 10cm程度 | 常時稼働 | 1サイト\$1.5B程度 (Lockheed Martin請負) | レーダーサイトが1つのみでは、LEOの物体を継続的に検出、追跡し、認識を維持する能力はない | ● 伝導率や放熱性に優れた次世代半導体をレーダーアレイに採用。レーダー走査に必要な高出力、高周波、低運用コストに寄与。 |
| 1-4 | Space Based Space Surveillance (SBSS) (2012年 初期運用～) | 衛星(LEO) | 光学 | GEO | 口径30cm | 常時稼働 | \$823M (プログラム予算) | 衛星開発：Ball Aerospace, Boeing 光学系：Northrop Grummanが担当 | ● 機械的ジンバルを用いることでターゲットに向けたカメラ移動が可能 |
| 1-5 | Geosynchronous Space Situational Awareness Program (GSSAP) (2014年～) | 衛星(GEO) | 光学 | GEO | 不詳 | 不詳 | \$700M (プログラム予算) | 衛星開発：Northrop Grummanが担当 | ● RPOにより、対象物体に近接した状態で監視可能 |
| 1-6 | ORS-5 (2018年初期運用～) | 衛星(LEO) | 光学 | GEO | 不詳(GEO内物体の画像取得実績あり) | 常時稼働 | \$87.5M (衛星、地上システム、打上) | MIT LLにより開発 | ● 機械的なジンバルを用いず、固定光学システムを利用。低コスト・迅速性を重視。 ● 移動物体を高速・高感度で撮像する技術を採用。 |
| 2 | DoD/Situational Awareness Camera Hosted Instrument (SACHI) (準天頂衛星搭載予定) | 衛星(QZO) | 光学 | GEO | 不詳 | 不詳 | 不詳 | 日米協力の下、準天頂衛星に搭載。 MIT LLにより開発 | ● ORS-5をベースに、取得画像のエッジ処理能力向上やセンシング視野拡大等を図っている。 |

デブリ監視及び回避技術に係る動向調査状況 – デブリ監視 –

23-003-T-014

米国では、商用SSA事業者によるサービス提供が加速している。特にLeoLabsは、LEOに特化したレーダーを用いた2cm級のデブリ検出や複数サイトのレーダネットワークを構築することでグローバルなカバレッジを実現している。また、Kratosは昼夜・天候条件に依存しないRFセンサーを導入する動きもある。

| # | 実施主体/プログラム名 | センサ場所 | 監視仕組 | 対象軌道 | 検出精度 | 観測頻度 | 資金 | 体制 | キー技術 |
|---|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------|-------------------------|--|--|---|
| 3 | NASA Orbital Debris Program Office | | | | | | | | |
| | HUSIR | 地上 | レーダー Xバンド、Wバンド | LEO | 5mm~ 2cm | 常時稼働と推測 (データ提供に制限あり) | NASAはHUSIRとMHAXで年間1,000時間のデータを取得 | NASA及びDoDがデータ利用 | Xバンド画像とWバンド画像を同時に生成。対象物体のサイズ、形状、向き、動きに関するデータを提供 |
| | HAX (HUSIRと隣接設置) | 地上 | レーダー Kuバンド | LEO | 2~10cm | 常時稼働と推測 (データ提供に制限あり) | 同上 | 同上 | NA |
| | Goldstone Radars | 地上 | レーダー | LEO | 3~5mm | 常時稼働と推測 (データ提供に制限あり) | NASAは年間12時間のデータを取得 | NA | NA |
| 4 | LeoLabs | 地上 /6サイト・10センサー | フェーズドアレイレーダー Sバンド、UHF | LEO | 2~10cm | 常時稼働 | 衛星1機あたり、\$2,500/月で追跡・監視サービスを利用可能 | データ取得、分析、提供に至る一連の垂直統合サービスを衛星運用事業者へ提供する | <ul style="list-style-type: none"> LEOに特化したレーダーを用いて、民間企業で唯一の2cm級のデブリ検出が可能。 複数サイトのレーダネットワークを構築することでグローバルなカバレッジを確保。 |
| 5 | Kratos Defense & Security Solutions | 地上 /20サイト以上・140以上センサー | 受動的RFセンシング L、S、C、X、Kuバンド | O/HEO/MEO/LEO | NA | 常時稼働 | NA | NA | <ul style="list-style-type: none"> RFは、昼夜・天候に関わらずデータ取得が可能。軌道上で密集した状態で物体追跡が可能。 |
| 6 | ExoAnalytic Solutions | 地上/30サイト・300以上センサー | 光学 | GEO/HEO/MEO/LEO | 10cm | 99%の稼働率 | 追跡・監視サービス利用料\$90,000~\$1,360,000/月(光学センサーの利用数で価格が変動) | 最大の光学センサーネットワーク | <ul style="list-style-type: none"> 各センサーの運用は自動化され、薄暗い物体検出機能を有する。 |
| 7 | Numerica (Slingshot Aerospace) | 地上/20サイト以上 | 光学 | GEO | NA | 常時稼働 | NA | Slingshotと提携 | <ul style="list-style-type: none"> 昼間衛星追跡技術 |

デブリ監視及び回避技術に係る動向調査状況 – デブリ監視 –

23-003-T-014

- 欧州は、EUにおいてSSA体制（軍用センサー中心）を構築している中で、商用センサー調達を検討中。
- ESAでは、地上ベースのレーザーを構築し、今後レーザーの高出力化や自律制御を実施していく見込み。

| # | 実施主体/プログラム名 | センサ場所 | 監視仕組 | 対象軌道 | 検出精度 | 観測頻度 | 資金 | 体制 | キー技術 |
|----|--|----------|------------------|---------------------|--|------|--|---------------------------------|--|
| 8 | EU Space Surveillance and Tracking Service (一部センサを例示) | 地上 | 光学、レーダー、 レーザー | LEO/MEO/ HEO/GEO | NA | NA | EUSSTの予算不足に対して、民間と防衛の相乗効果を活用。(EUのSSA活動とGOVSATCOMの連携) | 商用センサー調達を検討中。欧州の自主性強化を推進中。 | NA |
| | GRAVES (仏) | 地上/2サイト | レーダー | LEO | 10cm | 常時稼働 | NA | NA | NA |
| | TIRA (独) | 地上 | レーダー L、Kuバンド | LEO/GEO (推定) | 2cm, 1,000km | 常時稼働 | NA | NA | 高精度の軌道パラメータを提供する狭帯域追跡レーダー（Lバンド）と高解像度イメージングを行う広帯域画像レーダー（Kuバンド）で構成 |
| 9 | ESA | | | | | | | | |
| | Izaña-1 laser ranging station (伊) | 地上 | 測距レーザー | LEO | 80cm (口径) 1064nm (波長) 夜間レンジ (目標) : • 10cm, 600km • 50cm, 1,400km • 大型物体, 最大3,000km 昼間レンジ (目標) : • 50cm, 最大1,000km | NA | NA | NA | ESAは、新たな地上ベースのレーザーを構築。今後、レーザーの高出力化や自律制御によるデブリ監視、デブリ回避の実現が期待される。 |
| 10 | CNES/宇宙監視用データカタログ (ArianeGroup, Eutelsat, Magellium) | 地上 衛星 | 地上：光学 衛星：光学 | LEO/MEO/ GEO | • 地上：ArianeGroupの既存センサー（世界15サイト）を活用 • 衛星：光学センサーを搭載した衛星開発 | NA | フランス政府予算（フランス2030投資計画の枠組み） | プログラムを通じて、SSAセンサー開発、サービス実証を実施する | 地上・衛星センサーを用いて収集されるデータ量を増やし、CNESのSSA活動を補完・強化 |

デブリ監視及び回避技術に係る動向調査状況 – デブリ監視 –

23-003-T-014

- 中国は、APSCOが支援する**中国主導の地上ベースの国際的な光学SSA体制構築を推進中。**
- ロシアは、**天文台や研究所等と国際的に連携したSSA体制を構築。**
- 日本では、**米国SSNと連携しつつ、地上センサーを運用中。将来的には、衛星・地上ベースのSDA体制を構築する見込み。**

| # | 実施主体/プログラム名 | センサ場所 | 監視仕組 | 対象軌道 | 検出精度 | 観測頻度 | 資金 | 体制 | キー技術 |
|----|--|----------------------------------|----------------------|-----------------|---|-----------------------|----------------|---|------|
| 11 | 中国 | 地上レーダー（少なくとも5基）、地上光学（7サイト） | レーダー 光学 | LEO/MEO/ GEO | NA | NA | NA | 中国のSSAレーダーの一部は、ミサイル警告機能も果たす。 | NA |
| 12 | Asia-Pacific ground-base Optical Satellite Observation System <small>（加盟国：バングラデシュ・中国・イラン・モルゴル・パキスタン・ペルー・タイ・トルコ）</small> | 地上 | 光学 | LEO/MEO/ GEO | <ul style="list-style-type: none"> 10cm, 1,000km 20cm, 2,000km これまでに206個の物体が追跡され、宇宙物体カタログに記録 | NA | NA | アジア太平洋宇宙協力機構が支援する中国主導の国際的な地上ベースの光学SSA体制構築を推進。 | NA |
| 13 | ロシア/Russian Space Surveillance System | 地上レーダー（14サイト）、地上光学（2サイト/10基） | レーダー、 光学 | LEO/MEO/ GEO | <ul style="list-style-type: none"> レーダー：8,000km 光学：2,000~40,000km | NA | NA | ロシアのSSAレーダーは、ミサイル警告機能も果たす。 | NA |
| 14 | RSA（ロシア） /International Scientific Optical Network （2008年～） | 地上18サイト/10センサー（中核的なサイト・センサーのみ記載） | 光学 （口径20~40cmが中心） | GEO中心 | 年間200万回の観測を収集し、HEOまたはGEO軌道にある6,000以上の宇宙物体のカタログを保持 | NA | NA | 各国の天文台や研究所等（チェコ、中国、アメリカ、欧州他）と国際的に連携したSSA体制を構築 | NA |
| 15 | JAXA | | | | | | | | |
| | 上齋原 スペースガードセンター | 地上 | フェーズドア レイレーダー | LEO | 直径10cm級（約650km） 同時観測物体数：最大30 | 観測データ数：10,000 パス/日 | | 防衛省やJAXA等が一体となったSSA運用体制構築に向けた取り組みが進んでいる。 | NA |
| | 美星スペースガードセンター | 地上 | 光学 | GEO | 口径1m、口径50cm | | 同上 | 同上 | NA |
| 16 | 防衛省 | | | | | | | | |
| | SDA衛星 | 衛星 | 光学 | GEO（推定） | NA | NA | 595億円/令和5年度予算 | SDA衛星の製造と更なる複数機運用について検討中 | NA |
| | SSAレーザー測距装置 | 地上 | レーザー | LEO | NA | NA | 189億円/令和4年度予算案 | 特定物体を高精度で測距するために利用 | NA |
| | Deep Space (DS)レー ダー | 地上 | レーダー Xバンド | GEO | NA | NA | NA | NA | NA |

デブリ監視及び回避技術に係る動向調査状況 – デブリ監視 –

23-003-T-014

- 衛星ベースのSSAサービス提供（光学、LIDAR、受動的デブリ検知等）を目指すベンチャー企業が出始めている。

| # | 実施主体/プログラム名 | センサ場所 | 監視仕組 | 対象軌道 | 検出精度 | 観測頻度 | 資金 | 体制 | キー技術 |
|----|----------------------|--------------------|---------|-------------------------|---|------|---------------------------|---|--|
| 17 | D-Orbit (伊) | 衛星 (一部実証) | 光学 | NA | NA | NA | NA | D-Orbitの軌道遷移サービス衛星 (ISON) にSSAセンサーを搭載 | IONに搭載されているスタートラッカーをSSTデータの収集に再利用する |
| 18 | HEO Robotics (濠) | 衛星 (打上開始) | 光学 | 主にLEO | NA | NA | NA | アクセルスペースの衛星搭載センサーとの連携及びDroid-1 (Turion) に搭載されたホスト型ペイロードとして専用カメラを打上げ | 軌道上でデータ取得を行うため、「既存衛星の搭載カメラ」と「専用カメラ」の2通りのアプローチを取っている。衛星側のダウンタイムを有効活用することで、画像取得を実施している。 |
| 19 | Dignatara (印) | 衛星 (打上予定) | LIDAR | LEO (将来的にMEOやGEOも想定) | 1cm級 (今後3年で少なくとも40機をLEOに配備予定) | NA | 監視衛星開発に\$10M調達 | 政府機関やコンステレーション事業者と協力。 | LIDARセンサーを使用することで、太陽光や日食の段階でも正確に物体を追跡できる。 |
| 20 | Vyoma (独) | 衛星 (打上予定) 地上 | 光学 | LEO | 1cm級の検出を目標 (パイロットでは、30cm程度) | NA | 監視衛星開発に€8.5M調達 | 衛星ベースのセンサーは、地上センサーを補完する想定 | 衛星上の光学センサーとMLを活用した自動化システムを組合せた軌道上決定や衝突回避サービス提供 |
| 21 | NorthStar (加) | 衛星 (打上予定) | 光学 | LEO/MEO/GEO/HEO | LEO:5cm, MEO:10cm, GEO:40cm, HEO:10~40cm | 常時監視 | 資金調達総額は\$100M近く | NOAA/TraCSSを通じた事業機会創出や衛星運用事業者とのパートナーシップを通じた商用SSAサービス提供 | 投資初期段階からTelespazioといった企業がコンステレーションのリスク軽減等を支援していた。 |
| 22 | ODIN SPACE (英) | 衛星 (一部実証) | デブリ衝撃検知 | LEO/GEO | 数百のセンサーによる0.1mm~1cmの微小デブリ検出 | NA | NA | D-Orbitの6U衛星を用いたセンサー実証に成功 | 微小デブリがセンサーの基板に穴を開ける際に発生する振動から、当該デブリのサイズ、速度、軌道を記録・分析 |
| 23 | SCOUT Space (米) | 衛星 (打上予定) | 光学 | LEO | センサー実証では物体から2kmの位置から受動的に検出及び識別を実施 | NA | \$5.5M調達し 自社製品開発・生産を加速 | NA | <ul style="list-style-type: none"> センサーデータの統合、AI/MLに基づく物体認識の自律化、閉ループ光学ナビゲーション コスト効率の高い推進システム活用 |
| 24 | スターシグナル・ソリューションズ (日) | 衛星 (予定未定) | 光学 | 不詳 | NA | NA | NA | 今後、実際の宇宙ベースの観測データを用いて手法を検証する予定 (詳細不詳) | スタートラッカーと既存CDMを組み合わせた、従来よりも高精度なCDM生成高精度化したSSAデータセットを用いて、デブリ衝突評価と衝突回避運用に関するソリューション提供を想定 |

出所 – デブリ監視 – (1/2)

23-003-T-014

| # | 出所 |
|---|--|
| 1 | <ol style="list-style-type: none"> 1. GAO, DOD Should Evaluate How It Can Use Commercial (GAO-23-10556) 2. USAF, Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance 3. Space News, L3Harris gets \$119 million Space Force contract for deep-space telescopes 4. Miter.org, GEODSS: PAST AND FUTURE IMPROVEMENTS 5. USSF, USSF announces initial operational capability and operational acceptance of Space Fence 6. USSF, Swinging for the Space Fence 7. Lockheed Martin, https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/space-fence.html 8. Secure World Foundation, The Importance of Space Situational Awareness 9. Breaking Defense, Near-Term Funds For Second Space Fence Radar Uncertain 10. USAF, Space surveillance satellite flies past 4th anniversary 11. Gunter's Space Page, SBSS 1 12. USSF, Space Based Space Surveillance 13. USSF, Geosynchronous Space Situational Awareness Program 14. MIT, ORS-5 SensorSat 15. 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, ORS-5 System Acquisition Successes and Regrets 16. Gunter's Space Page, ORS 5 (SensorSat) 17. eoPortal, ORS-5 (Operationally Responsive Space-5) 18. MIT, Monitoring activity in the geosynchronous belt 19. USSF, ORS-5 satellite prepped for launch 20. 2022 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Space and Ground-Based SDA Sensor Performance Comparisons |
| 2 | <ol style="list-style-type: none"> 1. NASA OIG, NASA's Efforts to Mitigate the Risks Posed by Orbital (IG-21-011) 2. MIT, Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar |
| 3 | <ol style="list-style-type: none"> 1. LeoLabs, Radars 2. Via satellite, OneWeb Signs on as Customer for LeoLabs Collision Avoidance Service 3. 2021 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, A Worldwide Network of Radars for Space Domain Awareness in Low Earth Orbit 4. LeoLabs, LeoLabs Tracking and Monitoring |
| 4 | <ol style="list-style-type: none"> 1. Kratos, Space Domain Awareness 2. Kratos, Advanced SDA Services 3. Kratos, Tracking & Maneuver 4. Kratos, Space Situational Awareness Whitepaper |
| 5 | <ol style="list-style-type: none"> 1. CONFERS, ExoAnalytic Solutions 2. ExoAnalytics, Space Domain Awareness 3. ExoAnalytics, Commercial price list |
| 6 | <ol style="list-style-type: none"> 1. Numerica, SDA |

出所 – デブリ監視 – (2/2)

23-003-T-014

| # | 出所 |
|----|--|
| 7 | 1. Space News, Europe seeks greater autonomy in space traffic management 2. Federation Of American Scientist, A GRAVES Sourcebook 3. Secure World Foundation, GLOBAL SPACE SITUATIONAL AWARENESS SENSORS |
| 8 | 1. EAS, New laser station |
| 9 | 1. APOSOS, Asia-Pacific ground-base Optical Satellite |
| 10 | – |
| 11 | 1. UNOOSA, International cooperation in field of observations of the near-Earth objects within ISON project |
| 12 | 1. Global Security.org, Russian Space Surveillance System (RSSS) 2. Secure World Fundation, Space Situational Awareness |
| 13 | 1. D-Orbit, 2021 - Reusing existing space infrastructure to identify and monitor resident space objects |
| 14 | 1. Space News, Getting SSA off the ground |
| 15 | 1. Space News, Getting SSA off the ground |
| 16 | 1. JAXA, 宇宙状況把握 2. JAXA, SSAシステム 3. JAXA, JAXAの最近の取組みについて 4. 防衛省, 防衛省の宇宙分野における取組 |
| 17 | 1. 防衛省, 防衛省の宇宙分野における取組 |

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）

2.2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）

2.2.3 デブリ監視及び回避技術の事例調査

2.2.4 強み・弱み分析

2.2.5 戦略・研究開発計画

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

デブリ監視及び回避技術の調査分析 – デブリ回避 –

23-003-T-014

米国では、様々なセンサーデータをクラウド上で統合し、回避技術の精度向上を進めている。また、商用SSA事業者は、衛星運用者の回避判断に関わる意思決定を支援する回避システムを構築（運用者へ推奨アクション提供することで回避判断に係る時間削減や不要な回避操作を最小化する等）。ESAでは官民連携の下で、米国と同様な意思決定支援技術の研究開発を進めており、将来的には更なる自動化に向けた衝突回避技術に関する研究開発に向けたロードマップを策定。

| | 体制 | キー技術 | 資金源 | 特徴 |
|-----|---|---|---|---|
| 米国 | <ul style="list-style-type: none"> DoD/CSPOCによってデータ統合、解析、提供されるデータは、情報量が多いため衛星運用者のノイズとなっている側面もある。また、DoD/CSPOCは、回避に関するユーザー側の推奨アクションは提供していない。 NOAAは、STMデータ共有の取り組みをサポートするためのクラウドシステムを構築中。衛星情報等を含むデータベースへのアクセス、タイムリーな衝突回避スクリーニング、衝突確率計算等を実施する。 | <ul style="list-style-type: none"> NOAAの想定しているシステムでは、様々なデータソース（DoD、民間、学術等）をクラウド上で融合し、データ管理を自動化することで、軌道予測を改善し、潜在的な衝突を特定し、リスクを軽減に資する視覚化情報や推奨アクションを提供する LeoLabsのサービスは、自社のレーダーネットワークを活用し、アラートやレポート等をリアルタイムでユーザへ提供することで、衛星事業者の意思決定を支援する。 ExoAnalyticは、デブリ衝突等に関するアラート及びレポートが自動生成され、プロセスで発生する可能性のある人為的エラーを最小化する。 Slingshotは、デブリ接近情報等について、ユーザにとって無関係なデータノイズの低減やマヌーバの決定段階をガイドすることで、衛星運用者等の時間削減や意思決定を後押しする。 | <ul style="list-style-type: none"> CSPOCによる運用事業者へのデータ提供は無料で実施されている。 商用SSA事業者による回避サービスは、主にLEOコンステレーション事業者が利用 | <ul style="list-style-type: none"> レガシーシステムからクラウド化への移行、様々なセンサーデータの統合、回避技術の精度向上が挙げられる。 商用SSA事業者は、衛星運用者の意思決定を支援する回避システム構築を推進している。 |
| 欧州 | <ul style="list-style-type: none"> EUSSTの枠組みにて回避システムを構築している。 ESAでは官民連携でデブリ回避システムを自動化するためロードマップを設け、研究開発を進めている。 | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙空間での衝突のリスクを自動的に評価することで、意思決定プロセスを改善し、危険にさらされている衛星へのコマンド送信を支援する等の衝突回避システムの開発を検討中。 | <ul style="list-style-type: none"> ESAは、自動衝突回避技術の開発に向けてAstroscale（GMV、Oneweb）と契約（€800K）。 | <ul style="list-style-type: none"> ESAでは官民連携でデブリ回避システムを自動化するためロードマップを設け、研究開発を進めている。 |
| 中国 | <ul style="list-style-type: none"> APOSOSにて将来の衝突回避に関する早期警報サービス基盤確立に関する計画を有している。 | （現行の捕捉物体数は200程度であり米欧と比べ、衝突回避に関するアラート精度は劣ると推定される） | APSCOによる支援 | <ul style="list-style-type: none"> 回避サービスの計画はあるものの、詳細不詳 |
| ロシア | <ul style="list-style-type: none"> ISONにおいて衝突回避評価解析のサポートを目標としているものの詳細不詳。 ROSCOSMOS主体の回避サービスを提供。 | 不詳 | 不詳 | <ul style="list-style-type: none"> ROSCOSMOS主体の回避サービスを提供。 |
| 日本 | <ul style="list-style-type: none"> 米国から提供された情報や国内観測データ等を基に、JAXAにて回避解析を実施する。 | <ul style="list-style-type: none"> 今まで蓄積してきた衝突回避に係る判断プロセス JAXA衛星の場合は、JAXAにて回避マヌーバを実施する。富士通SSAシステムあり | <ul style="list-style-type: none"> 政府予算にて対応 | <ul style="list-style-type: none"> 米国提供情報と国内観測データに基づき、JAXAによる回避解析・回避対応の実施。 |

