

**宇宙技術戦略(衛星、分野共通技術)
令和7年度改訂に向けた検討資料**

宇宙技術戦略
(令和7年度改訂)

内閣府宇宙開発戦略推進事務局
令和8年●月●日

宇宙技術戦略

基本的考え方

(1) 策定の趣旨

「宇宙基本計画」(令和5年6月13日閣議決定)に基づき、世界の技術開発トレンドやユーザーニーズの継続的な調査分析を踏まえ、安全保障・民生分野において横断的に、我が国の勝ち筋を見据えながら、我が国が開発を進めるべき技術を見極め、その開発のタイムラインを示した技術ロードマップを含んだ「宇宙技術戦略」を策定した。

本戦略においては、「衛星」、「宇宙科学・探査」、「宇宙輸送」、加えて「分野共通技術」の分野について、安全保障や宇宙科学・探査ミッション、商業ミッション、また、それらミッションに実装する前段階の先端・基盤技術開発に加え、民間事業者を主体とした商業化に向けた開発支援について、開発の進め方や重要性を検討し、可能な範囲で示した。関係省庁における技術開発予算に加え、10年間で総額1兆円規模の支援を行うことを目指す「宇宙戦略基金¹」を含め、関係省庁・機関²が今後の予算要求、執行において参照していくとともに、最新の状況を踏まえたローリング³を行っていく。

(2) 重要技術の評価軸

開発の道筋を検討するに当たって、必要な宇宙活動を自前で行うことができる能力を保持(「自立性」の確保)するため、我が国の技術的優位性の強化に資する技術開発や、経済安全保障環境の変化を踏まえ、我が国の宇宙活動を支えるサプライチェーンが断絶するリスクを念頭に置いたサプライチェーンの強化(サプライチェーンの「自律性」の確保)に資する技術開発等を推進していく視点が重要となる。

このため、各分野において以下の評価軸に基づき、技術開発の重要性を総合的に評価した。

①衛星、分野共通技術

i. 技術的優位性

我が国の衛星産業の競争力の維持・発展の観点での重要性や、国内外市場における勝ち筋につながり得る技術を戦略的に支援していく。具体的には、機能・性能面、コスト・納期面での優位性、開発ステージにおける先行性、輸出可能性等を評価した。また、当該技術を保有又は保有しようとする企業等が、国際市場で勝ち残る意志と技術、事業モデルを有するかについて評価した。加えて、現在技術成熟度の低い技術であっても将来的に競争力の発展等に重要な技術として先行する研究開発が必要な技術であるかどうか等を評価した。

ii. 自律性

我が国がシステムとして衛星開発を継続する上で、サプライチェーン上における重要性の高い技術とそれを支える施設・能力について支援していく。具体的には、当該技術のサプライチェーン上の代替困難度、調達自在性のリスクに加え、衛星システム構築のコア技術であるかどうか、衛星には通信、測位、観測、軌道上サービス、宇宙科学・探査等、ユースケースが広く存在するとこ

¹ 「輸送」「衛星等」「探査等」の3つの分野において、宇宙技術戦略で抽出された技術項目を参照しつつ、技術開発テーマを設定し、スタートアップをはじめとする民間企業や大学等が複数年度(最大10年)にわたって大胆に技術開発に取り組めるよう、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)に新たに基金を設置し、支援するもの。

² 内閣官房、内閣府、総務省、文部科学省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省、防衛省、JAXA、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)等。

³ 宇宙技術戦略において特定された取組を実施しながら、継続的に最新動向等を踏まえた改訂を行うこと。

ろ、様々なユースケース実現への影響があるか、現在技術成熟度の低い技術であっても、将来的に上記の自律性の観点から重要な技術として先行する研究開発が必要な技術であるかどうか等を評価した。

iii. ユースケース

安全保障・民生分野横断的に、開発した先に当該衛星技術のエコシステムを支えるのに十分なユースケースや市場等が期待できるかについても評価した。技術的優位性又は自律性の観点で重要性が確認できる技術開発についても、本評価軸も比較衡量の上、支援について検討する。

②宇宙科学・探査

i. 技術的優位性

世界的に見て独創的な科学的アイデアの実現に必要な特長ある技術や、独創的・先鋭的な宇宙探査のための技術、国際協力ミッションにおける我が国の役割分担の履行のための技術について支援していく。具体的には、当該技術がコアとなって実現されるミッションの成果が科学的に高い評価を得られるか、又は機能・性能面で優位であるか（今後、優位性を獲得し得るか）、国際協力ミッションに関する技術については、当該技術がコアとなって実現される国際貢献により我が国のプレゼンスを発揮・向上できるかについて評価した。

なお、先端的な科学的成果を得るために、まず、独創的な科学的アイデアを広く集め、基礎研究段階からの育成や必要な要素技術開発を行う。宇宙科学・探査ミッションとして具体化する段階に当たっては、世界的な科学的成果が得られるか、コスト・納期面を含め技術的に実現可能性があるかという観点から、スクリーニングやステージゲート等により評価した。

また、将来の地球低軌道活動や持続的な月面活動等が段階的に進展していくことを見据え、開発した技術が、その技術的優位性を活かして、将来の活動の進展に応じた基盤整備や市場創出等につながる可能性があるかどうかについても評価した。

ii. 自律性

宇宙科学・探査ミッションは、独創的なアイデアを実現する観点から一点物が多く、技術によっては必ずしも広い市場が見込めない場合もあるが、我が国において継続・発展させていくためには、サプライチェーン上における重要性の高い技術とそれを支える施設・能力について、企業と研究開発機関で適切に役割分担しつつ、継続的に支えていく必要がある。

具体的には、当該技術のサプライチェーン上の代替困難度、調達自在性のリスクに加え、システム構築のコア技術であるかどうかを評価した。また、当該技術を開発する企業や研究開発機関が、技術の維持・開発リスクを低下させるため、技術開発プロジェクト計画の早期の明確化や要素技術の先行的な研究開発、商業分野や国際市場への展開、当該技術を支える施設や能力の維持、必要に応じて海外に協力を求める場合にも戦略性を持って行う等、国内需要を支える意志や計画を有するかについても、評価した。

iii. 緊要性

これらに加えて、宇宙科学・探査の分野においては、緊要性を評価した。具体的には、これまでに国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)を中心とした科学コミュニティ等での検討を踏まえ、既にミッション化しているものや、国際的な枠組みの中で、我が国として研究開発することをコミットしているもの等が挙げられる。

③宇宙輸送

i. 技術的優位性

人類の活動領域は、地球、地球低軌道を越え、月面、更に深宇宙へと、本格的に宇宙空間に拡大しつつあり、我が国の宇宙活動を支える重要な基盤としての宇宙輸送については、研究開発やイノベーションを通じて技術的優位性を強化する必要がある。

このため、宇宙輸送能力の強化、安価な宇宙輸送価格の実現、打上げの高頻度化を実現する観点から必要な技術であるかどうかを評価した。

また、宇宙輸送能力の機能面及び性能面、コスト面及び納期面（リードタイム短縮等）、開発ステージにおける先行性、国際競争力に基づく輸出可能性等の観点から、当該技術を保有又は保有しようとする企業等が国際市場で勝ち残る意志とビジネスモデルを有するかについても評価した。さらに、技術成熟度の低い技術であっても、競争力の強化に向けて先行開発が必要な重要な技術であるかどうかについても評価した。

ii. 自律性

H-IIAロケットの部品点数は約 100 万点、そのサプライヤーは約 1,000 社に達すると指摘されており、我が国が他国に依存することなく宇宙へのアクセスを確保していくためには、ロケットのコンポーネントや部品、材料に関するサプライチェーン及び開発能力を継続的に維持していく必要がある。このため、基幹ロケット及び民間ロケットに関するサプライチェーンリスクに関して、関係企業に対してヒアリングを実施する等により、サプライチェーン上の代替困難度や調達自在性のリスクやシステム構築上のコア技術であるかどうかについて評価した。また、技術成熟度の低い技術であっても、将来的に自律性確保の観点から先行開発が必要な技術であるかどうかについても評価した。

iii. 多様な宇宙輸送ニーズへの対応

宇宙基本計画では、次期基幹ロケットの運用実現、完全再使用化及び有人輸送への拡張、及び高速二地点間輸送や宇宙旅行などの新たな宇宙輸送システムの実現を目指すことが示されており、こうした宇宙輸送分野のイノベーションを積極的に創出することにより、多様な宇宙輸送ニーズに確実に対応できるようにすることが求められている。

このため、様々なペイロードへの対応（衛星、実験機材、食料、燃料、構造物、ローバ、宇宙飛行士、ロボット等）、多様な宇宙輸送ルートの実現（高速二地点間輸送、軌道間輸送、洋上打上げ、宇宙旅行、月・火星等）、柔軟かつタイムリーな打上げ機会の提供、信頼性の高い宇宙輸送ロジスティクスの提供等、多様な輸送ニーズに対応する宇宙輸送サービスを実現するために必要な技術であるかどうかを評価した。その際、当該技術に係る市場セグメントの市場性や将来性が十分に期待できるかについても評価した。

また、増加する国内の衛星打上げ需要やグローバル需要に応えるため、海外の宇宙輸送技術の国内での活用、サブオービタル飛行などの我が国に前例のない多様な取組を進めることが期待されており、こうした取組により我が国の宇宙産業の裾野を拡大させ、ひいては我が国がアジア・中東における宇宙輸送ハブとしての地位を築くことを目指す必要がある。このため、ロケットの打上げや帰還をホストする宇宙輸送ハブとしての射場・宇宙港の機能強化に資する技術であるかどうかについても評価した。

(3)技術開発支援の在り方

世界における競争環境が厳しくなる中、我が国の国内需要は部品産業を含めたサプライチェーンを維持するには不十分であることから、国内の技術開発プロジェクトや政府需要の機会を、国内市場のみならず国際市場への展開のために戦略的に活用していくことが重要である。このため、当該技術を保有又は今後保有しようとする企業等が、国内需要を支え、国内市場を拡大させるとともに、国際市場で勝ち残る意志と技術、事業モデルを有するかを確認し、重点的に育成・支援していく。

評価軸を踏まえてスクリーニングされた重要技術については、国は技術開発計画の早期の明確化等により、技術開発投資の予見可能性を高めるとともに、先行的な研究開発を含め必要な技術開発を支援し、必要に応じて国産コンポーネントの開発とそれを支える施設・能力についても支援を実施していく。技術実証を行うに当たっては、失敗を恐れず、高頻度で宇宙実証を行うアジャイルな開発手法を取り入れていく。加えて、可能な限り民間事業者からサービス・財を調達することで、民間事業者の投資を促進する好循環を形成していく。

(4) 策定プロセスとローリングの在り方

本文書を取りまとめるに当たっては、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送のそれぞれの技術分野について、衛星小委員会、宇宙科学・探査小委員会、宇宙輸送小委員会において専門的議論を深め、それに基づいて、宇宙政策委員会において、宇宙技術戦略の全体を取りまとめた。関係省庁の参画の下、安全保障・民生分野横断的に議論を行い、執筆に当たっては、産学官・国内外における技術開発・実証、人材、技術情報等における結節点として、JAXA からの技術的支援も受けた。それぞれの技術分野について、技術・産業・人材基盤の維持・発展に係る課題について検討し、宇宙技術戦略の策定に当たって参照していくため、官民プラットフォームや業界・学術団体からも意見聴取を実施した。

欧米の宇宙開発機関や政府においては、地域・国全体で一貫した産業基盤支援を実施するため、産学官のステークホルダーを巻き込み、先端・基盤技術開発から商業化に至るまで、技術戦略・ロードマップを策定し、ローリングを行っている。

ローリングを行うに当たっては、こうした事例も参考にしながら、個別技術分野に係る国内の英知を結集し、本文書をベースに戦略的議論を深めていく。例えば、毎年度、ローリングの重点テーマを検討・決定し、世界の技術開発トレンドやユーザーニーズについて調査分析を実施し、最新の調査と予算の状況等を踏まえたアップデートを実施していく。その際、文献調査の実施に加え、本文書について官民プラットフォームや業界・学術団体等の意見を聴取する。また、必要に応じて情報提供依頼(RFI)等も活用し、本文書のローリングを実施していく。

衛星

I. 通信

(1) 将来像

衛星通信においては、常に一定の位置から1機で広範囲をカバーできる静止軌道衛星と低・中軌道でグローバルにエリアカバーが可能な衛星コンステレーションを活用した通信サービスが、ユースケースに応じて利用されている。観測衛星等が扱う情報量の増大に伴うデータ中継需要の拡大や、衛星コンステレーションの利用の更なる拡大が見込まれることから、衛星通信の需要は今後も拡大を続けることが予想されている。このような需要の拡大は、衛星通信の高速・大容量化や利便性向上の必要性を高めており、高速・大容量通信が可能で高セキュリティな光衛星間通信技術やスマートフォンと衛星とのダイレクト通信技術などの新技術⁴の実用化が進展している。今後、宇宙ネットワークと地上ネットワークのシームレスな連携により、海上、空中、宇宙を含むあらゆる場所に対して切れ目のない通信を提供することが可能になると見込まれるところ、その実現において、衛星通信は地上ネットワークに並ぶ基幹インフラとなると予想される。

Beyond5G(6G)の実現を目指す2030年代においては、地上系ネットワーク(TN: Terrestrial Network)と非地上系ネットワーク(NTN: Non-Terrestrial Network)の融合により、陸、海、空、宇宙を統合したネットワークが構築されることが期待されている。NTNにおいては、静止軌道や低軌道など異なる軌道の衛星や高高度プラットフォーム(HAPS: High Altitude Platform Stations)がそれぞれの特性を生かしてシームレスにつながることで(マルチオービット化)により、高速・大容量・低遅延・多元接続⁵といった様々なニーズに対応することが目指されており、その際には安全性にも留意することが重要である。このような技術の進展により、離島、海上、山間部等における効率的な通信需要のカバーや、ドローンや空飛ぶクルマ等の飛行体に対しての切れ目のない通信サービスの提供、観測衛星のデータ伝送の高速・リアルタイム化による観測データの活用高度化、自然災害を始めとする災害時等に備えたネットワークの冗長性の確保などへの一層の貢献が見込まれる。また、安全保障領域においては、宇宙における脅威の変化に対応するため、専用の静止通信衛星の利用のみならず、異なる軌道の通信衛星や同志国衛星といった、整備背景の異なる衛星の複合利用によって、抗たん性⁶を確保し切れ目のない通信を実現する方向性であり、欧米各国軍では実現に向けた取組を実施している。

(2) 環境認識と技術戦略

衛星通信は、宇宙産業全体の中で最も大きな市場規模を占めている。我が国においては、静止衛星を中心とした技術面・運用面の知見の蓄積や電波や光による衛星間通信技術・運用の豊富な実績に加え、衛星通信への本格的な適用が目指される光通信技術や量子暗号通信技術等の先端技術開発において優れた実績を有することが強みである。

衛星通信に関しては、従来からある衛星と地球間の通信需要の更なる拡大に加え、近年生じている衛星間の通信需要も拡大が見込まれており、低軌道メガコンステレーションの提供拡大による提供価格の低下や、通信の高速・大容量化の更なる進展が想定されることも相まって、2032年までにデータ通信分野は2倍以上に市場が拡大するとの見通し⁷もある。衛星通信が、災害時等

⁴ <https://spacenews.com/ast-spacemobile-achieves-space-based-5g-cellular-broadband-connectivity-from-everyday-smartphones/>

⁵ 多元接続: 一つのノード(基地局、衛星など)から多くの端末に同時に通信接続すること。(Multi-Access)

⁶ 抗たん性: システムが障害や故障に対して耐える能力。

⁷ NSR 社 <https://www.nsr.com/satcom-data-traffic-in-geo/>

Straits Research 社 <https://straitsresearch.com/jp/report/satellite-communication-market>

に備えた通信の冗長性⁸・抗たん性確保や、安全保障の確保と Society 5.0 の実現に貢献する重要技術となることを踏まえれば、前述の TN と NTN が融合された将来像の実現に向けて、その自立性の確保と戦略的な技術開発に取り組んでいく必要がある。

衛星通信は経済安全保障の観点からも重要なインフラの一つであり、米 PWSA や欧州委員会の IRIS²⁹等サプライチェーンを国内で確保する動きが欧米等を中心に見受けられる。我が国が自立性及び自律性を確保していくためには衛星通信に関する重要な技術を国内で確保することが必要であり、民間企業による国内外の市場獲得に向けた取組も行う必要がある。

また、将来にわたる衛星通信に必要な周波数に関する課題として、近年の通信・観測・IoT 等衛星利用の進展による需要増加に伴い、我が国を含め世界的に周波数確保に向けた申請が進み、周波数が非常にひっ迫した状況となるおそれがある。周波数の国際調整は先着優先方式であることを踏まえ、今後いかに利用する周波数を確保していくかが喫緊の課題となっており、早期に手続を開始することができるよう、一層の官民連携が必要と考えられる。

① 衛星間や衛星と地上間における光通信ネットワークシステム

i. 環境認識

衛星通信においては、通信に利用可能な周波数資源がひっ迫しつつある中、周波数資源を消費せずに大容量通信が可能な衛星光通信(衛星間メッシュ通信技術、光通信端末技術、ネットワーク管理技術(シミュレータ含む)等)への関心が高まっている。世界でも、低軌道の衛星コンステレーションにおいて衛星間メッシュ通信¹⁰に光通信を活用する事例が生じるなど、開発及び利用が活発化している。

我が国では、2005 年に JAXA や欧州宇宙機関(ESA)等によって、光衛星間通信の実証に世界で初めて成功し、2020 年には JAXA が静止軌道に光データ中継衛星を打ち上げた。2024 年には光データ中継衛星と低軌道観測衛星(ALOS-4)との間で 1.8Gbps の光通信実証試験に成功(1.5 μ m 波長帯の 1.8Gbps の光衛星間通信(静止軌道-低軌道(GEO-LEO)))は世界初)するなど、光通信の技術開発に取り組んでいる。ただし、これらの実証試験に用いられた光通信端末は中～大型衛星向けであり、国内で小型衛星にも搭載可能かつ実用的な光通信端末を量産することができる状態とはなっていない。搭載する衛星の目的に応じて、LEO-GEO 用途では長距離通信用通信条件での性能向上に向けた高出力化や高感度化、LEO-LEO 用途では量産のための小型・低コスト化など、用途に応じた技術開発が期待される。また、光通信と相補関係にある電波を考慮した、光・電波の融合としてネットワークの最適化も必要である。

また、衛星から地上へのダウンリンクにおいて重要となる光通信システム技術の一部である補償光学やサイトダイバーシティ、可搬型の光地上局等による伝送効率・安定性を向上させる技術は、我が国の地理的な条件(降雨が多く、光地上局の設置場所が限られる点)を考慮すると、欧米に比して必要性が高く、我が国で実利用できるレベルを獲得していく必要がある。この光地上局に関しては、2020 年代になり世界各国で NASA、ESA、各国宇宙機関、大学研究機関などの公的機関を中心に、稼働中のものを含め 20 局以上の光地上局の整備が進められている。我が国でも NICT が鹿島地上局に2m 級の大型望遠鏡を新設し、さらにこれを含めた全国4か所に設置された光通信用望遠鏡をネットワーク運用するシステムを構築している。

⁸ 冗長性: システムの一部が故障しても、他の部分がその機能を代替する能力。

⁹ IRIS²: Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite の略。EU が域外のインフラ依存を低減させ、主権と自律性を確保することを目的として構築を目指すマルチオービット通信衛星コンステレーション

¹⁰ 複数の衛星が相互に通信リンクを形成し、データを直接交換するネットワーク技術。衛星同士がデータを中継し合うことで、地上局を介さずに広範囲のデータ伝送が可能になる。

米国では Space Exploration Technologies Corp.(SpaceX 社)による Starlink¹¹や Amazon.com, Inc.(Amazon 社)による Amazon Leo (旧 Kuiper)¹²において、低軌道衛星コンステレーション構築の取組が進展すると同時に、光衛星間通信の適用も進められている。また、ミサイル探知・追尾等を目的として、小型通信衛星を含め、最大 1,200 機もの衛星コンステレーションシステムを構築すべく、宇宙開発庁(SDA)が拡散型戦闘宇宙アーキテクチャ(PWSA)構想を 2019 年に立ち上げており、この需要に対応する形で、光衛星間通信に関する技術開発が進められている。PWSA では、相互運用性を重視した光通信機器の規格化の取組がなされている。PWSA は 2023 年に実証フェーズ(Tranche 0)を始動させ、最初の衛星の打上げに成功した。2026 年までの次なるフェーズ(Tranche 1)においては、光通信衛星も含む、174 機の小型衛星から成る低軌道通信衛星コンステレーションの構築を目指している。また、国家偵察局(NRO)は、SpaceX 社と Starshield の契約を結び、米宇宙軍の Delta8 の管制による MILNET と呼ばれる数百機レベルの低軌道衛星コンステレーションを構築する予定である。MILNET の具体的な計画は非公開であるが、SDA が開発している PWSA においても次のフェーズ(Tranche 3)において Transport Layer(T3TL)の予算要求が取り下げられており、Starshield の利用が検討され始めている可能性がある。

欧州では ESA が静止軌道に光データ中継衛星(EDRS-C)を打ち上げ、2020 年より光データ中継の実運用を行っている。また、地上の光ファイバーネットワークを宇宙に拡張することをコンセプトとした次世代ハイスループット衛星の実証計画(HydRON¹³)に向けた研究開発にも着手している。これに加え、米 PWSA 構想や米 SpaceX 社による Starlink、中 Guo Wang¹⁴等、主要国のメガ通信衛星コンステレーション計画を受け、2023 年より、欧州委員会において低軌道を含めた多軌道通信ネットワーク構築を目指したプログラム(IRIS² 構想)を開始している。

ii .技術開発の重要性と進め方

衛星通信に利用可能な周波数資源のひっ迫や高速・大容量通信の需要拡大等の状況を踏まえ、我が国においても衛星通信への光通信の実装及び運用に積極的に取り組んでいく必要がある。衛星通信において光通信の重要性が高まることに鑑みれば、速やかに衛星光通信の運用に関する知識・経験を蓄積するとともに、衛星光通信の高度化に向けた研究開発を行っていくことが非常に重要である。