デブリ監視及び回避技術の調査分析 – デブリ回避 –

23-003-T-014

- 従来米国では、宇宙軍によるSSAデータ解析が実施され、接近情報等が関係者・国へ共有される。
- また、NOAAはSTMデータ共有のためのクラウド環境構築を進め、DoD SSNで取得したデータ含め、様々なデータソースをクラウド上で統合及びデータ管理を自動化し、潜在的な衝突の特定等に役立てる。

| # | 実施主体/プログラム名 | 回避システム | システムの課題/改善取組 | 資金 | 体制 | キー技術 | |
|---|-------------|--|---|---|--------------------|--|---|
| 1 | DoD | 18th Space Defense Squadron, CSpOC (Combined Space Operations Center) (★) [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] | <ul style="list-style-type: none"> SSNの各センサーが取得したデータは、CSpOCによってデータ統合、解析等が実施され、衛星運用者・関係国へデータ配布 (Space-Track.orgを通じてTLE、近接解析情報が提供) される。 Space-Trackを通じて提供するデータは、ユーザー側へ推奨アクションを提供するものではない。 | <ul style="list-style-type: none"> 現行システム下では、手動的作業が一部存在。(手動作業でデブリのカタログ化を実施している) | NA | NA | <ul style="list-style-type: none"> ユーザーは、APIクエリを構築して履歴から特定のデータを取得し、新しいデータの取得を自動化する。 |
| | | ※回避システムではないものの、参考記載 AFRL, Space System Command/ Unified Data Library (UDL) (★) [1] [8] [9] | <ul style="list-style-type: none"> SSAデータに係るクラウドベースのデータリポジトリを構築中。 UDLは、SSNセンサーの取得データを自動的に保存可能。 UDLの利用にはUDLアカウントが必要 | <ul style="list-style-type: none"> UDLを通じて商用SSAデータを自動的統合できない。 UDLは、DoDユーザーのSSAニーズを全て満たしていないとの情報がある。宇宙軍は、ポータブルであらゆる運用環境で利用できる戦術的なUDL機能を検討している。 | UDLの契約総額は、\$280M以上 | NA | NA |
| 2 | DoC | NOAA/ Traffic Coordination System for Space (TraCSS)*1 (★) [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] | <ul style="list-style-type: none"> NOAAによるSTMデータ共有の取り組みをサポートするためのクラウドシステム (TraCSS) の構築。 衛星情報等を含むデータベースへのアクセス、タイムリーな衝突回避スクリーニング、衝突確率計算等が求められている。 | <ul style="list-style-type: none"> データ管理を自動化し、SSA能力開発を進め、米国宇宙産業の運用リスクを低減を図る。 | NA | TraCSSのプロトタイプは、MIT LL、MITRE、Aerospace Corp.等の支援を受けて、NOAAが開発。 | <ul style="list-style-type: none"> 様々なデータソース (DoD、民間、学術等) を融合することで、軌道予測を改善し、潜在的な衝突を特定し、リスクを軽減に資する視覚化情報や推奨アクションを提供する。 |

※1 : 以前は、Open Architecture Data Repositoryと呼ばれていた

出所)

- 18th Space Defense Squadron, [Fact Sheet](#)
- Space News, [Space Force wants \\$56M to 'enhance' its Unified Data Library](#)

- USSF, [SSC Unified Data Library and Space Fence establish Direct Sensor Connection](#)

デブリ監視及び回避技術の調査分析 – デブリ回避 –

23-003-T-014

米国の商用SSA事業者は、各センサーデータをクラウド環境上でプラットフォームとして構築した上で蓄積し、APIを介して衛星運用者のアクセス性を高め、衛星運用者にとってのユーザビリティを向上させている。

| # | 実施主体/プログラム名 | 回避システム | システムの課題/改善取組 | 資金 | 体制 | キー技術 |
|---|-----------------------|---|--|----|---|---|
| 3 | LeoLabs | <ul style="list-style-type: none"> 衛星所有者や運用者向けにカスタマイズされた衝突回避サービス (LeoSafe) を提供。 LeoSafeは、自社のレーダーネットワークを活用し、アラートやレポート等をリアルタイムでユーザへ提供することで、衛星事業者の意思決定を支援する。 センサーのデータは、自社レーダーの他、DoD SSNセンサーデータも取り込んでいる。 | NA | NA | LeoLabs は LEOで運用されているすべての衛星の約60%をサポート。米政府、SpaceX、Planet、Oneweb等が顧客となっている。 | <ul style="list-style-type: none"> 自社のセンサーとSSNセンサーデータを組合せて精度を高めている。 センサーの取得データは、センサネットワーク側でエッジ処理を行った上で、クラウドに乗せることで、取得データを自社プラットフォームで利用可能とする時間を短縮。 検出エンジンは、アルゴリズムを使用して、重要なイベントに対してカスタマイズ可能なアラートと通知を提供する。 データアクセスは、Web ベースのGUIと、地上システムの統合と自動化のために RESTful APIを利用している。 |
| 4 | ExoAnalytic Solutions | <ul style="list-style-type: none"> デブリ衝突等に関するアラート及びレポートが自動生成され、プロセスで発生する可能性のある人為的エラーを最小化する。 | NA | NA | NA | <ul style="list-style-type: none"> 約15,000個のオブジェクトに対する約2,000個の観測を、15分ごとに約10個のアラートに自動的に処理する。 |
| 5 | Slingshot Aerospace | <ul style="list-style-type: none"> 宇宙向けの衝突回避コラボレーション及び通信プラットフォームに係るサービス提供 (Slingshot Beacon) を開始。 デブリ接近情報等について、ユーザにとって無関係なデータノイズの低減やマヌーバの決定段階をガイドすることで、衛星運用者等の時間削減や意思決定を後押しする。 | CSpOCから提供されるデータは膨大であり、衛星運用者にとってノイズとなっている。ユーザーの判断支援に資するサービスを提供する。 | NA | Slingshot Beaconのパイロットプログラムに参加しているLEO上の衛星の53%を占める。 | <ul style="list-style-type: none"> シームレスなチャットとファイル共有機能を有しており、関係者間で同じデータに基づいた連携が可能。 |

デブリ監視及び回避技術の調査分析 – デブリ回避 –

23-003-T-014

- 欧州では、EUSSTの枠組みで、デブリ回避に係るデータ解析・配布が実施されている。
- ESAでは、衝突のリスクを自動的に評価し、意思決定プロセスを改善するための自動衝突回避技術に関する研究開発を推進中。

| # | 実施主体/プログラム名 | 回避システム | 回避システムの課題/改善取組 | 資金 | 体制 | キー技術 |
|----|---|--|--|----------------------------------|--|--|
| 6 | EU Space Surveillance and Tracking Service | 衝突回避に関する解析情報をユーザに提供している。 | NA | NA | NA | NA |
| 7 | ESA | <ul style="list-style-type: none"> ESAにて自動回避システムに係る研究開発を推進中。 ESAは、自動衝突回避技術の開発に向けてAstroscale (GMV、Oneweb) と契約し、新技術を模索中。 | 増加する衝突リスクへ対応するために、ESAは、Collision Risk Estimation and Automated Mitigation (CREAM)活動を開始した。宇宙空間での衝突のリスクを自動的に評価し、意思決定プロセスを改善する。危険にさらされている衛星へのコマンド送信を支援する等の衝突回避システムの開発を検討している。 | 自動衝突回避技術に係るAstroscale等と契約は€800K。 | GMVは、衝突回避プロセスと情報共有システムでの貢献 OneWeb は、コンステレーションの衝突回避を管理方法等による貢献 | 衝突可能性のある衛星に対するコマンド送信等の地上運用を自動化する技術について研究開発を進めている。 |
| 8 | 中国/Space Debris Monitoring and Application Center | 中国は様々なセンサーからのSSAデータを照合し、中国の衛星運用者に対する接近・衝突情報のアラート提供を政府機関主導で実施 | 国外のSSAセンサーカバレッジを欠いている状況。他方で、2010年以降、中国は軌道上でRPOを実施できる衛星を複数配備しており、他国衛星の特性を把握し、情報を収集する能力の一助となっている可能性がある。 | NA | NA | NA |
| 9 | Asia-Pacific ground-base Optical Satellite Observation System | 接近予測や衝突リスク評価・解析が実施されると想定される。 | (実施状況等について詳細不詳) | NA | NA | NA |
| 10 | ROSCOSMOS/ASPOS OKP | ISONネットワークや他のロシアSSAセンサーからのデータを利用して地球周回軌道上の物体を検出・追跡し、ドッキング、再突入、ミッション後の廃棄をカバーする | 国外のSSAセンサーカバレッジを欠いている状況。既存の地上光学センサーを補完するために、SSA衛星及びホステッドペイロードを開発していく構想がある。 | NA | NA | NA |
| 11 | RSA (ロシア) /ISON | 高軌道衛星コンステレーションの衝突回避評価解析のサポート等を目標。 | (実施状況等について詳細不詳) | NA | NA | NA |
| 12 | JAXA | 国内センサー (光学、レーダー) の観測データ及び米国からデブリ接近情報の提供を受け、接近解析や衝突回避マネージャ等を実施する。 | <ul style="list-style-type: none"> 専門性が要求される回避運用に対して、JAXAではデブリ回避支援ツールを開発の上、衛星事業者へ提供し、衛星事業者の回避策立案・運用効率化に貢献している。 富士通は、JAXA衛星運用者のデブリ回避対応に資するSSA解析システムを構築。観測計画の策定や観測データの処理等を自動化し、解析運用者の運用負荷軽減を図っている。 | 回避ツールは衛星事業者へ無償提供される | NA | 衝突確率と最接近距離を解析した上で、等高線図として視覚的に表示することで、衛星事業者側の回避策の立案を効率化 |

出所 –デブリ回避–

23-003-T-014

| # | 出所 |
|----|---|
| 1 | <ul style="list-style-type: none"> 1. 18th Space Defense Squadron, Fact Sheet 2. 36th Annual Small Satellite Conference, 18 SDS Small Satellite Support 3. 宇宙政策委員会 (宇宙産業・科学技術基盤部会), 宇宙交通管理 (STM) に関する議論の動向 (慶応義塾大学宇宙法研究所) 4. GAO, DOD Should Evaluate How It Can Use Commercial (GAO-23-10556) 5. Space News, Slingshot Aerospace rolls out free space-traffic control service 6. Space News, U.S. Space Command announces improvements in space debris tracking 7. Space-Track.org, SSA Sharing & Orbital Data Requests 8. Space News, Space Force wants \$56M to 'enhance' its Unified Data Library 9. USSF, SSC Unified Data Library and Space Fence establish Direct Sensor Connection |
| 2 | <ul style="list-style-type: none"> 1. Breaking Defense, EXCLUSIVE: Commerce's draft space traffic management service goes beyond DoD's baseline 2. Aerospace Corporation, Paving an Integrated Approach for Space's Traffic Jam Problem 3. SAM.gov, NOAA Open Architecture Data Repository (OADR) Enhanced Safety Service Request for Information (RFI) 4. SAM.gov, NOAA Space Object Commercial Data Request for Information (RFI) 5. NOAA, Media Briefing: Open-Architecture Data Repository (OADR) 6. Via Satellite, Office of Space Commerce Issues 7 Awards for Commercial Space Traffic Coordination Pilot 7. Breaking Defense, NOAA plans 'initial' civil alternate to DoD space tracking system by 2024: senior official |
| 3 | <ul style="list-style-type: none"> 1. LeoLabs, Leosafe 2. LeoLabs, Vertex 3. LeoLabs, Collision Avoidance 4. Viasatellite, OneWeb Signs on as Customer for LeoLabs Collision Avoidance Service |
| 4 | <ul style="list-style-type: none"> 1. 2022 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), ExoALERT: 1 Year of AI-Enabled Space Traffic Management Services at GEO |
| 5 | <ul style="list-style-type: none"> 1. SlingShot Aerospace, Slingshot beacon 2. SlingShot Aerospace, Beacon |
| 6 | <ul style="list-style-type: none"> 1. EUSST, EU Space Surveillance and Tracking |
| 7 | <ul style="list-style-type: none"> 1. ESA, ESA tasks European industry with staving off in-space collisions 2. Astroscale, Astroscale Awarded 800K Euro ESA Contract to Boost Collision Avoidance Maneuver Capability on Congested Orbital Highways |
| 8 | <ul style="list-style-type: none"> 1. APOSOS, Asia-Pacific ground-base Optical Satellite |
| 9 | – |
| 10 | – |
| 11 | – |
| 12 | <ul style="list-style-type: none"> 1. JAXA, スペースデブリに関する最近の状況 |

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）

2.2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）

2.2.3 デブリ監視及び回避技術の事例調査

2.2.4 強み・弱み分析

2.2.5 戦略・研究開発計画

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (DoD①)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- 米国は、地上ベース及び衛星ベースの複数のセンサーから構成される**グローバルな宇宙監視体制を構築**。
- 現在、一部のセンサーにおいて性能向上が図られているところ（詳細次項参照）。

実施主体/
プログラム名

DoD/Space Surveillance Network (米)

- 米国は、**Space Surveillance Network (SSN)** と呼ばれる地上ベースのレーダーや光学望遠鏡、SSA衛星の複数センサーによる**グローバルな宇宙監視体制**を構築。**SSNの運用・制御**は、米宇宙軍 Delta 2の**18th Space Defense Squadron** (18 SDS) が担当。軌道上物体の追跡及び監視、衝突可能性予測、デブリ識別等も実施する。[1]
- **SSNの一部センサーの中で、性能向上 (地上：Space Fence、衛星：ORS-5) を図る動きがある**ため、次項以降において事例を示す。

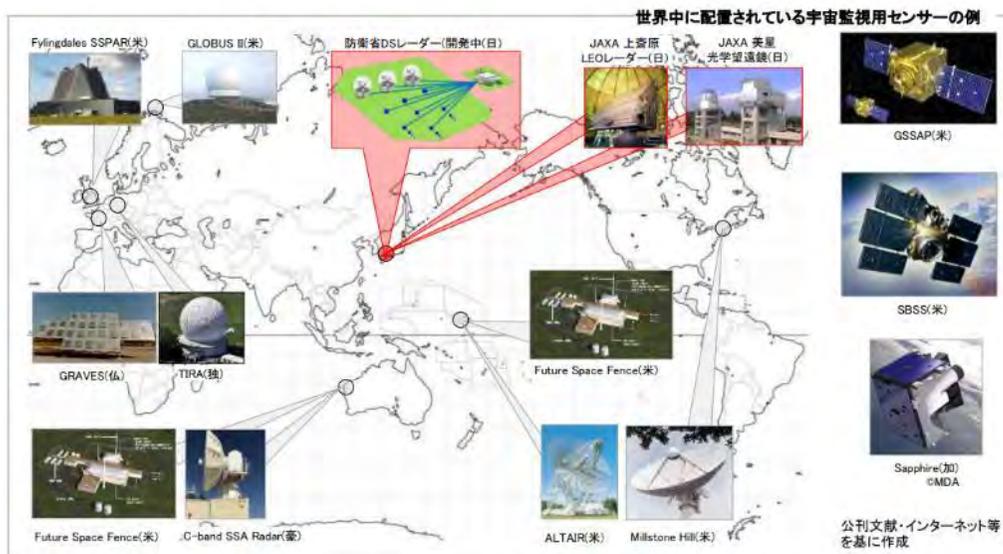


図 SSN (Space Surveillance Network) [2]

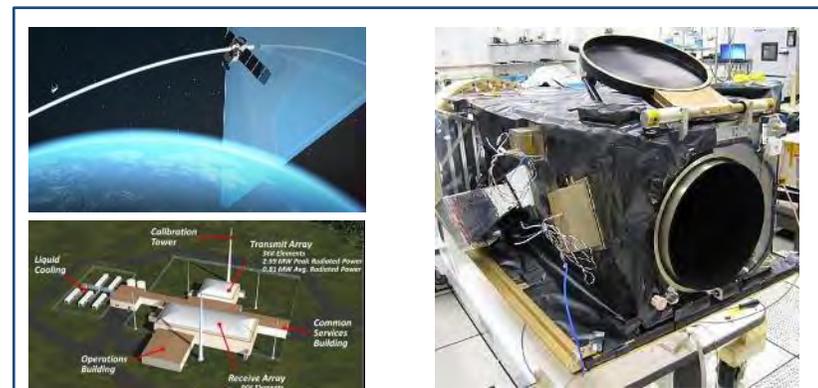


図 地上ベースのセンサー例
Space Fence (レーダー) [3] [4]

図 衛星ベースのセンサー例
ORS-5 (光学) [5]

Space Fence及びORS-5の詳細は次項参照

出所)

1. 18th Space Defense Squadron, [Fact Sheet](#)
2. 内閣府 宇宙安全保障部会, [防衛省のSSAに係る取組について \(資料2 -2/2-\)](#)

3. Lockheed Martin, [Space Fence](#)
4. AMOS, [Space Fence Overview \(Lockheed Martin\)](#)
5. eoPortal, [ORS-5](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (DoD②)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

米国SSNの地上ベースのセンサー追加や通信システムのデータ処理能力向上を通じて、米国の宇宙領域把握 (SDA) 体制構築を進めている。

実施主体/プログラム名 DoD/Space Surveillance Network (米)
Ground-Based Electro-Optical Deep Space System (GEODSS)

- Ground-Based Electro-Optical Deep Space System (GEODSS) は、1980年代初頭以来、SSNの主要なセンサーとしてGEOの物体監視を継続している。グローバルに3サイト展開しており、各サイトは3つの光学望遠鏡 (口径1m) を有する。^[1]
 - 1センサーあたり、4,600観測/8時間を見込んでいる (2003年時点)^[2]
- 米国宇宙軍では、宇宙領域把握 (SDA) 体制構築に向けて、米国SSN (センサー、指揮制御システム含む) の維持や通信システムのアップグレード (データ処理能力向上に取り組んでいる (MOSSAICプログラム※1))。^{[3][4]}
 - 同軍は、MOSSAICプログラムの請負事業者としてL3 Harrisを2020年に選定 (10年間で\$1.2B規模)。
 - 当該契約の一環として、既存のGEODSSセンサーのアップグレードと新しいGEODSSセンサー設置 (スペイン、オーストラリア) するために、\$119Mの資金提供が実施された。設備は2024年6月までに完了する予定。

※1 : The Maintenance Of Space Situational Awareness Integrated Capabilities (MOSSAIC) program



図 GEODSSサイト^[1]



図 GEODSSの光学望遠鏡外観^[5]

出所)

1. USSF, [FACT SHEETS](#)
2. Miter.org, [GEODSS: PAST AND FUTURE IMPROVEMENTS](#)

3. L3 Harris, [L3HARRIS AWARDED](#)
4. Space News, [L3Harris gets \\$119 million](#)
5. dvids, [GEODSS Sizzle Reel](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (DoD③)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

米国とオーストラリアのパートナーシップの下で、新たなSSAセンサーを設置することで、オーストラリアのSDA能力開発を実施しつつ、SSNセンサーを南半球に配置することで、GEO物体に対する光学センサーによるカバレッジを改善する。

実施主体/
プログラム名 DoD/Space Surveillance Network (米)
Space Surveillance Telescope (SST)

- SSTは、2022年に初期運用能力が達成され、**完全な運用能力は2023年後半に達成されると予測**されている^[1]。
 - 口径3.6m、f/1の光学系を備え、12個の電荷結合素子（CCD）センサーを用いることで**検出感度を高め**つつ、光学系の駆動技術（モーター制御技術）を向上させることで、**高速かつ機敏な観測**を実現している。^{[2][5]}
 - SSTは、GEO上の物体を画像化することができ、リアルタイムで画像を受信して処理して、衛星の正確な位置を特定できる。また、データ処理システムは、**毎晩TByteを超えるデータをフィルタリングを可能**とする^[1]。
 - SSTは、2002年から2011年にかけて、MIT リンカーン研究所によって開発。2017年にDARPAによって米国空軍に譲渡後、SSN専用センサーとして運用^[2]。
- 本SSTは、オーストラリア国防総省と米国国防総省のパートナーシップを通じて、ニューメキシコ州からオーストラリアへの望遠鏡の移転された。
 - **オーストラリアのSDA能力開発と、SSNセンサーを南半球に配置することで、GEO物体に対する光学センサーによるカバレッジを改善**する意図がある。^[3]
 - 米国がSSTを所有し、オーストラリアは、SST施設や運用、訓練等に責任を持つ^[3]。SSTプログラム予算は、\$150M（2016年時点）と見られる^[4]。



図 SST外観^{[1][3]}

出所)

1. USSF, [SST achieves initial operational capability](#)
2. MIT, [SST captures its first image](#)

3. USSF, [SST Reaches Operational Acceptance](#)
4. Space News, [DARPA hands over space tracking telescope to the Air Force.](#)
5. DARPA, [SST Australia: Signed, Sealed and Ready for Delivery](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (DoD④)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- **Space Fence (地上ベースのレーダー)** は、SSNセンサーの中で、最も高感度なレーダーとされている。**超小型衛星や小さなデブリ (約10cm程度)**、軌道上で密集した状態での物体検出を可能としている。
- 高感度を実現している背景に、**次世代半導体を活用したレーダー性能向上が挙げられる。**

プログラム名/ 実施主体 DoD/Space Surveillance Network (米)
Space Fence

- Space Fenceは、2020年3月より初期運用が開始された**地上ベースのSバンドフェーズドアレイレーダー**である^[1]。米国SSNのセンサーの一部として、米国宇宙軍の下で運用。
 - 2019年のテスト運用中には、インドのASATによる大量のデブリ追跡・軌道予測を実施することで、レーダーの能力を示している^[1]。
- 地上から一定のエネルギー帯域 (フェンス) を監視方向に常時送信することで、監視領域を通過する物体は自動的に追跡される^[2]。
- **Space Fenceは、SSNセンサーの中で、最も高感度なレーダーとして位置づけられている。**
 - 主に**LEOにおける衛星及びデブリを含む物体 (約10cm)** の検出や追跡、測定を提供する。**軌道上で密集した物体検出**を可能としている。**GEOの物体も検出可能**。^[2]
 - **次世代半導体と呼ばれる窒化ガリウム (GaN)^{*1}** をレーダーの送信側アレイに採用することで、**レーダー走査に必要な高出力、高周波数、低運用コストに寄与している**。^{[2][3]}
- Space Fenceは、2箇所のレーダーサイト (マーシャル諸島、オーストラリア) での運用が想定されるものの、**現在はレーダーサイトが1つのみであるため、LEOの物体を継続的に検出、追跡し、認識を維持する能力はまだ無い**^[5]。
 - 既に運用が開始されているマーシャル諸島のレーダーサイトは、Lockheed Martinにより開発された (契約規模は\$1.5Bと見られる) ^[4]。

※1: 次世代パワー半導体 (SiC (シリコンカーバイド)、GaN (窒化ガリウム)、Ga2O3 (酸化ガリウム) 等) は、電気機器に多く利用されているSi (シリコン) よりも、優れた物理的特性 (高耐圧、高耐熱、小型化等) を有する。^{[6][7]}

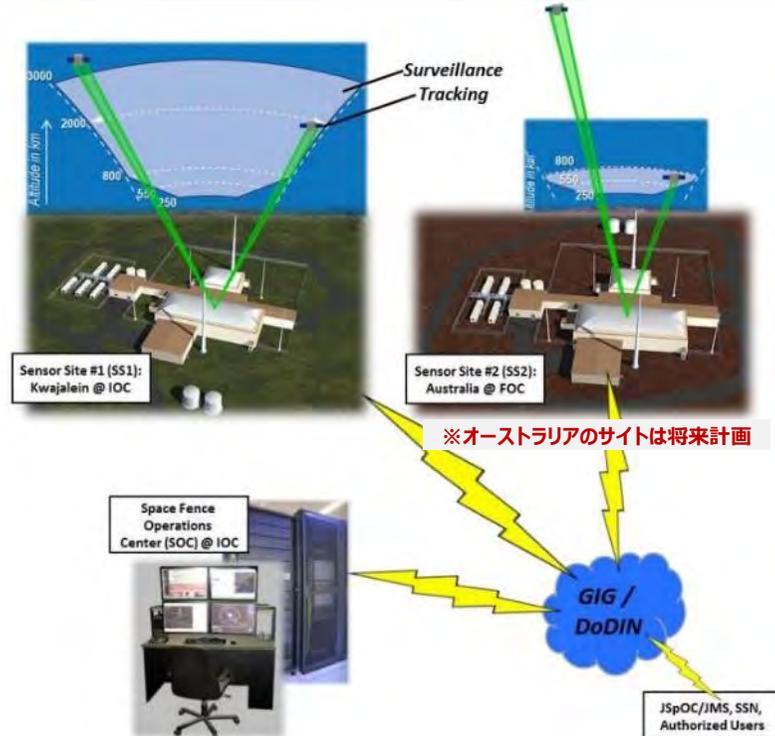


図 Space Fenceのアーキテクチャ (イメージ図) [2]

出所)

1. Lockheed Martin, [Space Fence](#)
2. USSF, [Swinging for the Space Fence](#)

3. AMOS, [Space Fence Overview \(Lockheed Martin\)](#)
4. Breaking Defense, [Near-Term Funds For Second Space Fence Radar Uncertain](#)
5. Space News, [Space Fence surveillance radar site declared operational](#)

6. 経済産業省, 「次世代デジタルインフラの構築」に関する国内外の動向
7. サンケン電気株式会社, [化合物半導体 SiC, GaNとは](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (DoD⑤)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- 衛星ベースのSSNセンサーの一部として、LEOからGEOを常時監視している。
- 機械的ジンバルを用いることでターゲットに向けたカメラ駆動が可能。