地球観測衛星の撮像データの大容量化やリアルタイム送信需要の拡大等を踏まえれば、衛星間での大容量データ伝送需要は一層拡大することが予想されるところ、データ中継サービスは、衛星光通信の一つのユースケースとなることが予想される。海外においても同様のサービスを検討している事業者は既に存在しているところ、我が国においても早急に、衛星光通信を用いたデータ中継サービスを実用化していくことが自立性及び自律性の観点から非常に重要となる。加えて、データ中継サービスを介したデータ伝送が宇宙空間における情報流通の中心となる可能性もあるところ、宇宙におけるデータ主権の観点からも、データ中継サービスを我が国の事業者が提供することは非常に重要である。

また、衛星光通信は、衛星コンステレーションにおける衛星間通信においても重要である。特に低軌道においては、複数の衛星コンステレーションが構築されていることから周波数資源の獲得が困難な状況となっており、衛星間の通信に光通信を活用する重要性が増している。現在、我が

¹¹ 2025 年 10 月現在、8,000 機以上。(34396 機、通信速度 20Gbps/機目標)

¹² 2025 年 10 月現在、102 機。(3236 機、通信速度 50Gbps/機目標)

¹³ HydRON (High throughput Optical Network)の略称。ESA の推進する光通信システム開発計画で、宇宙空間でテラビット/秒級容量の光通信ネットワークをマルチオービットで実証することを目標とする。

¹⁴ 2025 年 10 月現在、機数非公表。(12992 機、通信速度目標等、詳細不明)

国においては、光衛星間通信ネットワーク技術の確立に向け、実証に当たっての全体システム設計に着手するとともに、低軌道衛星間の光通信ネットワークシステムや光通信端末等の国際競争力を持ち得る重要要素技術の研究開発を行っている。本研究開発においては、利用省庁のニーズも踏まえつつ、2Gbps 以上の通信速度を目指し、2023 年度までのシステム設計を踏まえ、2031 年度までにシステム実証を実施する。

また、国際市場の開発計画の進展に遅れることなく、重要な通信インフラを構成する光通信ネットワークの早期の社会実装を目指し、コンステレーションの構築を進めることが自立性の確保、経済安全保障の観点からも非常に重要である。

衛星光通信を我が国が継続して利用可能にするためには、衛星光通信に関する機器の海外依存を解消し、国産化による自立性及び自律性を高めることが必要である。衛星光通信端末の国際競争力を高めるため、その小型軽量化や高度化に向けた検討に加えて早期の軌道上実証が重要である。このため、その要素技術として、端末の小型軽量化を実現する光増幅器の高出力化・高効率化や、衛星と地上との間における光通信速度を現状の Gbps クラスから Tbps クラスへと高速化していく次世代補償光学デバイスの研究開発、衛星間で 100Gbps の通信速度を実現する光通信端末の実用化に向けたデジタルコヒーレント技術¹⁵の研究開発に着実に取り組むことが重要である。これらの研究開発を行うに当たっては、併せて、小型衛星にも搭載可能な光通信端末を国内で製造する基盤を構築することも非常に重要である。加えて、様々な衛星光通信サービスを横断して利用可能としていくためには、光通信端末メーカを横断して相互に接続できることが重要であり、このため PWSA や HydRON、IRIS² における取組など海外動向も踏まえた上で、技術開発や規格の標準化に向けた取組に、一層積極的に関与していくことが非常に重要である。

また、2020 年度に打上げ、2024 年度に SAR 衛星 ALOS-4 との間で通信波長 $1.5\mu\text{m}$ (地上の光ファイバ通信と同じであり拡張性に優れる波長) における GEO-LEO 間衛星間通信として世界最高速度を達成した光データ中継衛星の運用を継続し、これを用いた光通信の実証実験を通じて宇宙における光通信技術の知見蓄積を進める。技術試験衛星9号機(ETS-9)による静止軌道と地上との間における世界最高レベルとなる 10Gbps の双方向光通信技術の実現、低軌道と地上との間での 100Gbps の光通信の実現に向けた開発にも着実に取り組み、国産による衛星光通信に関する最先端の技術開発を継続していくことが重要である。

衛星光通信に関しては、高いレベルでの擾乱管理や光通信端末と衛星バスとの精緻な協調制御など、衛星バスの技術水準も高めていく必要があることから、このような衛星バスを我が国で開発・生産可能な体制の整備についての検討や国際競争力を高めていくための方策についての検討が必要である。

衛星光通信は高い精度での捕捉が必要となるところ、光通信機器と衛星システムの間のアライメント、時刻情報、軌道情報、機械振動擾乱環境、衛星姿勢、熱光学、コンタミネーション等の高度なインターフェース管理が必要となり、このため、衛星の姿勢等に係る高精度の計算やシミュレーション等が必要となる。このような計算・シミュレーション等の障壁を下げ、衛星光通信の導入及び活用の障壁を下げしていく取組も重要である。

また、擾乱アイソレータや広帯域な光学アクチュエータ、アライメント補正技術、光通信端末及び光通信端末を衛星に搭載した後の試験技術等の要素技術開発が必要である。このような技術の開発を通じ、光通信技術を広く活用可能な環境を整えることによって、衛星光通信活用の障壁を下げしていく取組についても検討が必要である。

加えて、衛星-地上間の衛星光通信で課題となる大気のゆらぎ及び気象条件の影響による回

¹⁵ デジタルコヒーレント技術：光の振幅、位相の情報を使って伝送できる情報を増やす技術。

線品質の低下を克服するため、上り下り回線に対応した補償光学技術やサイトダイバーシティ技術等を活用した光地上局の高度化の取組や、大気ゆらぎや気象条件の影響を緩和できる光の新規波長の開拓も重要である。

② 大容量で柔軟な通信を提供するためのペイロードの高度化

i. 環境認識

静止軌道における衛星の調達においては、衛星通信需要が多様化していることや、需要の変化の不確実性が増大していることから、衛星の打上げ後に軌道上でソフトウェアを書き換えることにより、機能の変更が可能で通信ニーズの変化に対応が可能なデジタル通信ペイロードの需要が大半となってきた。この傾向は、民間利用、安全保障利用を問わず継続することが見込まれている。

欧米の衛星企業は、これまで継続的に安全保障用途でデジタル通信ペイロードを開発・実用化するとともに、民間需要にも対応した製品を開発してきている。例えば、2001 年の米 Boeing Company 社が率いるチームが開発した防衛通信衛星 WGS(Wideband Global SATCOM)によるデジタル通信衛星の開発を皮切りに欧 AirbusSE 社が ESA の Advanced Research in Telecommunications Systems(ARTES)プログラムの下で開発した通信衛星 SES-12 にて 2019 年に軌道上実証に成功した。2020 年に米 Lockheed Martin Corporation(Lockheed Martin 社)が米宇宙軍向けにデジタル通信ペイロード¹⁶の防衛静止通信衛星 AEHF-6 を打ち上げ、通信コンステレーションを完成させている。2021 年には仏 Thales Alenia Space 社が、航空機内の衛星インターネットの商業提供等を念頭に、フルデジタルの商業静止通信衛星 SES-17 を打ち上げ、世界市場において受注を積み上げている。こうした実績を基に、米 Boeing 社の 702X、欧 Airbus 社の OneSat、仏 Thales Alenia Space 社の Space Inspire など、欧米各社はフルデジタルペイロードを搭載した商用通信衛星をプラットフォームとして販売しており、OneSat、Space Inspire については 2026 年以降に打上げが予定されている。米 Astranis 社は、小型(600 kg)ながら 50Gbps の通信容量をもつデジタル通信ペイロードを小型静止軌道通信衛星用に開発し、民間向け及び安全保障用途の政府向けの両面での製造を展開している。

また、現在の衛星通信において主に利用されている周波数帯域は Ku 帯(12GHz~18GHz)・Ka 帯(26.5GHz~40GHz)であるが、これらの帯域は徐々にひっ迫しつつあり、また、より高速かつ大容量の通信需要も高まっていることから、Ku 帯・Ka 帯よりも更に高い帯域である Q 帯(33GHz~50GHz)や V 帯(40GHz~75GHz)を活用した商用通信衛星の実利用や、周波数の利用効率向上に向けた研究開発が日米欧等を中心に活発に行われている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

Beyond5G(6G)を見据えた世界の潮流を踏まえ、衛星通信に関する需要の多様化や需要の変化の不確実性の増加の傾向が続くことを踏まえれば、通信衛星に関するマルチオービット(静止軌道、低軌道)の調達需要を我が国の企業が獲得するためには、民間事業者の需要を的確に捉えた上で、デジタル通信ペイロード等のペイロードの高度化に向けた研究開発を行うことが引き続き重要であるとともに、ホステッド・ペイロードの仕組みを利用するなどして早期の軌道上実証を行うことが重要である。加えて、衛星通信に関する需要は増加していくことから、多様化する需要に

¹⁶ フルデジタル通信ペイロード：受信部、信号処理部、送信部のすべてをデジタル化した通信ペイロードのこと。対してデジタル通信ペイロードは信号処理部のみなど部分的なデジタル化したものを指す。

対応するのみならず、衛星1基当たりの通信効率や衛星通信の安定性の高度化に資するマルチアクセス技術(OFDMA 等)や AI を用いたリソースの最適割当技術など、地上のネットワークで開発が進んでいる技術の衛星適用についても併せて重要である。特に、スマートフォンとのダイレクト通信の商用化等により対向の地上端末が小型化していることに鑑みれば、高出力・高精度を担保した大型アンテナの開発も重要である。また、電波を用いたより高速かつ大容量の通信需要に対応するため、今後活用が期待される高周波数帯(Ka/Q/V/E¹⁷/W¹⁸)の活用に向けた研究開発や、これらの周波数帯の利用効率を高める機器(高効率 RF 機器)の開発、さらには機器性能の向上に寄与する GaN やダイヤモンド半導体等の新規技術を用いた半導体デバイスの開発も重要である。更に、高周波数帯の活用を図るために、衛星-地上間の電波伝搬の研究も重要である。

我が国では、これまでフルデジタル通信ペイロード、固定・可変ビームを開発してきており、これらを搭載した ETS-9 の打上げを目指して取組を進めている。この技術は、安全保障を含めた通信の抗たん性強化にも資するものであり、将来、通信衛星市場において競争力の一端を担うことが想定されることから、これらに係る研究開発を着実に進めることは重要である。

また、柔軟な通信ビーム制御を実現するデジタルビームフォーミング(DBF: Digital Beam Forming)、フェーズドアレイアンテナ(電子走査アンテナ)、周波数可変コンバータ¹⁹や低雑音増幅器²⁰(LNA: Low Noise Amplifier)、固体化電力増幅器²¹(SSPA: Solid State Power Amplifier)、デジタル通信ネットワークシステム、チャネライザ等の更なる要素技術の開発についても、民間事業者の世界の各軌道の通信衛星市場における技術的優位性や自立性への貢献等を見極めながら着実に実施していくことが、非常に重要である。

③ 地上系とのシームレスな連携を実現する非地上系ネットワーク(NTN)技術

i. 環境認識

Beyond5G(6G)が目指すあらゆる場所がシームレスな通信で繋がる社会を見据えると、地上無線局のみではあらゆる場所をカバーすることは困難であるため、地上系とのシームレスな接続を実現する NTN 技術の重要性が国際的にも認識されている。NTN は、離島、海上、山間部等の効率的なカバーに有用であり、自動運転車や空飛ぶクルマ、ドローン等に対しては広範囲に切れ目のない通信を提供することが必要となることから、今後は TN と NTN 双方を活用し、広範なエリアをカバーする通信環境の構築が重要となると考えられる。さらに、今後 NTN に搭載するオンボードコンピューティングの高度化が進展すれば、衛星や HAPS 側における処理が高度化し、高効率なマルチオービットのネットワークを構築することが可能となることも期待される。

これらの実現に向けて、移動体通信の技術仕様の国際的標準化プロジェクトである 3GPP (Third Generation Partnership Project)において標準化の取組が順次進められている。現時点で衛星による 5G サポートに必要な基本的機能の定義まで制定(リリース 17)されており、既に S バンド²²や L バンド²³を使った商業化が進んでいるだけでなく、NTN-TN 間のモビリティ拡張や、シームレスな衛星の切り替え、Ka バンドサポートなどの商用化を見据えた機能の標準化が 2024 年6月に完了した(リリース 18)。さらに、2025 年末にはダウンリンクカバレッジ拡張やアップリンク容量拡

¹⁷ E 帯: 71GHz から 76GHz、81GHz から 86GHz の周波数帯を指す。

¹⁸ W 帯: 75GHz から 110GHz の周波数帯を指す。

¹⁹ 周波数可変コンバータ: 対応する周波数を軌道上で変更可能な周波数変換器。

²⁰ 低雑音増幅器 (LNA): 微弱な入力信号を選択的に増幅する装置。

²¹ 固体化電力増幅器: 半導体を使用した電波の電力増幅器。

²² S バンド: 2GHz から 4GHz の周波数帯を指す。

²³ L バンド: 0.5GHz から 2GHz の周波数帯を指す。

張(ハイパワーUE²⁴含む)、衛星やHAPSのペイロードがデジタル化されることを前提にした再生中継方式²⁵、Kuバンドサポート(リリース19)²⁶などの要求について順次検討、仕様が策定されていく予定である。将来的には、3GPPに準拠した技術の導入によって、衛星と非専用端末との間での通信利用の拡大や、NTNとTN間の統合的運用が進展することが期待される。また、静止軌道/中軌道/低軌道/HAPSの各通信衛星/ノード²⁷に地上の携帯電話基地局と同様の機能を持たせることで、地上の携帯電話基地局を介さない端末間通信といった耐災害性の高い新サービスの実現も期待される。他方で、StarlinkやGlobalstar、BlueBirdのように、3GPPとは異なる独自の仕様で衛星と非専用端末との間での通信を確立する動きも進められており、いずれの取組についても注視しつつ、相互運用も考慮した規格の標準化に向けて取り組むことが必要である。世界においては、米SpaceX社によるStarlinkやAmazon社によるAmazon Leo(旧Kuiper)、英OneWeb²⁸等、全世界へのインターネットアクセス提供を目指す民間企業による低軌道コンステレーション構築が急速に進むとともに、従来型静止軌道通信オペレータが低軌道・中軌道衛星コンステレーションの構築に乗り出しており、欧州委員会のIRIS²構想²⁹においても、危機対応時等に加盟国に衛星通信サービスを提供すべく、低軌道衛星だけでなく、中軌道、静止軌道にも衛星を配置し、広範な通信覆域を有する通信インフラ構築を計画している。また、次世代通信衛星の開発に向けて、シームレスな通信を可能とする再生中継技術について、米Lockheed Martin社が実証機器を搭載した衛星を2025年4月に打上げたが、軌道投入に失敗している。OneWebは既存の第1世代では通信信号の変復調を行わない透過中継型衛星を採用していたが、第2世代では変復調を行う再生中継型衛星への移行を目指した実証実験を行っている。

さらに、スマートフォンなどのデバイスから衛星への直接通信(ダイレクトアクセス)の商用化が実現し、TN・NTNの融合・連携が進展している。地上モバイル周波数³⁰を利用する米SpaceX社のStarlink“Direct to Cell”や米AST SpaceMobile社が先行する中、衛星専用バンドを用いる3GPP仕様準拠のNTNにおいては、メッセージングサービス等に代表されるIoT-NTNは2023年より商用化段階に入り、音声通話等を実現するNR-NTNも2026年頃から商用化が進展すると思われる。

我が国の通信事業者においても、米SpaceX社やAmazon社等が提供する低軌道衛星コンステレーションをバックホール回線として利用したり、スマートフォン等の非専用端末に対して衛星からの直接通信サービスを2025年から提供を開始するなど、TNとNTNの連携に向けた動きを強めているほか、HAPSの活用に向けた研究開発を実施するなど新たな通信サービスの提供を目指す動きが顕在化している³¹。

ii. 技術開発の重要性と進め方

²⁴ ハイパワーUE: User Equipment(利用者端末)の送信電力を増加させた通信機器。送信電力を増やすことで通信サービスを受けられる範囲を増やす効果が期待される。

²⁵ 衛星が受信した信号を一度デジタル信号に変換し、エラー訂正や信号の再生成を行った後、再び送信する技術。これにより、信号の品質を向上させ、長距離通信でも高い信頼性を確保できる。

²⁶ <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-19>

²⁷ ノード: 通信網を構成する基地局などの接続点。

²⁸ 2024年10月現在、654機。(通信速度7.5Gbps/機目標)

²⁹ 2027年までに低軌道に170機配置、中軌道衛星、静止軌道衛星の配置、通信速度等は現在検討中。

³⁰ 地上モバイル周波数: 携帯電話の通話に使用している周波数帯。米Starlink社は1.9GHz帯、米AST Space Mobile社は840MHz帯で軌道上実証中。

³¹ KDDI社: <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2021/09/13/5392.html>

Softbank社: https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20230912_01/

我が国においても、TN と NTN の融合・連携を進めることが重要であり、TN と NTN の統合的運用に向けて技術開発を進めていく必要がある。例えば TN と NTN の統合的な運用に際しては、マルチオービットや複数事業者を連携するネットワーク制御技術や地上端末の高度化技術、衛星で使用する周波数と地上の基地局で使用する周波数の干渉を防止する技術、端末が衛星も含めた基地局の中から最適な基地局を選択するための制御・割り当て技術などが必要と考えられるところ、このような技術開発を支援していくことが非常に重要である。TN と NTN の統合的運用に当たっては地上における通信事業者の協力が不可欠であり、地上における通信事業者と連携した技術開発を行っていくことが非常に重要である。

また、TN と NTN の融合・連携の進展は、我が国の通信ネットワークにおいて NTN が果たす役割を増加させるものであるところ、NTN について我が国の企業が適切に管理・運用できることの重要性も増加していくものと考えられる。そのため、現在は海外の企業によって提供されている低軌道衛星コンステレーションについても、我が国の通信の安定的な提供の確保の観点から必要な範囲を見極めた上で、我が国の企業によって管理・運用できるよう、必要な取組を検討し、進めていくことが非常に重要である。その際には、低軌道衛星コンステレーションを用いた通信サービスは国内外を問わず提供されることや、海外のプレイヤーが既に巨額の投資を行っていることにも留意した上で、必要な自立性及び自律性を確保することが重要である。

中長期を見通した技術開発としては、NTN と TN との融合をより進める上で必要となると考えられる衛星やHAPSに gNodeB³²や Beyond5G(6G)無線局(RAN)を搭載する技術や、周波数の効率的な利用に資する技術、高い相互接続性を有し多層的な NTN と地上間でシームレスな通信を可能とするソフトウェア定義ルータ³³、NFV³⁴、ネットワークスライシング³⁵・再生中継技術などの Beyond5G(6G)通信ソフトウェア技術を実装するための技術開発について検討が必要である。

④ 秘匿性・抗たん性を確保する通信技術

i. 環境認識

通信においては傍受や妨害、なりすまし、改ざん等の脅威に対するリスクに常時留意する必要があり、利用者がやり取りする通信内容の秘密度や重要度に応じた秘匿性やバックアップ性が求められる。特に、衛星通信を含む無線通信は、傍受や妨害のおそれがあることに加え、量子コンピュータの実現によって従来の公開鍵暗号の安全性が低下し、危険にさらされること懸念されている。

暗号通信技術については、各国において量子暗号技術の研究開発が進められている。例えば欧州では、2024 年から3年間の実験ミッション EuroQCI において量子暗号鍵配信(QKD)衛星である Eagle-1 を 2027 年以降に打ち上げ、QKD 実証を行う予定である。中国は、墨子号を活用した実証システムによって衛星 QKD の実現に必要な技術課題に取り組んでおり、地上と衛星間での世界最大規模(4,600km)の量子暗号通信網を構築している。

加えて、米国では NIST が解読耐性を高めた耐量子計算機暗号(PQC)の標準化作業を推進しており、2024 年に標準化を進めていた3種類のアルゴリズムを連邦情報処理標準(FIPS: Federal Information Processing Standards)として決定され、すでに米 AWS、米 Cloudflare、米 Fastly 等の Web サービス企業での Web データや顧客データの保護などに関する適用が開始されている。ま

³² gNodeB：移動体通信事業者が街頭などに設置している、5G 方式の無線通信に対応した移動体通信基地局。

³³ ソフトウェア定義ルータ：機能をソフトウェアによって定義されたルータ。ソフトウェアの変更によって対応するプロトコルなどの機能変更が可能。

³⁴ NFV：Network Function Virtualization の略。ルータ、スイッチなどのネットワーク機能を計算機上に仮想化する機能。

³⁵ ネットワークスライシング：ネットワークの性質毎に仮想的に分割し、それぞれのニーズに合った通信環境を提供する。

た、NIST は引き続き、バックアップ用に別種の PQC 暗号方式の規格化を進めている。規格化された PQC 暗号方式への段階的な移行を進めるよう、政府機関・民間企業に働きかけ、2035 年には現行の暗号システムを全廃し、PQC 方式に切り替えるよう計画している。PQC に関しては、世界的に、EU、英国、カナダ、オーストラリア、日本等各国が上記米 NIST の活動に参加し、標準化規格やタイムラインを採用もしくは整合させている。これに対して、ロシア、中国は独自の PQC アルゴリズム開発を行っている。

我が国では 2024 年に国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)らが国際宇宙ステーションと地上間での秘密鍵共有と高秘匿通信に成功している。

一方、衛星搭載用抗たん性技術において PTW が挙げられるが、米宇宙軍は PTW のプロトタイプを実装した PTS-P ペイロードを WGS-11 に搭載する計画である。米宇宙軍は、将来系として、WGS 系を意識した高機能静止通信衛星としての PTS-R と、商用衛星ベースを活用し低価格でグローバルに早期展開できる PTS-G を計画したが、2025 年に PTS-R の計画を中止して、PTS-G の契約を 5 社(Boeing, Northrop Grumman, Viasat, Astranis, Intelsat General)と結び、PTW の実装による早期の抗たん性向上を目指している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

衛星通信においても、ユーザーの要求に応じて安全な通信を提供するため、秘匿性を高めるセキュリティ通信技術の開発や、通信回線の干渉や妨害等に対し抗たん性を高める取組を進めることが重要である。このため、TN で適用されているセキュリティ関連技術を採用することによるセキュリティ強化や、衛星に電波環境を把握する装置を搭載することによる抗たん性強化³⁶、サイバー攻撃の探知及び対処に資する技術開発について継続的に検討し取り組むことが必要である。