実施主体/ DoD/Space Surveillance Network (米)
プログラム名 Space Based Space Surveillance (SBSS)

- Space Based Space Surveillance (SBSS) は、2軸のジンバルの光学望遠鏡 (口径30cm) を搭載した大型SSA衛星であり、GEO内の衛星やその他の物体を監視する。^[1]
 - 衛星開発はBall Aerospace TechnologiesとBoeing、光学系はNorthrop Grummanが担当。プログラム総経費は、\$823Mと見られている。^[2]
- SBSSは、SSNセンサーの一つとしてLEO (SSO) に配備され、GEO内の各物体少なくとも1日に2回撮像できる。全天候・24時間のSSAデータを米国軍へ提供する。宇宙における潜在的な危険を検出・特定・追跡するための軍の活動を支援する。^{[1][2]}



図 Space Based Space Surveillance衛星^[2]



図 Space Based Space Surveillance衛星^[3]

出所)

1. USAF, [Space surveillance satellite flies past 4th anniversary](#)
2. Spaceflight101.com, [SensorSat \(ORS-5\)](#)

3. USSF, [Space Based Space Surveillance](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (DoD⑥)



23-003-T-014

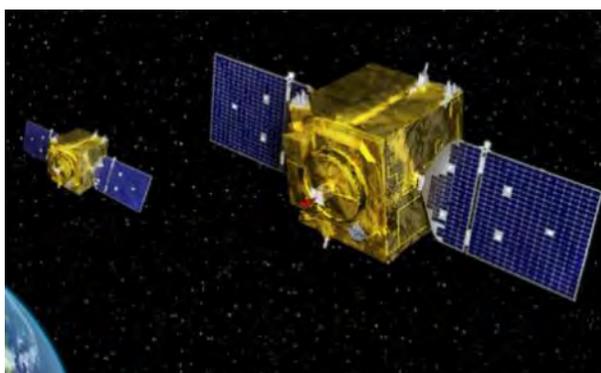
デブリ監視

デブリ回避

GSSAPは衛星ベースのSSNセンサーの一部として、GEO上の物体監視を実施している、2010年代から活発化している中国、ロシア等の衛星への近接運用の監視が主なミッションの一つと考えられている。

実施主体/プログラム名 DoD/Space Surveillance Network (米)
Geosynchronous Space Situational Awareness Program (GSSAP)

- GSSAP※1は、衛星ベースのSSNセンサーの一部として、米国宇宙軍により運用されている。^[1]
- 米国宇宙軍 (当時は米国空軍) の契約下において、Northrop Grumman (旧Orbital ATK) を主契約企業として製造された衛星であり、今までに6機が打上げられた。(2014年 (GSSAP1, 2)、2016年 (GSSAP3, 4)、2022年 (GSSAP5, 6) の2機ずつ打上げ)。^{[2][3]}
- 米国宇宙コマンドの宇宙監視運用をサポートすることが主な役割。宇宙の状況認識データを収集しつつ、軌道上物体の正確な追跡と特性評価を実施。^[3]
 - GSSAP衛星は静止軌道の近くで動作し、ランデブー・近接運用 (RPO※2) を実行する機能を備えている。RPOを通じて、宇宙船は対象物体の近くでオペレーションを行うことが可能となるため、飛行の安全性を維持しながら特性評価を行い、監視を強化することが可能。^[1]
 - GSSAP衛星は、中国・ロシア等の衛星に対し、複数回の近接運用を行ったとされている。^[4]
- 報道情報によると、衛星には電気光学センサーが搭載されており、これを通じてGEO衛星の活動を追跡・監視する。また、GSSAPの1機がGEOより上のドリフト軌道で動作しつつ、もう1機の衛星がGEOより下の軌道で動作していると予想されている^[1]。なお、GSSAPプログラム予算は、約\$700Mと見られている^[5]

GSSAP衛星^[1]

| DATE | SATELLITE APPROACHED | COUNTRY OF OWNERSHIP | APPROACH DISTANCE |
|----------------|-------------------------|----------------------|-------------------|
| Sept. 13, 2016 | TJS-1 | China | 15 km |
| Jul. 13, 2017 | Express AM-8 | Russia | 10 km |
| Sept. 14, 2017 | Luch | Russia | 10 km |
| Sept. 21, 2017 | Paksat 1R | Pakistan | 12 km |
| Sept. 29, 2017 | Nigcomsat 1R | Nigeria | 11 km |
| Oct. 5, 2017 | Blagovest (Cosmos 2520) | Russia | 14 km |
| Nov. 17, 2017 | Raduga-1M 3 | Russia | 12 km |
| May 14, 2018 | Raduga-1M 2 | Russia | 13 km |
| Aug. 23, 2020 | SJ-20/Chinasat 6A | China | 24 km |
| Jan. 2022 | SY-12 01, SY-12 02 | China | 73 km |

GSSAPによる衛星接近事例^[4]

出所)

1. Air Force, [GSSAP eoPortal](#), [GSSAP](#)

3. Gunter's space page, [GSSAP](#)
4. Secure World Foundation, [Counter space capabilities 2023](#)
5. Space News, [Air Force sent GSSAP satellite to check](#).

※1 : Geosynchronous Space Situational Awareness Program
 ※2 : Rendezvous and Proximity Operations

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (DoD⑦)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- ORS-5は既存の大型SSA衛星と比べ、**低コスト・迅速な配備を重視した小型衛星**である。
- 駆動に制約のある固定光学システムを利用しつつも、**センサー技術と最適化された飛行を組み合わせることで、連続的な物体観測を可能**としている。

実施主体/ DoD/Space Surveillance Network (米)
プログラム名 Operational Responsive Space (ORS)-5

- ORS-5衛星は、GEO上での他国衛星やデブリを継続的に監視するために開発されたSSA実証衛星 (LEOに配置)。1つの光学センサーが搭載 (MITリンカーン研究所により開発)。^{[1][2]}

- 光学部は**機械的なジンバルを用いず、小さな開口部を有する固定光学システム**を利用している。ORS-5は、特定の物体を検出ターゲットとしてはいないため、GEO内の衛星に脅威となる新たな物体を発見する可能性がある。^[1]
- **カメラシステムにおけるセンサー技術 (Time Delay Integration技術※1) と最適化された飛行を組み合わせることで、連続的な観測を可能**としている。^[3]

- 本ミッションは、既存のSSA衛星であるSBSS-1 (Space Based Space Surveillance-1) 衛星の後継機に向けた技術的なパスファインダーとして機能。^[3]

- ORS-5は、設計寿命が3年の100kg級衛星であり、既存のSSA衛星 (例 SSBS : 1,000kg級衛星) と比較すると、**低コスト・迅速な配備を重視した衛星**となる。^{[1][4][5]}

- 10年以上のミッション向けに設計された大型衛星よりも、**ORS-5の衛星開発は3年で完了** (大型SSA衛星の開発・運用期間の約1/3)。^[1]

- ORS-5の開発コストは、\$87.5M (衛星\$49M, 地上システム\$11.3M, 打上27.5M)。なお、**SBBSの開発コスト (\$823M) と比べ1/10程度**となる。^{[4][6]}

※1 : Time Delay Integration (TDI) は、移動物体を高速かつ高感度で撮像する技術。具体的には、CCD素子間の電荷転送と物体の移動タイミングを同期させることで、高速・高感度・高解像度読み出しを同時に実現する。^[7]



図 Operational Responsive Space (ORS)-5衛星^[3]



図 ORS-5 実証イメージ^[8]

出所)

1. MIT, [Monitoring activity in the geosynchronous belt](#)
2. Gunter's Space Page, [ORS 5 \(SensorSat\)](#)

3. eoPortal, [ORS-5 \(Operationally Responsive Space-5\)](#)
4. USSF, [ORS-5 satellite prepped for launch](#)
5. USSF, [Space Based Space Surveillance](#)

6. AMOS, [Space and Ground-Based SDA Sensor Performance Comparisons](#)
7. 浜松フォトリクス, [TDI技術](#)
8. Utah State University, [ORS-5 Program Management Review](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (CSpOC)



23-003-T-014

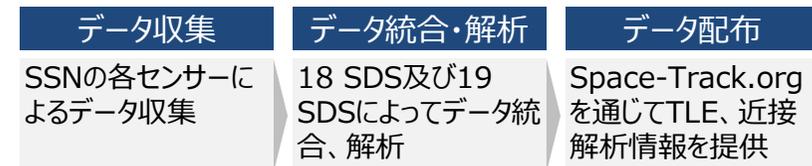
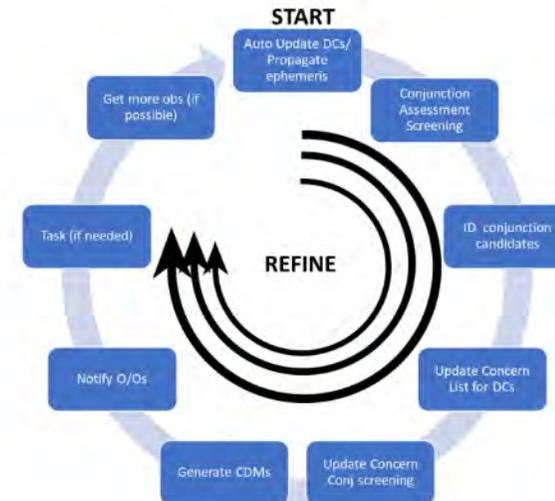
デブリ監視

デブリ回避

- 宇宙軍は衝突回避に係るデブリ近接情報等の情報を関係者に通知している。
- 観測データに反映されていないデブリが急遽発生した際は、手動でのシステム更新が必要な状況にある。

実施主体/プログラム名 Combined Space Operations Center (CSpOC) /18th Space Defense Squadron/19th Space Defense Squadron (米)
衝突回避に関わるサービス

- SSNの各センサーが取得したデータは、Combined Space Operations Center (CSpOC) /18th Space Defense Squadron (18 SDS) によってデータ統合、解析等が実施され、衛星運用者・関係国へデータ配布される。^[1]
【基本サービス】
 - 18 SDSは、軌道上の16,000以上の衛星の位置データを使用して Web サイトを定期的に更新する。公開Webサイトwww.space-track.orgを通じて、TLE、近接解析情報等が登録ユーザー（衛星運用者等）提供される。
 - ユーザーは、カスタマイズされたAPIクエリを構築して特定のデータを取得し、新しいデータの取得を自動化することができる。Space-Trackを通じて提供するデータは、ユーザー側へ推奨アクションを提供するものではない。
- 【衝突回避に関わるサービス】
 - 18 SDSは、特定のニーズを持つ衛星所有者/運用者等に対して、接近通知メール及びデブリ接近情報に関わるデータ (Conjunction Data Message) を提供することで、衛星所有者/運用者の衝突回避の取り組みをサポートする。
 - 19 SDSは、衝突回避評価の実施を任務としている。^[2]
- 現行システムでは、観測データに組み込まれていないデブリが急遽発生した際は、手動でのシステム更新が必要となる。^[3]
 - 例えば、2021年11月のロシアASATによりデブリが発生した際には、宇宙軍職員は、当該デブリをカタログ化するのに3か月の期間を有したとされる。

図 SSAデータの流れ^[1]図 19 SDSで実施されるデブリ接近に係るスクリーニングの流れ^[2]

出所)

1. Space-Track.org, [SSA Sharing & Orbital Data Requests](#)
2. Space-Track.org, [SPACEFLIGHT SAFETY HANDBOOK](#)

3. GAO, [DOD Should Evaluate How It Can Use Commercial \(GAO-23-10556\)](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（日米連携）



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

日米協力の下で、米国は準天頂衛星へGEO監視センサーを搭載する予定。本センサーは、米国が開発した小型SSA衛星の開発技術を活用した上で、取得画像のエッジ処理能力向上やセンシング視野拡大等を図ること、ミッション実行性を高めている。

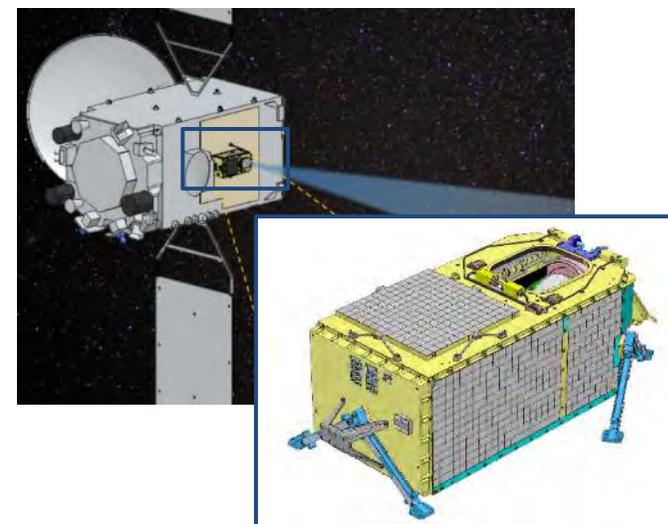
実施主体/
プログラム名

Situational Awareness Camera Hosted Instrument (SĀCHI) (米)

- 日米協力の下で、米国は準天頂衛星（GNSS）に光学センサーを搭載する予定。同センサーは、GEO内の衛星に関する挙動監視が目的であり、観測結果はデータ共有協定を通じて日本でも利用できるようになる。（ペイロード開発は、MITリンカーン研究所が担当）
- 本センサーに係るペイロード（SĀCHI）は、MITリンカーン研究所が開発を担当した小型SSA衛星（ORS-5）（前述）の開発技術を活用した上で、ペイロード側での画像処理能力を高め、GEO上での視野を広くするための2軸スキャンミラーを具備することで、ミッション実行性を高めている。

| | ORS-5（前述） | SĀCHI |
|----------|---|--|
| センサー配置軌道 | LEO (自律的にGEOをスキャンする) | QZO (GNSSの姿勢に依存する) |
| 監視対象軌道 | GEO | GEO |
| 衛星バス機能 | 必要 | 不要（衛星本体が担う） |
| 通信リンク | 7.5Mbit/sec ・ 米宇宙軍専用RF通信リンク ・ 生データを地上局へ送信 | 2.0Mbit/sec ・ 日本のRF通信リンクに依存 ・ 画像処理をペイロード上で実行し、地上局へ送信 |
| センシング技術 | 機械的なジンバルを用いず、小さな開口部を有する固定光学システムを利用。連続的な観測実行 | ORS-5と基本システムは同様であるものの、GEOでの視野を広くするために、2軸スキャンミラーを追加 |

ORS-5とSĀCHIの比較（出所[1]を元にKPMGコンサルティング作成）



SĀCHIの外観^[1]

出所)

1. MIT, Lincoln Laboratory is designing a payload to integrate on Japanese satellites

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (DoC/NOAA)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

NOAAはSTMデータ共有のためのクラウド環境構築を行い、潜在的な衝突の特定等のリスク低減に向けた取り組みを実施中。当該取組の一環として、商用SSAデータの評価を推進している。

実施主体/
プログラム名

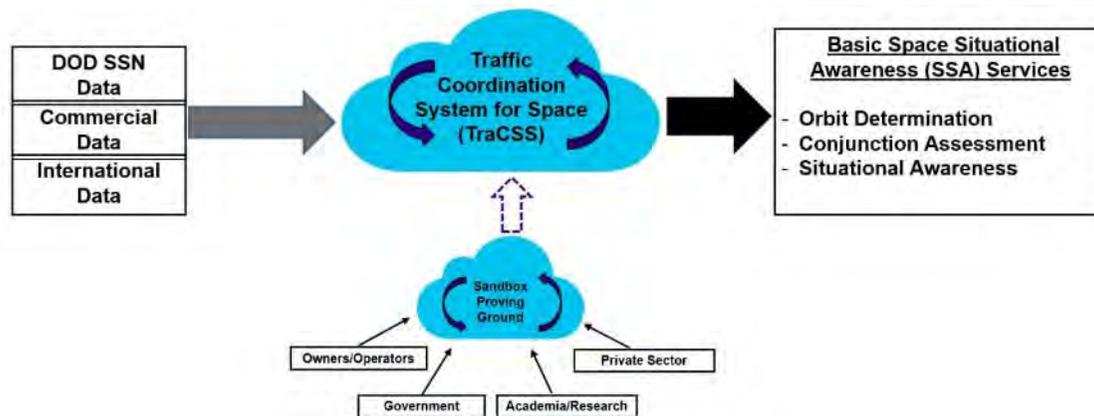
DoC/NOAA (米)
Traffic Coordination System for Space (TraCSS) (旧 Open Architecture Data Repository)

- 宇宙交通管理に関わるSPD-3^[1]に従い、DoC及びNOAAは、SSA及びSTMのデータの共有をサポートするためのクラウドシステム (Traffic Coordination System for Space) の構築^[2]を担うこととなった。
- SSNから取得されたセンサーデータを含め、様々なデータソース (DoD、民間、学術等) をクラウド上でデジタルに統合し、軌道予測の改善及び潜在的な衝突を特定することで、リスクを軽減に資する視覚情報や推奨アクションを提供する^{[2][3]}。
- NOAAは、2024年にTraCSSの初期運用能力に達し、2025年までに完全な運用能力に達することを目標としている^[2]。

【TraCSS開発に関わる民間事業者等の巻き込み】

- NOAAは、MITリンカーン研究所、MITRE、Aerospace Corp.等の支援を受けて、TraCSSのプロトタイプを開発した^[2]。
- また、TraCSSを開発する一環として、NOAAはDoDと連携の上、商用SSAデータ分析に係るパイロットプログラム契約を民間企業7社^{※1}と締結した。^{[4][5]}
 - 本契約は商用SSA能力が安全なミッション保証をどのようにサポートできるかをNOAA Office of Space Commerceが評価する。(MEOとGEOの運用がスコープ)。
 - また、商用データ購入により、衛星追跡、宇宙飛行の安全分析と通知、異常検出と警告を含むリアルタイムの安全機能等をサポートする。

※1 : COMSPOC Corp.、ExoAnalytic Solutions、Kayhan Space、KBR、NorthStar Earth & Space、Slingshot Aerospace、Space Data Association



☒ Traffic Coordination System for Space (TraCSS) のアーキテクチャ^[2]

出所)

1. NOAA, [President Signs Space Traffic Management Policy](#)
2. Aerospace Corporation, [1](#)

3. SAM.gov, [1](#)
4. Via Satellite, [1](#)
5. NOAA (Office of Space Commerce), [1](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (NASA)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- NASAでは、DoD SSNセンサーでは捕捉が難しいサイズ (mm~cm級) のデブリを観測している。
- デュアルバンド (X、W) の周波数帯による物体監視を実施することで対象物体の検出精度を高めている。

実施主体/ NASA Orbital Debris Program Office (ODPO)
プログラム名 Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar (HUSIR)

- NASA Orbital Debris Program Office (ODPO) は、DoD SSNのセンサーで追跡するには小さいサイズの軌道上物体に係る特性評価を実施している。[1]
- Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar (HUSIR) は、約5mm~30cmの範囲のサイズのデブリを統計的にサンプリングしている。(MITリンカーン研究所にて運営) [1][4]
- 同レーダーは、デュアルバンドの周波数帯による物体監視を実施することで対象物体の検出精度を高めている。
 - Xバンド画像とWバンド画像を同時に生成することで、物体のサイズ、形状、向き、動きに関するデータを取得する。また、大きく・複雑な物体に関して、個々のコンポーネントを特徴付け、小さな物体を相互に区別できる。[2]
 - アンテナビーム幅の広いXバンドレーダーで初期捕捉した後、Wバンドレーダーで対象物体を補足する。[3]
 - 以前HUSIRはXバンドレーダーとして活用されていたこと、Wバンドレーダー機能を追加した。デュアルバンドを実現するためには、市販品のアンプでは帯域幅と感度の問題で対応が難しく、カスタマイズされたアンプが開発された。[2]
- なお、HUSIRに隣接するKuバンドレーダー (HAX) を補完的に利用している。[1][3]
 - HAXはHUSIRよりも感度が劣るものの、HUSIRよりも広い視野を有する。
- NASAはHUSIRとHAXで年間1,000時間のデータを取得している。なお、データはNASA及びDoDにて利用されている。[4]
 - HUSIRとHAX以外のレーダーサイト (Goldstone Radars) では、年間12時間のデータを取得なお、Goldstone Radarsは、約3~5mmの範囲のデブリを観測している。[4]



図 HUSIRレーダー[1]

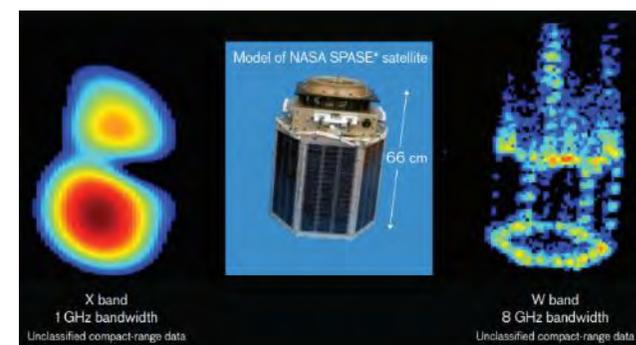


図 Xバンド及びWバンドによる取得画像[1]

出所)

1. NASA, [Radar Measurements](#)2. MIT, [Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar](#)3. MIT, [Development of HUSIR](#)4. NASA OIG, [NASA's Efforts to Mitigate the Risks Posed by Orbital \(IG-21-011\)](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（EU）



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- 欧州では、EUSSTの枠組みで各軌道（LEO、MEO、HEO、GEO）の物体追跡・監視を実施している。
- 最近では、欧州産業の自律性強化のための商用センサー調達を検討や予算不足を背景として民生と安保の相乗効果を期待する動きがある。

実施主体/
プログラム名

EU Space Surveillance and Tracking (EUSST) /EU (欧)

- EU Space Surveillance and Tracking (EUSST) におけるセンサーは、各軌道（LEO、MEO、HEO、GEO）の物体追跡・監視を実施している。SSTコンソーシアム加盟国内にセンサーサイトがあり、38個のセンサー（レーダー、光学、レーザー）で構成される。[1]
 - EUSSTでは、約95%が軍用センサーで構成されることから、**欧州産業の自律性強化のために商用センサー調達を検討**している。SSAに特化した「スタートアップフォーラム」が開催（200名以上が参加）され、将来の商用データの要求を作成するための3つのワーキンググループが設立された。[2]
 - EUSSTにおける課題の1つとして**予算不足が挙げられ、民生と安保の相乗効果を最大限活用する必要**がある。（EUのSSA活動とGOVSATCOMの連携）[2]。
- EUSSTでは、**衝突回避に関する解析情報をユーザに提供**している[1]。



【GRAVES】(仏) [3]

- レーダー
- LEO物体の常時監視（10cm）



【TIRA】(独)

- レーダー[4]
- LEO/GEO（推定）物体の常時監視(2cm,1,000km) [4]
- **高精度の軌道パラメータを提供する狭帯域追跡レーダー（Lバンド）と高解像度イメージングを行う広帯域画像レーダー（Kuバンド）で構成** [5][6]

図 EUSSTのセンサー（例） [1]

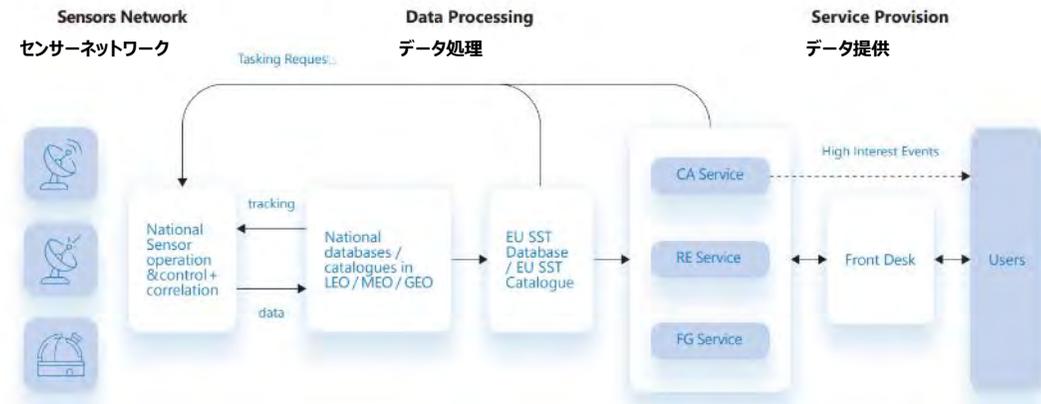


図 EUSSTの全体像[1]

出所)

1. EUSST, [EU Space Surveillance and Tracking](#)
2. Space News, [Europe seeks greater autonomy in space traffic management](#)

3. Federation Of American Scientist, [A GRAVES Sourcebook](#)
4. Secure World Foundation, [GLOBAL SPACE SITUATIONAL AWARENESS SENSORS](#)
5. ESA, [TIRA](#) 6. FHR, [Press releases](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (ESA①)

ESAは、新たな地上ベースのレーザーを用いて、衛星の監視を実施中。今後、レーザーの高出力化によるデブリ衝突回避や自律制御によるデブリ監視が期待されている。

実施主体/
プログラム名

ESA / Izaña-1 laser ranging station (伊)

- ESAの地上ベースのレーザーセンサー (Izaña-1 レーザー測距ステーション) は、現在、衛星の検出、追跡、監視を担っている。
 - レーザーによるピンポイント光源は、対象に短い光パルスを照射し、往復の所要時間から計算されたミリ単位の精度で各対象の距離、速度、軌道を決定する^[1]。
- ESAは、Izaña-1 レーザー測距ステーションをテストベッド的に活用していく方向を示している。^[4]
 - **デブリ追跡**：今後レーザーをアップグレード (150mW→50W) することで、衛星のみならず、非協力的物体 (デブリ) に対する追跡を実現させる予定。ESAによると、デブリのレーザー測距に対するレーザーの出力は、20~100Wを想定している。目標とするレンジは、夜間レンジ (①10cm, 600km ②50cm, 1,400km ③大型物体, 最大3,000km)、昼間レンジ (50cm, 最大1,000km) とされている。^[2]
 - **自律型デブリ追跡**：将来的には不必要な衝突回避操作の減少させ、衛星推進薬や地上でのエンジニアの対応時間を節約するために、完全自律型のデブリ追跡ステーションとなる構想がある。
 - **デブリ回避**：当該レーザー局は、ESAの自動回避システムをサポートする目的で活用される見込み。ESAは、技術的なチャレンジとして、レーザー出力を更に高出力化 (40kW程度) することにより、衛星へ衝突が想定されるデブリにレーザーを照射して、デブリの軌道をずらす構想を掲げている。



図 Izaña-1 レーザー測距ステーション^{[1][2]}

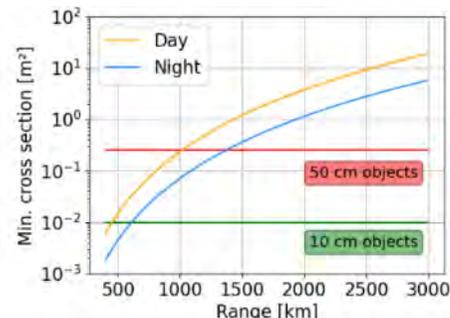


図 デブリ追跡に向けた目標レンジ^[3]

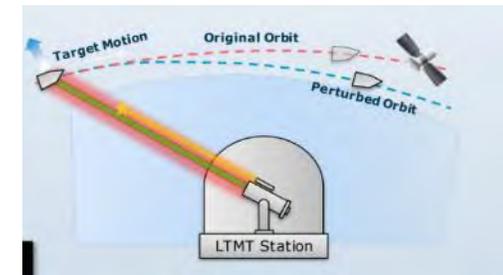


図 レーザーによるデブリ衝突回避^[4]

出所)

1. ESA, [New laser station](#)
2. DIGOS, [Izana-1](#)

3. DIGOS, [Space Debris Laser Ranging](#)
4. ESA, [Space Debris](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（ESA②）

ESAは、宇宙空間での衝突のリスクを自動的に評価し、意思決定プロセスを改善に向けた自動回避システムの研究開発を推進中。本取組のロードマップでは、官民連携の下で2025年に実証ミッション成功を想定している。

実施主体/
プログラム名

ESA（欧）

- ESAは、Collision Risk Estimation and Automated Mitigation (CREAM)と呼ばれる枠組みの下で、自動回避システムに係る研究開発を推進中。^[1]
 - 宇宙空間での衝突のリスクを自動的に評価し、意思決定プロセスを改善する。危険にさらされている衛星へのコマンド送信を自動化する等の衝突回避システムの開発を検討している。
 - 現在、上記CREAMの枠組みの下で、Astroscale（GMV、Onewebを含めたチーム）と契約（€800K）の上、手動的な介入を減らすための自動衝突回避技術の開発中（アクセス可能な大規模な地上局ネットワーク、オンボード処理等）。^[2]
 - GMVは、衝突回避プロセスと情報共有システムに関する専門知識で貢献する。OneWeb は、コンステレーションの衝突回避を管理する際の具体的な方法と課題に関する専門知識を提供する。^[1]
 - CREAMの取組のロードマップでは、官民連携を進めながら、2025年に実証ミッション成功を想定している。^[3]



図 CREAM high-level roadmap ^[3]

出所)

1. ESA, [ESA tasks European industry with staving off in-space collisions](#)
2. Astroscale, [Astroscale Awarded 800K Euro ESA Contract](#)

3. First Int'l. Orbital Debris Conf., [CREAM - ESA's Proposal for Collision Risk Estimation and Automated Mitigation](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（CNES）

23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

フランスではSSA能力強化を図っており、CNESは複数軌道に展開される光学センサーによるSSAデータを収集することで、CNESのSSA活動を補完・強化していく予定（民間事業者選定済み）。
 契約を通じて、選定事業者は宇宙ベースのSSAセンサー開発・サービス実証を実施する見込み。

実施主体/
プログラム名

CNES/宇宙監視用データカタログ（仏）

- CNESは、SSAデータ収集による宇宙活動の安全性向上を目的としたRFP（宇宙監視用データカタログ）を実施し、最終的にArianeGroupが主導するコンソーシアムを選定した。CNESは、SSAデータを購入することで、軌道上物体を監視・追跡、カタログ化する能力と自律性を強化していく。
 - 本活動自は、フランスの「Le plan d'investissement France 2030」（フランス2030 投資計画）の枠組みの下でフランス政府から資金提供が実施される。
- 選定されたArianeGroupが主導するコンソーシアムは、Eutelsat及びMagelliumと連携し、複数軌道での宇宙監視パフォーマンスを向上させる。
 - 本コンソーシアムは、複数軌道に展開される光学センサーによるSSAデータサービスをCNESに提供し、CNESのSSA活動を補完・強化する。地上センサーと軌道上の光学センサーを組み合わせることで、既存のサービスを拡張し、収集されるデータ量を増やすこと可能となる。
 - 本プロジェクトは、24か月の運用準備フェーズと、18か月の運用サービス実証フェーズで構成される。



出所)

1. satnews, Ariane Group + Eutelsat + Magellium to improve French SSA capabilities

デブリ監視及び回避技術の事例調査（中国）



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

中国は、地上ベースのセンサーをミサイル警戒に利用しつつ、SSA用途（LEO、MEO、GEO上の物体監視）としても用いている。また、中国の衛星運用者に対する接近・衝突情報のアラート提供を政府機関主導で実施している。

実施主体/
プログラム名

Space Debris Monitoring and Application Center（中）

- 中国は、宇宙物体の検出・追跡、特性評価のために、地上ベースのレーダーと光学望遠鏡のネットワークを有する。中国のSSAレーダーの一部は、ミサイル警告機能も果たしている。中国の既存のSSA能力は、地球周回軌道上の宇宙物体の正確な軌道・特徴把握を可能としていると見られる。※1
 - **レーダー（少なくとも5基）**：レーダーは主に中国人民解放軍によって運用されている。少なくとも5基の大型フェーズドアレイレーダーを運用。図1
 - **光学（7サイト）**：中国の主な光学観測は、Purple Mountain Observatory（PMO）によって運用（7サイトで複数の望遠鏡有する）。図2
- ※1：中国は、国外のSSAセンサーカバレッジを欠いている状況。他方で、2010年以降、中国は軌道上でRPOを実施できる衛星を複数配備しており、他国衛星の特性を把握し、情報を収集する能力の一助となっていると思われる。また、APOSOS（後述）を通じた地上光学センサーネットワークを構築している。

【Space Debris Monitoring and Application Center】

- 中国は様々なセンサーからのSSAデータを照合し、軌道上の衝突から中国の衛星を守るために、「Space Debris Monitoring and Application Center」を立ち上げた。（2015年）
 - 同センターは中国国家航天局が所掌し、中国の衛星運用者に対して、接近や衝突の可能性に関する早期警告を提供していると思われる。
 - 同センターは、ロシアのASAT実験（2021年）によるデブリの一部と中国の科学衛星との接近に関する警告を発信した。



図1 LPAR SITE NEAR KORLA [1]

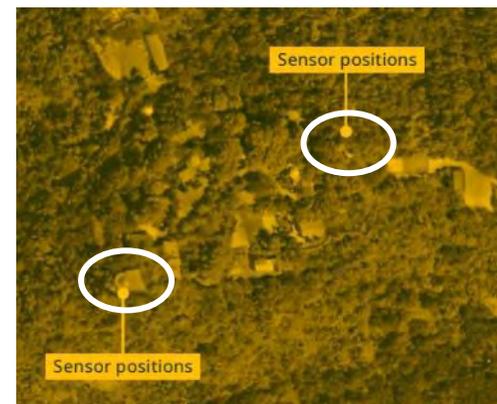


図2 Purple Mountain Observatory [1]

出所)

1. Secure World Foundation, [Global Counterspace Capabilities 2023](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（中国②）



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- 中国は、APSCO加盟国の光学望遠鏡を用いた宇宙観測ネットワークの構築を目指している。
- 本ネットワークを通じて、全ての加盟国への分散データ処理センター設置や将来の衝突回避に関する早期警報サービス基盤確立、宇宙分野における技術交流等のための国際協力が想定される。

実施主体/
プログラム名

Asia-Pacific ground-base Optical Satellite Observation System (APOSOS)

- Asia-Pacific ground-base Optical Satellite Observation System (APOSOS) は、中国が主導するアジア太平洋宇宙協力機構 (APSCO) ※1にて提案・支援されたプロジェクトである。
- 本プロジェクトは、APSCO加盟国における光学望遠鏡を用いた宇宙観測ネットワークの構築を目指している。^[1]
 - **Step1** (2012年～) : LEOの物体を追跡するために、既存設備を用いた観測ネットワークを構築する。2012年のプロジェクトの初期段階でタイ、インドネシア、イランで実施された現地パイロット観測に成功。2013年に加盟国3か国に3台の望遠鏡を恒久的に導入した。^[2]
 - **Step2** (2017年～) : MEO、GEOの物を追跡する能力を拡大のために新たな設備を導入を図る。直径30～50cmの望遠鏡と広視野測量望遠鏡、精密追跡望遠鏡が全ての加盟国に設置される予定。完全なネットワーク構築後は、LEOで直径10cm程度の物体検出が可能と想定される。^[2]
- APOSOSは、宇宙観測ネットワークの構築を通じて、全ての加盟国への分散データ処理センター設置や将来の衝突回避に関する早期警報サービス基盤確立、宇宙分野における技術交流等のための国際協力などを掲げている。
- 中国、ペルー、トルコによって提案され、中国とトルコが本プロジェクトの主導国に指名されている（データセンターは北京に設置）。これまでに206個の物体が追跡され、宇宙物体カタログに記録されている。

※1

アジア太平洋宇宙協力機構 (APSCO) :

- 宇宙科学技術の平和利用における協力基盤を確立することにより、加盟国間の宇宙プログラムの開発を促進および強化することに特化した政府間機関。本部：中国・北京
- 加盟国は、バングラデシュ、中国、イラン、モンゴル、パキスタン、ペルー、タイ、トルコの8か国

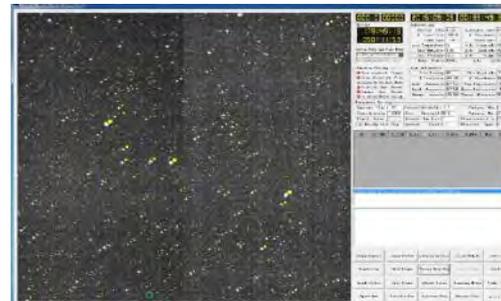


図 追跡ソフトウェア^[3]

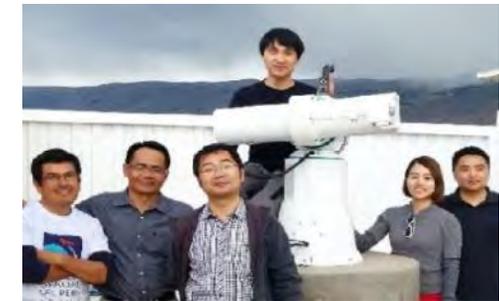


図 ペルーの観測サイト^[3]

出所)

1. APOSOS, [Asia-Pacific ground-base Optical Satellite](#)
2. APSCO, [Ground-Based Space Object Observation Network](#)

3. APSCO, [Ground-Based Space Object Observation Network](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (SKKP/ROSCOSMOS)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- ロシアのSSAは、中国同様にミサイル警戒と併用する体制である。また、ROSCOMOS（ロシアの宇宙機関）では、ISONや他のロシアSSAセンサーからのデータを利用した物体検出・追跡を実施。
- 既存の地上光学センサーを補完するために、SSA衛星及びホステッドパイロードを開発していく構想がある。

実施主体/
プログラム名

Russian Space Surveillance System (SKKP) (露)
Automated Warning System on Hazardous Situations in Outer Space (ROSCOSMOS)

【Russian Space Surveillance System (SKKP)】^[1]

- ロシアの宇宙監視システムであるSKKPは、主にミサイル警戒に使用される複数のフェーズドアレイレーダーと地上ベースの専用光学望遠鏡で構成されている。地球周回軌道にある10cm以上の物体を追跡、識別、特徴付けることができるSSA能力を保有。※ 1
 - レーダー（14サイト）：8,000km離れた物体（サッカーボール程度）を検出し、最大500個の物体を同時に追跡できるとされている。
 - 光学（2サイト/10基）：高度 2,000km から 40,000km の宇宙物体を検出するように設計されている。※ 2
 - ※ 1：SKKPは、センサーカバレッジ（ロシアの地理的背景）に欠点が存在していたものの、ISONネットワークが追加されたため欠点が解消されたと見られる。
 - ※ 2：ロシアは、移動式光学センサーに取り組んでいると見られている。1.5mの光学望遠鏡を搭載する車両と制御用車両の2台で構成され、HEO、GEOの物体観測に使用される予定。

【Automated Warning System on Hazardous Situations in Outer Space (ASPOS OKP)】^[1]

- ROSCOMOS（ロシアの宇宙機関）は、光学望遠鏡を活用し地球に近い宇宙空間の物体を監視するシステムASPOS OKP（Automated Warning System on Hazardous Situations in Outer Space）を開発。2016年に運用が開始されている。
 - 同システムは、ISONネットワーク（後述）や他のロシアSSAセンサーからのデータを利用して、2000km以上の地球周回軌道上の物体を検出・追跡し、ドッキング、再突入、ミッション後の廃棄を含む様々なSAAサービスを提供する。
 - ロシアは既存の地上望遠鏡ネットワークを補完するために、少なくとも1機の宇宙監視衛星及び将来の地球観測衛星に搭載される宇宙監視ホストパイロード、ISSに搭載されるホストパイロードを開発すると報道されている。

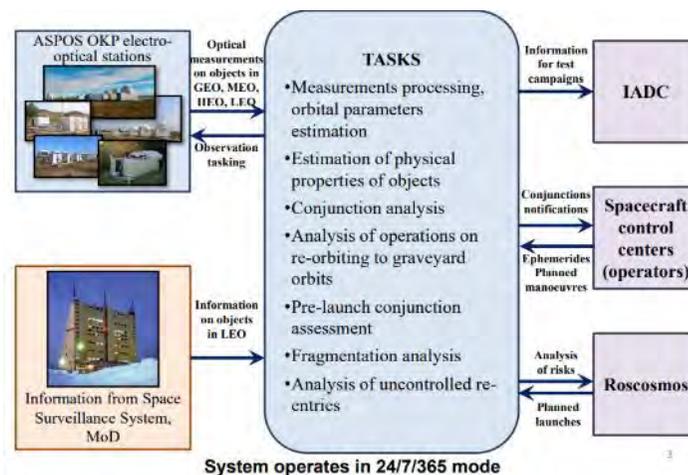


図 ASPOS OKP ^[2]

出所)

1. Secure World Foundation, [Global Counterspace Capabilities 2023](#)
2. UNOOSA, [Committee on the Peaceful Uses of Outer Space](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（ロシア）



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- ロシアは、**科学研究を対象とした軌道上物体を光学観測する国際的なプロジェクトを推進。**
- **スイス、イタリア、スペイン、中国、メキシコ、エジプト等の各国天文台と国際的に連携している。**

実施主体/
プログラム名

Russian Academy of Sciences (RSA) (露) /International Scientific Optical Network (ISON)

- International Scientific Optical Network (ISON) は、Russian Academy of Sciences (RSA) が主導する、**科学研究を対象とした軌道上物体を光学観測する国際的なプロジェクト**である。(2004年に開始) [1]
 - 主な観測対象は、デブリ、小惑星、ガンマ線バースト残光
- **ISONの地上センサーの中核は、18サイトに設置された30台の光学望遠鏡**（主に口径20cm～40cm） [1]
 - 上記他、ISONに参加する協定を結んだ機関等に口径50cm～80cm（12台）、口径60cm～2.6m（10台）を有する。
- ISONにおけるデブリ観測として、**GEO、HEO、MEOデブリ追跡、高軌道にある暗いデブリの追跡・監視等を実施**している。 [1]
 - **年間200万回の観測を収集し、HEOまたはGEO軌道にある6,000以上の宇宙物体のカタログを保持**していると見られる。 [2]
 - なお、高軌道デブリ・データベース整備、高軌道におけるデブモデルの開発、高軌道衛星コンステレーションの衝突回避評価解析のサポート等を目標としている。 [1]
 - **スイス、イタリア、スペイン、中国、メキシコ、エジプト等の天文台と国際的に連携**している。(なお、小惑星観測に関する国際協力として、アメリカ、欧州、中国等の研究所と連携) [1]

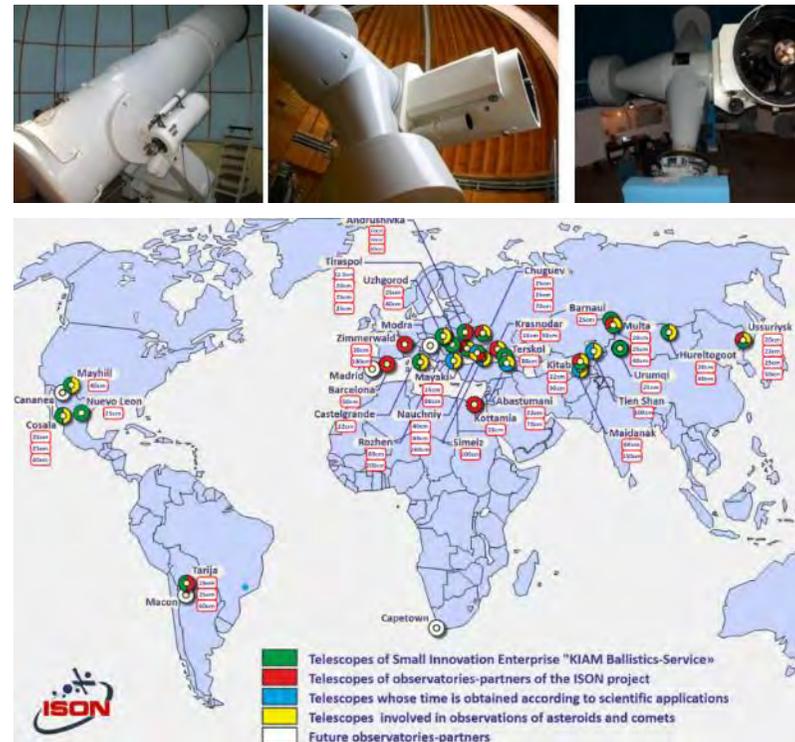


図 ISONの光学センサー及びセンサー設置場所 [1]

出所)

1. UNOOSA, [International cooperation in field of observations of the near-Earth objects within ISON project](#)
2. Secure World Foundation, [Global Counterspace Capabilities 2023](#)



デブリ監視及び回避技術の事例調査 (JAXA)

デブリ監視

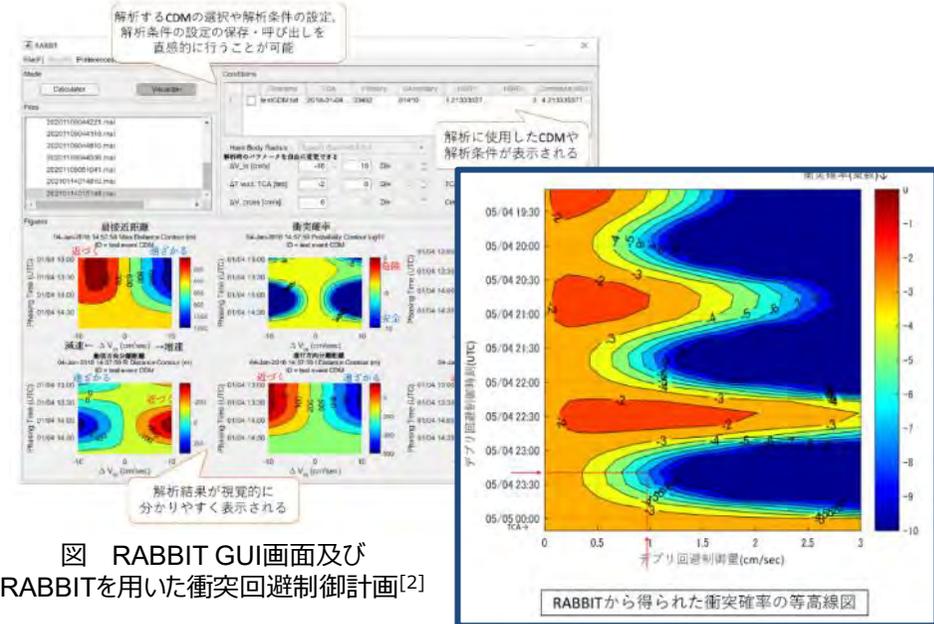
デブリ回避

JAXAでは、**デブリ回避運用を容易にするためにデブリ接近衝突確率に基づくリスク回避支援ツールを開発し、衛星運用機関に向け無償提供を行っている。**本ツールにより、**デブリとの最適な衝突回避策について軌道力学専門家がなくても、視覚的に短時間で回避策を立案できる。**

実施主体/
プログラム名

JAXA/デブリ接近衝突確率に基づくリスク回避支援ツール(RABBIT) (日)

- JAXAでは、**衛星のデブリ回避運用を容易にするために「デブリ接近衝突確率に基づくリスク回避支援ツール」(RABBIT)を開発し運用に活用してきた。**なお、本ツールは、**衛星運用機関に向け無償提供**が実施されている。[1]
- RABBITは、様々な接近に対して衝突リスクを解析し、色分けされた等高線（赤は危険、青は安全）で視覚的に表示する。当該等高線図により、**視覚的にデブリとの最適な衝突回避策について短時間で立案を可能とする。**[1]
 - CDMをRABBITに入力する事により、人工衛星を、いつ、どれだけ軌道制御すればデブリとの衝突を回避できるのか、衝突確率と最接近距離を解析した上で、等高線図として視覚的に表示することが可能。[2]
 - デブリ衝突回避運用に長けた**軌道力学専門家がなくても、得られた等高線図から、最適な衝突回避手段を見つけ出す事が可能となる。**[2]



現状

- 現在、衛星を運用する各機関は、**米国の連合宇宙運用センター(CSpOC)から、接近通知(CDM)を受け取っている。**
- この通知により**数日以内のスペースデブリとの衝突の可能性を把握している。**

課題

- CDMには衝突回避のために、**いつ、どれくらいの軌道制御を実施すれば良いのか、という情報までは記載されていない。**
- 各衛星の運用機関が**自力で計算**する必要があり、軌道力学の**専門家による解析が必須**となる。