前述の衛星光通信は、従来の電波通信よりも指向性が高く、ビームの照射範囲が狭いため、外部からの盗聴や傍受が困難であることから、通信の秘匿性を高めるためには、衛星光通信を利用することも一つの方策となる。このため、NICT が開発を進める光地上局について、社会実装を進めるべく取り組むことも重要である。

さらに、衛星量子暗号通信技術については、我が国においては 2010 年より NICT が構築した都市間レベルの実証ネットワークが長期稼働している。こうした技術的強みを活かし、量子暗号装置等の開発を進めるとともに、ユーザーのニーズも踏まえて、実運用も含めた宇宙実証を行うことにより、距離によらない堅牢な量子暗号通信網の早期の実現を図っていくことが重要である。また、衛星量子鍵配送と合わせて、NICT が国際宇宙ステーションと地上間で実証した衛星—地上局間の通信路が見通し通信路であることを活用した情報理論的安全な秘密鍵共有についても、有効なオプションとして取り組むことが重要である。

そして、衛星通信に対する意図的な妨害・傍受等の電波に対する脅威を回避するため、地上における無線技術も活用した高度な周波数ホッピングの技術が必要である。

³⁶ 通信回線の抗たん性を高める方策として、衛星に電波環境を把握する装置を搭載し、妨害波を識別して可能であれば衛星側で妨害波を除去、不可避であれば通信回線の周波数変更、通信経路の変更（地上局変更やデータ中継衛星の活用等）をすること等がある。

II. 衛星測位システム

(1) 将来像

我が国が測位能力を自立的に確保するために整備が進められている準天頂衛星システムは、我が国の安全保障の確保、社会課題の解決や産業・経済の活性化、防災・減災、国土強靱化において必要な位置・時刻情報を提供する社会インフラとして、さらに、アジア太平洋地域における社会インフラとして、その役割を果たしていくことが期待されている。今後、7機体制の確立により、我が国の衛星のみで測位が可能となることで、必要不可欠な社会インフラとして、一層の活用が期待される。さらに、世界的に妨害・干渉事例が顕在化していることも踏まえ、他国に依存しない測位サービスの安定供給を目的としたバックアップ機能の強化や利用可能領域の拡大のため、7機体制から 11 機体制に向けた開発に着手したところである。

準天頂衛星システムが提供する先進的な高精度測位サービスの活用により、将来的には、除雪や点検といったインフラの維持管理作業の効率化や、自動車やドローン、農機等の自動化・無人化によるスマートシティ、スマート農業の実現が期待され、人口減少に直面している我が国における労働力不足や高齢化等の社会課題の解決や、イノベーションによる日本経済の更なる活性化に大きく貢献すると見込まれる。このような将来を見据え、より使いやすい高精度測位サービスの提供を行うことで、高精度な地図等の地上側の情報と組み合わせたソリューションが社会実装され、更にそれが様々な分野に広がっていくことが期待される。

(2) 環境認識と技術戦略

上記に向け、我が国が測位能力を自立的に確保するため、準天頂衛星システムの整備を進めていく必要がある。その際、システムとしての成立性を担保し、万一の事態が発生した際の供給不安を払拭するため、自律性の観点から、妨害・干渉に強い高精度な衛星測位システムとする技術開発及び開発整備が非常に重要である。(妨害回避機能の強化(ソフトウェア無線等)、時刻・位置決定の高精度化(衛星間リンク、クロック技術、細密軌道制御技術、補正情報の精度向上・収束時間の短縮)、維持・運用の効率化(デュアルロッチ、運用自律・自動化)、小型・軽量・省電力化等)

さらには、ユーザーの利用端末の高度化や抗たん性やセキュリティ耐性の強化を通じた、利用領域及びユーザーの拡大に関する実証や技術の開発も重要となる。(受信機の信頼性・抗たん性・セキュリティ強化、受信機の高精度化、宇宙用受信機の適用領域拡大等)

① 妨害・干渉に強い高精度な衛星測位システム

i. 環境認識

衛星測位システムの一つである米国の GPS は、当初は安全保障用途として構築されたが、民間航空機が空路を誤ったことにより撃墜される事件が発生したことを機会に、安全な航行の確保を目的として民間にも一部のサービスが開放された。このため、基本的に測位システムは国家が主導して構築・維持・運用し、民間事業者が無料で提供サービスを使用するという構造になっている。現在は、スマートフォンのアプリケーションから金融取引まで、社会活動に関連する多様なユースケースに利用されており、チップ等を含む利用分野の市場規模は 2023 年時点で 3,080 億ドル(Euroconsult Space Economy 2023)である。

民生産業においては、各国で様々なサービスに利用されており、衛星測位サービスは社会に根付いたものとなっている。その中でも、我が国は、世界に先駆けてセンチメートル級の高精度測位サービスを提供しており、自動走行や自動農機等への導入が進んでいる状況であり、今後モバイルヘルスや自動運転等の人命に関わるクリティカルなユースケースを実現するために、更なる測位精度やサービス品質の向上、停止期間の短縮、ユーザーが利用するにあたり参照する、現在

の測位サービス環境や性能評価に関する適切な情報提供が求められている。

安全保障においても衛星測位システムは利用されており、軍事演習等で妨害・干渉事例が顕在化していることに伴い、世界的に、妨害耐性・抗たん性の強化が急務となっている。具体的には、米国において約 50 年ぶりとなる測位分野の技術実証衛星(Navigation Technology Satellite-3: NTS-3)を 2025 年8月に打ち上げた。電子走査アンテナやソフトウェア無線機等を組み合わせて活用することにより、配信信号エリアを限定することによる信号強度強化や周波数を変更することで妨害を回避すること等の抗たん性向上技術の実証が進められている。また、衛星測位システムに対する物理的攻撃あるいはサイバー攻撃によるリスクの高まりを踏まえ、2024 年から抗たん性の観点から、R-GPS³⁷という安全保障用途目的の信号を送信し、最低限の構成に絞った小型で低コストな衛星群を GPS に追加する検討を開始した。NTS-3 と同様の技術は、欧州においても次世代測位衛星 Galileo 2nd Generation(G2G)に搭載予定であり、2027 年までに打上げ予定である。同じく、米 SDA や ESA においてもコンステレーション多層化によって衛星測位システムの抗たん性や性能の向上を目指す動きがある。また、世界的にも GNSS 信号へのスプーフィングやジャミングの事例が急増していることから、各国が連携・協調しながら、各種妨害をシステム側で検知した場合にはユーザーへ伝えることが望ましいという勧告³⁸も出されるなど、問題意識が高まっている。

一方、民生分野において、米国の Globalstar、Iridium 等の低軌道通信衛星に測位ペイロードを相乗りさせ、測位信号を配信している事例や、米国の Xona 社や中国の CENTISPACE 社等のように、低軌道通信衛星との相乗りではなく、低軌道測位コンステレーションを民間主導で構築する事例も見受けられる。しかしながら、新たにこのような低軌道測位コンステレーションを構築するには、十分な数の低軌道衛星や周波数を確保する必要があることから、容易ではないと考えられる。なお、周波数については他国にて既存周波数帯との干渉を踏まえて別の(例えば C 帯)周波数利用を検討する動きも見られ、2031 年の世界無線会議(WRC-31)の議題案として、5030-5250MHz 帯に対する無線航行衛星業務の分配が提案されている³⁹。

ii. 技術開発の重要性と進め方

現在、世界には、GPS(米国)、GLONASS(ロシア)、Galileo(欧州)、北斗(中国)、NavIC(インド)、準天頂衛星システム(日本)の6つの衛星測位システムが存在しており、これらは、継続的に測位精度やサービス品質の向上や停止期間の短縮が進んでいる。例えば、測位衛星の精度の指標の一つである SIS-URE⁴⁰は、GPS や準天頂衛星では約 0.6~0.7m (95%)程度だが、Galileo は約 0.2m (95%)程度と現段階で先行している。測位衛星も国際競争の時代に入っており、精度や安定性等の観点から他国の衛星測位システムに劣後してしまうと準天頂衛星システムが将来的に使われなくなってしまう懸念があるため、我が国も継続的な技術開発やその実証を実施していく必要がある。

例えば、測位精度の更なる向上のためには、衛星が送信する位置・時刻情報を更に正確なものとするのが戦略的に必要である。そのために、光時計やアンサンブルクロック等の超高精度クロックシステム技術や、衛星間リンク等を用いた高精度軌道時刻推定技術に取り組む必要がある。さらに、高精度測位サービスにおいては、補正情報の精度向上やリアルタイム化が求められる。

³⁷ R-GPS: Resilient GPS の略。L1C/A,P(Y),M コードの信号を送信する計画。 <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2024/emile.pdf>

³⁸ ICG-19 での勧告。 https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2025/ICG-19/ICG-19_WG-S_Recommendation_10S-1.pdf

³⁹ 国際民間航空機関(ICAO)は、2024 年 11 月の ITU の会合において、意図的な無線航行衛星業務への妨害波が、同じ周波数帯で運用されている航空安全システムへ干渉を及ぼす懸念(特に 5000-5150MHz の重複を懸念)があるとして、本議題案の検討に対して反対の立場を表明している。

⁴⁰ SIS-URE: Signal-In-Space User Range Error の略。衛星に起因する、衛星とユーザーを結んだ線の方向の誤差。

また、測位サービス品質を高め、停止期間を短くするためには、 ΔV 制御高度化等の細密軌道制御技術が必須となる。加えて、衛星測位システムを継続的に運用していくためには、衛星打上げコストを継続的に削減する必要がある。衛星バス、測位ペイロードの小型・軽量・省電力技術や、デュアルロンチ化技術、運用自律・自動化が不可欠である。

また近年、航空機や船舶等においてスプーフィングやジャミングの事例が増加している。例えば、ロシアによるウクライナ侵略後、カリニングラードや黒海、東地中海、フィンランド東部、またイスラエル・ガザ付近においても、スプーフィングやジャミングが報告されており、安全保障分野を中心に、これらへの対応として、メッセージ認証、拡散コード認証等による信頼性向上とソフトウェア無線等による抗たん性強化に取り組むことが必須となる。並行して、測位に悪影響を及ぼす各種妨害や衛星等を検知する技術の獲得や、電離層擾乱等への影響に対する改善についても検討を進めていく必要がある。

さらに、主要部品の国産化にも並行して力を入れて取り組むことも戦略的に必要である。例えば、測位衛星の心臓部となる原子時計については、我が国以外の5つの衛星測位システムは自国製のものを搭載している一方で、現状では、我が国の準天頂衛星には他国製の原子時計を搭載せざるを得ない状況がある。自律性、コスト、調達期間等の観点から、このような状況を解消していく必要がある。段階的な国産化を進めるなど、地上用途も含め適切なサプライチェーンを構築・維持し、最終的に国産化を可能とする実現可能性が十分にある道筋を作ることが重要である。

これらのことから、準天頂衛星システムについて、7機体制に向けた開発・整備・運用やバックアップ機能等を強化した 11 機体制に向けて検討・開発に着手することが非常に重要であることに加え、民生・安全保障共通して、測位精度やサービス品質を向上させる時刻・位置決定の高精度化(衛星間リンク、クロック技術、低軌道衛星の監視局利用など)、アベイラビリティ向上(細密軌道制御技術など)、補正情報の精度向上・収束時間の短縮)及び高信頼化(複数台の光格子時計による参照時計(日本標準時)の安定的な生成、測位衛星への高精度時刻情報の安定供給等)、これに加え衛星開発・打上げコストを継続的に削減する維持・運用の効率化(デュアルロンチ、運用自律・自動化)、小型・軽量・省電力化の開発、安全保障分野を中心に必要となる、妨害・干渉への耐性を強化する妨害回避機能の強化(ソフトウェア無線⁴¹等)について、上述のとおり自律性等の観点から主要部品の国産化を図りつつ1つのシステムとして推進することで、高精度で妨害・干渉に強い測位システムを実現していくことが、非常に重要である。

加えて、世界的に政府・民間を問わず急激に進展する衛星測位コンステレーションの多層化及び冗長化、周波数の多様化にも対応できるよう、我が国においても低軌道衛星測位(LEO-PNT)コンステレーションや 5GHz 帯測位信号の技術獲得に向けた要素技術の研究開発及び実証に取り組むことが重要である。

② 利用領域及びユーザーの拡大に関する実証や技術の開発

i. 環境認識

民生分野における受信機のうち、位置・時刻情報に関するものは、マスマーケットでの利用が既に広まっており、スマートフォン等の一部として民生市場の中で利用が進んでいる。この分野は生産数が多いことから、小型軽量化、低コスト化が進んでいる。一方、準天頂衛星システムが提供する、世界的にも先進的な高精度測位サービスに対応した受信機については、マスマーケットのも

⁴¹ ソフトウェア無線(SDR, Software-defined radio)は、ハードウェアに変更を加えることなく、システムを制御するソフトウェアを変更して無線通信方式を切り替えることを可能とする無線通信技術である。一般的に広い周波数範囲において多くの変調方式が可能となるように、ソフトウェアが汎用性の高いプログラム可能なハードウェア(電子走査式アンテナ等)を制御するものである。

のより大型・高価であったが、近年は小型化・低廉化が進んでおり、継続的に産業用機器等での利活用が今後も進捗する見込みである。具体的には、準天頂衛星システムに係る国内市場規模は、2021 年の約 4 兆 4,039 億円から 2030 年に約 18 兆 8,843 億円へ成長することが見込まれるという試算が存在する⁴²。また、海外に対しても、準天頂衛星システムという測位システム単体での展開ではなく、例えば農業、工業、測量といった個別のソリューションの提供と一体となって準天頂衛星システムを展開していくことによって、今後、関連市場がより広がっていくことが期待される。

特に、我が国の生活を支える基盤である重要なインフラにおいても、衛星測位システムは必要不可欠な存在となっている。例えば、証券取引所・金融情報サービス企業と証券会社・投資銀行のトレーディング基盤の間や証券会社・投資銀行の拠点間の時間遅延を検知するためには、協定世界時 (UTC) との同期誤差が数十ナノ秒レベルであることが必須であり、これを満たすことができる測位衛星が利用されている⁴³。航空分野においては、準天頂衛星システムと連携して衛星航法システム (SBAS) が運用され、航空機の航法性能向上が図られている。また、携帯電話においても、基地局間の電波発射のタイミングの同期を取るための手段として、衛星測位システムが提供する時刻情報が広く活用されている。仮に、我が国において 30 日間測位衛星が停止してしまった場合、その経済損失は、2021 年時点で 9,057 億円、2030 年時点で 18,950 億円に達するとの試算がある⁴⁴。重要なインフラは民間企業等の各主体で運用されているが、GPS のみではなく準天頂衛星も活用するような対策を講ずることにより、万一、GPS が利用できなくなった場合のシステムの安定性を高めることができると考えられる。

これに加え、従来は測位システムの利用対象領域としていなかった静止軌道や月近傍においても、受信機の受信感度の向上や測位衛星の SSV⁴⁵における情報が利用できるようになったことで、今後利用の拡大が見込まれており、静止衛星である ETS-9 では測位精度が求められる GPS 航法を基盤とした自律的な軌道制御を試みる予定である。

安全保障分野では、従来から測位システムが国家主導で開発が進められてきた背景から、例えば米国の NTS-3 においては、米国の AFRL⁴⁶が主導する形で、ユーザーのソフトウェア受信機と衛星搭載のソフトウェア無線機を統合的に実証するための研究開発が取り組まれており、衛星の打上げと同じく 2025 年ごろに全体システムとして実証される計画である。欧州においても、2016 年から初期サービスを提供している PRS サービス⁴⁷対応の受信機について、小型化・製造コスト削減に向けて EUSPA⁴⁸が「ULTRA (Ultra low-cost PRS Receiver)」プロジェクトを推進することで、厳しいセキュリティ制約が課される中でもユーザー利便性の高い受信機となるよう取り組まれており、今後、小型化されたユーザー機器の開発が進む見込みである。

ii. 技術開発の重要性と進め方

⁴² 内閣府宇宙開発戦略推進事務局調べ。

⁴³ 宇宙政策委員会 宇宙安全保障部会 第 29 回会合 (平成 30 年 9 月 20 日) の三井物産セキュアディレクション株式会社資料。

⁴⁴ 内閣府宇宙開発戦略推進事務局調べ。

⁴⁵ Space Service Volume: 高高度 (GNSS 衛星の近く又は、より高い高度) の軌道にいる GNSS のユーザー、国連により Interoperable GNSS Space Service Volume (SSV) として、低軌道から静止軌道までの基準信号性能を文書化、定義している。

⁴⁶ Air Force Research Laboratory

⁴⁷ Galileo Public Regulated Service: 政府公認のユーザーや高い継続性を必要とする機密アプリケーション向けの暗号化されたナビゲーションサービス。

⁴⁸ European Union Agency for the Space Programme: 2021 年に設立された欧州連合宇宙計画庁 (EUSPA) は、当初 2004 年に European Global Navigation Satellite Systems Agency (GSA) として創設された宇宙機関であり、欧州連合宇宙計画を管理する欧州連合の機関である。

衛星測位システムを利用するためには、測位衛星から配信される信号を受信し、位置・時刻を決定する受信機が必要であり、スマートフォンに内蔵されているチップを始め、衛星搭載品や防衛装備品等、様々な製品がユーザーの利用端末となっている。また、衛星測位システムの利用拡大に当たっては、RTK⁴⁹の代替サービスとしての位置付けも含めた MADOCA-PPP の実用サービスの提供等により地上での利用を加速化させることや、7機体制における性能向上した SBAS 運用により航空機等の航法性能向上を図ることが非常に重要であるが、それにとどまらず、宇宙での活用も有望視されている。例えば近年は、測位衛星より低い軌道の衛星だけでなく、静止衛星による利用や月近傍でも利用が想定されている。静止軌道を含む高高度衛星や月近傍等の新たな領域での利用には、地上での利用とは異なりサイドローブ⁵⁰のような微弱信号を用いた測位技術を利用することになる。そのため、微弱信号を受信できる機器の開発や、測位信号を受信する衛星側で高精度測位信号を処理できるオンボード PPP(Precise Point Positioning)等に取り組むことが非常に重要である。

また、利用ユーザーの更なる拡大には、実証等を実施し利用者のニーズを把握しそれに対応していくことも含め、測位精度の向上に加え、衛星からの信号になりすまし正常な測位を妨害するスプーフィング等の脅威が増加していることを踏まえた抗たん性やセキュリティ耐性の強化も重要となる。

具体的には、利用ユーザー拡大に必要となる測位精度の向上、抗たん性やセキュリティ耐性の強化及び受信機の小型・低コスト化といった高付加価値化の観点から、高高度・月近傍対応マルチ GNSS 受信機や衛星オンボード PPP、受信機用チップスケール原子時計、アダプティブアレイアンテナ、マルチパス⁵¹対策に資する信号処理技術、次世代受信技術(アルゴリズム)等の受信機の高精度化と複数情報源に基づく偽情報対策、認証やソフトウェア受信機と電子アンテナを利用した妨害回避等による受信機の信頼性・抗たん性・セキュリティ強化に関する実証や技術開発を実施することが重要である。これに加えて、利用領域拡大に必要となる宇宙用受信機の適用領域拡大の開発を推進することで、利用領域及びユーザーの拡大を実現することが重要である。

⁴⁹ RTK: Real Time Kinematic の略。携帯電話ネットワーク等を用いた高精度測位システム。

⁵⁰ アンテナの電波を放射状に示した際に、主に使用する信号強度・感度強い部分のメインローブに比して、信号強度・感度がわずかに生じている部分を指す。

⁵¹ 電波が発信源から受信点まで直進するだけでなく、山やビルなどに反射して複数のルートを通して伝播すること。

III. リモートセンシング

(1) 将来像

小型衛星コンステレーションの構築の進展や新たなセンサの開発等により、地球観測衛星の時間・空間・波長分解能が高まっている。また、ビッグデータ処理、人工知能(AI)及び機械学習(ML)といったソリューション技術が発展する中、地球観測衛星データを短時間かつ自動で宇宙から地上に届けると同時に、ドローン、航空機、IoT、気象、海洋、その他の地上データ等を組み合わせて必要な解析を行うことができるようになり、幅広いアプリケーション・サービスを実現することが可能となる。

特に近年では、様々な課題に対するソリューションとして、個別の衛星システム単位ではなく、衛星観測データや地上データ等を複合的に組み合わせることによって AI 等の活用により効果的・効率的にアプローチする手法・事例等が広がっている。

これによって、安全保障に加え、大規模災害への対応を含む防災・減災、国土強靱化、2050 年カーボンニュートラルの実現を含めた地球規模課題への貢献、さらには自動運転やスマートシティ、スマート農林水産業等の民間市場分野におけるイノベーションの創出が期待される。

また、国際協調による気候変動や防災・災害対策等の地球規模課題解決に向けた取組など、近年、衛星地球観測への期待が外交的にも増加している。そうした中、特に、島嶼国やグローバルサウス等との関係強化において、国際協調・協力の観点での地球観測の在り方をより戦略的に検討することで、我が国の総合的な国力の強化に資することが期待される。

(2) 環境認識と技術戦略

リモートセンシング分野は、これまでの大型観測衛星による広域・高精度観測に加え、小型観測衛星コンステレーションの登場によって高頻度の観測が可能となり、商業化と市場の拡大が進展している。2022 年に始まったロシアによるウクライナ侵略においては、各国が状況把握のため、高分解能・高頻度観測の商用観測衛星を活用している。また、令和6年能登半島地震及び 2024 年に発生した石川県における豪雨では、大型衛星である ALOS-2 及び民間小型 SAR 衛星により発災後の撮像を実施し、浸水や土砂災害発生状況の把握に活用された。「令和6年能登半島地震に係る災害応急対応の自主点検レポート(令和6年6月)」では、能登半島地震を踏まえた有効な新技術及び方策として、災害応急対策の強化・被災状況等の把握における SAR 衛星の有効性が明記された。今後、小型衛星と大型衛星の相互連携による、衛星観測の新しい価値創出が防災等の分野を中心に期待される。また、我が国においては、多様なセンサを搭載した観測衛星の製造・運用・解析の経験の蓄積があり、大規模システムインテグレーター企業に加え小型衛星コンステレーションスタートアップ企業や非宇宙領域のプレイヤーも含めたエコシステムを形成している。こうした我が国の強みを活かしながら、新たな市場を形成していくことが必要である。

海外では、NASA が 2024 年3月に「EARTH SCIENCE TO ACTION STRATEGY 2024-2034」、ESA では同年9月に ESA2040 年戦略に従い地球観測科学戦略「Earth Science in Action for Tomorrow's World」を発出している。気候変動に関連する地球規模課題に対し、多様な地球観測衛星によって意思決定や行動に活用する点が目標と掲げられており、戦略的、総合的な長期の方針がまとめられている。さらに、米国や NATO においては商用宇宙ソリューションの防衛分野への統合戦略が策定され、具体的な取組⁵²が進展している。我が国においても、JAXA による衛星地球観測の今後の方向性として、第5期(2025～2031 年度)における衛星地球観測分野での

⁵² 例えば米国では商業衛星の画像やデータ解析能力を活用し、機密扱いでない戦術情報を戦闘部隊に迅速に提供する TacSRT (戦術監視・偵察・追跡プログラム、Tactical Surveillance, Reconnaissance, and Tracking Program) などが実施されている。

JAXA の役割をふまえ、「戦略性」、「総合性」、「継続性」の観点より、従来の衛星毎のプロジェクトベースでのシーズ発想から、ソリューションも含めた各課題への戦略的・複合的なアプローチに立脚したプログラム形成・体制整備へと転換していく計画である。また、防衛省が宇宙領域防衛指針を発表し、民間や研究機関との連携強化やデュアルユース技術の開発投資促進を通じて、国内宇宙産業の基盤強化を目指している。

様々な分野での実証・利用が広がる可能性のあるセンサについては、我が国として今後も開発・維持すべきである。ただし、気候変動や防災・災害対策などの地球規模課題解決に向けた取組など、直近では国際プレゼンスの向上などには寄与するものの新たな市場創出が短期的に見込めず、民間主導でそのセンサ技術を開発継続していくことは困難であるケースも存在する。このような新しいセンサやセンサの技術革新においては、政府としても利用省庁・関係機関によるアンカーテナンシーの可能性を追求することや、民間の将来の事業化に向けた実現性検討やフロントローディング支援をしていくことについても検討が必要である。

① ニーズに即した情報を抽出・提供するための複合的なトータルアナリシス技術

i. 環境認識

社会・経済を支えるインフラとして、地球観測衛星データの重要性が一層高まる中、IoT・ビッグデータ活用・AI・機械学習等の進展により、今後、データの種類や量が飛躍的に増加すると想定される。こうした中、統合的な観測データセットをアーカイブ・高次処理・配信等で整備することに加え、衛星リモートセンシングデータをドローン、航空機、IoT、気象、海洋、その他の地上データ等と融合し、複合的な解析を実施することで、災害対策・国土強靱化・地球規模課題解決や Society5.0 の実現等に資する幅広いアプリケーション・サービスに適用するニーズが高まっている。

衛星データを解析して主に安全保障用途の顧客のニーズに即した情報を提供する官民連携の動きが進んでおり、米国では、2022 年に国家偵察局(NRO)が 10 年で最大 40 億ドル以上の画像契約を米国企業と締結、2024 年には、国家地理空間情報局(NGA)が5年で2億 9,000 万ドルの契約を米国企業と締結した。欧州においては、ESA が AI を含めた最先端技術を衛星リモートセンシングに適用する研究開発プログラム・Φ-Lab 等を進めるとともに、EU の観測プログラム・Copernicus データのオープン＆フリー戦略により、ダウンストリーム事業者数を増やしており、我が国においても二次利用向けにデータをオープン化する等により、宇宙データ利用の裾野を広げるといった枠組みの検討が必要である。将来的には 3D 化技術により、国土管理にとどまらず、都市デジタルツインの構築によるスマートシティ等の実現が想定される。米 Maxar Technologies 社がステレオ画像の合成処理によって 3D 化のソリューション提供を実施するとともに、NASA は ASTER⁵³等により3次元地形情報を整備、公開している。また、仏宇宙開発機関(CNES)は欧 Airbus 社と官民共創の衛星コンステレーションプログラム・CO3D によって、高分解能 3D マップの作成・技術実証の開始を 2026 年より目指す。さらに、2024 年9月に米 Planet 社が発表した世界各地の森林の炭素蓄積量を測定可能な Forest Carbon は、同社の衛星観測データ及び GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation)を含む宇宙機や航空機のライダーデータに AI 処理を行うことで、対象地域の樹冠と炭素貯蔵量の変化測定を可能とするもので、森林破壊リスクの追跡・軽減等への活用が期待される。

我が国の産業界においても、ALOS による観測データを活用して全世界デジタル 3D 地図サービス「AW3D」の世界展開が進められており、航空測量会社においても衛星データを含めた多様な

⁵³ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer の略。NASA と日本の経済産業省が共同で 3 次元地形情報を公開している。<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

地理空間情報の活用が進む。2020 年代後半以降、商用観測衛星も含め多くの衛星が打ち上げられることが想定される中、2030 年代には地球全体から都市域までシームレスにデジタルツインでつなぐことで、膨大なデータから必要な情報を容易に抽出可能な衛星データ利用ソリューションが展開されることが予想される。防衛省は、デジタルツインを活用し膨大なデータを即時処理して状況を可視化し、災害派遣等を想定した技術実証を通じてリアルタイムで直感的な情報提供環境の整備を検討している。

また、衛星以外のデータとの融合やモデルとの同化及び AI を活用したアルゴリズム開発等の分野においては、JAXA 等が気象に応じた地表面や河川等の状態を数値計算する、陸上の水循環シミュレーションシステム(Today's Earth)の実証を進めており、今後社会実装が一層求められる。欧米においても、欧州では地球デジタルツイン(Destination Earth)のプラットフォームの運用が開始され、また、NASA と ESA が観測データ解析プラットフォーム(MAAP)の共同運営を開始するなど、衛星データを統合的に活用する機械学習(ML)やアルゴリズム、モデルや AI の技術発展が加速している。

近年、米国や欧州、中国では AI の開発・活用が国家戦略として進められ、衛星データ解析分野でも民間企業や研究機関が AI を積極的に導入し、森林管理や災害予測、資源調査など多様なユースケースが生まれている。例えば、米 Maxar 社の複合解析技術、中国の RingMo 3.0 などは、高度な AI 処理により精度の高い環境評価や基盤地図の作成を実現している。我が国においても 2025 年に「人工知能関連技術の研究開発及び活用の推進に関する法律」(AI 法)が施行され、新たに設置された人工知能戦略本部において人工知能基本計画の検討が開始されたところであり、将来的には衛星データ利用にかかる AI 戦略についても議論され研究開発が加速することが期待される。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国が様々なデータを複合的に解析する技術を開発し、大規模災害や頻発する風水害への対応、老朽化するインフラの監視、広域海洋監視等、我が国が特に強いニーズを有する分野に適用することは、自律性の観点から重要であるとともに、新たな市場の構築につながる。さらに、当該技術に係る我が国の経験の蓄積を活かすことは、我が国の国際競争力の獲得や産業規模の拡大につながることを期待される。このような市場構築には、防災分野は行政による一次利用としたうえで、二次利用向けにオープン化されたデータを活用しビジネス拡大に繋げる仕組み等の検討が必要である。

我が国においては、政府において複数の衛星データ提供プラットフォーム⁵⁴が構築され、プラットフォーム間で API 連携を実施し、多種衛星をオンデマンドでタスキングする開発も進む。2020 年より日本全国の 3D 都市モデルの整備・活用・オープンデータ化プロジェクト「PLATEAU」が始まっている。さらに、内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の第3期プログラムにおいて、防災デジタルツインの構築に向けた開発として、衛星センサをマルチに活用して、地上系のセンサとも組み合わせながら、広域的な被害状況の把握を進める取組を実施している。実装に向けた道筋を引き続き検討することが必要である。加えて、国立環境研究所は、温室効果ガス(GHG)の観測データを集約し、国内外の研究機関・産業界に提供するプラットフォームの開発を進めており、2025 年度に立ち上げ予定である。

加えて、インフラ管理や森林状況把握等の行政課題を念頭に複合的データの解析手法の開発とデータ利用実証も実施している。JAXA を始めとする研究機関においては気象や海洋を始めと

⁵⁴ JAXA の G-Portal 、文部科学省の DIAS 、経済産業省の Tellus など。

する地球規模の環境データの高度化に向け、モデルデータ同化⁵⁵等の解析技術に関する先行した研究開発を進めており、このような衛星地球環境データを活用した新たなソリューションの創出に向けた技術開発も、非常に重要である。

また、地球全体から都市域までシームレスにデジタルツインでつなぐ将来も見据え、特に安全保障や防災での利用において重要となるデジタルツインに向けたモデル同化・可視化技術、機械学習や AI による複合・解析技術、データフュージョン等のためのセンサ及びデータ校正・補正技術、ユーザーインターフェースも考慮した衛星データの数値情報化技術や API でのデータ提供基盤の構築、付加価値情報を創出するための画像判読・変化検出の複合解析技術、急速な発展を遂げている生成 AI 等最先端の情報科学との融合・活用も含めた AI 分析・予測技術の高度化等の開発を進めることが非常に重要である。情報科学との融合では、例えば、地震・洪水等の災害状況に合わせて小型 SAR 衛星の関心領域(AOI)を自動で適切に設定する技術⁵⁶や、異なる衛星データ・航空写真・3次元点群データ等を組み合わせ、地上の変位・被害状況を解析するシステム⁵⁷が考えられる。

加えて、こうしたリモートセンシングを活用したソリューション市場は黎明期である。このため、官需だけでなく民需、国内市場だけでなく国際市場への展開も見据え、衛星データ利用の開発・実証を行い、実証結果をふまえた官民におけるソリューションの積極的な実装を進めることが非常に重要である。

② 時間情報を拡張するコンステレーションに関する技術等

i. 環境認識

衛星リモートセンシングの活用が進んでいる災害対策や安全保障分野においては、リアルタイム性がより求められている。観測対象地域・地点の情報を高頻度に観測して変化を見逃さないようにするとともに、意思決定を迅速に行うために、膨大な観測データから有益な情報を抽出して伝送する技術が求められる。

時間情報を拡張するコンステレーションに関する技術等は、観測衛星のコンステレーション構築、オンボード情報処理システム、観測衛星システムの小型軽量化・低価格化技術、静止軌道からの観測などによるリアルタイムな観測技術から構成される。

現在、世界において、小型観測衛星コンステレーションの登場によって高頻度の観測が可能となり、リアルタイム性が求められる安全保障分野の官需が、商業化と市場の拡大をけん引している。米宇宙庁(SDA)の拡散型戦闘宇宙アーキテクチャ(PWSA)構想では、ミサイル早期警戒等の安全保障ニーズに対応するため、通信衛星コンステレーションにとどまらず、2026 年までの次なるフェーズ(Tranche 1)において、一部の衛星に赤外線センサを搭載した 35 機の低軌道観測衛星コンステレーション構築も行う計画となっている。また、2022 年に米国防総省の国家偵察局(NRO)が 10 年で最大 40 億ドル以上の画像契約を、光学衛星コンステレーションを展開する米 BlackSky 社

⁵⁵ モデルデータ同化：地球大気等をシミュレーションするための数値モデルに衛星から得られた実測データを取り込む手法。連続的なデータの作成や衛星では観測できない情報の推定が可能となる。< <https://earth.jaxa.jp/ja/research/fields/model/index.html>>

⁵⁶ 震度分布や地盤情報等とインフラ情報を合わせて解析し、混乱する災害初期に、適切に AOI を複数衛星に振り分けタスキングする技術。小型 SAR 衛星は高解像度だが撮像範囲が狭く、ピンポイントなタスキングが必要。数十機以上でコンステレーションが構成される時期には、現在の手動による個別のタスキングは困難であり、南海トラフ巨大地震等の広域災害の場合は、更に難易度が上がる。

⁵⁷ 今後機数増が見込まれる小型 SAR 衛星は、高解像度だが撮像範囲が狭く、アーカイブデータの十分な蓄積が難しいため、既存のデータと組み合わせた解析手法が必要。

⁵⁸、Maxar Technologies 社⁵⁹、Planet Labs 社⁶⁰の3社と締結し、画像購入に加えて、衛星製造・打上げ・地上設備を含む費用も一定率で負担する等、政府予算で民間事業者による衛星コンステレーションの構築を支援している。さらに、NRO は 2024 年末までに SpaceX 社製の ISRT⁶¹用低軌道小型衛星 100 機以上の衛星の打ち上げを実施した。フィンランドの小型合成開口レーダ (SAR) 衛星コンステレーションスタートアップ企業 ICEYE⁶²においては、フィンランド技術庁や政府投資機関による出資を受けており、ウクライナにおける実戦経験を踏まえながら技術レベルを高め、規模を拡大している。また、こうした欧米民間事業者は、政府調達等による資金力・信用力をレバレッジに、民間資金調達や国際展開も実施している。

他方、これまでの大型観測衛星による広域・高精度観測に加え、コンステレーション構築による高頻度の観測に加えてソリューション技術との組合せで、防災・災害対策を含めた民生分野におけるリモートセンシングの重要性が今後ますます高まる見込みである。令和6年能登半島地震においても、政府の大型観測衛星である ALOS-2 のデータに加えて、国内外衛星事業者が政府機関に衛星データを提供する事例が相次いだ。その他、観測データをリアルタイムで活用することで、インフラ管理や災害リスクに係る保険、再生可能エネルギーの出力予測に活用する等、成長が期待される。また、将来的には地球全体から都市域までシームレスにデジタルツインでつなぎ、時間・空間方向に広がる 4D 情報の強化により「見通せる社会」⁶³の実現に貢献することが期待される。

こうしたコンステレーション構築の動きに加え、コンステレーションのより効果的な活用の観点で、欧州では ESA が主導し地上局を介して EU の Copernicus プログラムの衛星 Sentinel とフィンランドの ICEYE 社の衛星を協調させて運用する技術の実証を 2021 年に実施した。我が国でも 2021 年に、JAXA 宇宙イノベーションパートナーシップ (J-SPARC) の枠組みの下、将来の衛星データの活用及び観測ミッションにおける小型衛星と大型衛星の連携について検討が開始された。また、米小型 SAR 衛星コンステレーションスタートアップ企業である Capella Space 社でもオンボード画像処理技術の軌道上実証を 2022 年に実施したことを公表している。我が国においても、地球観測衛星の活用拡大を目指す官民連携コンソーシアムである「衛星地球観測コンソーシアム (CONSEO)」の枠組みにおいて、2024 年に衛星地球観測の官民連携による災害対応訓練(防災ドリル)を実施した。ここでは、大規模災害を想定し、ALOS-2、ALOS-4 や民間衛星 (SAR・光学) を活用し、実際の撮像等を実施し、報告用プロダクトの作成を実施した。

ii. 技術開発の重要性和進め方

我が国においては光学や SAR 等の小型衛星コンステレーション事業を展開するスタートアップ企業が複数社存在⁶⁴する。運用機数では欧米企業に劣後している一方で、地上技術として磨かれたイメージセンサ技術や SAR の高分解能技術等が強みである。また、多波長光学観測を始め、新たなセンサ技術の商業化に向けて取り組むスタートアップ企業も存在する。

⁵⁸ 2024 年 11 月現在、16 機運用。< <https://ir.blacksky.com/news-events/press-releases/detail/98/blackskys-new-satellites-complete-commissioning-enter>>

⁵⁹ 2024 年 10 月現在、3 機運用。(6 機目標) < <https://www.maxar.com/splash/it-takes-a-legion>>

⁶⁰ 2024 年 10 月現在、22 機運用。< <https://developers.planet.com/docs/data/skysat/>>

⁶¹ 情報収集・警戒監視・偵察・ターゲティング

⁶² 2024 年 10 月現在、38 機運用。< <https://www.iceye.com/press/press-releases/iceyes-four-new-generation-3-satellites-launch>>

⁶³ 自然・社会経済などの将来や、突発的な災害・環境変化などを見通せる社会。

⁶⁴ Axelspace 社：2024 年 10 月現在、5 機運用。(光学、2025 年までに 12 機目標)

Synspective 社：2024 年 10 月現在、4 機運用。(SAR、2020 年代後半に 30 機目標)

QPS 社：2024 年 10 月現在、3 機運用。(SAR、2027 年度までに 24 機目標)

観測衛星データの利用省庁を含め政府は、こうした企業とともに、衛星コンステレーションの利用拡大に向けた実証や、小型軽量化・低価格化に資するコンポーネント・要素技術の開発等を実施している。加えて、JAXA においては、JAXA の大型観測衛星による広域・高精度観測と民間の衛星コンステレーションによる高頻度の観測を組み合わせた官民共創プログラムや、オンボードエッジコンピューティング環境を活用した軌道上での衛星間連携の実現に向けた研究開発等を実施している。観測衛星コンステレーションが安全保障や防災・減災、将来的には地球・都市デジタルツインの 4D 化による「見通せる社会」の実現に貢献することに鑑みれば、更に時間分解能と、ユーザーが地上で画像を確認するまでの時間短縮を実現すべく、こうした事業を着実に実施していくことは重要である。

他方、小型衛星コンステレーションは、アジャイルに高頻度の開発・実証を繰り返す中で、高分解能化、観測幅拡張等、機能・性能を段階的に向上させ、かつ十分な数の衛星を打ち上げることで初めて高頻度・高精度観測という価値が生み出せるため、深い「死の谷(valley of death)」を越えるための大規模かつ長期的な先行投資が必要となる。上記の国内スタートアップ企業は、主に政府の研究開発事業の採択や、ベンチャーキャピタル(VC)からの資金調達・ベンチャーデッド・新規株式公開を含めた民間市場における資金調達によって先行投資を進めている。衛星運用機数で海外企業との差が拡大している現状や我が国におけるリスクマネー供給量の少なさを踏まえれば、民間からの資金調達をうまく活用しつつも、政府としては研究開発支援のみならず、可能な限り早期に利用省庁・関係機関によるアンカーテナンシーの可能性を追求するとともに、高頻度実証・量産化技術の確立・商業化加速に向けた更なる支援の強化が非常に重要である。

さらには、国内の小型衛星コンステレーションが世界の技術・ビジネスに後れを取らぬようにすることが必要である。多種衛星の協調観測技術や運用自律化技術を含むコンステレーション技術、IoT を活用した地上リファレンスデータ取得等によるスマートタスキング技術に取り組むことが重要であり、例えば、災害状況に合わせて SAR 衛星の AOI を自動で適切に設定する技術や被害域の判読など解析から情報提供までの自動化、異なる衛星データ・航空写真・3次元点群データ等を組み合わせ、地上の変位・被害状況を解析するシステム、衛星センサをマルチに活用して、地上系のセンサとも組み合わせながら、広域的な被害状況の把握を進める取組の検討が必要である。光通信技術等による高速・高頻度ダウンリンク技術、データ取得と同時にデータ解析を行うオンボードエッジコンピューティングの高度化や省電力化、複数の観測衛星で撮像したデータと静止軌道や低軌道のデータ中継衛星に配置されたエッジコンピューティング機能と連携して処理する技術、衛星システムの小型軽量化・低価格化について、ユースケースや産業界、関係政府機関のニーズを踏まえつつ総合的に取り組むことが重要である。

防衛省においては、スタンド・オフ防衛能力の実効性確保に必要な目標情報の探知・追尾能力獲得のため、衛星コンステレーションの構築事業が開始された。本事業と並行して、光衛星間通信や撮像画像のオンボード処理技術等の確立に向けた実証に取り組んでいくことは非常に重要である。

また、安全保障や防災・減災において、即時性、常時・連続性、広域性の向上を実現する静止軌道からの観測技術についても取り組んでいく。海外計画の最新動向を注視しつつ、実現に必要な大型アンテナの開発(合成開口・補償技術)を含め取り組むことが重要である。

③ 空間情報を拡張する光学／レーダ等のセンサ開発技術

i. 環境認識

空間情報を拡張する光学／レーダ等のセンサ開発技術は、画像の取得や陸域・海洋・大気の多様な物理量を観測するための光学イメージャ、合成開口レーダ(SAR)、雲・降水レーダ計測、ラ

ライダー計測（高度計、ドップラー等）という多様なセンサの開発と、共通技術としての新しいセンサで構成される。

光学や SAR センサ等については、高分解能化、広域化等、イメージング画像の高度化に向けて各国がしのぎを削る。例えば、光学では、米 Maxar Technologies 社、欧 Airbus 社などは 30cm 級の超高分解能光学衛星画像を提供しており、今後も安全保障・民生利用の様々なニーズに対応するため、イメージング画像の高度化の流れは続く見通しである。また、センサの小型化についても開発が進んでいる。例えば、加 GHGSat 社は、瑞 ABB 社のセンサを利用し、温室効果ガス観測の小型衛星コンステレーションの構築を進めている。

SAR については、民間事業者による X バンド⁶⁵ SAR 衛星のコンステレーション事業が進展⁶⁶すると同時に、JAXA において、植生を透過し、地殻変動の観測に適した L バンド⁶⁷ SAR 衛星 ALOS-2 の運用、及び ALOS-4⁶⁸の運用により、高分解能、広域撮像が可能である。令和6年能登半島地震においても、ALOS-2 の観測データが、輪島市西部における最大約4mの隆起の検出や土砂災害箇所⁶⁹の早期把握に活用された。続く 2024 年9月の石川県での豪雨でも、観測データが国土交通省に提供され、浸水や土砂災害発生の状況把握に活用された。また、複数の民間事業者(X バンド SAR 衛星や光学衛星)も災害後に緊急観測を行っており、将来の激甚災害に備え官民連携での衛星の役割分担が求められるとともに、L バンドと X バンドによる複合的なデータ利用も期待されている。海外においては、L バンドでは、NASA、印 ISRO が共同開発する 2025 年に打上げられた NISAR 衛星、ESA 等が開発し、2028 年以降打上げ予定の ROSE-L 衛星がこれを追う。また、独 DLR が TanDEM-X により複数機の編隊飛行による同時観測にいち早く取り組んでおり、米国では民間事業者が X バンド SAR 衛星によるバイスタティック SAR 観測実証が進むなど、センサだけでなく高度な複数機運用技術の重要性も高まる見込みである。

雲・降水レーダによる3次元観測データは、科学的価値も大きいことから、豪雨災害等をもたらす雲・降水システムの理解にも大きく貢献している。20 年以上にわたって世界の降水3次元情報を観測している TRMM 衛星や GPM 衛星に搭載された降水レーダ⁶⁹や世界初のドップラー速度計測による EarthCARE 搭載雲レーダ⁷⁰においては、我が国が高い技術的優位性を有しており、欧米と共同開発した衛星に我が国の雲・降水レーダが搭載・運用されている等、我が国の技術力を軸とした欧米との国際協力も進む。