対応

- JAXAは**デブリ接近回避を容易に解析するツール**として RABBITを**開発し運用**に活用してきた。

出所)

1. JAXA, RABBIT
2. JAXA, デブリ接近衝突確率に基づくリスク回避支援ツール(RABBIT)の無償提供開始のお知らせ



デブリ監視及び回避技術の事例調査 (JAXA)

デブリ監視

デブリ回避

- JAXAでは、従来より地上ベースのセンサー（光学・レーザー）によるデブリ監視を実施してきた。
- 今後、デブリや不審な衛星の動向など宇宙の状況を把握するために、防衛省による地上ベースのレーザー測距装置及びレーザーやSDA衛星の保有・運用が想定される。

実施主体/
プログラム名

JAXA/防衛省（日）

- JAXAでは従来から、SSA関連施設（光学、レーザー）による、スペースデブリの観測および観測データに基づく軌道決定、接近解析等を実施している。^[1]
 - 地上ベースのセンサー：光学望遠鏡（GEOを観測）、フェーズドアレイレーザー（LEOを観測）
- 防衛省は、SDA（宇宙領域把握）体制の確立が急務として、2027年度までにSDA能力を強化する方向性を示している。^[4]
 - 地上ベースのセンサー（予定）：SSAレーザー測距装置（3式）^[3]、SSAレーザー（1式）^[3]
 - レーザー：LEOの常時監視に加え、日本の衛星と宇宙物体との衝突のおそれがある場合に、より高精度の位置測定を可能とするために、SSAレーザー測距装置を取得する。（189億円/令和4年度予算案）^{[3][6]}
 - DSレーザー：主にGEOで運用されている人星及びその周辺を常時継続的に監視し、衛星への衝突等を事前に察知する（Xバンド帯、諸元不詳）。^[4]
 - 衛星ベースのセンサー（予定）：SDA衛星（光学望遠鏡を搭載）^[5]

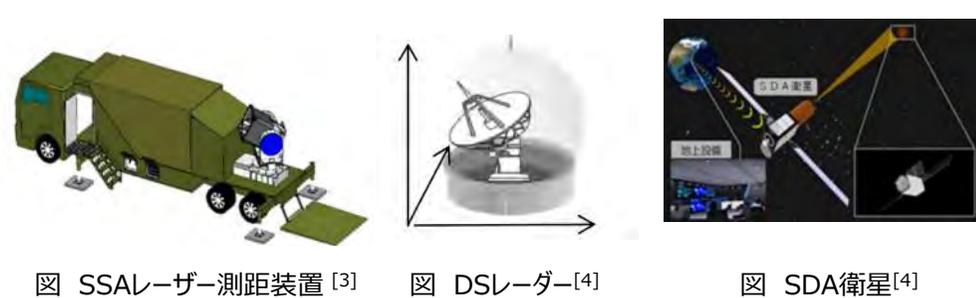
防衛省は、衛星の運用状況や「意図や能力」を把握するために、SDA衛星の製造を行うとともに、更なる複数機運用について検討中。（宇宙領域把握（SDA）の強化（595億/令和5年度予算）を挙げている）^[5]

JAXA（現行）

| | | |
|---|---|--|
|  レーダー Radar | 観測能力 Observation capacity | 10cm級（高度650km） 10 cm class (at an altitude of 650 km) |
| | 同時観測物体数 Number of observable objects at once | 最大30 Up to 30 |
|  光学望遠鏡 Optical telescope | 検出限界等級 Detection limit grade | 1 m 望遠鏡：約 18 等級 50 cm 望遠鏡：約 16.5 等級 50 cm telescope: about 16.5 grade |
| | 解析システム Analysis system | 管理対象物体数 Number of targets 観測データ数（レーダー） Amount of observation data (Radar) 観測計画立案など Compiling an observation plan etc. |
| | | 最大 100,000 物体 Maximum 100,000 objects 10,000 / パス / 日 10,000 paths/day 自動処理 Automatic processing |

図 SSAシステム（レーザー、光学）^[2]

防衛省（予定）



出所)

1. JAXA, [宇宙状況把握（SSA）システム](#)
2. 防衛省, [防衛省の宇宙分野における取組](#)

3. 防衛省, [新たな重要装備品等の選定結果について](#)4. 防衛省, [宇宙状況監視（SSA）のための山口県に所在する山陽受信所跡地へのレーダー配置について](#)5. 防衛省, [令和5年度予算の概要](#)6. 防衛省, [令和4年度宇宙関連概算要求について](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (JAXA/防衛省)



23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- 日本では、**米国からデブリ接近情報の提供を受け、接近解析や衝突回避マヌーバ等に役立っている。**
- **今後、防衛省やJAXA等が一体となったSSA運用体制構築に向けた取組がなされている。**

実施主体/
プログラム名

JAXA/防衛省 (日)

- JAXAは保有衛星の安全な運用のため、SSA関連施設による物体観測、衝突回避運用等を実施。
 - 日本では、**米国からデブリ接近情報の提供を受け、接近解析や衝突回避マヌーバ等に活用している。**
 - 米国・日本政府間の取極に基づき、**日米相互に宇宙物体の軌道に関する情報提供する体制**となっている。
- 現在、**防衛省やJAXAを始めとした関係政府機関等が一体となったSSA運用体制構築**に向けた取組が推進されている。

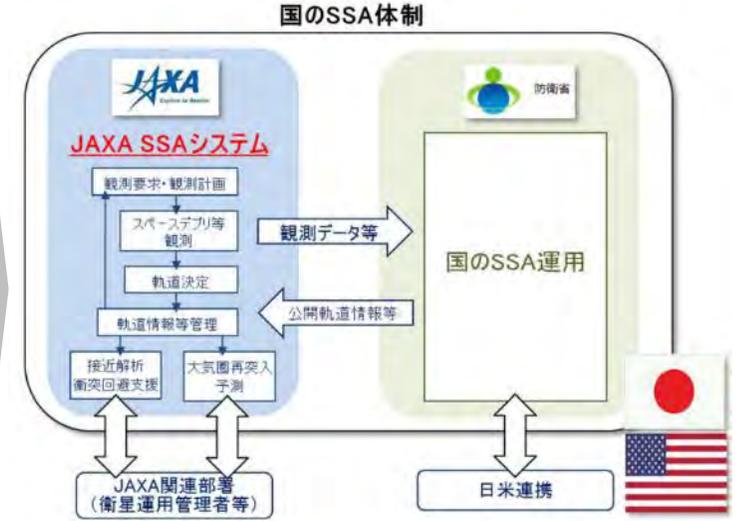
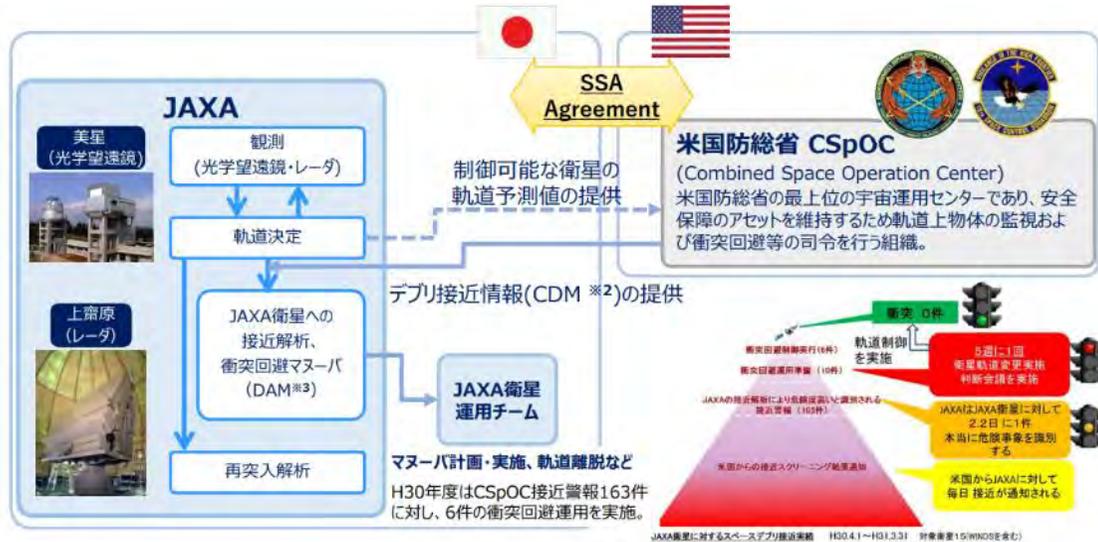


図 SSA運用体制 (現在と今後) [1]

出所)

1. JAXA, [スペースデブリに関する最近の状況](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（LeoLabs①）

デブリ監視

デブリ回避

- **LEOの物体監視に特化したレーダーを用いて、民間企業で唯一の2cm～10cm級のデブリ検出が可能。**
- **センサーによるデータ取得から解析・データ提供に至る一連の垂直統合されたシステムを構築している。**

実施主体/
プログラム名

LeoLabs（米）

- LeoLabsは、世界に6箇所/10基の独立したフェーズドアレイレーダー（Sバンド、UHF）を用いて、LEOの物体を対象とした追跡・監視を実施。
 - フェーズドアレイレーダーは、天候条件に左右されず、駆動部品を使用せずに電子的に制御されるため、数十年の動作寿命が期待される。
- LEOの物体監視（常時監視）に特化したレーダーを用いて、民間企業で唯一の2cm～10cm級のデブリ検出（300km～2,500km）を可能としている。
- LeoLabsは、センサーによるデータ取得から解析・データ提供に至る一連の垂直統合されたシステムを構築している。本システムには、クラウドデータプラットフォーム及び複数サイトに展開するグローバルレーダーネットワークが含まれている。
 - 衛星1機あたり、\$2,500/月で追跡・監視サービスを利用可能。
- LeoLabsは、オーストラリアにおけるレーダー配備を発表した。



図 LeoLabsのグローバルレーダーネットワーク [1] [2]



図 LeoLabsの垂直統合されたシステム [3]



出所)

1. LeoLabs, [Radars](#)
2. LeoLabs, [Radars](#)

3. LeoLabs, [Vertex](#)
4. LeoLabs, [Tracking and Monitoring](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (LeoLabs②)

民間
企業

23-003-T-014

デブリ監視

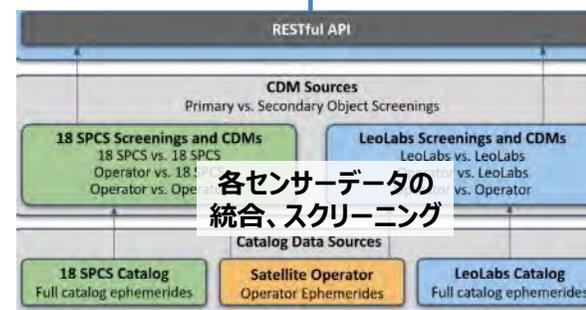
デブリ回避

LeoLabsは、自社センサーとSSNセンサーデータを組合せてデータの精度を高め、衝突回避に係るアラートやレポート等をリアルタイムでユーザへ提供することで衛星運用者等の意思決定を支援するサービスを実施。

実施主体/
プログラム名

LeoLabs (米)

- 衛星所有者や運用者向けにカスタマイズされた衝突回避サービス (LeoSafe) を提供。
- LeoSafeは、自社のフェーズドアレイレーダーネットワークを活用し、衝突回避に係るアラートやレポート等をリアルタイムでユーザへ提供することでユーザ (衛星運用者等) の意思決定を支援するサービスである。^[1]
 - 自社センサーとSSNセンサーデータを組合せてデータの精度を高めている。
 - センサーの取得データは、センサネットワーク側でエッジ処理を行った上で、クラウドに乗せる。^[1]
 - 検出エンジンは、アルゴリズムを使用して、重要なイベントに対してカスタマイズ可能なアラートと通知を提供する^[2]。ユーザは、ほぼリアルタイムでマネージャ計画に資するスクリーニング情報やLeoLabs及び18SDSからのアラートの集約等が提供される。^[1]
 - データアクセスは、Web ベースのGUIと、地上システムの統合と自動化のためにRESTful APIを利用している。^[2]
- LeoLabsの衝突回避サービスは、複数のLEOコンステレーション事業者 (SpaceX, Planet, Oneweb等) が利用しており、LEOで運用されているすべての衛星の約60%をサポートしている。^[4]

ユーザへの視覚情報の提供
(Webベース)図 ユーザへのデータ提供^[3]

出所)

1. LeoLabs, [Leosafe](#)
2. LeoLabs, [Vertex](#)

3. LeoLabs, [Tracking and Monitoring](#)
4. Viasatellite, [Collision avoidance service](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (Slingshot)

民間
企業

23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- Slingshotは、LEOの物体の定期的な追跡・特性評価に向けて、光学センサーネットワーク拡大を加速中。
- デブリ接近情報等について、ユーザにとって無関係なデータノイズの低減やマヌーバの決定段階をガイドすることで、衛星運用者等の時間削減や意思決定を後押しするようなサービスを提供している。

実施主体/
プログラム名

Slingshot Aerospace (米)

- Slingshotは、2023年末までに、新しい光学センサー（昼夜追跡可能な独自光学センサーを含む）を導入し、世界最大のLEO光学センサーネットワークを構築予定（20か所以上サイト/計200以上のセンサー）。[1]
 - 現在、Slingshotは地上ベースの光学センサーをグローバルに展開する Numericaと提携し、SSA機能を強化している。[2]
 - LEOコンステレーションの急速な拡大に伴い、LEOの物体に対する定期的な追跡と特性評価が肝要となっている。[1]
- 同者は、データ解析・共有技術の強化も進めており、衝突回避コラボレーション及び通信プラットフォームに係るサービス提供（Slingshot Beacon）を開始している。
 - Slingshot Beaconは、カスタマイズ可能なダッシュボードを用いて衛星状態を視覚化でき、特定の基準を満たす接近情報を衛星運用者に通知することで、無関係なデータのノイズをカットする。また、マヌーバの決定段階をガイドすることで衛星運用者等をサポートする。[3][4]
 - シームレスなチャットとファイル共有機能を有しており、関係者間で同じデータに基づいた連携が可能となる。[3][4]
 - 当該サービス（パイロット版）には、OneWeb、Spire Global、Orbit Fab等の事業者が参加する。本パイロット版に参加する事業者は、LEOの衛星コンステレーションの53%を占める。[4]



図 Slingshot Beaconに関するイメージ図[3][4]

出所)

1. Slingshot Aerospace, [Global Sensor Network](#)
2. Numerica, [SDA](#)

3. Slingshot Aerospace, [Free service satellite operators](#)
4. Slingshot Aerospace, [Beacon](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (Kratos)

民間
企業

23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- 受動的なRF信号測定は、昼夜・天候条件に影響せず、軌道上で密集した物体追跡も可能となる。但し、RF信号を送信している衛星が前提となることから、非アクティブなデブリにはデメリットとなる。
- レーダー等の各センサーと補完的に組合せることでより正確なデータ取得が実現できる。

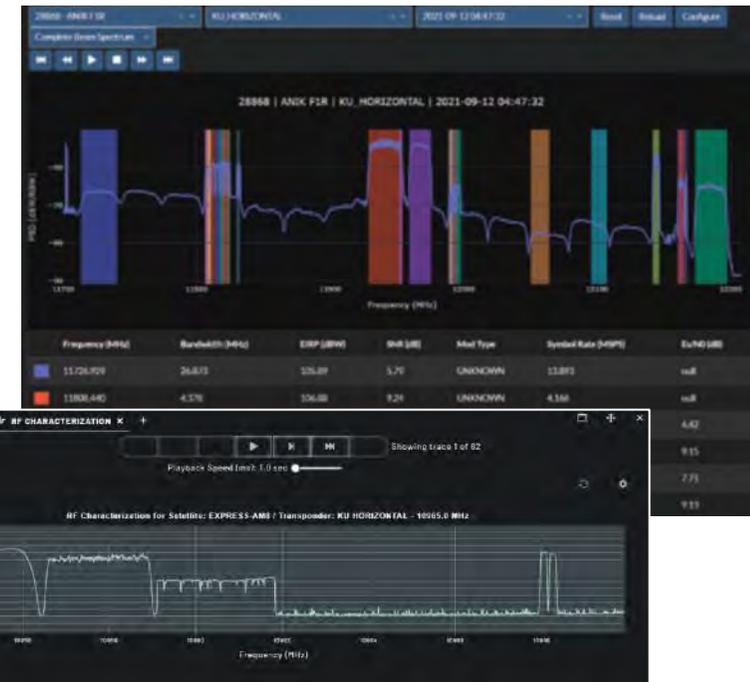
実施主体/
プログラム名

Kratos Defense & Security Solutions (米)

- Kratosは、受動的なRFセンサーをグローバルに展開 (20サイト以上/140以上のセンサー) することで、複数のサイトから衛星から送信されるRF信号を常時測定する。[1][2]
 - 取得した信号は分析・処理され、衛星の位置等をほぼリアルタイムで検出できる。
 - RFデータを利用することで、衛星の軌道逸脱や異常検出等の把握が可能。
- RFは、昼夜・天候に関わらずデータ取得が可能であり、各衛星を一意に識別することが可能なため、軌道上で密集した物体追跡も可能とする。[1][2]
 - 但し、アクティブな物体 (RF信号を送信している衛星) のみ検出が可能となる。
 - 光学、レーダー等の各センサーと補完的に組合せることでより正確なデータ取得が実現でき



図 KratosによるRFセンシング[3]

図 KratosのRF信号調査及び特性評価サービス (上) [2]
RF信号分析による衛星の異常検出 (下) [3]

出所)

1. Kratos, [Tracking and maneuver](#)
2. Kratos, [Signal survey and characterization](#)

3. Kratos, [RF space situational awareness whitepaper](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (SCOUT Space)

民間
企業

23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

- SCOUT Space (米) は、2026年までに100以上のSSA衛星を配備予定。同社は、衛星搭載センサーデータの統合やAI/MLに基づく物体認識の自律化、閉ループ光学ナビゲーション等のに注力している。
- 更に、商用の衝突回避キットを同社のSSA衛星に活用し、コスト効率の高い推進システムの実現を計画。

実施主体/
プログラム名

SCOUT Space (米)

- 米国のSCOUT Spaceは、今後はOVER-Satと呼ばれる6U超小型衛星の運用を開始する予定。2026年までに100以上のOVER-Satの稼働を想定。
 - 同社は、2021年にSSAセンサーの軌道上配備に成功している。(センサーは、Orbit Fabの推進薬補給実証衛星Tanker-001 Tenzingに搭載)。^[1]
 - 当該センサーにより、LEO物体から2km離れた位置から受動的に検出及び識別、モデル化することが可能となった。2023年に初期展開が開始された後、2024年後半には利用可能になる計画。^[1]
 - SCOUTはこれまでに\$5.5Mを超える資金調達を実施し、シードラウンドを完了させ、自社製品ライン開発・生産の加速が期待される。^[2]

衛星向け自律的
ソフトウェア開発

運用の安全性と複雑さを軽減する自律的ソフトウェアを開発

- Sensing : センサーデータ (光学、LIDAR、RF等) の統合によるデータの忠実性向上
- Processing : AI/MLに基づく物体認識の自律化
- Autonomy : 回避操作と接近アルゴリズムを含む閉ループ光学ナビゲーションに係る航法誘導制御システム

衝突回避
キットの活用

コスト効率の高い推進システムの活用

- OVER-Satは、小型衛星がデブリや他の衛星を回避できるように設計された衝突回避キット (Cola Kit) を利用。
- 本キットは、Benchmark Space Systemsにて開発され、スラスタや推進剤タンク、電装類等がモジュール化されている。同社は衛星運用事業者の推進薬消費量に応じた従量課金を採用している。(\$100,000~\$150,000で2~10回の衝突回避操作の提供を想定)

図 OVER-Satの特徴^{[3][4][5]}図 OVER-Sat 外観 (上図)
対象物体の捕捉・データ処理イメージ (下図) ^[1]図 Benchmark 社の
Cola Kitの外観^[6]

出所)

1. Space News, [Getting SSA off the ground](#)
2. SCOUT Space, [Scout space closes oversubscribed seed round](#)

3. SCOUT Space, [Technology](#)
4. Sorae, <https://sorae.info/space/20210704-benchmark-maas.html>

5. Space News, [Benchmark Cola Kit](#)
6. Benchmark, [Products](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (ExoAnalytic)

民間
企業

23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

ExoAnalyticは、**グローバルな光学センサーネットワークを利用して、デブリ監視を実施している。また、各センサーから収集したデータに基づき、デブリ衝突等に関するアラートやレポートを自動生成するサービスを提供する。**

実施主体/
プログラム名

ExoAnalytic Solutions (米)

- ExoAnalyticは、**地上ベースの光学センサーをグローバルに展開** (30以上サイト/300以上のセンサー) している。**各センサーの運用は自動化され、運用や薄暗い物体検出機能等**を有する。[1]
 - GEO、HEO、MEO、LEO (要求に応じて) の各軌道をカバーしている。センサーは世界中で99%利用可能な状況。[1]
 - 追跡・監視サービス利用料\$90,000~\$1,360,000/月 (光学センサーの利用数で価格が変動) [3]
- ExoALERTと呼ばれる**デブリ衝突等に関するアラート及びレポートが自動生成され、プロセスで発生する可能性のある人為的エラーを最小化**する。[2]
 - 約15,000個のオブジェクトに対する約2,000個の観測を、15分ごとに約10個のアラートに自動的に処理する。[2]

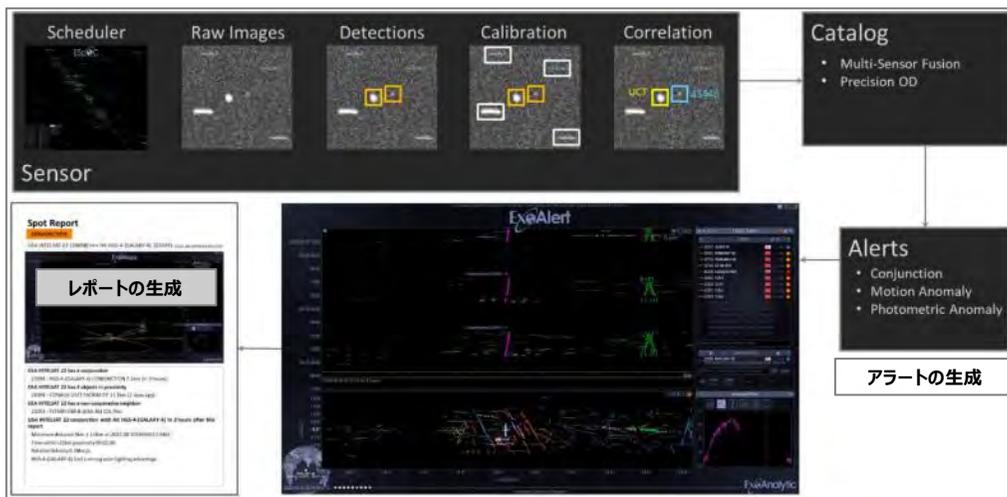


図 ExoALERT systemに関するデータの流れ [2]

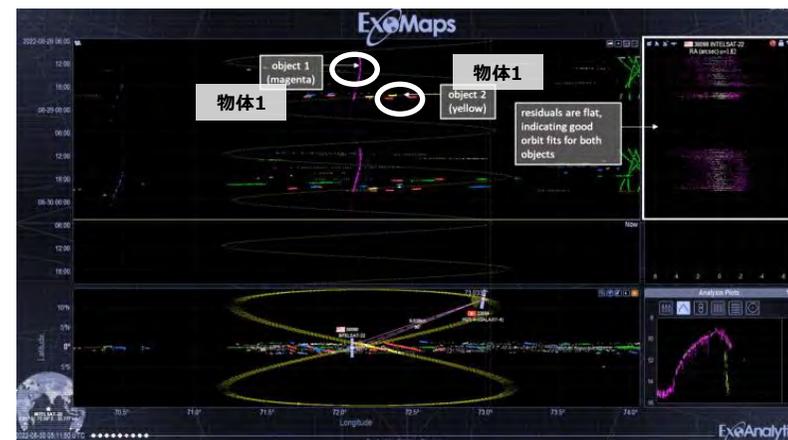


図 接近情報に関わる2つの物体の軌道[2]