また、高度計ライダーによって、都市や森林等を含めた地表面形状に係る3次元的理解が可能となることが期待され、2030 年までに1～2兆円規模との予測もある航空機ライダーのニーズを部分的に衛星が担うことで、市場の獲得が期待される。さらに、高分解能イメージング等と融合して都市デジタルツインを実現することで都市管理・インフラ管理・災害対策など社会の DX 化が一気に加速される可能性がある。NASA においては、氷床観測の ICESat や森林観測の GEDI を開発・運用している。

⁶⁵ 8～12GHz の電波（マイクロ波）。X バンド SAR は、L バンドや C バンドと比較して小さい物体の観測に適しており、具体的には地上インフラ等人工物の観測に用いられる。

⁶⁶ Synspective 社：2024 年 2 月現在、最高分解能 0.9m、観測幅 20km70km×30km。

QPS 社：2024 年 2 月現在、最高分解能 0.46m、観測幅 14km×7km。

フィンランド ICEYE 社：2024 年 2 月現在、最高分解能 0.5m、観測幅 50km×30km。

⁶⁷ 1～2GHz の比較的波長の長い電波（マイクロ波）。L バンド SAR は、比較的広い範囲の地殻変動などの観測に適している。

⁶⁸ 高分解能（3m）で広域撮像（200km）できる能力を有する（2024 年 7 月に打ち上げられた）。

⁶⁹ 降水の立体構造を高い精度で観測することができるセンサ。我が国が開発した降水レーダが、日米共同ミッションである熱帯降雨観測衛星(TRMM、1997 年打上げ)や全球降水観測計画(GPM、2014 年打上げ)に搭載され、日々の気象予報や気候学の研究に活用。

⁷⁰ 衛星搭載のレーダによる雲の垂直構造の観測や雲の内部の粒子運動を計測する技術。EarthCARE ミッションにおいて NICT と JAXA が CPR (Cloud Profiling Radar) を開発中。 https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/about/cpr_tech_j.html

加えて、ドップラー、偏光、差分吸収等多様なライダー技術の発展により、従来の計測手法では困難であった大気粒子や風況、水蒸気等の3次元プロファイルの解明により気象や台風の予測精度向上、黄砂・火山灰等の分布の把握に加え、4D の地球デジタルツインの実現にも貢献することが期待される。

ii. 技術開発の重要性と進め方

空間情報を拡張する光学、SAR、雲・降水レーダのセンサ開発技術については、安全保障や防災・減災、将来的に産業基盤となり得る地球・都市デジタルツインの実現に貢献し、リモートセンシング技術をシステムとして高度化するコアの技術であり、今後の技術投資を怠れば、我が国の技術的優位性が低下することにつながるため、技術投資と調達自在性の確保が必要である。また、地上技術として磨かれたイメージセンサ技術や SAR の高分解能・広域撮像技術、雲・降水レーダの3次元計測等が強みである。このため、自律性、技術的優位性の観点から、情報収集衛星や、ALOS-4、EarthCARE、降水レーダ衛星(PMM)を含めた既存ミッションに着実に取り組むことが重要である。

センサの高度化に向けた取組も必要であり、光学センサについては、安全保障や防災等の被災状況把握や3次元地形情報に資する、40cm 級の高解像度化・高指向精度化が非常に重要である。さらに将来像として海外事業者がリードする 30cm 級の高解像度化の実現性検討も必要である。また、赤外線センサについては、広範囲での超高精細な撮像を可能とする4k×4k 級以上の多画素化技術の獲得が重要である。都市デジタルツインの基盤となる3次元地形情報の高精度化においては、宇宙からレーザ光を用いて直接的な距離計測を行う高度計ライダーとステレオイメージングとの組合せで、鉛直方向の地上位置精度1m 級の高精度な3次元データの獲得が見込まれる。世界最高水準の3次元情報の開発に向け、光学衛星コンステレーションとの協調観測等を見据えて2020年代後半での高度計ライダーのISSでの宇宙実証と衛星への搭載を目指し、必要な技術の獲得・実証に取り組むことが非常に重要である。さらに、高度計ライダーを活用した商業化の道筋を描きつつ、小型・高効率・高機能なレーザ技術といった、革新的な高度計ライダー技術の獲得に向けた要素技術の開発に挑戦することも非常に重要である。また、高精度な陸地の3次元情報を取得する高度計ライダーのみならず、風向風速、大気微粒子や、微量大気成分の鉛直分布など大気3次元情報の精緻化に向けた多様なライダーの実現についても検討が必要である。

加えて、SAR や雲・降水レーダ等のレーダ技術の高度化も重要である。SAR センサの高度化においては、ALOS-4 において開発している新たな観測技術(デジタルビームフォーミング)を活用した広域観測で世界をリードするとともに、更なる高度化として、広域観測や、ALOS-2 による研究において土地被覆分類⁷¹の高精度化や海上における台風の風速等観測への有用性が明らかになっている多偏波観測、これまで観測が困難であった南北方向(衛星進行方向)の変異を測定するバイスタティック観測が重要である。また、小型化の検討においては複数機運用技術に挑戦することによって、衛星データ利用の拡大が期待されることから、検討に着手する必要がある。さらに、民間事業者がコンステレーション構築を進める小型 SAR 衛星については、高分解能化、広域化や干渉解析技術等、ミッションの高度化を着実に実施することが重要である。また、雲・降水レーダの高度化においては、高感度化・高精度化に加え、大型アンテナ、デジタルビームフォーミング、多周波化・多偏波化等の発展的な観測技術の開発等、我が国の強みとなる技術を継続的に磨いていくための検討が必要である。とりわけ、光学と SAR については、安全保障分野において

⁷¹ 土地被覆分類：生態系評価や資源管理、防災・減災等への活用を念頭に、土地の状態や利用状況を水域や都市、水田、畑地、裸地等のカテゴリーに分類すること。

もセンサの高性能化を着実に取り組むことが重要である。また、世界で民間事業者による衛星コンステレーション構築・商業化が加速しており、画像処理技術、超低高度技術、新たなセンサ技術等を含めた技術要素を考慮しながら、常に先の技術トレンドを見据えた検討が必要である。

センサの高度化に向けては、新たな利用を開拓し得る革新的なセンサ技術について取り組むことが重要である。実証の機会を増やすとともに、観測性能をシミュレーション上で評価する設計解析技術などの新規技術を積極的に取り入れながら技術開発を加速し、また、光・量子技術等の先端技術や革新性の高い地上技術をいち早く宇宙応用に向けて開発することが重要である。センサ小型化の技術開発についても、小型観測衛星コンステレーション構築の上で重要であり、検討が必要である。

④ 波長・周波数情報を拡張するセンサ開発技術

i. 環境認識

気候変動に係る科学研究に加え、近年活発化しているカーボンプライシングや ESG ファイナンス、自然資本等に対しては、波長/周波数情報を拡張するセンサによるデータが有用であり、米科学アカデミーにより 10 年に一度勧告として発出される Decadal Survey を基に、NASA において先端的な地球観測が進められる。また、北米等のスタートアップ企業を中心に、多様な波長・周波数情報の活用による新たなデータサービスの事業開発が推進されている。加 GHGSat 社が産業排出源からの温室効果ガス観測に成功し、独自の小型衛星コンステレーションの構築⁷²を進め、米 Spire Global 社が気象情報や船舶が発出する電波信号の観測と事業展開⁷³を行っている。小型光学衛星コンステレーションを構築する米 Planet 社が非営利団体の米 Carbon Mapper 社と協力し、メタンガス検出を目的とするハイパースペクトルイメージングセンサを搭載した衛星⁷⁴を 2024 年に打ち上げた。ESG ファイナンスの観点においても、企業や金融機関等による衛星データの活用が始まっており、ESA 等を中心に、国際ルールメイキングに向けた動きが顕在化してきている。このような流れの中で、カーボンマーケットでの市場獲得も視野に入れた仕組みづくりが重要になってきている。

我が国においては、GOSAT/GOSAT-2 において世界に先駆けて近赤外から熱赤外に至る広帯域同時分光計測技術を確立し、新たに 2025 年に GOSAT-GW を打上げ、温室効果ガス観測の高精度観測を継続して実現している。また、電波放射計の一種で、高分解能で高頻度、広域の観測が可能なマイクロ波放射計⁷⁵AMSR シリーズは、気象やスマート水産業などの実利用分野で活用されている。特に気象分野では降水予測精度の向上等、気象庁に加え米海洋大気庁(NOAA)、豪州やインドなどにおいて幅広く利用されている。また、船舶等からの人工電波も含むマイクロ波を超広帯域に計測が可能な、世界初の革新的なマイクロ波放射計として期待されている「超広帯域電波デジタル干渉計(SAMRAI)」について、実証衛星の打上げに向けた研究開発が進められている。

⁷² 2024 年 12 月時点現在、軌道に 12 機の衛星を配置してグローバルな温室効果ガス排出の監視を行っている。2023 年 11 月に打ち上げられた商用初の CO2 監視衛星 (GHGSat C10, Vanguard) を含む。2024 年 12 月に、同社は 2026 年末までに追加で 9 機を打ち上げる計画を発表。

⁷³ なりすまし信号や GNSS 妨害スプーフィング等の電波信号の検出、船舶検知など、複数の波長帯域における衛星コンステレーションを用いた電波信号観測のサービスを展開中。 <https://spire.com/space-services/signals-intelligence-constellations/>

⁷⁴ ハイパースペクトルセンサを搭載した 2 機の衛星 (Tanager1, 2) の打上げを予定。Tanager1 は 2024 年に打ち上げられた。 <https://www.planet.com/pulse/nasa-jpl-imaging-spectrometer-ready-forplanet-launches-first-tanager-1-integrationhyperspectral-satellite-and-36-superdoves-with-spacex/>

⁷⁵ 地表面や大気などの自然界から放射される微弱なマイクロ波を測定するセンサの総称。

また、多波長で観測可能なセンサ SGLI やハイパースペクトルセンサの HISUI は、農林水産業、気候変動観測等を含む様々な分野での実証・利用が広がっている。特に、令和6年能登半島地震では、SGLI を始めとする赤外観測により輪島市と能登町の火災を検知し、国土技術政策総合研究所の現地調査に活用された。加えて、電波収集衛星は、広域かつ多様な電波環境の把握や、安全保障分野における情報収集に資する重要な手段であり、その技術開発や活用の在り方についても今後検討を深めていくことが求められる⁷⁶。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国が技術的優位性を有するマイクロ波放射計については、世界第6位の広さを誇る排他的経済水域 (EEZ) を有する海洋立国として、国内外の気象やスマート水産業等の利用ニーズに応えるとともに、自律性やこれまで構築してきた技術的優位性を失うことがないよう、国内企業と連携した継続的な高度化が重要である。

我が国が世界に先駆けて開発した分光計測技術については、カーボンプライシングや ESG ファイナンス、自然資本の評価等に衛星データを活用することで、新たな市場創出の可能性も期待できる。2025 年6月には、分光計測技術とマイクロ波放射計測技術の両方を備えた GOSAT-GW が打ち上げられた。現在、国連気候変動枠組条約及びパリ協定の下、途上国を含めた各国に温室効果ガスの排出量の報告が求められているところ、GOSAT-GW を含む衛星を用いた温室効果ガス排出量の推計技術を中央アジア、インド等の地域へ普及させる取組を推進しており、さらに国際標準化を目指すことは、各国の排出量報告の精度向上及び透明性の確保に資する取組として重要である。

また、世界に先駆けて高感度の多波長データの取得を進めているハイパースペクトルセンサ「HISUI」から取得したデータを国内向けに無料公開を行い、HISUI の開発・利用実証で蓄積された知見を引き継ぎさらに実用性の高いコンステレーションに適用可能な小型・高感度の多波長センサの開発・実証の 2027 年度までの実施を着実に進めることは非常に重要である。これまでの実証によって得られた多波長センサの技術を活用し、商用利用だけではなく政府利用も想定した今後の衛星開発の在り方について検討が必要である。さらに、国際ルールメイキングに向けて各国の動きが活発化する中、こうした我が国の経験の蓄積を活かし、小型・高感度の多波長センサを搭載したコンステレーションの構築に取り組むことで得られる広域かつ高頻度な多波長データを活用し、上記のカーボンプライシング、ESG ファイナンス、自然資本等の国際市場を金融機関等と連携しつつ早期に獲得するための取組を進めることが重要である。

さらに、船舶情報収集のための AIS⁷⁷/VDES⁷⁸観測技術及び電波情報収集技術については、自律的に海洋状況を把握する上で重要な技術であり、AIS については ALOS-4 に搭載された AIS センサのデータ利活用に着実に取り組み、VDES については国際連携が欠かせず 2029 年までに他国衛星との接続及び宇宙実証を実施するとともに、小型衛星コンステレーションの社会実装に向けた取組を進めることが非常に重要である。また、SAR と船舶識別信号 AIS/VDES 等の複数種類のデータの同時利用による広域な海域の定期的な観測技術の開発についても船舶の詳細情報の把握につなげていくために重要である。上記のようなセンサの技術開発を加速するためには、

⁷⁶ 例えば米 HawkEye 360 社は、小型衛星による電波収集コンステレーションを運用し、無線信号の検知・特性把握・位置特定を行い、商用・安全保障向けサービスを提供している。公式発表によれば、2024 年時点で衛星数は 30 機超の規模に達している。

⁷⁷ 船舶自動識別装置 (AIS) が船舶運航や海上交通管理に利用されており、衛星でこの AIS 信号を受信することで、世界中の AIS 搭載船舶の位置情報等を取得できる。

⁷⁸ 衛星 VDES (VHF Data Exchange System; 次世代 AIS) は、AIS システムを拡張し、船舶・海洋を対象として双方向デジタル通信により海洋情報交換 (IoT) ネットワークを構築することを目的としたシステムである。

実証の機会を増やし、技術開発を加速することが重要である。引き続き、我が国においても赤外・マイクロ波センサの国産高性能化に民生・安全保障分野双方で取り組んでいく必要がある。

IV. 軌道上サービス

(1) 将来像

宇宙領域把握体制の整備、国内における官民相互の宇宙状況把握に関する情報共有の枠組みの構築、同盟国・同志国等との協力により、衛星運用状況等の情報共有を進めるとともに、より精度の高い衝突警報システムを実現していく。

また、技術開発・実証の進展により、衛星の運用終了後の適切な廃棄処理が行われるとともに、能動的スペースデブリ除去⁷⁹やデブリ低減、衛星の寿命延長に資する燃料補給、点検、交換、修理・補修、機能付加などの軌道上サービスが実用化されることで、スペースデブリの数が一定程度まで管理された状態を実現することが期待される。

このような技術の進展とともに、衛星同士の衝突や、衛星とスペースデブリとの衝突の防止、更にデブリ低減等の軌道上サービスを安全かつ円滑に実行していくための軌道利用に関する国際的な規範・ルール等の整備が進み、各国間で実行されることが期待される。

また、軌道上での製造組立や軌道間輸送に係る技術の進展等により、ロジスティクスを含む宇宙輸送や衛星利用、探査活動まで、軌道利用の可能性が抜本的に拡張されることや、これに伴う幅広い宇宙インフラ・サービスの実現、市場の創出が期待される。加えて、宇宙太陽光発電、宇宙システムや社会インフラに影響を与える宇宙天気の詳細な把握や予測等も、軌道上で展開されるサービスとして期待される。

更に、SpaceX 社が開発中の完全再使用型の二段式超大型ロケットである Starship による低価格で大量の衛星を一度に軌道投入する時代が来ることを見据え、衛星をそれぞれの軌道に移動させるラストマイルデリバリーのニーズが出てくることが想定される。

(2) 環境認識と技術戦略

宇宙空間の利用は、安全保障や経済・社会活動において不可欠なものとなっているが、小型衛星コンステレーションなどの宇宙機やスペースデブリなどの宇宙物体の増加によって軌道が混雑することにより、衛星同士の衝突や衛星とスペースデブリとの衝突などのリスクが増大している⁸⁰。また、破壊的な直接上昇型ミサイルによる衛星破壊実験、衛星への付きまといなどの脅威となる行為も懸念事項となっている。

軌道上サービスは、デブリ除去を含め、宇宙における安全保障において重要であることに加え、軌道環境の維持と宇宙経済の更なる発展のバランスを図り、両立を可能とする技術として期待される。同時に、宇宙安全保障では、軌道上サービス衛星のデュアルユース性への懸念が近年高まりつつある。また、例えば静止衛星の寿命延長に大きな需要が見込まれる⁸¹など、燃料補給や軌道上修理、交換、製造組立への活用といった、新たなアプリケーション・サービス、宇宙天気情報の利用による障害等の回避・軽減について、市場の創出が期待される。加えて、宇宙太陽光発電システム(SSPS)は、将来的なエネルギー源として期待される。

軌道上サービスの安全性・費用対効果向上や市場成長促進には、インターフェース等の標準化・規格化が有効な手段であり、戦略的対応が必要である。米国では政府方針に基づき、NASA

⁷⁹ 軌道上に存在するデブリを、専用衛星等を用いて軌道から取り除く技術。

⁸⁰ 低軌道における人工衛星と他物体の 1km 以内ニアミス回数が 2021 年以降加速度的に増えている。

出典 Evaluation of LEO conjunction rates using historical flight safety systems and analytical algorithms. Dan Oltrogge*, Salvatore Alfano, Jim Wilson, Pascal Wauthier

⁸¹ 出典 <https://www.nsr.com/street-insider-nsrs-in-orbit-services-report-projects-14-3-billion-in-revenues-as-non-geo-constellations-grow-demand/>

主導で産官学連携のコンソーシアムが設立され、標準形成を推進している。欧州ではESAがZero Debris Approachの一環としてESAが開発する衛星のデブリ化抑制のためにインターフェース標準化を進めている。我が国も宇宙戦略基金の枠組みで、事業者間の情報共有、競争・協調領域の特定、標準化検討、技術開発シナリオ策定を通じ、産業化に向けた国内連携プラットフォーム創設を予定している。

① 軌道上サービスの共通技術

i. 環境認識

デブリ除去や燃料補給による衛星の寿命延長を始めとした、軌道上サービスを実施するためには、RPO⁸²技術やマニピュレーション技術、結合・曳航時の物理特性変化に対応可能な航法誘導制御技術等の軌道上サービスの共通技術によって、サービスが実施できる距離までサービス衛星が対象物体まで接近し、接触型のサービスにおいては、物理的に接近・捕獲・接続することが必要となる。また、各コンポーネントの開発と並行して、RPOやサービス提供中の安全かつ正確な動作を確保するため、サービス衛星のシステムやロボット技術に対する検証・妥当性確認・試験(Verification, Validation & Testing)の重要性が高まっている。

米国においては、2020年、米Space Logistics社がサービス衛星MEV-1で静止軌道上の大型衛星へ接近し、世界で初めてドッキングによる寿命延長サービスを実証した。また、2021年、米Maxar Technologies社は米国防総省向けにマニピュレーション技術を開発すべく、契約を締結し、民生利用だけでなく、安全保障用途への関心も高まっている。

我が国においても、1997年に打ち上げた2つの衛星(ETS-VII)のランデブー・ドッキング実験に成功したことを皮切りに、宇宙ステーション補給機HTV等を通じてRPO技術を向上させてきた。JAXAが民間事業者と実施する商業デブリ除去実証(CRD2)プログラムにおいて、フェーズⅠとして2024年に実証機を打ち上げ、大型デブリ(ロケット上段)の周回観測を実施した。2027年以降に実際に大型デブリを除去実証するフェーズⅡを行う予定である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

RPO技術やマニピュレーション技術等の軌道上サービスの共通技術は、デブリ除去・低減や、衛星の軌道上修理・交換、燃料補給等を行うことによる衛星の寿命延長、軌道上製造組立といった多様な軌道上アプリケーションを実現するために中核となる基盤技術である。RPO技術については、ETS-VIIやHTVの蓄積、スタートアップ企業のELSA-d、CRD2プログラム等を通じて、我が国が世界に先行する強みを有するほか、マニピュレーション技術については産業用ロボット等地上民生品において、我が国が強みを有する。これらの我が国の強みを活かして新たな市場を切り拓いていくとともに、宇宙からの安全保障を確保していくため、軌道上サービスの共通技術の開発に着実に取り組んでいく。加えて、マニピュレーション技術等によりサービス捕獲対象を広げることと、対象を把持する瞬間の角運動量減衰に対応し、非協力や不確定性の高い対象にドッキングした後姿勢制御を安全に保ちながら曳航する技術の開発が求められる。ユースケースの実証が少ないこともあり今後の開発が見込まれる分野ではあるが、軌道間輸送機(Orbital Transfer Vehicle: OTV)やデブリ除去、軌道上の組立・製造に不可欠な技術として開発が進むものと考えられ、今後の検討が必要である。また、軌道上における複雑な状況認識や、取得できる情報が限定的で予見の難しい環境への対応を実現するためにはAIを活用することが有効だと考えられる。他方、世界各国での宇宙におけるAIを適用した軌道上サービスは開発が始まったばかりである。こ

⁸² Rendezvous and Proximity Operations の略称 ランデブー・近傍運用。

のため、世界に先駆けて、先進的 AI 技術を設計段階から活用し、宇宙空間においても自律的な判断・制御や FDIR⁸³等を行うための技術開発が求められ、実用化に向けては、アルゴリズム開発や評価・検証、訓練データの獲得など、必要なシステム技術全般の開発・実証に取り組むことが重要である。

例えば、2024 年に打ち上げた CRD2 フェーズ I においては、制御されていない非協力物体への接近等の重要技術の実証が行われた。今後、フェーズ II においてロケット上段を把持・除去する実証に取り組むことが重要である。また、軌道上等で複数種類の複雑な作業を自律的に遂行できる汎用作業ロボットアーム・ハンド技術を開発することが重要である。

さらに、将来の軌道上サービスの対象拡大を見据えて、鏡面的な光学特性を有する衛星やタンブリング衛星など、非協力物体の中でもより対応が困難なターゲットへ対応可能な RPO 技術やエンドエフェクタ技術等を開発することが重要である。

加えて、RPO 技術の高度化に向けて、次世代航法センサ開発、AI や機械学習により多様な対象への相対航法・制御を汎用化・ロバスト化する技術、宇宙空間における燃料補給・製造組立サービスに係るロジスティクス最適化等に向けた開発の検討が必要である。

② 軌道環境・物体の状態監視・遠隔検査技術

i. 環境認識

安全な宇宙活動を維持していくためには即時的かつ正確なスペースデブリ等の宇宙物体の把握が必要であり、年々増加する宇宙物体⁸⁴に対する注目度が増してきている。また、10cm 級を下回る小さなデブリに対するリスクの重要性への認識も高まる中、世界各国でも宇宙物体把握の技術開発⁸⁵及びスタートアップ企業の進出が数多く見られ、近年では地球観測用の高分解能光学衛星を使用して、軌道上からデブリや人工衛星の情報を得る企業も登場している。

我が国の民間企業においては、軌道上の物体の観測、軌道決定、接近予測解析、デブリの再突入予測、解析等の各要素を開発し各々のサービスとして提供する事業者が存在するが、米 LeoLabs 社のように、それらを統合したサービスとして提供している会社は今のところ見られない。

軌道上サービスの個別のアプリケーション提供に当たっては、軌道環境・物体について、光学、レーダ等のセンサやデータ処理による地上からの把握と、赤外・可視光カメラ、3D ライダーやスタートラッカー等の衛星搭載センサや複数センサの組み合わせによる軌道上からの把握が想定される。また、正確な物体把握のためには、物体位置のみならず、形状、運動状態の情報取得も必要である。

軌道情報の利用については、米国の連合宇宙運用センター(CSpOC)から提供される情報の運用が主流であるが、米 LeoLabs 社や米 Slingshot 社が、民間事業としてより精密な軌道決定や衝突回避運用を支援するサービスの提供を開始しており、米国政府も利用している。加えて、宇宙空間の監視や衛星の特性把握を通じた対衛星(ASAT)脅威の検出・偵察・防護は安全保障分野でも活用が注目されている⁸⁶。近年、米国は、GEO における宇宙状況把握(SDA:Space Domain

⁸³ FDIR: Fault Detection, Isolation, and Recovery (故障検知・隔離・回復)

⁸⁴ ESA の Space Debris Office によれば、地球周回軌道における 10 センチ以上の物体数は、54,000 個、1 センチから 10 センチ以内の物体数は、1,200,000 個、及び 1mm から 1 センチまでの物体数は 1 億 4,000 万個となっている。

https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers (updated on 5 May 2025)

⁸⁵ 軌道上のデブリ環境の現状把握や将来予測、リスク評価等においては、ESA の MASTER、NASA の ORDEM、JAXA の NEODEEM 等のモデルが構築されている。

⁸⁶ 米国の GSSAP (Geosynchronous Space Situational Awareness Program) 衛星やカナダのサファイヤ衛星が運用されており、欧州では

Awareness)能力の更新⁸⁷を進め、また、衛星搭載センサ等により運用者が自機の異常・ハザード・脅威を把握する取組⁸⁸も推進している。我が国においては、2023 年3月より、防衛省が米国や JAXA と連携し、宇宙状況把握(SSA: Space Situational Awareness)情報の集約、処理、民間事業者を含め共有等を行っている。JAXA では、スペースデブリ衝突回避制御計画立案を支援するツール RABBIT を開発し、2021 年から防衛省、米 CSpOC から提供されるスペースデブリ接近情報とともに、国内外の公的機関、企業、大学等の人工衛星運用機関に無償で提供している。

また、防衛省では宇宙物体の運用・利用状況及びその意図や能力を把握する SDA 体制を構築するため、2026 年度までの打上げを目標に、我が国独自の SDA 衛星を保有するとともに、他国の動向等を踏まえつつ、更なる複数機での運用に関する検討や GNSS 信号を用いた宇宙空間での測位を含めた各種取組を推進している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

他国の技術開発動向及びスタートアップ企業の事業化のスピードに対応するためには、即時性の高い宇宙物体把握の観点で、自国だけではなく他国との協力も視野に入れた能力の拡大も検討する必要がある。そのため、我が国の能力と国際協調の可能性を評価の上、我が国の自立性と国際枠組み形成の両立に向けたアプローチを検討する必要がある。

防衛省が米国や JAXA と連携し、SSA/SDA 体制の構築を着実に進めることは、宇宙からの安全保障を確保することに加え、軌道上サービスの様々な民生アプリケーションの創出につながることから重要である。また米国では民間独自の SSA サービスの展開が始まっているように、国内においても SSA サービスを提供する事業者が育成されることも期待される。

我が国の SSA/SDA 能力の向上や軌道上サービスの展開に向けては、軌道上物体の検知・識別に必要なセンサ(イメージング用 ISAR⁸⁹、ISAL⁹⁰)等の技術開発や、低軌道物体の飛躍的増加を踏まえたフェンスレーダ技術⁹¹、バイスタティックレーダ技術⁹²等について検討が必要である。また、大型衛星デブリを対象とした近傍撮像・診断の実証に引き続き取り組むことが重要であるほか、サブ 10cm 級の小型デブリの監視技術の開発や、宇宙設置型の宇宙状況把握システムの検討も重要である。

また、正確な物体把握のため、より精度及び信頼性の高いデータ取得を可能とするセンシング技術の開発も期待されている。

今後の衛星群の安全かつ効率的な運用の実現にむけ、軌道上の物体の観測システムの構築を加速化(観測頻度の向上・大量データの処理能力向上等)し、商用 SSA を活用した、軌道決定、接近予測解析、デブリの再突入予測、解析等に関する技術やサービスの開発を検討することが必要である。また、宇宙交通管理を見据えた衛星運用基盤の高度化を検討することが必要である。

EU 加盟 5 カ国が軍事 SSA 能力の構築を進めているほか、欧州防衛基金は脅威物体の追跡・無力化を目指す「Bodyguard」プロジェクトを支援している。

⁸⁷ 米宇宙軍が GSSAP の後継として RG-XX プログラムを推進している。同計画では軌道上給油(refueling)を組み込むことで、衛星の機動持続性・任務自由度の向上を図っている。

⁸⁸ 米宇宙軍の Space Rapid Capabilities Office (Space RCO) が Own-Ship Awareness という取組を推進している。

⁸⁹ ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar): 宇宙物体の回転運動を利用し、高解像画像情報を取得するレーダ装置。衛星等により対象物体に近づく必要が無いため、低コスト、低リスクで物体の状態を把握することができるため、軌道上サービスの効率化に貢献する。

⁹⁰ ISAL (Inverse Synthetic Aperture Ladar) :合成開口技術と LiDAR 技術を組み合わせたアクティブイメージングレーダ。全天候型のカバレッジで、長距離ターゲットの高解像度検出を実現する。

⁹¹ 広範囲、高速のビーム照射により、予測情報の無いまたは誤差が大きい宇宙物体を効率的に検出、探知することができる技術

⁹² 受信のみの設備を追加することにより、アクティブセンシングの能力を拡大することができる技術

③ デブリ除去・低減技術

i. 環境認識

近年、各国におけるメガコンステレーション構築計画などにより、宇宙機やスペースデブリなどの宇宙物体の増加による軌道上の混雑が急速に進行しており、適切な対策を取らない場合には、今後のコンステレーションの世代交代、新規参加国・企業の増加、民間宇宙ステーションの出現で安全航行が困難になるとの指摘がある。こうしたリスクに対応すべく、米連邦通信委員会(FCC)は2024年に、地球低軌道の商用衛星の運用終了後の大気圏再突入等による廃棄措置の期限を、運用終了後25年から5年に短縮した。また、2022年に米国政府が「Orbital Debris Implementation Plan」を通してデブリ除去を含む政府の取り組むべきアクションを特定し、これに基づき、超党派によるNASAを調達主体とした「Orbital Sustainability Acts(ORBITS ACT)」により、Orbital Prime⁹³が開始された。ESAは、Zero Debris Approach⁹⁴において、2030年までに全ての欧州の衛星を、運用停止後速やかに軌道上から撤去する目標を示した。その一環として、ESAはデブリ除去に適した設計Design for Removal(D4R)と標準インターフェースを策定し、ESA衛星に搭載している。また、スペースデブリ低減に取り組む事業者等を評価する民間の認証制度(レーティングスキーム)について欧州の認証機関による運用が開始されるなど、各国が独自に宇宙空間の安全で持続的な利用のために取り組んでいる。このような流れの中、スペースデブリ除去・低減に取り組むべく、2027年にデブリ除去実証(フェーズⅡ)を計画する我が国のCRD2プログラムに加え、欧米の各国において様々なデブリ除去実証プロジェクトが計画されている。欧州ではESAの下、スイスClearSpace社が制御再突入⁹⁵によるESAのProba-1衛星(質量94kg)の除去実証を行うため、ClearSpace-1の打上げを2028年に予定している。英宇宙庁のミッションにおいては、ClearSpace社、英アストロスケール社が、2026年以降のデブリ除去実証を行うべく、選出されている。安全保障分野においては、米宇宙軍のOrbital Primeプロジェクトの下、2026年頃のデブリ除去実証を目指し、2022年にフェーズ1として100社超のスタートアップ企業等との契約を開始した。現在はフェーズ2として41社に絞って開発契約を実施している。

デブリ低減の取組としては、テザーや帆等を使用した低減技術等の開発も進んでおり、米Tethers Unlimited社は2021年にテザーによる短時間での大気圏再突入に成功する一方、我が国でも複数の民間事業者が軌道上での実証を予定している。

また、小型・中型のデブリの増加を踏まえ、より小さなデブリの除去・低減に向けた取組の重要性が高まっている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

デブリ除去技術について、我が国ではCRD2プログラムを通じて、JAXAと民間事業者が、世界に先駆けて3tクラスの相対的に衝突リスクの高いロケット上段などの大型デブリを、商業的に捕獲・軌道変更し、これにより除去の道筋を示すことを目指している。我が国が世界に先行する強みを有する技術であり、宇宙における安全保障に加え、混雑する軌道環境の維持と宇宙経済の更なる発展の両立に貢献し、新たな市場を切り拓く技術として非常に重要である。2024年に実施され

⁹³ アメリカの宇宙軍が推進するプログラム。デブリ除去を含む軌道上サービスの商業活動を活性化させることを目的としている。

<https://spacewerx.us/orbital-prime-2/>

⁹⁴ ESA ミッションにおいて2030年までにZero Debrisを目指す憲章

⁹⁵ 制御再突入：人工衛星等を制御して、あらかじめ安全確保を図った、着地又は着水の地点や区域内へ落下させる再突入。

出典 人工衛星等の打上げに係る許可に関するガイドライン

https://www8.cao.go.jp/space/application/space_activity/documents/guideline1.pdf

た軌道上でのデブリへの接近、近傍制御、画像の取得等の関連技術実証に続き、2027 年以降のデブリ除去技術実証に向けた開発を着実に進めるとともに、2021 年に制定した軌道上サービスを実施する人工衛星の管理に係る許可に関するガイドラインに基づき同実証を実施していく。今後、本技術の更なる高度化に向けて、非協力物体の回転レート低減技術、デブリ除去の対象を複数物体へ拡大するコンピュータ・ビジョン⁹⁶等の技術、分散型のアーキテクチャを含めた制御再突入技術等についても、検討が必要である。

また、デブリ除去技術については、ターゲットとするデブリのサイズや特性に応じた適切なアプローチが重要であり、地上からのレーザ照射も含めたレーザアブレーション等による非接触型のデブリ除去技術や、微小デブリに対応した受動的除去技術についても、開発やシステムの検討を進めることが重要である。

加えて、デブリ低減技術として、水を推進剤とする低コスト推進機やデブリの大気圏突入を加速するPMD(Post Mission Disposal)装置⁹⁷を始め、衛星等の軌道離脱のための技術開発・実証も重要であり、2027 年の実証をターゲットに進められている。

④ 衛星の故障や推薬枯渇に対応した協力物体への寿命延長技術

i. 環境認識

ミッション機器がまだ機能しているにもかかわらず、燃料が枯渇する等により寿命を迎える衛星は、静止衛星の半数程度ある⁹⁸とされている。寿命延長技術は、そのような衛星にサービス衛星をドッキングさせることで、軌道の維持や姿勢制御を代行して対象の衛星の運用を継続させ、あるいは、対象の衛星に燃料を補給することによって寿命を伸ばし、ミッションの継続を可能とする。宇宙機の使い捨て文化からの脱却や、軌道上サービス・ロジスティクスの概念拡張等による新たな市場の開拓が可能となる。また、燃料補給については従来の寿命延長の目的だけではなく、OTVへの給油等、宇宙ロジスティクス⁹⁹の一部としても期待されている。

米国においては、前述のとおり、2020 年、米 Space Logistics 社が MEV-1 でドッキングにより静止軌道上の大型衛星へ寿命延長サービスの実証を行ったことに加え、米宇宙軍は、2026 年以降に静止軌道の衛星にヒドラジン燃料を供給することを計画する。欧州においても、EU と仏 Thales Alenia 社が、燃料補給や衛星ペイロードの交換能力の実証等をすべく、EROSS (European Robotic Orbital Support Services – In Orbit Demonstration)ミッション¹⁰⁰を 2028 年までに打上げ予定である。我が国においては、制御可能な衛星への接近・捕獲技術を基盤とし、協力衛星を対象とした燃料補給技術の確立を目標とする最長5年間のプロジェクトを開始した。

⁹⁶ 画像、動画、点群から情報を抽出する一連の手法。画像検知センサなどの機器や、取り入れた視覚情報を認識するための人工知能(AI)など、幅広い分野で研究されている。

⁹⁷ 進行方向と逆向きにローレンツ力を発生させ、速度を落として軌道を低下させて高度を下げる導電性の紐を使った推進システム。
出典 https://www.aero.jaxa.jp/topics/magazine/pdf/sorasora_no02.pdf 宇宙機に搭載することで、ミッション終了後の宇宙機の軌道離脱を早め軌道滞在時間を短縮させる装置。

⁹⁸ 出典 Benjamin A. Corbin, Amana Abdurrezak, Luke P. Newell, Gordon M. Roesler, Bhavya Lal (2020) Global Trends in On Orbit Servicing, Assembly and Manufacturing (OSAM), SCIENCE & TECHNOLOGY POLICY INSTITUTE pp.11
(<https://www.ida.org/-/media/feature/publications/g/gl/global-trends-in-on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-osam/d-13161.ashx>)

⁹⁹ 米国では安全保障ユーザーの資金提供を受けながら、宇宙ロジスティクス分野に関する研究が大学を中心に行われている。
<http://strategic.mit.edu/spacelogistics/about.php> 等。

¹⁰⁰ EROSS: European Robotic Orbital Support Services の略称。軌道上サービスのサービス衛星と対象物体に必要な技術を実証し、効率的で安全な軌道上サービスの提供を目指している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

寿命延長技術の確立等を通じて、衛星運用者が負担するコスト減が期待され、黎明期にある軌道上サービス市場の拡大をけん引する可能性があり、コストパフォーマンスの観点から優位性があるのかを検証しながら取り組むことは重要である。さらに、現在開発が進められている方式の化学推進対応の燃料補給技術だけではなく、多様な方式の化学推進系への補給等の技術開発、電気推進や複数機、多様な軌道に対応した補給のためのドッキング機構及び補給口精密接続技術等、多様な推薬・軌道に対応できる燃料補給の汎用性の向上等の技術についても、インターフェースの標準化を見据えた開発に取り組むことが重要である。その際、米国企業が先行するタグ式での寿命延長との差別化を図る観点からも、バルブを介して燃料を補給する方法や、カートリッジを交換する方法等の複数のアプローチや、補給所の設置といった将来的なアーキテクチャの検討も踏まえつつ開発を進めることが重要である。

大型の各種静止衛星や高機動な推進技術が必要とする SDA 衛星においては、搭載される推薬量の制約が、衛星寿命に大きな影響を与えるため、燃料補給技術などの軌道上サービス技術を活用し、衛星のライフサイクルを適切に管理し、限られた数の衛星を有効に活用していくことが重要である。

⑤ 軌道上修理、交換、製造組立技術

i. 環境認識

軌道上に配備した衛星は故障や発電能力の低下、燃料枯渇等の理由で寿命を迎えた際に軌道離脱等で廃棄されてきた。一方、衛星システムの多くの部分は、更に長期間で動作可能に設計製造されているため、寿命となった部分を修理・交換することができれば運用を継続することが可能となる。また、軌道上での宇宙機・物体の直接製造により、打上げリスクやコストの低減、既存衛星のミッションの追加や変更、搭載機器のアップグレード、修理を可能とすることに加え、地球外での人類の活動に必要な物資の製造、宇宙太陽光発電システム等の大型構造物の製造等も可能とする。

いずれのサービスも現段階では、概念設計や初期的な研究の段階であるものの、従来では実現不可能だった高度な能力として、通信・発電・観測等を持つ巨大宇宙アセットの実現、迅速で低コストに宇宙アセットの能力、配置の延長・更新、衛星開発に求められる信頼性・コスト・開発スケジュールの負担の最小化などが実現することから、技術実証の進展に伴い市場での需要が見込まれると考えられる。将来的にはシスルナ圏や月面活動などでの応用や、超大型の軌道上構造物である太陽光発電システムの製造などへの適用も期待される。

米国では米 Orbital Express 社により機器の交換に関する要素技術実証を軌道上で実施した実績があり、米国防総省傘下の DIU (Defense Innovation Unit) や米 Northrop Grumman 社によるプロジェクトが予定されている他、マニピュレータによる修理・交換・製造組立を目指した技術の開発を継続している。欧州では ESA と仏 Thales Alenia Space 社の共同プロジェクトである EROSS が進められ、2028 年頃には寿命の延長と機能の向上に関する軌道上での実証を実施する計画である他、2024 年には ESA と欧 Airbus 社が国際宇宙ステーションにおいて初となる金属 3D プリンタによる金属部品の製造を成功させた。さらに米 Made in Space 等軌道上 3D プリンティング企業が出てきている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

軌道上での製造組立技術は欧米が先行している状況にあるが、我が国においても本技術の適用先候補として軌道上でのミッションの追加・変更、搭載機器のアップグレード、ポスト ISS、月・惑

星探査活動への研究開発などが進められている。

本技術の技術成熟度や事業成熟度は未だ低く、3D プリンティングやロボティクスの要素技術など、我が国に強みのある技術の宇宙適用も念頭においたシステムの検討を進め、早期の宇宙実証に向けた技術開発を段階的に進めることで、十分な巻き返しが可能であることから、これらに取り組むことが非常に重要である。3D プリンティングについては、樹脂や複合材、金属といった複数の素材が適用可能であり、強度や造形容易性、重量等のそれぞれの特性に応じた適切なターゲットを設定することが重要である。

⑥ 軌道間輸送・宇宙ロジスティクス技術

i. 環境認識

小型衛星の打上げが急増する中、ライドシェア¹⁰¹が一般的となってきたが、ロケットからの分離後、衛星自身の推力を使用せずに目的の軌道まで追加輸送を行う、又は軌道上でドッキングを行い衛星を目的の軌道まで導くラストマイルデリバリー等の軌道間輸送や、軌道上でのロジスティクスに必要な宇宙ステーションへの物資や構造物の輸送の技術の開発が進んでいる。これらのサービスを用いることにより、より効率的に軌道への投入を実現し、余分に衛星の燃料を消耗することなく配置することが可能となる。

軌道投入に必要な輸送手段のスケラビリティ向上による抜本的な効率化・低コスト化に加えて、大規模で複雑なシステムを構築するために必要となる技術実証の高頻度化が重要であることから、これらを可能とする宇宙空間での物流インフラ技術（宇宙空間を自在に移動する技術）を世界に先駆けて獲得することで、2030 年には1兆円近くとも予測される軌道上サービス市場¹⁰²の獲得や、我が国の宇宙開発利用に係る長期的な競争優位性の確保に繋がることが期待できる。

現在展開されているサービスは低軌道中心の小型衛星のラストマイルデリバリーであり、米 Northrop Grumman 社¹⁰³、伊 D-Orbit 社¹⁰⁴、米 Momentus 社¹⁰⁵等が存在する。その他、OTV の機能を持たせたキックステージを開発し2026 年以降に低軌道から中軌道、静止軌道、シスルナ以遠への軌道間輸送サービスを目指している米 Impulse Space 社は、LEO 以遠の軌道にも対応するアップグレードを行っており、2026 年に GEO 内での輸送ミッション「GEO Express 1」を計画している。自社のロケット打上げを含めて複数のペイロードを運ぶサービスである米 Blue Origin 社の Blue Ring は複数ペイロードに対応可能なポートを持ち合計で最大 4,000kg ペイロードを搭載可能であり、2025 年1月に Pathfinder で実証した。等があり、スタートアップ企業を中心に特徴を持った推進系を核として2025 年時点で10 社程度が軌道上実証及びサービス化を進めている。

米国では、DIU が商用技術を活用して低コストで迅速な低軌道や静止軌道への物流システムの構築を目的とし、OTV を担当する Blue Origin 社、燃料補給システムを担当する Space Logistics 社、軌道上での製造組立を担当する Skycorp 社の3社を選定し Orbital Logistics Vehicle Project を開始した¹⁰⁶。安全保障の分野においても米宇宙軍と DIU は宇宙領域認識能力を強化することを目的として宇宙監視ペイロードを搭載した OTV である Mira を2026 年に低軌道と静止軌道に打ち上げる契約を Impulse Space 社と締結した¹⁰⁷。

¹⁰¹ 複数の小型衛星をロケットに相乗りさせる打上げ方式。

¹⁰² 「In-Orbit Service: Satellite Servicing, ADR and SSA 6th Edition」

¹⁰³ ESPASat を用いて静止軌道への軌道間輸送を実施している

¹⁰⁴ 静止軌道と低軌道への軌道輸送を提供している

¹⁰⁵ 低軌道への軌道輸送を提供している

¹⁰⁶ <https://www.diu.mil/latest/companies-selected-for-diu-orbital-logistics-vehicle-project-moving-forward>

¹⁰⁷ <https://spacenews.com/impulse-space-wins-34-5-million-contract-for-u-s-space-force-missions/>

欧州では、シスルナ以遠も見据え In-Space Transportation Club として再利用、拡張可能なモジュール式宇宙輸送機群による軌道上サービスのエコシステム実現に向けたコミュニティ形成、宇宙実証の取組を ESA がプログラマ的に進めようとしている¹⁰⁸。また、ESA が LightShip 構想として、広範なコミュニティによる低コストの火星ミッション市場の開拓を狙い OTV の概念検討を進め、共通的なインターフェース提供や、軌道間輸送に加え通信リレー、ナビゲーションサービスの提供も視野に入れており、OTV の出口として深宇宙での活用も考えられる¹⁰⁹。