出所)

1. ExoAnalytics, [Space Domain Awareness](#)
2. AMOS, [ExoALERT: 1 Year of AI-Enabled Space Traffic Management Services at GEO](#)

3. ExoAnalytics, [Commercial price list](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（Vyoma）

デブリ監視

デブリ回避

- Vyoma（独）は、**12機のデブリ監視衛星コンステレーションを計画している（2024年より打上開始）**。
- **衛星搭載の光学センサーとMLを活用することで、安全で自動化された衛星運用サービス（デブリとの接近検知、回避操作等）の提供を通じて、顧客のミッションコスト削減に繋げる方向性を示している。**

実施主体/
プログラム名

Vyoma（独）

- ドイツのスタートアップであるVyomaは、デブリ監視衛星の開発を進めている。当該開発に対して、€8.5Mの資金調達が発表された（2023年6月）^[1]
- 同社は、**12機のデブリ監視衛星によるコンステレーションを計画している**。最初のパイロット衛星2機は、**2024年に打上げ開始**される予定。最終的に、宇宙ベースのカメラのネットワークを使用して、従来追跡困難であった、**1cm級の物体追跡を計画**している。^[1]
 - 2機のパイロット衛星は、LEO上の30cmを超える物体追跡とカタログ化に重点を置くように設計されている。
 - 当該**衛星ベースのセンサーは、地上センサーの補完**を想定している。Vyomaの最も高性能な地上光学センサーはLEOで約5～7cmの物体観測が可能。
- また、同社は、衛星上の光学センサーとMLを活用した自動化システムを組合せた**軌道上決定**や**衝突回避サービス提供**を想定。^{[1][2][3]}
 - 更に、**安全で自動化された衛星運用サービス（デブリとの接近検知、回避操作支援等）の提供を通じて、顧客のミッションコスト削減に繋げていく方向性を示している。**

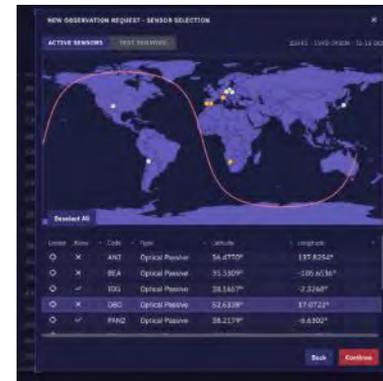
軌道決定
サービス

- 衛星運用者の要求に応じて、**独占的な観測データを提供可能**。追加の観測データと既存のナレッジを統合することで、軌道をより正確に決定できる。
- 新しい観測が行われるたびに軌道情報が更新され、衛星運用者へデータ提供（CMD形式）される。

衝突回避
サービス

サービスは3つのレベルに分かれている：

- ① **Monitor**：衛星運用者は、**衛星のステータス情報（軌道等）を視覚的に把握可能**。スクリーニングを通じた、**正確な衝突確率を取得可能**。
- ② **Plan**：衛星運用者は、**最適な回避操作の推奨事項を得ることが出来る**。
- ③ **Save**：衛星運用者は、**専用の追跡情報を取得することができ、不必要な回避操作を避けることが出来る**。

図 追跡サービスイメージ^{[2][3]}図 軌道決定サービス及び衝突回避サービス（イメージ）^{[2][3]}

出所)

1. Vyoma, <https://spacenews.com/vyoma-raises-9-million-for-debris-monitoring-satellites/>
2. Vyoma, <https://www.vyoma.space/orbit-determination/>

3. Vyoma, <https://www.vyoma.space/collision-avoidance/>

デブリ監視及び回避技術の事例調査（Odin Space）

デブリ監視

デブリ回避

- Odin Space（英）は、衛星搭載センサーを通じて1cm以下の微小デブリ追跡やマッピング、特性評価を実施する。微小デブリがセンサーの基板に穴を開ける際の振動を通じて受動的にデブリを検出する。
- 2024年にセンサーの打上げを開始後、LEO/GEOに年間10個以上（最終的に数百）を配備予定。

実施主体/
プログラム名

ODIN SPACE（英）

- 英国のスタートアップ企業であるOdin Spaceは、LEOからGEOにわたる1cm以下の微小なデブリの追跡やマッピング、特性評価に重点を置いている。^[1]
 - 同社は、独自の衛星を開発・配備するのではなく、ODIN（Orbital Debris Impact Network）と呼ばれるホステッドペイロード型のSSAセンサー配備を計画。
 - 微小デブリがセンサーの基板に穴を開ける際に発生する振動から、当該デブリのサイズ、速度、軌道を記録・分析することをコンセプトとしている。今後、数百のセンサーを打上げることにより、cm以下のデブリ環境の動的な高解像度マップを構築することを目指している。^[2]
- 同社は、2024年にセンサーの打上げを開始し、ホステッドペイロードとしてLEOとGEOに年間10個以上のセンサーを配備する予定。^[2]
 - 2023年6月に軌道上でのセンサー動作に関する技術実証（センサーを通じた微弱な振動検知）を成功させている。センサーはD-Orbitの6U衛星に搭載。^{[2][3][4]}
 - 実証成功により、0.1mm～1cmの範囲のデブリをマッピング、デブリサイズ・位置を測定を可能とする商用センサーの製造に一步近づいた。^[4]

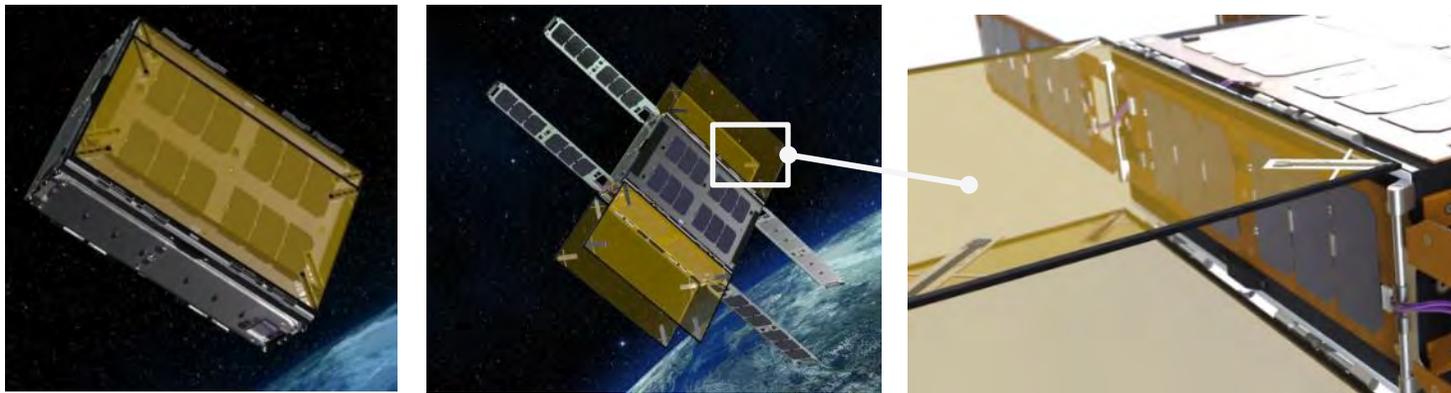


図 実証衛星 外観イメージ（左図：展開前、中図：展開時、右図：拡大）^[5]

出所)

1. Space News, [Getting SSA off the ground](#)
2. Space News, [British startup powers up sensor](#)

3. SPACE.com, [Odin space completes debris tracking demo](#)
4. SatNow, [Odin space successfully demonstrates](#)
5. ASH3D, [Odin space](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (D-Orbit)

民間
企業

23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

既存の軌道上サービス衛星（軌道輸送機）のプラットフォームに搭載されているカメラを再利用することにより、衛星ベースのSSAを実施する試みがある。

実施主体/
プログラム名

D-Orbit (伊)

- D-Orbitは、独自の軌道輸送機（ION）を開発し、複数の顧客に対するLast one mileサービスを提供している。
- 同社は、既存のIONプラットフォームに搭載されているStar Trackerのカメラを再利用して、LEOの物体特定や監視を実施する試みを進めている。一部実証を進めており、監視能力をさらに向上させるために継続的な改善を検討する予定。
 - ION-mk 01 SCV-001ミッションでは、IONプラットフォーム搭載のStar Trackerによる画像取得と地上への送信に成功したものの、地上試験で得られたほどの良好な結果は得られなかった。
 - 後続のION-mk 02 SCV-002ミッションにて、同じカメラが利用され、より高画質の画像の記録と地上への送信を可能とした。

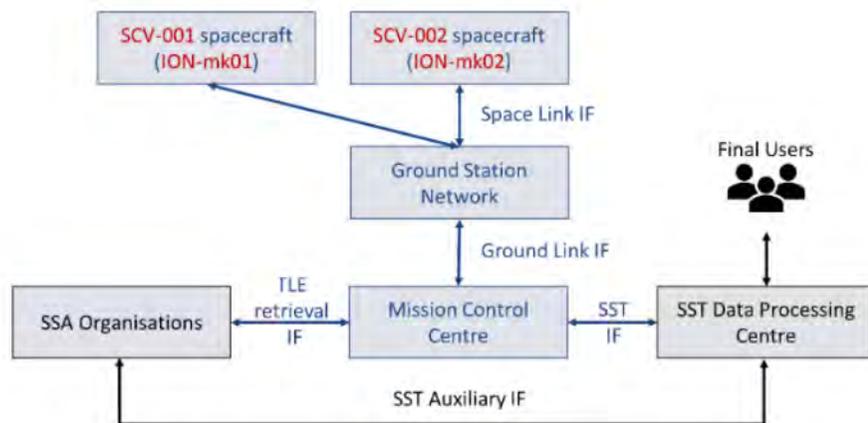


図 ミッションアーキテクチャイメージ^[1]



図 ION-mk 02搭載
スタートラッカーのカメラ位置^[1]



図 SCV-002スタートラッカー
で撮影した地球の画像^[1]

出所)

1. D-Orbit, 2021 - Reusing existing space infrastructure to identify and monitor resident space objects

デブリ監視及び回避技術の事例調査（富士通）

デブリ監視

デブリ回避

- 富士通は、JAXA衛星運用者のデブリ回避対応に資するSSA解析システムを構築。
- 観測計画の策定や観測データの処理等を自動化し、解析運用者の運用負荷軽減を図っている。

実施主体/
プログラム名

富士通（日）

- 富士通は、JAXA SSAシステムにおいて、デブリの軌道を計算する解析システムを新たに構築・稼働を開始した（2022年4月）
- 本解析システムでは、光学・レーダーによる観測から得られたデータに基づいて計算したデブリの軌道に対して、**JAXA衛星の軌道と比較解析**を行う。両者の接近を検知した場合は、衝突確率及び衝突を回避するための軌道制御に必要な情報を添えて、**JAXA衛星運用者に自動で通知**することで、**衛星の速やかな軌道修正の対応を支援**する。

【解析システムの特徴】

1. 最適な観測計画の作成と観測データ処理能力の向上により、衝突リスクをタイムリーに把握
2. 定常的な作業（観測計画の策定や観測データの処理）を自動化し、解析運用者の運用負荷を軽減
3. 国が運用管理する「SSAシステム」との連携

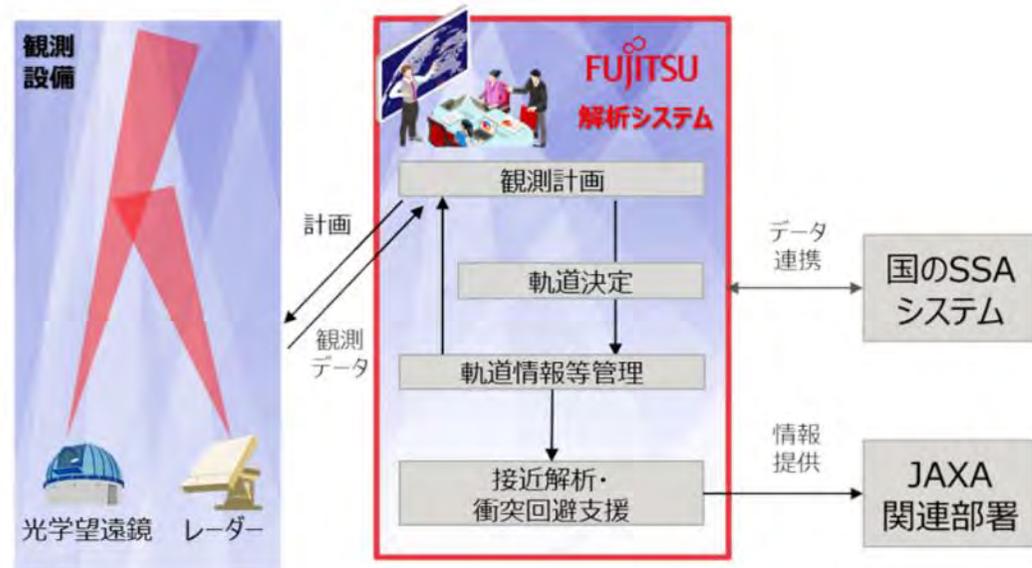


図 「JAXA SSAシステム」の概要 [1]

出所)

1. 富士通、[スペースデブリの軌道を精緻に把握する富士通の新解析システムが「JAXA宇宙状況把握（SSA）システム」において運用開始](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（HEO-Robotics）

民間
企業

23-003-T-014

デブリ監視

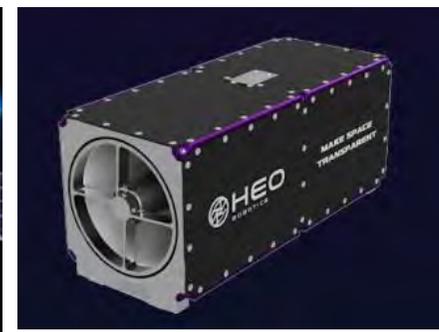
デブリ回避

HEO Roboticsは、衛星運用者が軌道上の詳細情報に基づく意思決定が行えるように、既存衛星搭載カメラや専用カメラを通じて軌道上で衛星をモニタリングするサービスを提供している。

実施主体/
プログラム名

HEO-Robotics（濠）

- High Earth Orbit (HEO) Robotics は、軌道上で衛星をモニタリングするサービスを提供している。
 - 軌道上の衛星を利用し光学的に宇宙物体を観測するための、衛星検査を実施するソフトウェア及びハードウェアを開発している。
 - 軌道上取得データは画像処理とノイズ削減がなされ、衛星運用者に対し軌道上の衛星の状態や動作状況、リスクや異常検知に関する情報を提供することで、衛星運用者は詳細な情報に基づく意思決定が可能となる。
- 同社は、軌道上でデータ取得を行うため、「既存衛星の搭載カメラ」と「専用カメラ」の2通りのアプローチを取っている。衛星側のダウンタイムを有効活用することで、画像取得を実施している。
 - 既存衛星の搭載カメラ：地球観測衛星の搭載カメラを軌道上検査カメラとして活用している。
例：GRUS衛星（アクセルスペース）搭載のセンサーから取得したデータをHEO Roboticsが開発したソフトウェアと統合
 - 専用カメラ：衛星の二次ペイロードとしてホストできるように設計されたカメラを衛星に搭載する
例：Droid-1（Turion）に搭載されたホスト型ペイロードとして打上げ

HEO Roboticsのサービスイメージ^[1]Droid-1（Turion）に搭載されたる専用カメラ（イメージ）^[2]

出所)

1. HEO Robotics, <https://www.heo-robotics.com/>
2. HEO Robotics, <https://www.heo-robotics.com/supplierprogram>

デブリ監視及び回避技術の事例調査（Dignatarara）

デブリ監視

デブリ回避

衛星ベースSSAセンサーは光学が大半を占める中で、Dignatararaは、LIDARセンサー及び宇宙天気データを組合せることで、他の物体追跡と差別化を図る動きをしている。また、同社は、SSAデータプラットフォーム開発やSSA衛星開発を進めており、自社サービス提供に向けた動きを進めている。

実施主体/
プログラム名

Dignatarara（印）

- インドに本拠を置くDignatararaは、軌道上物体（1cm程度）を追跡するために、今後3年間で少なくとも40機の衛星をLEOに配備することを計画。将来的には、Dignatararaは、LEOのみならず、MEOやGEOにもサービス拡大をする見込み。（2022時点）^[1]
- 同社は、LIDARセンサーと宇宙天気データによる測定結果を組み合わせることで、太陽光と日食の段階で他の物体追跡システムよりも高い精度を実証する予定。同社のセンサーは、OrbAstroが開発する6Uの超小型衛星（ORB-6）に搭載される。^[3]
 - LIDARセンサーは、物体の軌道予測に係る微調整、衛星状態監視に活用される。
- 同社はSSAデータを収集分析するための「Space-MAP（Mission Assurance Platform）」を開発している。潜在的な衝突リスクの分析を目指している。
 - Dignatararaは、政府機関やコンステレーション事業者等と協力を進め、効果的なSSAデータ製品の構築を促進している。参加している関係者は、同社のデモ衛星が取得した観測データについて1年間無料でアクセス可能となる。^[1]
- また、\$10Mの調達資金を利用して、光学センサーを搭載した超小型衛星（6U、12U）の開発を実施する計画。^[4]



図 LIDARセンサーが搭載される超小型衛星の外観^[2]^[3]

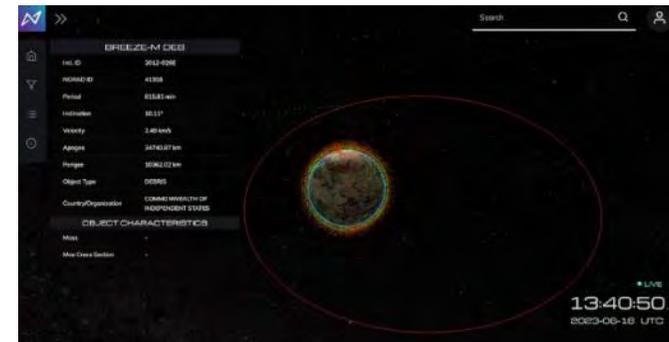


図 Dignatararaのサービスイメージ^[4]

出所)

1. Space News, [Getting SSA off the ground](#)
2. satnews, [imaging payload](#)
3. satnews [Space Debris Tracking](#)
4. Space News, [Indian SSA startup raises \\$10 million](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査（NorthStar）

民間
企業

23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

NorthStar（加）は、2023年に4機のSSA衛星を打上げ後、最終的に24機のSSA衛星コンステレーションを構築予定。同社は、衛星運用事業者とのパートナーシップを通じた商用SSAサービス提供を通じたグローバルな体制作りやビジネス機会創出を推進している。

実施主体/
プログラム名

NorthStar Earth and Space（加）

- NorthStarは、宇宙ベースの専用光学センサーを搭載した衛星コンステレーションを介して宇宙を監視する商用サービス展開を進めている。
 - 最終的には、24機のSSA衛星コンステレーション構築を想定。LEOで1cm程度、MEOで7cm程度、GEOで40~50cm程度の物体追跡を目指している。^[1]
- NorthStarはシリーズCラウンドにおいて、\$35Mを調達（2023年1月）を発表した。同社の資金調達総額は\$100M近くとなった。^[1]
 - 同社は、SES、Telespazio※1、アクセルスペース等の衛星運用事業者らとのパートナーシップを通じた商用SSAサービス提供に向けた動きを加速。^{[3][4][5]}
 - なお、Telespazio（LeonardoとThaleの合併企業）は、NorthStarとのパートナーシップ締結により、欧州政府に対するNorthStarの独占販売代理店となると見られる。TelespazioはNorthStarの最初の資金調達ラウンドに投資し、NorthStarのコンステレーションのリスク軽減等を支援していた背景がある。
- 現在、2023年に4機の衛星（Spireの16U衛星バスを利用）の打上げを予定している。^[2]
 - なお、当該4機は既に商業顧客と政府顧客からの契約を獲得しているとされている（具体的な顧客名称等は不明）。^[2]
 - 同社CEOによると、NorthStarも選定されているNOAAのパイロットプロジェクト（前述のNOAA/TraCSSを参照）が商用SSAの機会を強め、ビジネスの呼び込みに繋がっていると述べている。
- LEOの物体が1時間に何度も衛星の光学センサーの視野に入るような追跡頻度を見込んでいる（物体と軌道の種類に依存）。また、衛星の視野を通過するすべての物体を同時に捕捉が可能。^[2]



図 NorthStarの光学衛星イメージ^[1]

出所)

1. Space News, [Northstar raises 35 million for debris tracking satellites](#)
2. Space News, [Northstar pivots to rocket lab following virgin orbits collapse](#)
3. Northstar, [SES](#)
4. Northstar, [Telespazio](#)
5. Northstar, [Axelspace](#)

デブリ監視及び回避技術の事例調査 (Star Signal Solutions)

民間
企業

23-003-T-014

デブリ監視

デブリ回避

スターシグナル・ソリューションズ（日）は、衛星搭載スタートラッカーを用いたSSAデータを用い、その取得データと既存CDMを組み合わせることで、従来よりも高精度なCDMを生成する手法を開発している。高精度化したSSAデータセットを用いて、デブリ衝突評価と衝突回避運用に関するソリューションの提供が想定される。

実施主体/
プログラム名

スターシグナル・ソリューションズ（日）

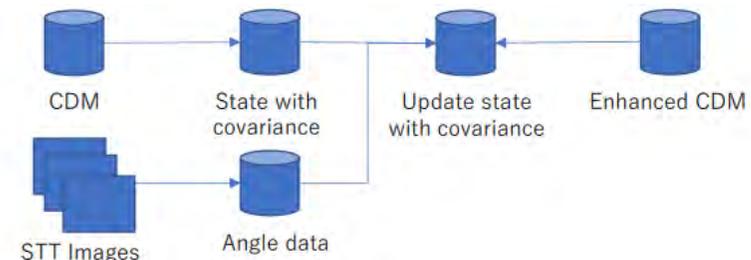
- スターシグナル・ソリューションズは、姿勢決定を目的として衛星に搭載されるスタートラッカー（SST）をデブリ等の観測に用い、その取得データと既存CDMを組み合わせることで、従来よりも高精度な CDMを生成する手法を開発している。
- 同社は、スタートラッカーの画像及び独自のアルゴリズムにより強化されたデブリ接近メッセージを用いたデブリ衝突評価と衝突回避運用のソリューションの提供を目指している。
- 今後、実際の宇宙ベースの観測データを用いて手法を検証する予定である。

メリット

- ・ 観測機会が多い（宇宙センサーとターゲットの相対位置による）
- ・ 宇宙センサーとして専用の衛星を打ち上げる必要がない。

デメリット

- ・ 画像をダウンロードするために、衛星搭載ソフトウェアの再プログラミングが必要となる可能性がある。
- ・ 撮像のためのSTTの設定が適切でない場合がある。
- ・ 地上観測に比べて観測時間が短い。

図 スタートラッカーを用いたSSAのメリット・デメリット¹⁾図 スターシグナル・ソリューションズのシステム概要²⁾図 データフローイメージ¹⁾

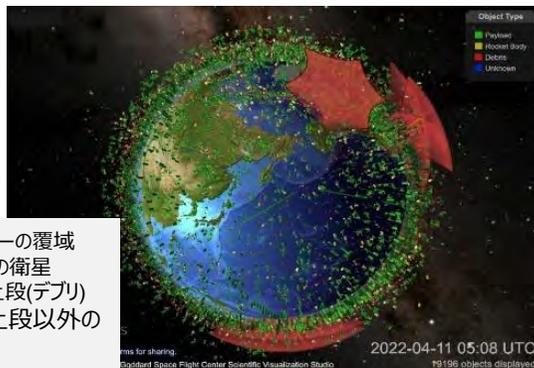
出所)

1. スペースデブリワークショップ（第10回）、スターシグナルソリューションズが取り組む接近情報の改良方法に関する概要
2. S-Booster 2021、スタートラッカーを用いた宇宙状況監視による衛星衝突回避SaaS