国内でもイプシロンロケットポストブーストステージ(PBS)と合わせて運用される革新的衛星技術実証用の搭載プラットフォームはライトマイルデリバリー機能を具備したものである。上記の通り、衛星の軌道間輸送について我が国は欧米に開発を先行されている形であるが、我が国においても OTV の構想や技術的な検討は長年にわたり継続されてきている。必要となる軌道上でのランデブー・ドッキングについては 1997 年の ETS-VII での実績を持ち、デブリ除去プロジェクト CRD2 等でも更なる開発が見込まれる。物資の輸送においては ISS へ補給を行う HTV の開発と実績を有しており、物資を輸送するような大型の輸送機については世界でも有数の技術を保有している。また、2025 年に初号機が打ち上げられた HTV-X の 3 号機では将来の軌道間輸送機としての活用も考慮した自動ドッキングの技術実証を予定している。さらに、軌道間輸送では、はやぶさシリーズ等の宇宙探査機において実績を有しており、惑星間往復航行に至っては日米のみが実現している。

ii. 技術開発の重要性と進め方

欧米が先行し開発と実証を進めているが、現状、小型衛星を対象とした低軌道へのラストマイルデリバリーのサービスが中心であり、中～大型衛星へのサービスや、静止軌道以遠への輸送については未だ開発途上である。

多様な軌道間の航行・運用を担い、各種の衛星や軌道上拠点等のインフラ整備、小型宇宙機の集団輸送等、あらゆる宇宙システムの効率的な物流手段として革新をもたらし得る再利用可能な OTV について、ETS-VII で培ったランデブー・ドッキング技術といった我が国の競争優位性も認識しながら、多様なニーズ・ユースケースにおける拡張性・汎用性等の観点も踏まえ、静止軌道やシスルナ領域を中心とした用途での開発を推進することが重要である。具体的には、高機動バス（高機動推進系技術、姿勢制御・ランデブー、軽量化、ペイロードインターフェース、自動・自律運用等）に係る要素技術及びこれらのシステムインテグレーション技術開発・実証を進めるとともに、再使用型 OTV システムの実現に向けたドッキング、長寿命化等に係る要素技術開発等を段階的に進めることが非常に重要である。

また、OTV の開発に当たっては、投入軌道や積載質量、それらに合った推進系の種別等の様々な設計があり得るほか、複数の OTV によるネットワークングや、軌道上燃料補給を伴う往還型の OTV といった他の軌道上サービスとの相互利用を通じた役割・機能の拡大が期待されることから、経済合理性の分析も含め、これらを総合的かつ戦略的に開発・運用するための宇宙ロジスティクスに係る研究開発を併せて推進することが重要である。具体的には、静止軌道・シスルナ等への物流コスト(打上げコストの他、目的地への輸送にかかる総合的なコスト)に係る多目的最適化モデル技術の開発、軌道上サービスの総合アーキテクチャ検証等を進めることが非常に重要である。

¹⁰⁸ <https://commercialisation.esa.int/2024/04/a-successful-start-for-esas-in-space-transportation-club/>

¹⁰⁹ <https://blogs.esa.int/to-mars-and-back/2024/09/17/seven-things-you-didnt-know-about-europes-tug-to-mars/>

⑦ 宇宙太陽光発電システム(SSPS)

i. 環境認識

宇宙太陽光発電システム(Space Solar Power System: SSPS)は、軌道上において太陽エネルギーで発電した電力をマイクロ波やレーザに変換して地上や月面、宇宙機等へ伝送し、電力変換して利用することが期待されるエネルギーシステムであり、各国で研究開発が進められてきている。

米国では、マイクロ波やレーザの送電の性能を検証する要素試作試験等の関連実験、SSPSのプロトタイプに必要な要素技術を開発する SSPIDR (Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research)プロジェクト等を始動しており、特に、2025 年にはサンドイッチタイル¹¹⁰を用いた電力変換と地上伝送の軌道上実証計画を進めている。他方、NASA は宇宙太陽光発電システムが他のエネルギー源に対してコストや CO2 排出量において優位となるためには、輸送コストや太陽光電池セルの発電効率等について飛躍的な技術革新が必要という評価をしている¹¹¹。

欧州では、宇宙太陽光発電対応策の方向性を整備することを目的に、2022 年 11 月に SOLARIS と呼ばれる SSPS の準備プログラムを開始し、3年間掛けて、技術的妥当性、メリット、導入オプション、商用利用の可能性、新興技術としてのリスク評価を行うこととしている。

SSPS については様々なシステムアーキテクチャや給電方式の可能性が議論されており、我が国においても、テザー方式、ミラー方式、風呂敷方式といったシステムアーキテクチャや、マイクロ波給電方式やレーザ給電方式といった給電方式が検討され、関連する技術開発を実施してきているところである。

ii. 技術開発の重要性と進め方

宇宙太陽光発電は多数の技術の組み合わせで実現されるシステムであり、無線電力伝送技術、大規模構造物の展開技術、高効率太陽光電池セル技術、低コストの宇宙輸送技術など、必要となる要素技術も多岐にわたる。例えば、無線電力伝送技術については、発送電一体型パネルの開発及び航空機による送電実証を既に実施し、今後、軌道実証機による地球低軌道からの送電実証を予定しており、これを着実に実施していくことが重要である。また、展開構造機構技術の軌道上実証の実施を予定しており、着実に進めていくことが重要である。

また、宇宙太陽光発電システムの経済性・社会実装可能性や最適なアーキテクチャの在り方は、宇宙輸送価格の低減や太陽電池セルの能力向上等、他の技術革新に大きな影響を受けることから、技術革新を踏まえてシステムアーキテクチャを柔軟に見直していくことについて、検討が必要である。また、システムアーキテクチャにとらわれない要素技術の開発・実証・高度化を着実に進めていくことも重要である。

⑧ 宇宙環境観測・予測技術

i. 環境認識

太陽活動を主な源として発生する宇宙環境の変動、すなわち宇宙天気は、軌道上の衛星運用等に支障を及ぼすおそれがあり、安全保障や経済・社会においてますます重要な役割を担うようになっている宇宙通信・観測・測位や地上インフラ機能、宇宙輸送、更には有人宇宙活動等に関

¹¹⁰ 片面に太陽電池、中央に太陽電池からの直流電力をマイクロ波に変換する機器、太陽電池の反対側の片面にマイクロ波を送電するアンテナが搭載されたパネル。

¹¹¹ Space-Based Solar Power (NASA) (2024 年 1 月 11 日)

<https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/01/otps-sbsp-report-final-tagged-approved-1-8-24-tagged-v2.pdf>

する宇宙システム安定利用のため、宇宙環境観測・予測技術が必要となる。特に、約 11 年の周期を持つ太陽活動は、極大期を迎え、太陽フレアの規模や頻度が数年前より格段に増えており、測位や低軌道衛星の障害など社会的影響も報告されている。

米国では、2019 年、危機管理対応を行う連邦危機管理庁(FEMA)が、宇宙天気をハリケーン、パンデミック等と並ぶ「壊滅的な国家リスク」の一つであると特定し、ホワイトハウスより「国家宇宙天気戦略」等が発表された。米 NOAA は、太陽風を常時監視する衛星 SWFO-L1 を 2025 年に打ち上げ、国際協力の下に 24 時間 365 日データを取得する地上受信局網の整備を進めている。民間企業による宇宙天気関連サービスの提供も活発化しており、2010 年には民間団体・米商業宇宙天気協会(ACSWA)が設立された。

ESA は、太陽から地球方向へ放出される太陽コロナ質量放出(CME)を衛星から観測するプロジェクト「Vigil ミッション」を計画しており、2031 年以降の打ち上げを目指している。

我が国においては、NICT が太陽活動や電離圏・磁気圏を観測・分析し、24 時間 365 日「宇宙天気予報」を関係機関に提供している。また、宇宙天気現象の観測・分析・予測・警報の強化等、予報の高度化に向けた取組を進めている。さらに、太陽フレア等による影響を高精度に分析・予測するためには、地上の観測設備や海外の衛星データを活用するのみならず、我が国上空の宇宙空間における宇宙環境の変動を直接観測し、観測データを準リアルタイムで地上に伝送・解析する運用が有効であることから、気象庁・総務省・NICT が連携し、2030 年運用開始予定のひまわり 10 号搭載を前提に気象センサと同時搭載可能な宇宙環境センサの開発及び計測データを伝送・処理するための地上システムの構築が進められている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

宇宙環境観測・予測技術は宇宙通信・観測・測位や地上インフラ機能等の安定的利用の確保等での活用が期待されている。こうしたニーズに対応していくためには我が国上空の宇宙環境を観測するセンサの開発やひまわり 10 号への搭載、国際協力による観測網の構築、高精度な観測・予報技術の開発等を通じた観測・分析能力の充実・強化、観測・予測結果に基づく警報の対象及びユーザーへの影響を分かりやすく示した新警報基準の策定等、宇宙天気予報の高度化・利用拡大を一層進めていくことは重要である。

V. 衛星基盤技術

(1) 将来像

諸外国や民間による宇宙活動が活発化し、競争環境が厳しくなる中、我が国の宇宙活動の自立性を将来にわたって維持・強化し、先に記したⅠ～Ⅳの衛星ミッションを軌道上で実現させるため、共通となる基盤技術について継続的に開発に取り組む。加えて、技術成熟度が低い先端技術の開発にも継続的に取り組み、技術・産業・人材基盤の強化を図ることで、衛星サプライチェーン構造の改革やバリューチェーン構造の構築を行い、我が国の宇宙産業エコシステムを再構築し、更に発展させていく。

(2) 環境認識と技術戦略

衛星基盤技術は、衛星システム技術とサブシステム技術より構成され、サブシステム技術は大きくデータ処理系、電源系、姿勢系、推進系、熱制御系、構造系、計装系、地上系から構成される。また、DX 等による非宇宙分野の開発・製造プロセスの変革を踏まえながら、衛星開発・製造プロセス自体の変革にも取り組む必要がある。

衛星基盤技術のシステムとしての性能は、ボトルネックとなる技術によって決まるという性質を有していることに留意しながら、衛星の共通となる基盤技術開発に取り組んでいく必要があるが、基盤技術は技術分野が多岐にわたり、コモディティ化している技術も存在する。限りある開発リソースの投入に当たっては、開発項目の選択と集中を行い、効率的に衛星基盤技術の強化と利用拡大の好循環を創出していく。

このため、1. (2)で示した重要技術の評価軸に基づき、衛星基盤技術の開発の重要性を総合的に評価してスクリーニングを行った。衛星基盤技術としては、衛星の機能高度化と柔軟性を支える SDS¹¹²基盤技術、小型衛星コンステレーション等の衛星の小型軽量化とミッション高度化を支える電気系基盤技術と機械系基盤技術、衛星の運用及び地上局効率化を支える地上システム基盤技術を特定した。

なお、5. 分野共通技術に、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の分野に共通する基盤技術として、宇宙機の機能性能高度化と柔軟性を支えるハードウェア技術、宇宙機の小型軽量化とミッション高度化を支える機械系技術、ミッションの高度化や柔軟性を支えるソフトウェア基盤技術、開発サイクルの高速化や量産化に資する開発・製造プロセス・サプライチェーンの変革、次世代の宇宙システムに向けた複数字宙機の高精度協調運用技術を整理している。

① 衛星の機能高度化と柔軟性を支える SDS 基盤技術

i. 環境認識

今後の衛星に対する多様で複雑に変化する機能要求に柔軟に対応し、衛星ミッションを軌道上で実現させるためには、従来専用ハードウェアにて実現してきた機能を極力ソフトウェアに移行し、軌道上でプログラム変更によるアプリケーションレベルの変更を行うこと、すなわちソフトウェア定義衛星(SDS)技術をより進めていくことが必要である。それぞれの衛星ミッションの目的に即した SDS 技術を適用することにより、通信面ではより効率的なデータ伝送を実現し、リモートセンシングは観測データを取得するだけでなく、情報抽出を実施することが可能となり、軌道上サービスは状況に応じた様々なセンシングや状況判断に基づくタスクの自律決定が実現する。また、こうした

¹¹² SDS: Software Defined Satellite (ソフトウェア定義衛星): 衛星が従来ハードウェアで実現してきた機能を極力ソフトウェアへ移行させ、軌道上でプログラム変更によりアプリケーションレベルの更新を行うことで、変容する需要に柔軟に対応することを意図した衛星。

SDS 化により打上げ後、状況に応じて軌道上でのソフトウェア更新による通信、データ処理などの新たな機能追加・変更が可能となる。加えて、現在 AI を活用した軌道上データ処理が行われているが、AI の活用が進むことで、地上からの SW 変更による軌道上での機能変更・追加に留まらず、AI によるオンボード SW 更新、完全自動化・自律化に発展していく可能性もある。

SDS 化においては、多量の演算能力要求に応える高性能で低消費電力な計算機を実現する「衛星搭載高性能計算機」、機能の SW 化による増大するアプリケーション SW の開発規模に対応し、SW の変更を容易にする「SDS SW フレームワーク」などの開発が必要になってくる。「衛星搭載高性能計算機」としては機能の SW に伴う演算能力の増大とともにコストに見合う宇宙用、非宇宙用分野の部品・技術から構成される計算機アーキテクチャの開発が必要と考える。また「SDS SW フレームワーク」においては、増大する SW の開発規模、SW の変更を容易にするカプセル化技術、エラー処置技術、システムアーキテクチャや HW 仮想化技術などの開発が必要である。

現在、欧米においては、通信、観測等の分野を中心に SDS 化が急速に進んでおり、実証のフェーズから実用フェーズに移行しつつある。その背景には、米 AItech 社、スウェーデンの Unibap 社等複数の企業が先端民生用デバイスを活用した宇宙用高性能計算機を開発し、従来の宇宙用計算機と比較して大幅に性能が向上したことがある。

諸外国では、SSA における対象の自動抽出・追尾・軌跡推定や、自律的 RPO、サイバー探知と隔離システム、干渉やジャミングを低減するための通信方式の軌道上変更など、高性能な SDS を前提として多くの機能が実現されようとしており、その適用範囲は安全保障分野を含め、今後さらに拡大していくと見込まれる。

ii. 技術開発の重要性和進め方

衛星の機能高度化と柔軟性を支える SDS 基盤技術は衛星の世界的なトレンドであり、今後、民生・安全保障の両方の分野において、システム構築のコア技術として必須の技術となることを想定すると、自律性確保の観点から着実に開発を進めていくことが非常に重要である。我が国においては、2026 年度以降に打上げ予定の ETS-9 による軌道上実証に向けて、打上げ後に通信周波数や通信領域をフレキシブルに変更できるフルデジタル通信ペイロードを開発している。加えて、JAXA・民間事業者において軌道上での高度な AI 処理やフレームワーク研究を含め、オンボードエッジコンピューティング環境の構築とその活用を目指した研究開発を実施している。

また、衛星搭載高性能計算機技術については、調達性の観点から、産業界から国産化の要請は大きい。加えて、ユーザーがアプリケーション開発に集中できるように、計算機と併せて SDS ソフトウェアフレームワークの提供も必要である。また、計算機の高性能化に伴い、消費電力の増大と排熱が大きな課題になる中、低消費電力化や低コスト化が可能な衛星搭載用光電融合技術の活用が今後求められていくと考えられる。これらについて、民間事業者等の技術提案を募りながら、更なる研究開発の検討が必要である。

② 衛星の小型軽量化とミッション高度化を支える電気系基盤技術

i. 環境認識

今後、通信・観測などのミッションの伝送容量の増大や観測時間の拡大等を踏まえ、電源システムや太陽電池パドルを含め、電源系に対する小型化、大電力化、高効率化及び制御の柔軟性のニーズが、ますます高まっていくと見られる。世界では、SDS 化や電気推進の増加、ミッションの高度化による電力増加等の要請もあり、デジタル電源や電気推進用高圧大電力電源といった技術トレンドも存在する。さらには、衛星の打上げコスト低減のため、複数機同時打上げが普及してきたことで、電源にも収納性が求められ、高収納性の太陽電池パドルや薄膜太陽電池セルの開

発もなされている。一方で、小型衛星コンステレーションの急激な増加により、太陽電池セルの供給が追いつかなくなることが懸念され始めている。また、誘導姿勢制御系については、小型衛星コンステレーションの普及等を背景とした衛星事業環境の競争の激化により、誘導姿勢制御系のセンサやアクチュエータの小型化と低価格化、短納期化が進む。同時に、新規参入者にも使用可能な、センサ・アクチュエータ・制御装置が一体化された統合制御ユニットも開発されている。軌道上サービスという新たな事業分野の成長を背景に、多様な対象物に対応する視覚センサ、距離センサの開発や、これらセンサを融合した近接誘導制御アルゴリズムの開発が進められている。これらの誘導姿勢制御系のセンサやアクチュエータ、距離センサやより精度の高い量子航法センサ等に係る技術は、編隊飛行等の高度な複数機運用やその自律化・自動化を実現する上でも欠かせない技術であり、単一衛星や従来のコンステレーションでは成し得なかったシステムが実現可能となることが期待されている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

電源システムについては、我が国においては高信頼性を重視し、一度開発した製品を繰り返し使ったことで、新規技術の開発や実証が遅れ、海外製品との性能差異が拡大している状況である。通信・観測などのミッションの伝送容量の増大や観測時間の拡大等を踏まえ、ミッションのコア技術として自律性の観点から電源システムの開発は重要である。現在進められている ETS-9 における電気推進系の開発を含む全電化衛星技術の宇宙実証や、小型衛星向けのデジタル電源の開発の取組に加え、電気推進電源の更なる小型・高性能化や小型～大型衛星に活用できるフレキシブルなデジタル電源の国産化についても開発が重要である。

また、同じく電源システムの太陽電池パドルについては、従来我が国の事業者が強みを持ち、輸出してきたが、技術のコモディティ化に伴い、国際競争が激化している。特に太陽電池セルについては、コストパフォーマンスに優れている独・米製の海外製セルによる寡占状態である。高収納なフラットパックの太陽電池パドルや薄膜太陽電池パドル、小型衛星向け太陽電池パドルの開発等に加え、産業界のニーズも強い価格・性能において競争力のある国産太陽電池セルの開発に取り組むことが非常に重要である。

誘導姿勢制御系システムのうち、小型から大型衛星向けのジャイロ¹¹³や CMG¹¹⁴、GNSS 受信機、及び国産 STT についてはデュアルユースであることから、厳格な輸出管理が求められる。また、小型衛星向けの統合姿勢制御ユニットについては内部設計がブラックボックス化されることから、ミッション要求に対する柔軟な開発のために国産化の要請がある。民生・安全保障分野における自律性の観点から、これらを開発することは重要である。現在開発が進められている国産スタートラッカー、小型 CMG の取組に加えて、小型衛星向けのリアクションホイールの開発のニーズも小型衛星事業者から挙がっており、今後検討が必要である。

③ 衛星の小型軽量化とミッション高度化を支える機械系基盤技術

i. 環境認識

小型衛星コンステレーションにおける多数機によるミッション遂行や、経済性向上のための複数機打上げの実現には、衛星の軽量化・コスト削減が必要である。また、小型軽量化と併せてミッションによるスペック要求の多様化・高度化を同時に果たさなければならず、その実現のためには推

¹¹³ ジャイロ：人工衛星の姿勢の回転(角速度)を検出するセンサ。

¹¹⁴ CMG：Control Moment Gyro。回転しているホイールの回転の向きを変更することによってトルクを得る姿勢を制御するアクチュエータ。

進系、熱制御系、構造系から成る機械系基盤技術の開発が必要である。

推進系については、従来の運用軌道への移動や軌道維持に加え、コンステレーション軌道面の変更や、軌道離脱、軌道上サービスにおける機動性等の機能要求の多様化が見られる。電気推進は化学推進よりも高い比推力¹¹⁵を有するため、静止衛星においてオール電化衛星が主流となる中で普及してきており、搭載推進剤の少量化により一層の衛星の小型化やペイロード比率の向上に貢献すると考えられる。他方、電気推進のホールスラスト¹¹⁶についてはこれまでロシア製のシェアが高かったため、ロシアのウクライナ侵略により世界で調達性が悪化している。また、電気推進の主要推進剤であるキセノンの高価格化により、代替のクリプトン等の推進剤が開発されている。さらに今後、軌道上サービスにおいては化学推進の高い推力と電気推進の高い比推力を両立させるマルチモード推進系が、小型衛星・ライドシェアミッション向けには、安全管理の観点から低毒性の化学推進系やクリーン推進剤の開発が注目されている。中でも、無毒・低毒で扱いやすい推進剤による小型の推進機などが実現すれば、多くの小型衛星等の機動性を高め、衛星の軌道離脱や衝突回避の促進も期待できる。その他、NASA においては火星圏用原子力推進の開発が進められると同時に、米 Aerospace Corporation が、地球超低軌道(VLEO)¹¹⁷にディスク状で電気推進の小型衛星 DiskSat を打ち上げる予定である等、世界では新たな挑戦が計画されている。VLEO については、近年、特に観測領域などでの関心が高まっており、VLEO 向けの高推力・高比推力な推進系の開発が見込まれる。我が国においても技術試験機 SLATS により、世界で初めてイオンエンジンを用いて超低高度で長期間軌道を維持する技術を実証し、光学画像観測運用を成功させるとともにギネス世界記録に認定される等、他国に先行した実績を有している。2025 年 3 月には、米 ALBEDO 社が、我が国の SLATS の成果も参照して商用 VLEO 地球観測衛星を上げた他、近年では、米 DARPA の Otter プログラム等、VLEO 衛星の長寿命化を目的とし、エアブリージング電気推進系を搭載した VLEO 衛星の計画が具体化し始めている。

熱制御系については、大型の静止通信衛星において、通信の大容量化・SDS 化に伴う発熱量の増加に対応するため、高効率排熱システムの技術が必要とされ、機械式二相流体ポンプルーブや展開型ラジエータによる大規模熱輸送等、能動的な熱制御手法が世界で開発されている。仏 Thales Alenia Space 社製造の SES-17 に搭載された能動的熱制御系は既に軌道上で実用化されている。また、大型衛星、小型衛星のいずれにおいても、マイクロヒートパイプ等の受動的熱制御による局所排熱技術へのニーズが高まっている。その技術として、欧米で機器内振動流型ヒートパイプや相変化蓄熱材(PCM)¹¹⁸等の技術開発が進められているほか、衛星全体のリソース節減に寄与する技術として VEM¹¹⁹を米 AFRL が開発・実証を進めている。構造系については、多機能構造などにより、衛星構造の最適化や新規方式、新材料による軽量化が進んでいくことが見込まれる。衛星の多機能構造については、現状は論文レベルでの発表にとどまっているが、Boeing 社の通信用フェーズドアレイアンテナのように、従来は部品を組み立てることで実現していたアンテ