デブリ監視及び回避技術の調査分析 – 地上・衛星ベースの効率的な組み合わせ

03-T-014

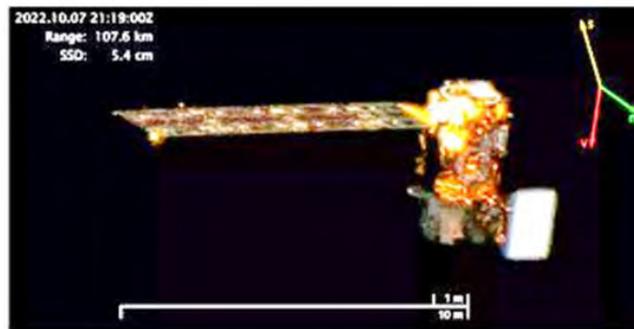
- デブリ監視、回避においては衛星ベースデータの利用はまだ初期段階
- 衛星搭載の光学カメラやスタートラッカーを利用したデータ収集をととして、対象の観測頻度が上がることによる的確な軌道決定、衝突回避が期待される



- ・赤エリア：地上レーダーの覆域
- ・緑色の点：運用中の衛星
- ・黄色の点：ロケット上段(デブリ)
- ・赤色の点：ロケット上段以外のデブリ

米LEO LABS社が提供する地上からのレーダー網からのデータ収集による道環境・物体の状態監視サービス

出典 <https://gizmodo.com/new-image-first-look-spacex-mini-starlink-orbit-1850209123>



Worldview-3衛星(米Maxar社)が、Landsat 8(NASA)の主に太陽電池パドル展開状態を約100kmから遠隔検査

出典 <https://www.space.com/maxar-satellite-photo-nasa-landsat-8>

特徴

- ・ コストメリット
- ・ 地上ベースの光学センサーに比べ、気象/大気条件が問題とならず、宇宙ベースの方が地上よりもセンサ感度が高くなる
- ・ より高頻度で詳細に監視ができる

考察

- ・ 衛星ベースの光学カメラなどによるデブリ監視はコストが高くなるが、衛星に搭載されているスタートラッカーを利用したデータ収集では、非常に大きなコスト性が期待される
- ・ ミッションによりどこまでの正確性が求められるかを考慮し判断される

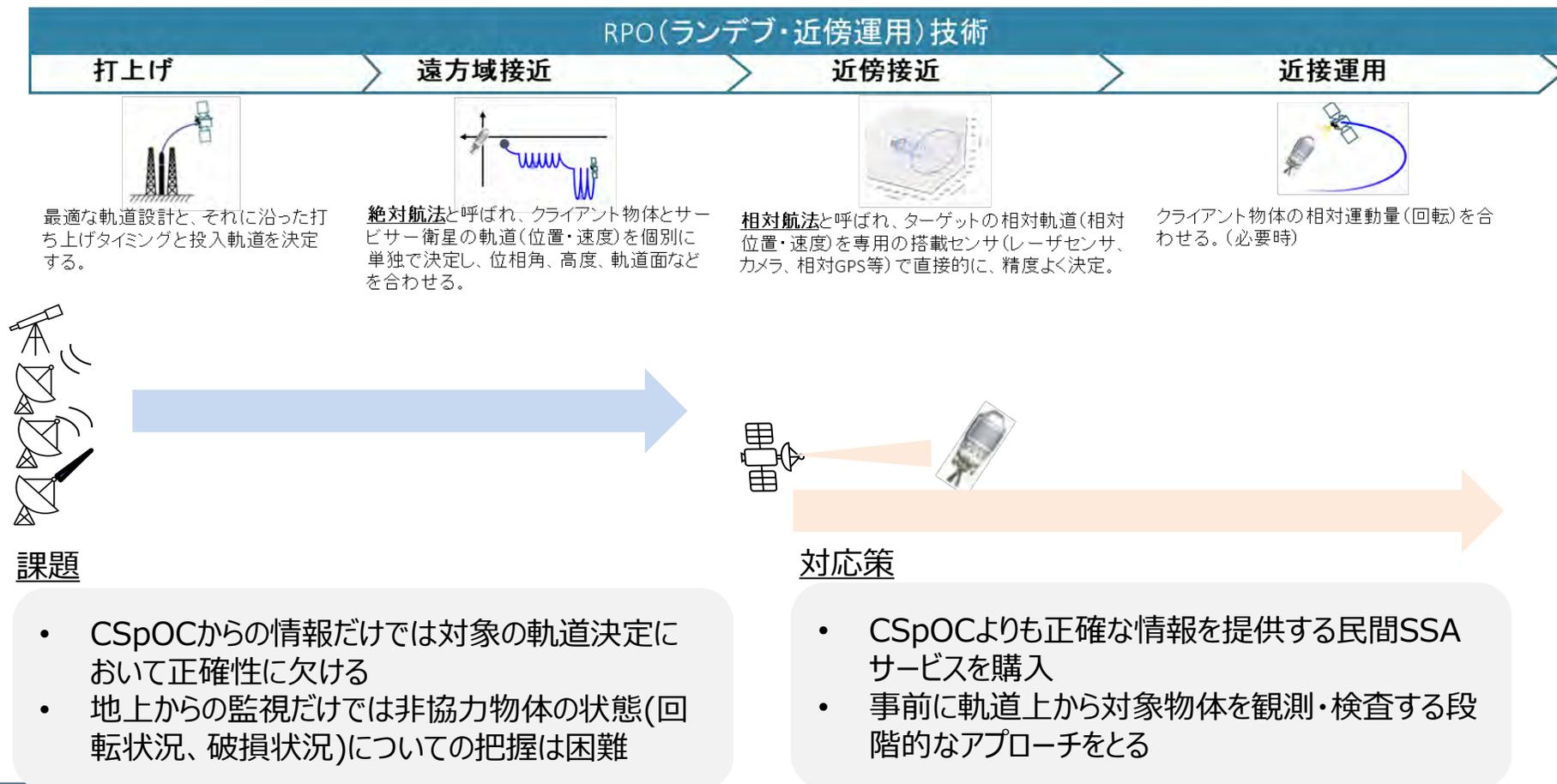
地上ベース
センサー

衛星ベース
センサー

(参考)デブリ監視及び回避技術の調査分析 –RPOにおけるセンサー利用–

23-003-T-014

- ユースケースに合わせて各センサーの特徴を考慮して必要なセンサーの組み合わせを考慮する
- 軌道上サービスにおいては絶対航法においては地上からのデータを中心に、近傍においては衛星自身のセンサーをもとに運用を実行している



デブリ回避技術の課題 – 事業者の改善に向けた取り組み

23-003-T-014

- デブリ回避技術において、システムに取り込む観測データの正確性、膨大なデータの処理、更に、回避の行動など運用における意思決定への支援に課題があると考えられる

デブリ監視/データ集積

デブリ回避/データ処理・解析（リスク分析）と意思決定（衛星運用）

ユーザの課題

- ✓ 正確な軌道決定や、運用計画立案に必要な情報が不足
- ✓ デブリ接近情報が不正確

- ✓ 不要なデータが混入しており、解析の妨げになっている
- ✓ データ量自体は膨大で処理が難しい
- ✓ 経済性とリスクに鑑みた最適運用の特定が困難

求められる改善

- システムに取り込むデータの正確性

- 迅速なデータ処理・解析
- 衛星事業者の意思決定を支援

対策案

- センサーの増加
- センサーの性能向上

- データ処理・解析における人的作業の最小化

デブリ回避技術の課題 – 事業者の改善に向けた取り組み

23-003-T-014

- データ集積においてはデブリ接近情報などの解析精度を向上させるために、地上のセンサー網を広げるだけでなく、軌道上からの物体監視と、特徴を活かしたセンサーの利用が進む

デブリ監視/データ集積

軌道上ベースの物体監視を進める主な企業

- Orbit (HEO) Robotics
- North Star (加)
- Dignatara
- Vyoma
- SCOUT

様々なセンサーの利用

- Leo Labs フェーズドアレイレーダー
 - 天候条件に左右されない
- Kratos 受動的なRFセンサー
 - 昼夜・天候に関わらずデータ取得
 - 軌道上で密集した物体追跡も可能とする

スタートラッカーの利用

- スターシグナルソリューションズ(日)
- D-Orbit(伊)

企業の取り組み

技術観点

- 衛星バス：機動性を有する衛星バス開発或いは標準バスの調達、燃料補給機能の有無 等
- 光学系：ジンバル駆動或いは固定光学系の新規開発
- 小型衛星活用：GEOのSDA衛星と連携する小型衛星（LEOからGEOを監視）開発検討
- 異種センサーの組合せ：光学、レーダー、レーザーを組合せることで監視精度向上に繋げる。
- 感度：光学素子高感度化
- 駆動性：光学系駆動部のモーター高出力化・制御性能向上
- 多波長化：レーダーの規模により周波数帯に幅（L～W帯）がある。米欧ではL/Ku、X/W等の組合せが存在。
- 走査性：熱伝導率や放熱性等に優れる次世代半導体を適用することでレーダー走査性向上

デブリ回避技術の課題 – 事業者の改善に向けた取り組み

23-003-T-014

- 人的作業の介在を最小化し、迅速なデータ処理・解析を試みている。
- インプットされたデータソースをクラウド上で統合・管理することで、衛星事業者による衝突回避判断を迅速・正確に実施できるように、視覚情報や推奨アクションを提供する動きが出てきている。

デブリ回避/データ処理・解析（リスク分析）と意思決定（衛星運用）

- ExoAnalytric
ExoAnalyticと呼ばれるデブリ衝突等に関するアラート及びレポートを自動生成。プロセスで発生する可能性のある人為的エラーを最小化。
- SCOUT Space（米）
衛星搭載センサーデータの統合やAI/MLに基づく物体認識の自律化、閉ループ光学ナビゲーションを開発
- 富士通
JAXA衛星運用者のデブリ回避対応に資するSSA解析システムを構築。観測計画の策定や観測データの処理等を自動化し、解析運用者の運用負荷軽減を図る
- LeoLabs
自社センサーとSSNセンサーデータを組合せてデータの精度を向上。センサーの取得データは、センサネットワーク側でエッジ処理を行った上で、クラウドに乗せる。
- Vyoma(独)
衛星上の光学センサーとMLを活用した自動化システムを組合せた軌道上決定や衝突回避サービス提供を想定。

技術観点

プラットフォーム化

- 各センサーデータの統合管理、データ処理、回避判断支援

自動化

- AI/ML等を用いた自律的な回避操作（衛星へのコマンド送信自動化）

回避システム高度化

- 自動回避システム（衝突リスクの自動評価）の研究開発を通じた、衛星運用者の回避判断に資するユーザビリティやアクセス性向上

企業の取り組み

2.1 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）

2.2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）

2.2.3 デブリ監視及び回避技術の事例調査

2.2.4 強み・弱み分析

2.2.5 戦略・研究開発計画

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

2.1 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）

2.2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）

2.2.3 デブリ監視及び回避技術の事例調査

2.2.4 強み・弱み分析

2.2.5 戦略・研究開発計画

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

デブリ監視における業界トレンドのまとめ

23-003-T-014

- デブリ監視はLEOを中心とした軌道上混雑悪化によるニーズの高まりに伴い、より正確なデブリ監視を行う必要性が生じており、それに対応するためにセンサの多様化・地理的配置拡大と衛星活用が進んでいる

環境変化

環境変化に伴うニーズの変化

ニーズの変化

- ✓ LEOコンステの急速な増加に伴う軌道上混雑の悪化
- ✓ 上記に伴う回避行動の増加

- ✓ LEOコンステにおいては、回避行動実施によるサービス一時停止などの機会損失と燃料消費による衛星寿命短縮がクリティカル化し、回避行動の合理化ニーズが増大
 →LEOにおいて、リスクとなりうる軌道上物体を網羅的に特定し、精度高く軌道を予測することが、運用合理化の前提となる

ニーズへの対応

求められる要件

LEOデブリ・物体の観測

- ✓ 今まであまり撮像されていなかったLEOにおける軌道状態を監視できること

デブリ軌道の正確な測定

- ✓ デブリの軌道精度を改善し、必要な回避行動を削減・合理化すること

軌道上デブリの網羅的特定

- ✓ より小さな物体や様々な物性の物体を漏れなく特定すること

技術的トレンド

① センサ種別の多様化

- ✓ 光学に加えて、レーダーやレーザーといったセンサも活用することで、撮像可能物体を拡張

② 地上センサの地理的配置拡大

- ✓ LEO観測では、既存のGEOとは異なる地理的なカバレッジが必要
- ✓ 複数点観測は軌道精度改善にも有効

③ 衛星センサの活用

- ✓ 様々なセンサを活用しても、地上センサだけでは撮像できない物体への対応が必要

デブリ監視における日本の強み・弱み

23-003-T-014

- 日本では米国との強固な連携体制を強みとして、安全保障中心に計画が進められているが、地上/衛星システムを統合した全体としての計画が不在であり、米国とのすみ分けなども考慮した開発戦略が必要か

① センサ種別の多様化

② 地上センサの地理的配置拡大

③ 衛星センサの活用

世界の動向

- ✓ 二波長や走査性向上に関するR&Dプログラム運用中（欧米）
- ✓ センサーを高出力化し、従来のSSAに加えて特にGEO物体対象のSDA能力を強化（米国DoD）

- ✓ カバレッジが不足しているLEOの小型デブリ（～10cm）を捕捉するために、LEO監視に特化したレーダーセンサーをグローバルに配備（米国/LeoLabs）

- ✓ 地上センサー補完のためにSSA衛星やホステッドペイロードを配備（米国DoD、中国、ロシア）
- ✓ 光学系小型化、低コストの監視手法の確立による軌道上SSA監視能力の向上（DoD）

日本の現状

強み

- ✓ 防衛省SSAレーザ測距を用いることで、LEOでの精度高い監視精度が期待
- ✓ 同省のSSAレーダーによりGEOでの物体監視も可能に

- ✓ 地上国内に光学・レーダーを有しており、自前でのGEO・LEOの物体監視が可能
- ✓ 米国との強固な連携によるデータ共有

- ✓ 今後、安全保障用途のSDA衛星配備により、軌道上での物体監視が可能となる
- ✓ 民間事業者でも先進的取り組みを行う事業者が存在

弱み

- ✓ 各分野での明確な開発計画が不在で、二波長/高走査性レーダーや、測距以外のレーザなどの研究開発が進んでいない

- ✓ 小型LEOデブリに関しては自前技術がなく、空白はLEOのデブリ状況について米国商用SSA事業者（LeoLabs）から調達

- ✓ センサーとしての衛星の数が少ない

デブリ回避における業界トレンドのまとめ

23-003-T-014

- デブリ回避においては、マルチソースでのデータ蓄積に加えて、人間の介在を減少させる自律化と、人間の一定の介在を前提としたユーザビリティ向上の方向性での技術開発が進められている

ニーズの変化

- ✓ LEOコンステにおいては、回避行動実施によるサービス一時停止などの機会損失と燃料消費による衛星寿命短縮がクリティカル化し、回避行動の合理化ニーズが増大（※ニーズは監視・回避で共通）
- ➔ 最適運用のためにデブリ回避における各フェイズでの課題に対応する必要がある

ニーズへの対応

デブリ監視/データ集積

デブリ回避/データ処理・解析（リスク分析）

ユーザの課題

- ✓ 正確な軌道決定や、運用計画立案のに必要な情報が不足
- ✓ デブリ接近情報が不正確

- ✓ 不要なデータが混入しており、解析の妨げになっている
- ✓ データ量自体は膨大で取扱いが難しい
- ✓ 経済性とリスクに鑑みた最適運用の特定が困難

技術的トレンド

- ① **マルチソースでのデータ集積**
- ✓ 軍事用途のセンサから取得したデータに加えて、天文台や商用プレイヤなどのデータを統合
 - ✓ 自国だけでなく、国際連携でデータを蓄積

- ② **一気通貫の自動・自律化、意思決定のサポート**
- ✓ クラウド上でデータを一元的に管理・分析し、衛星へのコマンド送信まで自律的に実施
 - ✓ リスクに無関係な不要データを自動でカット
 - ✓ 視覚的な状況表示やマヌーバ計画オプションを提示して意思決定を支援

デブリ回避における日本の強み・弱み

23-003-T-014

- 日本では米国との強固な連携体制を強みとして、安全保障、JAXA、民間それぞれで検討が進められている。一方、全体を統合した開発戦略は不在に見受けられる

①

マルチソースでのデータ集積

- ✓ 様々なセグメントのデータソース (DoD、民間、学術など) の取り込み・統合 (米国)
- ✓ 自国のSSAシステムその他、国際的に連携したデータソースを組み合わせて利用 (中露)

②

一気通貫の自動・自律化、意思決定のサポート

- ✓ データ処理・解析～コマンド送信まで自動化を指向 (欧州)
- ✓ インプットデータをクラウド上で統合・管理することで、高度な解析・運用計画まで自動化 (米国)
- ✓ 衛星事業者による衝突回避判断を迅速・正確に実施できるように、視覚情報や推奨アクションを提供 (LeoLab等の商用SSA事業者)

世界の動向

日本の現状

強み

- ✓ 国内SSAセンサ網に加えて、米国CSpOCのデータも利用可能

- ✓ JAXA衛星運用者のデブリ回避対応に資するSSA解析システムを構築し、観測計画の策定等を一部自動化
- ✓ 軌道力学専門家なしでもデブリ回避策を視覚的に短時間で立案可能となるリスク回避支援ツールRABBITをJAXAが開発・無償配布

弱み

- ✓ 米国のように、様々なセグメントのデータソース (安全保障、民間、学術等) を一元的に取り込む動きが始まったばかり

- ✓ クラウドの活用等による統合的プラットフォームに関する構想は今のところない
- ✓ 具体的なマヌーバ計画を能動的に提案する機能はまだ実現できていない

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.2.1 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ監視）

2.2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析（デブリ回避）

2.2.3 デブリ監視及び回避技術の事例調査

2.2.4 強み・弱み分析

2.2.5 戦略・研究開発計画

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

デブリ監視及び回避技術 戦略・研究開発計画立案

23-003-T-014

- 軌道混雑で回避行動が必要となる中、安全で効率的にデブリ回避を実現するシステムの開発をすすめる
- 監視・回避の基本となるデータの収集においては、米国との強固な関係を基軸とし、地理的特性による日本独自のデータ収集による相互関係を構築する
- デブリ監視・回避技術は、軌道上の状態把握と同様に宇宙利用の基本的なインフラであり、安全保障の観点からも重要であり、日本独自の情報を介した相互関係の維持に必要な技術の確保を目指す。

| デブリ監視 / データ集積 | | デブリ回避/データ処理・解析(リスク分析) | |
|---|---|-----------------------|--|
| 技術 観点 | <p>軌道決定の高度化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ リスクとなりうる軌道上物体を特定し、精度高く軌道を決定することが回避行動合理化の前提となる | 技術 観点 | <p>スムーズで効率的にデブリを回避できるシステム開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 人間による情報の解析と処理に限度がある為、自動化・自立化による、スムーズで経済性とリスクに鑑みた最適な回避運用を実現する |
| 技術 以外 | <p>国際的な連携</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 日本だけではデータの収集に限りがある為 CSpOC、TraCSS、海外企業から安定的に入手する | 技術 以外 | <p>関係各所の連携</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 収集したデータと、各企業が保有する技術を活かす為、防衛省SSAシステム、JAXAの監視能力、各企業の技術を統合し、合理的な回避運用を実現 |
| 軌道上環境と衝突回避の必要性に関する認識の向上・啓発と既存技術の普及 | | | |
| <p>企業の技術・包括的なサービスを提供する企業の育成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 戦略的な投資、援助 | | | |

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

現状

- 軌道環境の悪化が進み、持続的な宇宙利用の実現の為、デブリ化の低減、デブリの除去技術の開発が求められる
- PMDにおける自立的な軌道離脱装置は、米欧を中心に技術成熟がなされている。FCCの新ルール導入を受け、LEO衛星事業者が自立的な軌道離脱装置や軌道上サービスによる外部サービスを採用するかについて、今後の動きが注目される。各国で2026年ころからデブリ除去の実証が行われる。
- 我が国のCRD2では環境負荷が大きいとされる3tのロケット上段を除去する。ここで実証された技術は実用に直結するものであり、日本の強みとなる。

分析

- 運用終了時のデブリ化の防止については、商業化を目指す。一方、既存デブリの除去については政府の継続的な除去活動が望まれる。
- デブリ除去サービスにおいては技術的な標準化には至っていない。まだ標準化が為されていない中で日本発の標準化を得ることが重要。運用・安全管理については、デブリ除去をより高い技術レベルで実証し、ルール・標準とする事で、確実に安全なサービスを拡大する。
- 我が国ではCRD2で獲得した進んだ技術をもとに、実証を積みかさねる。更に、開発した技術をルールへ埋め込みデファクト化を進めることで、我が国がデブリ除去のビジネスと、スペースデブリ低減・改善の議論の中心的な役割を果たしていく必要があるのではないかと。

2. 調査結果の御報告

2.1. 令和4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 デブリ監視及び回避技術の調査分析

2.3 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3.1 デブリ除去サービス技術の調査分析

2.3.2 強み・弱み分析

2.3.3 戦略・研究開発計画

2.4 推進薬補給技術の調査分析

2.5 軌道上製造技術の調査分析

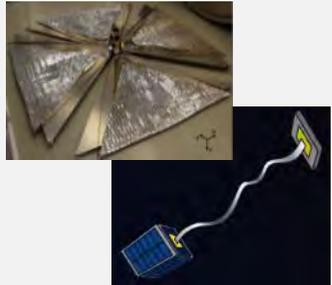
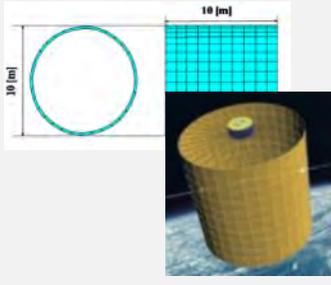
2.6 COTSの利用に関する調査分析

2.7 官民連携による研究開発に関する調査分析

デブリ除去サービス技術に関する調査スコープ

23-003-T-014

本調査では、デブリ発生防止の観点でのPMD（自律的な軌道離脱技術）及びADR（能動的なデブリ除去）を対象とした調査を行う。なお、サービサーを介したミッション運用後の廃棄処理はADRに含める。

| 自律的な軌道離脱 | | サービサーを介したデブリ除去 | |
|---|-----|---|-----|
| 受動的 | 能動的 | 受動的 | 能動的 |
| PMD Post-mission Disposal | | PDR Passive Debris Removal | |
| <ul style="list-style-type: none"> 衛星に搭載された受動的・自律的な軌道離脱装置（膜、テザー等）を用いた軌道離脱を行う。 衛星に搭載された推進系を用いて能動的・自律的な軌道離脱を行う。 | | <ul style="list-style-type: none"> 展開機構等を有するデブリ除去衛星を用いて、展開部へ受動的にデブリを衝突させることで微小デブリ等を除去する。 ロボットアームやレーザー、テザー等が搭載されたデブリ除去衛星を用いて、既存デブリを能動的に捕獲（或いは再配置）・除去する。 サービサーを介したミッション運用後の廃棄処理含む。 | |
|  | |  | |
| 図 軌道離脱システム（膜・テザーの例） ^{[1][2]} | | 図 PDRの例（円筒形展開機構等） ^{[5][6]} | |
| 調査対象 | | 調査対象 | |

出所)

1. NASA, [13.0 Deorbit Systems](#)
2. PR TIMES, [EDT（導電性テザー）を用いたデブリ対策装置](#)

3. Astroscale, [ELSA-d](#)
4. Astroscale, [ドッキングプレート](#)
5. 九州大学, IHI, JAXA, [Passive Orbital Debris Removal](#)

6. IHI, 九州大学, [低密度物質を用いたスペースデブリの除去方法の研究](#)
7. Astroscale, [COSMIC](#)、8. ESA, [OlaMOI](#)
9. JAXA, [HTV](#)

デブリ除去サービス技術の調査分析に関する動向分析結果

23-003-T-014

- PMDでは、諸外国ともに膜面方式を中心としたPMD技術の成熟が見られる。
- ADRは、ドッキングプレートを介する準協力物体へのRPO技術・捕獲技術実証等を通じ、実用化・商業化への具体性が示されている。また、既存デブリ（非協力物体）に対する軌道上実証の動きが加速している中で、ロボットアーム方式による複数の計画が予定されている。その他、ネット・鋸方式での部分的実証やレーザー方式の基礎的研究が実施されている。

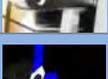
| | | 基礎研究 | 応用研究・開発 | 軌道上実証 | 実用化・商業化 | |
|------------------------------|----------------------------------|---------------|-------------------------------------|--|---------------------------------|-------|
| PMD 自律的 軌道離脱 | 膜面 | | アクセルスペース（日） | | NASA、米国企業他 ESA、欧州企業他 JAXA | |
| | テザー、他 | | ALE/BULL（日） | Tethers Unlimited（日） | 技術制成熟した状態 | |
| ADR サービス者を介した能動的 デブリ除去 | 準協力物体 (新規衛星) ドッキング プレート | | Altius（米）詳細不明 | Astroscale（日） | RPO・捕獲技術等実証 | |
| | | ロボットアーム 簡易 | ロボティクス技術の獲得が必須 ロボットアーム方式にバリエーション | 川崎重工業（日） Astroscale（日） Clearspace（欧） Kall Morris（米） | 邀電（中）詳細不詳 | |
| | 非協力物体 (デブリ等) ネット・鋸 | | | | RemoveDEBRIS（欧） | 部分的実証 |
| | | レーザー ビーム | | スカパーJSAT（日） ESA（欧） コロラド大学（米） | | |

基礎研究が中心

デブリ除去サービス技術に関する長所・短所分析結果

23-003-T-014

- PMDについて、自律的な軌道離脱を可能とするためサービス者の開発が不要。他方、質量増加やLEO向けに限定。
- ADRでは、準協力物体ではドッキングプレート方式が利用されるものの、新規衛星に限定される。非協力物体に対して、安全性や汎用性、対象形状等の特徴や方式（ロボットアーム、ネット、鋳、レーザーなど）に応じて長短が異なる。
→日本では、PMDやドッキングプレート、伸展ブームによる実績があり、今後ロボットアームを用いたデブリ除去を予定。なお、複数あるロボットアーム方式の内、諸外国と比べて機構をシンプル化することで、安全性や汎用性を高めている。

| デブリ除去サービス（方式） | | 長所 | 短所 | 日本の状況 |
|--|---|--|---|---|
| PMD | 軌道離脱装置  | <ul style="list-style-type: none"> ● 軌道離脱装置を衛星に搭載することで、<u>自律的な軌道離脱</u>が可能（サービス者の利用が不要） | <ul style="list-style-type: none"> ● 軌道離脱装置による<u>衛星質量の増加</u>。 ● 抗力による減速及び大気圏突入によるデブリ除去。LEO上でのデブリが対象 | <ul style="list-style-type: none"> ● 過去JAXAによる<u>技術成熟</u>。アクセルスペース社により<u>軌道離脱装置の実証を予定</u> |
| | ADR | ドッキングプレート  | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>準協力物体</u>へのドッキングのため、非協力物体よりもRPOが安全に実施可能 ● 軌道離脱装置よりも比較的軽量 | <ul style="list-style-type: none"> ● クライアント衛星へのドッキングプレートの装備が必要となるため、<u>新規衛星のみが対象</u>（既存デブリ・衛星は対象外） |
| ロボットアーム | 例：伸展ブーム  | <ul style="list-style-type: none"> ● 対象に応じて<u>地上試験が実施可能</u> ● <u>正確な位置・姿勢制御が不要</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>対象物体に引っ掛ける場所が必要</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● 他国に先駆けたJAXAの実証や直近の川崎重工業による実証 →<u>部分的実証に留まる</u> |
| | 例：シンプルなロボットアーム・エンドエフェクター  | <ul style="list-style-type: none"> ● 複雑なロボットアーム・ハンド駆動を<u>シンプル化</u>することで、<u>安全性や汎用性を高める</u> ● ロボティクス機構の<u>軽量化・コスト低減</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● 既存デブリ・衛星の<u>特定箇所（ローンチアダプターリング等）を把持する必要</u>がある。 ● <u>正確な位置・姿勢制御必要</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● アストロスケール社のコンセプトは、シンプルなアーム・ハンド機構を採用と推測。<u>今後実証予定</u>。 |
| | 例：複数のアーム・挟み込み  | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>形状・姿勢を問わない</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>複雑なアーム・ハンド機構の開発が必要</u> ● <u>駆動部品が多く、制御が複雑化</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● 日本では想定されていない |
| | 例：間接式エンドエフェクター・粘着  | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>形状・姿勢を問わない</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>凹凸面、脆い表面素材</u>に不向き（間接式エンドエフェクターを用いることでカバー） | <ul style="list-style-type: none"> ● 日本では想定されていない |
| ネット  | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>形状・姿勢を問わない</u> ● <u>一定距離</u>から操作可能 ● <u>正確な位置・姿勢制御不要</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● 地上試験困難。<u>ネット放出後に繰り返し対応が困難</u>。捕獲中・後の衛星側制御 | <ul style="list-style-type: none"> ● 日本では想定されていない | |
| 鋳  | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>一定距離</u>から操作可能 ● <u>正確な位置・姿勢制御不要</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>鋳射出の反力、打込み方向に精度必要</u> ● <u>破片発生や推進タンク破損時の爆発リスク</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● 日本では想定されていない | |
| レーザー、ビーム  | <ul style="list-style-type: none"> ● <u>一定距離</u>から照射可能 ● 複数のデブリに対するレーザー照射 | <ul style="list-style-type: none"> ● 高出力レーザー照射のための<u>衛星光学系の大型化や熱管理</u>。一度の照射で数mm/s程度のΔVのため、<u>迅速なミッション遂行は想定されない</u> | <ul style="list-style-type: none"> ● スカパーJSAT社により衛星ベースのレーザーを検討中 →<u>他国に先駆けて構想を提示</u> | |

デブリ除去サービス技術に関する動向分析 (1/2)

23-003-T-014

受動的

能動的

PMDにおける受動的な軌道離脱装置は、米欧を中心に技術成熟（TRL7～9）がなされている。FCCの新ルール導入を受け、LEO衛星事業者が受動的離脱装置 **或いは軌道上サービス衛星による外部サービスを採用するかについて、今後の動きに注視が必要となる。また、中国では、ロケット上段のペイロードアダプターへの軌道離脱装置搭載の動きも出てきている。**

本ページでは、「★」の記載がある事例のみ一件一葉形式にて詳細を後述

| # | 装置名※1 | 製造主体 | 方式※2 | 搭載衛星 (衛星質量kg) | 装置質量 (kg) | 打上年 | 展開年 | TRL 推定 | サービス 費用※3 | サービス導入課題 (特徴を中心に例示) | |
|----|-------|------------------|-----------------------------------|------------------|--|-------|------------------------------|------------------------------|--------------|------------------------|---|
| 1 | PMD | NanoSail-D2 | NASA (米) | 膜面 | FASTSAT (4.2kg) | N/A | 2010 | 2011 | 7-9 | 不詳 | <p>衛星質量の増加</p> <ul style="list-style-type: none"> 高い技術成熟度の割に、PMD実施率が低い背景として、衛星質量の増加が推測される。 <p>新ルールへの適用</p> <ul style="list-style-type: none"> 衛星事業者は、LEO衛星が新しいFCCの5年ルールを満たさない（再突入に5年以上かかる）場合、受動的な離脱システム（膜面等）または外部の能動的な軌道離脱サービスを利用する必要がある。 |
| 2 | PMD | Drag-Net | MMA Design (米) | 膜面 | ORS-3 (100kg) | 2.8 | 2016 | 2016 | 7-9 | 不詳 | |
| 3 | PMD | Icarus-1 | Cranfield Aerospace Solutions (英) | 膜面 | TechDemoSat-1 (157kg) | 3.5 | 2014 | 2019 | 7-9 | 不詳 | |
| 4 | PMD | Icarus-3 | | 膜面 | Carbonite-1 (80kg) | 2.3 | 2015 | 未定 | 7-9 | 不詳 | |
| 5 | PMD | DOM | | 膜面 | ESEO (45kg) | 0.5 | 2015 | 未定 | 7-9 | 不詳 | |
| 6 | PMD | DragSail | Surrey Space Center (英) | 膜面 | inflateSail (3.2kg) | N/A | 2017 | 2017 | 7-9 | 不詳 | |
| 7 | PMD | Exo-Brake | NASA (米) | パラシュート | TES-5 (3.4kg) TES-7 (3.0kg) TES-13 (4.0kg) TES-15 (4.5kg) | 不詳 | 2014 2021 2022 2022 | 2015 2021 2022 2022 | 7-9 | 不詳 | |
| 8 | PMD | RemoveDEBRIS | Surrey Space Center (英) | 膜面 | RemoveDEBRIS (100kg) | N/A | 2018 | 2019 | 7-8 | 不詳 | |
| 9 | PMD | CanX-7 | UTIAS-SFL (加) | 膜面 | 3U Cubesat (3.6kg) | 0.8 | 2016 | 2017 | 7-9 | 不詳 | |
| 10 | PMD | 名称不詳 | 中国 | 膜面 | 長征2号ロケット上段ペイロードアダプター (300kg) | 不詳 | 2022 | 2022 | 7-8 | 不詳 | |
| 11 | PMD | ADEO-N ★ | ESA (欧) | 膜面 | ION SCV003 | 1.0 | 2021 | 2022 | 7-9 | €2.4M | |
| 12 | PMD | D-SAIL ★ | アクセルスペース (日) | 膜面 | 革新的衛星技術実証3号機 (110kg) | 1.9 | 未定 | 未定 | 3-6 | 不詳 | |
| 13 | PMD | Terminator Tape★ | Tethers Unlimited (米) | テザー | Prox-1 (71kg) | 0.808 | 2019 | 2019 | 7-9 | 不詳 | |
| 14 | PMD | EDT ★ | ALE (日) ※BULLによる事業継承 | テザー | 不詳 | 不詳 | 未定 | 未定 | 3-6 | 数十万～ 数千万円 | |

※1：#1～#9の比較結果（装置名、製造主体、方式、搭載衛星、装置質量、打上年、展開年、TRL）は、NASA公開情報^[1]に基づきKPMG作成。#9～#13の詳細は、次項以降を参照。

※2：「Drag Sail」を便宜的に「膜面」として略している。

※3：公開情報ではサービス費用に係る情報入手は難しいため、政府・宇宙機関と事業者の契約金等の規模感をリサーチ。

出所)

1. NASA, <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/deorbit-systems>

デブリ除去サービス技術に関する動向分析 (2/2)

23-003-T-014

受動的

能動的

EOLではドッキングプレート方式が主流となっている。Astroscaleを中心にRPO技術獲得が進み、複数の衛星に対するEOLサービスが予定されている。また、ADRでは、ロボットアーム方式が主流となっている。米欧各社は、RPO技術獲得に加え、独自のロボティクス技術の実証や燃料補給機能の具備を想定。レーザー方式は複数構想があるものの研究段階にある。

| # | ミッション名 | 事業主体 (オーナー) | 事業主体 (メーカー) | 捕獲機 | 除去方式 | TRL 推定 | 打上 | サービス費用 ※1 | サービス導入課題 (特徴を中心に例示) | |
|----|--------|----------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------|-----|---------------------|--------------------------------|---|
| 15 | ADR | ELSA-d | Astroscale | Astroscale | ELSA-d | ドッキングプレート | 7-8 | 2021 | 不詳 | ・ 模擬デブリの自律的な捕獲技術 |
| 16 | ADR | Sunrise | ESA/ OneWeb | Astroscale | ELSA-M | ドッキングプレート | 3-6 | 2024 | €14.8M プログラム資金 | ・ 複数の連続したデブリ除去技術、対象物体が回転した状態での捕獲技術等 |
| 17 | ADR | 名称不明 | Altius | Altius | 不詳 | ドッキングプレート | 3-6 | 2022 | 不詳 | ・ 300以上の搭載実績が謳われるものの、実証実績は不詳 |
| 18 | ADR | CRD2 | JAXA | Astroscale | ADRAS-J (フェーズ1) | 接触式 (詳細方式不詳) | 3-6 | 2023 | 145億円 文部科学省予算 | ・ 非協力物体への接近、近傍制御・映像取得技術、デブリ捕獲技術 |
| 19 | ADR | COSMIC | UKSA | Astroscale | 不詳 | ロボットアーム | 3-6 | 2026 | €2.4M UKSA資金 | ・ ロボットアームを用いた能動的なデブリ捕獲技術 |
| 20 | ADR | ADRIOS | ESA | ClearSpace | ClearSpace-1 | ロボットアーム | 3-6 | 2026 | €86M ESA資金 | ・ 4つのアームを用いた能動的デブリ捕獲技術、燃料補給機能 (詳細不詳) |
| 21 | ADR | Orbital Prime | 米国宇宙軍 | Kall Morris | MK1 Laelaps | ロボットアーム | 3-6 | 2025- 2026 実証 | \$0.75M Orbital Prime 資金 | ・ 関節式エンドエフェクター実証、対象物体が回転した状態での捕獲技術実証 ・ 燃料補給機能 (詳細不詳) |
| 22 | ADR | DRUMS | 川崎重工業 | 川崎重工業 | DRUMS | 伸展ブーム (通電性) | 3-6 | 2021 | 不詳 | ・ 対象物体への接近、近傍制御・映像取得技術、伸展式テザーによる捕獲技術 |
| 23 | ADR | RemoveDEBRIS | EU | Surrey Space Center (英) | Remove DEBRIS | ネット | 7-8 | 2018 | 不詳 | ・ 対象物体の近接距離からの捕獲、軌道離脱 |
| 24 | ADR | 名称不明 | スカパーJSAT | スカパーJSAT | | レーザー(衛星) | 1-2 | - | 不詳 | ・ 高出力レーザー開発、レーザー照射精度等 |
| 25 | ADR | OlaMoT | ESA | Thales | OlaMoT衛星 | レーザー(衛星) | 1-2 | - | 不詳 (ESAプログラム) | ・ 高出力レーザー開発、大型光学系搭載のための衛星構造、高精度デブリ検出・追跡 等 |
| 26 | ADR | LARAMOTIONS | ESA | DLR | - | レーザー(地上) | 1-2 | - | 不詳 (ESAプログラム) | ・ レーザー出力損失、高精度追跡・検出 |
| 27 | ADR | Space Tractor | コロラド大学 | コロラド大学 | Space Tractor | 電子ビーム(衛星) | 1-2 | - | 不詳 | ・ 軌道上でのビーム照射精度 |
| 28 | ADR | 名称不明 | Orbit Guardians | Orbit Guardians | 不詳 | 伸展ブーム (推定) | 1-2 | - | 不詳 | ・ 複数の連続したデブリ除去技術、対象物体が回転した状態での捕獲技術等 |

※1：公開情報ではサービス費用に係る情報入手は難しいため、政府・宇宙機関と事業者の契約金等の規模感をリサーチ。

【参考】PDRの構想

23-003-T-014

受動的

能動的

PDRは、デブリ除去衛星から構造物を展開し、構造物に衝突したデブリを受動的に捕獲やデブリを減速させるコンセプトである。過去30年程度にわたりコンセプトが検討させているものの、大きな進展はない状況。

参考1 : NASA

- NASAでは、「Sweeper」として、PDRのコンセプトを一般的な観点で紹介している。
 - 衛星バスに取付られた大きな薄膜を用いて、小さなデブリと衝突・速度低下させ、破片が急速に脱離するようにする。
 - 捕獲方式は、デブリを展開構造内で直接捕捉する、デブリが展開構造内を通過する際にデブリを減速させる、デブリが展開構造内を通過する際にデブリを分断・粉砕する等である。

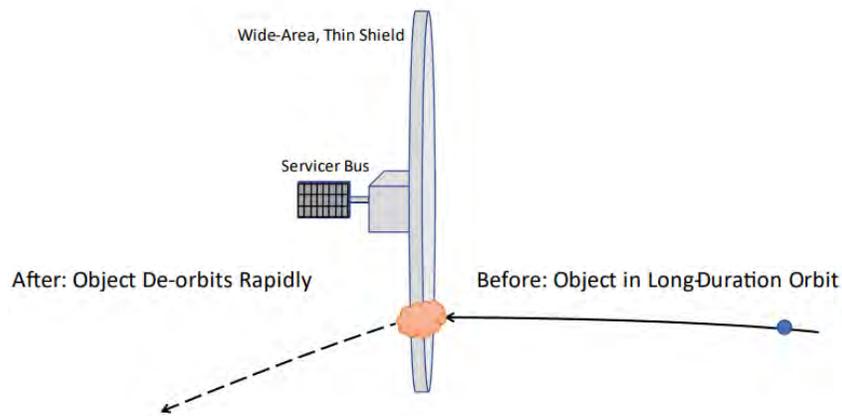


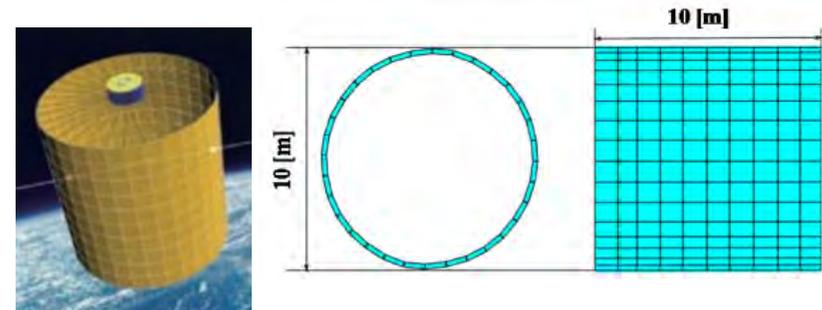
図 Sweeperのイメージ[1]

出所)

1. NASA, [Cost and Benefit Analysis of Orbital Debris Remediation](#)

参考2 : 九州大学、IHI、JAXA

- 九州大学及びIHI、JAXAは、円筒形デブリ除去衛星の実現性検討を実施。
 - 円筒形の側面には、デブリを受動的に捕獲するためのエアロゲルを用いている。



| | |
|----|--|
| 形状 | 円筒形型（直径10m, 高さ10m, 厚さ0.1m※） ※エアロゲルを使用 |
| 質量 | エアロゲル 640kg, バス部 360kg |
| 軌道 | SSO, 800km, 98.6 deg |

図 大型円筒形デブリ除去のコンセプト[2][3]

2. 九州大学, IHI, JAXA, [Passive Orbital Debris Removal Using Special Density Materials](#)
3. 九州大学, IHI, [低密度物質を用いたスペースデブリの除去方法の研究](#)

【参考】技術成熟度（TRL）の定義

23-003-T-014

技術的動向を把握するために、JAXA殿のTRL定義を踏まえて各ミッションのTRLレベルの識別を行う。
 （但し調査対象がJAXA基準に基づくTRL定義を公表していない場合は、JAXA TRL運用ガイドラインを踏まえ当社で推定）

JAXA TRL運用ガイドラインを踏まえたTRL推定の考え方

| TRL | JAXAの定義 ^[1] | 各TRLレベルの定義区分の考え方の補足 ^[1] (機器・コンポーネント等を評価対象とする場合) | | | | 左記ガイドラインを踏まえたTRLの推定 |
|-----|---|---|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| | | 模擬度 (Fidelity) | 環境レベル | 検証コンフィグレーション | 実証レベル/ プロセス | |
| 9 | 対象の実際のモデルが軌道上運用を通じて所期の寿命まで実証されること『フライト・ブルーブン』 | 実際のモデル (PFM, FM) | 実際にライフサイクルに亘って経験する環境 | 最終システムコンフィギュレーション | 宇宙機の寿命時 | 実用化・商用化 → TRL 9 |
| 8 | 対象の実際のモデルのライフサイクルに亘って経験する環境での地上試験（システムPFT又はAT）を通じた『フライト認定』 | 実際のモデル (PFM, FM) | ライフサイクルに亘って経験するシステム環境 | 最終システムコンフィギュレーション | システムPFT又はAT完了時 | |
| 7 | 対象の認定モデルのライフサイクルに亘って経験する環境を包含し適切なマージンを有した環境での地上試験（システムQT）を通じた実証 | 認定モデル (PM, EQM, PFM) | 適切なマージンを有したシステム環境 | システムPMコンフィギュレーション | システムQT完了時 | 軌道上実証 → TRL 7-8 |
| 6 | 対象の認定モデルの相当環境での地上試験（QT又はPFT）を通じた妥当性（有効性）確認 | 認定モデル (PM, EQM, PFM) | 相当環境 | 機器単体 | 機器QT又はPFT完了時 | |
| 5 | 対象のエンジニアリングモデル（EM）の相当環境での妥当性（有効性）確認 | エンジニアリングモデル（EM） | 相当環境 | 機器単体 | EM開発試験での妥当性確認の完了時 | 応用研究・開発 → TRL 3-6 |
| 4 | 対象のブレッドボードモデル（BBM）の実験室環境での妥当性（有効性）確認 | ブレッドボードモデル（BBM） | 実験室環境 | 機器単体 | BBM 試作試験での妥当性確認の完了時 | |
| 3 | クリティカル機能や特性の分析的及び実験的なコンセプト証明 | | | N/A | | 基礎研究 → TRL 1-2 |
| 2 | テクノロジーコンセプトやアプリケーションの明確化 | | | N/A | | |
| 1 | 基本原理の観察と報告 | | | N/A | | |

出所：JAXA, https://www.mext.go.jp/kaigisiryoy/content/20211224-mxt_uchukai01-000019713_2.pdf

デブリ除去サービス技術に関する個別事例（1/19）

23-003-T-014

- HPS GmbHは、衛星運用終了後に自律的に軌道離脱を行うための「帆」の開発・実証を成功させている。
- 小型から大型までの衛星に幅広く対応する製品ラインナップを設け、商用ベースでの利用を進めている。

| | | | | |
|--------|--|---------|---------|---------------|
| ミッション名 | The Drag Augmentation Deorbiting System (ADEO) | 実施主体 | オーナー | ESA GSTPプログラム |
| | | | メーカー | HPS GmbH（独） |
| TRL | 8~9（実用化・商用化） | デブリ除去方式 | PMD（膜面） | |

- ESA GSTPプログラムの下で、HPS GmbHは、自律的な軌道離脱を行うための「帆」（ADEO）を開発し、当該システムの軌道上実証を成功させた。^[1]
 - 帆を展開することで、衛星の軌道高度の減衰を促し、受動的に軌道離脱する方法を提供する。^[2]
 - ADEOは、D-OrbitのION衛星に搭載され、2022年に軌道上での帆の展開が確認された。なお、ESA及び同社は過去に複数回の実証を成功させている。ADEO-1（2014-2017）、ADEO-N1（2018-2019）、ADEO-N（2019-2020）、ADEO-N2（2021）^[3]
- 同社は、搭載を想定する衛星サイズ別にADEOの製品ラインナップを準備しており、同社サイトからADEO搭載に関わる見積依頼をすることができる。^[2]
 - なお、サイトにおいて、ADEOに関するシステムは、推進力で動作する能動的な（軌道離脱）システムよりもコストが低くなるとしているものの、価格詳細は公開されていない。報道によると、HPS GmbHは、ESAからADEO-Mの開発に対して€2.4Mの資金提供を受けている。^[4]

ADEOの製品ラインナップ（HPS GmbH）

| | ADEO-N | ADEO-M | ADEO-L |
|------|--------------------------|--------------------------------|--|
| 対象衛星 | 1kg~100kg | 対象衛星 ADEO-NとADEO-Lの 中間 | 対象衛星 100kg~2,000kg |
| 展開状態 | 1.5~5m ² | 展開状態 5~25m ² | 展開状態 25~100m ² (カスタム可能) |
| 収納状態 | 10cm×10cm× 6cm(~10cm) | 収納状態 個々のデザインに合わせて カスタマイズ | 収納状態 430cm×430cm× 180cm |
| 総質量 | 1kg | 総質量 | 9-14kg |

図 ADEOの製品ラインナップ^[1]図 展開された帆の様子^[1]

出所)

1. ESA, [Successful In-flight Demonstration of the ADEO Braking Sail](#)
2. HPS GmbH, [ADEO](#)
3. HPS GmbH, [2021 ADEO-N Clean Space Industrial Days](#)
4. Astrodrom, [HPS acquires 2.4 million euros for ADEO M de-orbit system](#)