¹¹⁵ 比推力：推進剤の消費率当たりの推力を表し、値が大きいほど効率がよく、燃費がよいことを示す。

¹¹⁶ ホールスラスト：電場と磁場の相互作用により推進剤を電離し、磁場による・加速を行いし排出することで推力を得る電気推進の一つ。同じ電気推進であるイオンエンジンと比較すると、比推力はイオンエンジンには劣るものの、大きな推力を得やすい推進系となる。

¹¹⁷ VLEO: Very Low Earth Orbit。正確な定義はないが近地点高度が 350km 程度以下と通常の低軌道衛星よりもさらに低い軌道を示す。残留大気により減速してしまうため、定常的に推進系で加速する必要がある等のデメリットがある軌道ではあるが、光学衛星はより近くで観測することになるため分解能等性能を上げやすい、通信においてもより少ない電力で通信できる等のメリットもある軌道となる。

¹¹⁸ PCM: Phase Change Material: 固体⇄液体等の相変化時の大きなエネルギー吸収/放出特性を活用し、蓄熱を行う材料。本材料を使用することでパルス状の発熱に対しても、温度を一定に保つ熱制御が可能となる。

¹¹⁹ VEM: Variable Emissivity Materials。熱放射率が高温時は高く、低温時は低く遷移する物質。本材料を衛星の放熱板に使用することで、日陰時等の衛星低温時に衛星を温めるためのヒーター電力が大幅に削減でき、衛星全体のリソースが削減できる。

ナを一体成型で構成することで、小型軽量化に成功している例も存在する。

ii. 技術開発の重要性と進め方

推進系について、高比推力の電気推進については、静止衛星市場を念頭に、調達性を改善し自律性を確保する観点から、現在 ETS-9 で取り組む大型ホールスラスタの開発を着実に進め、更にその競争力を高める活動が重要である。また、小型衛星への適用を念頭に、高効率長寿命な小型ホールスラスタや、究極のクリーン推進剤となる水や低電力大推力を実現可能な希ガス等を利用したレジストジェットスラスタ¹²⁰、低電力・低価格が期待されるパルスプラズマ等のマイクロ電気推進スラスタ等の開発を進めることは重要である。長期的な観点からは、プラズマセイルに加え、高出力化の期待できるパルス核融合推進、また、超高精細の画像取得等が期待できる VLEO においては長期の運用を可能とするエアブリージングイオンエンジンの開発の検討が必要である。

さらに、電気推進の低価格化・推進変更の可能性を追求し、将来的には VLEO や小型衛星向けのホールスラスタや軌道上サービス等向けのマルチモードスラスタ等の開発を進めることが重要である。また、推進剤消費を抑制した軌道変更を可能とするエアロブレーキ技術の研究開発の検討が必要である。また、推進系不具合の多さを踏まえ、実証機会やアンカーテナンシーの拡充による技術の成熟・安定化に向けた取組が重要である。

熱制御系と構造系については、衛星システムとして各機能を熱的・機械的にインテグレーションする技術であり、システムのコア技術として自律性の観点から重要である。将来のフルデジタル静止通信衛星市場を念頭に、機械式二相流体ポンプルーブや展開型ラジエータによる能動的な高効率排熱システムに取り組むことは重要である。また、発熱源から効率的な排熱を可能とする液浸冷却技術¹²¹等の検討が必要である。小型衛星市場を念頭に置いた受動的熱制御システムは、従来から輸出用機器としてシェアを維持してきており、ヒートパイプパネル技術のさらなる国際競争力強化や局所排熱に対応する技術の検討が必要である。

構造系技術の多機能構造は小型軽量化だけでなく、製造コスト削減も期待できる。CFRP¹²²を始めとする高比剛性、低熱膨張性を有する高機能材料の活用や CubeSat 以外の小型衛星向け新規構造アーキテクチャの検討、システムのスケラビリティの確保を容易とするモジュール構造とともに、今後検討が必要である。

④ 衛星の運用及び地上局効率化を支える地上システム基盤技術

i. 環境認識

衛星コンステレーションの構築や衛星サービスの多様化により、個々の衛星の運用や地上局の構築に関して一層の自動化や効率化が求められている。民生・安全保障の両分野において、衛星の運用自動化や地上局ネットワーク仮想化といった、地上システム基盤技術の開発が必要である。

運用自動化技術については、欧米の大規模通信衛星コンステレーションや、小規模測位衛星コンステレーションにおいて、多数機管制システムが運用されていると考えられる。また、仏 CNES、伊 AIKO 社、米 Planet 社が、運用自動化や運用モード変更等の開発を開始している。一方、我が国においては、多数のコンステレーション等の構築例はなく、高度な運用自動化を実現している例は未だにないが、通信、観測、測位衛星等の多数機運用の自動化に向けた技術開発が進められ

¹²⁰ 水レジストジェットスラスタ：水推進剤を水蒸気に加熱して吹き出すことにより推力を得るスラスタ。

¹²¹ 液浸冷却技術：発熱源を冷媒となる液体に直接浸すことで、排熱効率を向上させる技術

¹²² CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastics。炭素繊維複合材料とも呼ばれ、炭素繊維を樹脂で固めた軽量で高強度な複合材料。

ている。今後、運用自動化技術を開発していくに当たっては、デブリ回避も課題となることに留意する必要がある。さらに、システムから適時提供される情報をもとに衛星側で状況を判断し、後続の衛星に観測要求を行う運用(いわゆる Tip & Cue)においても高度化が進むと考えられる。

地上局仮想化技術については、運用管制や観測データ処理、エンドユーザーへのサービス提供まで、最小限のハードウェアを除いた地上局の機能を束ね、米 Amazon 社の AWS Ground Station や米 Microsoft 社の Azure Orbital 等の既存のクラウドサービスと連携して地上局の機能を実現する動き(GaaS: Ground Station as a Service)がある。我が国の衛星コンステレーション構築を目指すスタートアップ企業もこうしたサービスを活用している。

また、衛星システムの高度化に応じ、今後地上局受信データの大容量化が進むことが見込まれ、地上局システムに係る高度化も求められる。これら運用自動化技術や地上局仮想化技術は、衛星の SDS 化に対する観点でも必要となる技術であり、衛星地上運用システムと連携して開発を進めることが開発の効率化の観点でも必要である。

ii. 技術開発の重要性和進め方

我が国においてもコンステレーション構築に向けた計画が進み、衛星側で自動化自律化機能が実装されていく中で、地上における運用省力化は今後重要性が増してくることが見込まれる。運用自動化技術については、衛星システムと機能配分を含めた一体開発が効率的であり、民生・安全保障の両分野において、自律性の観点から開発を着実に実施することが重要である。

また、地上局仮想化技術を活用することによって、地上局設備のコスト低減に加え、地上局の共通機能以外の個別機能の開発に事業者が注力できる。災害時等において地上アンテナ局が損傷した場合においても、別のアンテナ局を割り当てることによって復旧可能であるなど、抗たん性の観点からも将来を見据えた検討が必要な技術である。

さらに、運用自動化技術と地上局仮想化技術の組み合わせによる効率化も期待される。そして、次世代の多様な衛星システムに対応できる先進的で高セキュリティな地上局の実現に向けた、アンテナやデータ送受信装置や地上局と衛星のシステム全体の最適化運用等に関わる技術開発も検討が必要である。

(3) 横断的課題【ミッション融合】

世界では、衛星においてハードウェアで実現していた機能をソフトウェアで実現することで、衛星機能の柔軟性が向上し、複数のミッションに対応した機能を一つの衛星に実装する試みが進む。例えば、技術的類似性が高い通信と測位については、中国の Geespace 社が自動運転用の通信と測位のサービスを一つのコンステレーションで提供することを目指している。米国では、ミッション融合を開発するための方法論を示すものとして国防総省が Mission Engineering Guideline を 2020 年に初版、2023 年に改訂版を制定している。現在は主に学術的な研究が多いが、JWC(Joint Warfighting Concept)や JADC2(Joint All Domain Command and Control)などの一部将来コンセプトにたいし手アーキテクチャ設計検討に用いられている。

現時点では、ミッション融合技術については、世界においても検討・構想段階であり、新たな実用価値を提供するまでには至っていない。一方で、今後、より幅広いユーザーニーズへの対応を可能とするためには、従来の通信、測位、観測、軌道上サービスの縦割りによる思慮だけではなく、各ミッションの革新的な技術はもとより、それらを横断、融合し、複雑・高度な軌道の活用も含め新たな価値を生み出すための技術であり、今後我が国が宇宙分野における高い競争力を獲得・維持していく上で重要である。異なる観測衛星ミッションを System of Systems として複合的に運用するハイブリッド・コンステレーション(メタコンステレーション)や、複雑・高度なミッションの実現に

欠かせない衛星統合運用技術等の検討を通じ、新たな価値を生み出していく発想が必要である

(3. 宇宙科学・探査、4. 宇宙輸送は省略)

5. 分野共通技術

(1) 将来像

諸外国や民間による宇宙活動が活発化し、競争環境が厳しくなる中、我が国の宇宙活動の自立性を将来にわたって維持・強化し、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の宇宙ミッションを実現させるため、共通となる基盤技術の開発や重要技術のサプライチェーンの確保について継続的に取り組む。加えて、技術成熟度が低い先端技術の開発にも継続的に取り組み、技術・産業・人材基盤の強化を図ることで、サプライチェーン構造の改革やバリューチェーン構造の構築を行い、我が国の宇宙産業エコシステムを再構築し、更に発展させていく。

(2) 環境認識と技術戦略

宇宙機のシステムとしての性能は、ボトルネックとなる技術によって決まるという性質を有していることに留意しながら、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の分野に共通する基盤技術開発に取り組むことで、分野・組織の縦割りを排し、リソースの有効活用を図ることが必要である。一方、分野共通の基盤技術は多岐にわたり、コモディティ化している技術も存在する。限りある開発リソースの投入に当たっては、開発項目の選択と集中を行い、効率的に分野共通の基盤の強化と利用拡大の好循環を創出していく。

このため、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の分野に共通する基盤技術として、宇宙機の機能性能高度化と柔軟性を支える宇宙用高性能デジタルデバイス等のハードウェア技術、宇宙機の小型軽量化とミッション高度化やロケットの軽量化と製造期間・コストの低減を支える 3D プリンティング技術等の機械系技術、ミッションの高度化や柔軟性を支える機械学習・AI 等のソフトウェア基盤技術、開発サイクルの高速化や量産化に資するデジタル技術(MBSE/MBD、デジタルツイン等)の活用等の開発・製造プロセス・サプライチェーンの変革、編隊飛行等の次世代宇宙システムに向けた複数字宙機の高精度協調運用技術を特定した。なお、これら例示した技術は、将来の技術動向やミッション要件等に応じて適宜見直しを行う必要がある。

① 宇宙機の機能性能高度化と柔軟性を支えるハードウェア技術

i. 環境認識

通信、観測、測位、軌道上サービス、宇宙科学・探査において、軌道上での画像処理や AI 処理、柔軟な機能変更等の高度なデジタル機能を持つ人工衛星の研究開発が進んでおり、また、宇宙輸送分野においても、オンボード自律安全飛行技術の開発が進む。それらに不可欠な高性能計算機実現には、デジタルデバイスの主要部品である CPU¹²³や MPSoC¹²⁴、FPGA¹²⁵等を、宇宙用高信頼性部品として継続的に開発を行う必要がある。EUにおいては、宇宙用の計算機・部品開発について、将来的に現在の先端産業用デバイスに匹敵するデバイスを開発するロードマップ¹²⁶を有し、域内企業の開発を戦略的に支援している。

また、小型衛星コンステレーションの普及等を背景に、電源系に対する小型化・大容量化・低コスト化の市場からの要請を受け、次世代リチウムイオンバッテリーや全固体電池、リチウム硫黄電池等の開発が世界で進む。小型化・大容量化・高効率化を実現する耐放射線性高効率電力用デバ

¹²³ CPU：Central Processing Unit 中央演算処理装置。

¹²⁴ MPSoC：MultiProcessor System on a Chip 一つのチップに複数の CPU/アクセラレータ/FPGA/周辺 IO などの機能を集積した SoC(System On Chip)。

¹²⁵ FPGA: Field Programable Gate Array チップ製造後に購入者・設計者が内部論理回路の構成をプログラムできる集積回路。

¹²⁶ ESA では European Space Technology Master Plan (ESTMP) として、デジタルデバイス開発を含む、10 分野、47 技術の技術ロードマップを作成し、それに沿った開発を進めている。

イスの実現のためには、現行の Si¹²⁷半導体と比較して高効率な GaN¹²⁸/SiC¹²⁹半導体や、将来的には Ga₂O₃¹³⁰やダイヤモンド半導体等の開発・宇宙適用が鍵となる。海外では、耐放射線性高効率電力用デバイスなど、継続的な新規技術の開発を行っており、我が国との性能差異が拡大しているが、我が国においても、これら欧米の動きをキャッチアップするため、宇宙戦略基金を用いた開発・実証が立ち上がり、支援に向けた動きが進んでいる。また、我が国が持つ従来の宇宙用バッテリーの開発技術、ノウハウと併せて民生での材料技術を組み合わせることにより、競争力を保持できる可能性があり、次世代電池に関しても宇宙戦略基金を用いた開発・実証が進められている。

ii. 技術開発の重要性和進め方

宇宙機が高度なデジタル機能を追求する中、高性能計算機を構成するデジタルデバイスの主要部品(CPU、MPSoC や FPGA 等)については、現在、我が国は海外製品に依存している。他方、宇宙機システムの機能・信頼性を決めるコア技術であり、調達性等に問題が発生した場合、宇宙機の開発・製造自体ができなくなるため、自律性を確保するために宇宙耐性のある国産デバイスの開発を引き続き進めることは非常に重要であり、量産化についても検討が必要である。また、これらデジタルデバイスを組み合わせるとともに既存のコンポーネントの統合化を進めた低消費電力、低価格、高信頼性、高性能なコンピューティングデバイスの開発(チップレットやマルチチップモジュールなどの実装/パッケージング技術開発も含む)も検討が必要である。なお、宇宙産業だけでは規模の経済を確保できないため、非宇宙産業のユーザーも巻き込み、市場化を目指すべきである。

大電力を必要とする各種の高性能ミッションを実現するためには、大電力で柔軟な電源を可能とする耐放射線性高効率電力デバイスが重要である。またバッテリーについては、リチウムイオンバッテリーの高性能・低コストを実現する技術や非宇宙領域で我が国が強みとする技術を宇宙転用することで、宇宙業界におけるリーディングポジションを獲得する潜在性を秘めており、開発に取り組むことは重要である。全固体電池については我が国が技術的優位性を持ち得る分野であり、開発の検討が必要である。

② 宇宙機の小型軽量化とミッション高度化を支える機械系技術

i. 環境認識

宇宙開発が世界で加速化し、アジャイルな開発が求められる中、多様なニーズにタイムリーに対応していくために、3D プリンティングによる衛星、ロケットを含めた宇宙機製造技術の高度化が有効である。また、宇宙ミッションの経済性向上のためには、宇宙機の軽量化が鍵となるが、3D プリンティング技術によって宇宙機構造の最適化や複雑な形状の実現も可能となり、複合材・合金等の新規材料の選定による宇宙機筐体改良とともに、軽量化につながる。

既に、米 Relativity Space 社や Firefly Aerospace 社は、エンジンやロケットの構造体を 3D プリンタで製造し、製造期間を大幅に短縮している。米ボーイングにおいては、米宇宙軍の通信衛星 WGS-11+プロジェクトにおいて、1000 を超える部品を 3D プリンティングにより製造し、工期を通常の 10 年から5年と半減を図る計画もある。

科学を含む宇宙観測の高度化、月惑星等の表面探査がより一段と活発化する中で、ハードウ

¹²⁷ Si:シリコン。

¹²⁸ GaN:窒化ガリウム。

¹²⁹ SiC:シリコンカーバイド。

¹³⁰ Ga₂O₃:酸化ガリウム。

エア機械系技術の高度化が進んでいる。各国との協力や競争を有利に進めるためには、優位性の高い要素技術の研究開発を進めることが必要である。

ii. 技術開発の重要性と進め方

我が国においては、JAXAにおいて3Dプリンティング技術の活用に関する民間事業者との研究会を立ち上げ、衛星開発における市場化の時間の半減を掲げ、開発プロセスの研究を行っており、これを着実に進めることが重要である。なお、3Dプリンティング技術については、採用する造形手法、その宇宙機やロケットの製造への適用範囲と、材料の種類を含め開発範囲が広い技術であることから、各要素技術の開発と併せて、造形手法に合った管理項目と品質評価基準の確立やそれら開発成果を業界全体で共有していく仕組みの検討が必要である。また、3Dプリンティングをベースとした構造の自動設計やシミュレーション技術、従来は熱、電気、構造機能のそれぞれを製造後にインテグレーションしていたアンテナを一体成型する等の製造技術の刷新についても検討が必要である。

また、ハードウェア機械系要素技術については、冷却システムに必須の極低温冷凍機等の熱系技術や、様々な使用環境・機能要求に適合するモータ・減速機・センサ等の技術をベースとした高機能なアクチュエータを始めとした機構系技術は、日本が世界に対して優位性があり、研究開発に取り組むことは重要である。

③ ミッションの高度化や柔軟性を支えるソフトウェア基盤技術

i. 環境認識

機械学習・AI活用技術は、民生・安全保障の両分野において、多数機運用やミッションの自動化を行うに当たり、運用の省人化と高度化、自律化の実現に活用できる技術である。今後、宇宙を活用したデータのトラフィック量は、2020年から2030年までに14倍に増加するとの予測¹³¹もあり、こうしたデータを顧客のニーズに合わせ、軌道上で機械学習、AIを活用して処理し、地上に提供することで、データ通信量の削減を行うことが期待されている。一方で、地上での運用の自律化・自動化では、AIを使ってSSAでの衝突予測を行い、その結果を基に運用計画を立案するなど、実用化が進んでいる。宇宙科学・探査においても、取得した地形データに基づいてAI等による着陸地点、探査地点の判別等への活用が検討されている。

また、デジタルツインを可能とする仮想化技術や開発環境のクラウド化等についても、世界で進展しており、ミッションの高度化や柔軟性を支えることが期待されている。

ii. 技術開発の重要性と進め方

軌道上で機械学習、AIを活用して処理し、地上に提供する技術は、データ通信量を削減するとともに、データの迅速なユーザーへの展開が可能となり、有事や災害時を想定して自律性の観点からも重要な技術開発である。現在、海洋状況把握のため、衛星AISやSAR、電波情報収集衛星等を活用したAIシステムを開発しているところ、これを着実に開発し、発展させることが重要である。また、衛星画像の機械学習・AI解析技術の開発や、AI/MLによる異常検出技術、オンボードエッジ処理への活用等、機械学習・AI技術を適用する開発についても、検討が必要である。

加えて、ミッションの高度化や柔軟性を支える、デジタルツイン等を可能とするためのHW仮想

¹³¹ Analysys mason 社レポート：

https://www.analysysmason.com/contentassets/fc7abfdc628446bcae96198fde6cff2d/analysys_mason_traffic_revenue_cagr_jul2022_nsr.pdf

化技術や開発環境のクラウド化等についても、検討が必要である。

④ 開発サイクルの高速化や量産化に資する開発・製造プロセス・サプライチェーンの変革

i. 環境認識

米 SpaceX 社は、メガコンステレーションの構築やロケットの高頻度打上げにおいて、デジタル開発のノウハウを活用した開発サイクルの高速化や宇宙機の量産化を実現しており、これを受けて世界における宇宙機の開発・製造プロセスに大きな変革が見られる。また、近年、民生分野では、生成 AI を活用した設計効率化技術が急激に成長しており、宇宙分野でもあらゆるフェーズで活用され、例えば、米 Cadence 社の開発した AI により、回路設計において従来の 1/10 以下の時間で設計を可能とするなど、各分野での効率化が進んでいる。

米 SDA においては、PWSA 構築に向けて、従来の 10 年程度掛けて一つの衛星を開発・運用するスタイルではなく、ニーズの変化へ対応し、新規技術の早期導入を図るため、短いサイクルで衛星を開発するアジャイル・スパイラル開発手法を採用する方針が掲げられている。また、デジタルツイン技術は疑似的な実証を可能とすることで、衛星技術の開発を加速することができる。例えば、米 Boeing 社は、限定された実証機会を最大限活用するとともに、増加する実証コストを抑制するため、デジタルツイン技術を利用した仮想的な実証機会の確保を行っている。

開発サイクルの高速化や量産化に向けては、COTS 品の宇宙転用拡大により、より進展の早い非宇宙分野の技術を宇宙分野に適用していくことも必要である。また、COTS 品の宇宙転用に向けて、耐放射線評価・信頼性評価試験の限られた機会を確保し、各種の宇宙環境における COTS 品の性能評価試験技術を確立して、得られた知見を宇宙業界全体として共有していくことが求められる。海外では、例えば NASA の GSFC Radiation Data Base や欧 RADNEXT 等、宇宙業界全体として耐放射線評価の試験データや照射手法等を共有していく取組を行っている。加えて、欧米においては、COTS 品に関してコンサルティングサービスを専門的に提供する事業者も存在する。また、欧米では 2020 年以降、より積極的に COTS を活用することを目指した COTS の衛星適用に関するガイドラインを作成しており、COTS 利用推進の一要因となっている。併せて、COTS の放射線評価等を専門に行う企業も存在し、彼らの自社投資による放射線試験設備の増強(主に TID 試験)や、ノウハウ蓄積による試験効率の向上により、COTS 利用推進に必要な放射線試験キャパシティの確保に繋がっている。こうした地上での技術評価の取組に加え、軌道上実証も引き続き重要であり、機会の拡充に向けて軌道上実証サービスの事業化を目指す動きも見られる。一方、国内においては 2025 年3月に JAXA の宇宙転用可能部品の「宇宙適用ハンドブック(小型衛星、超小型衛星編)」が制定され、COTS 部品の利用促進に向けた動きがある。

ii. 技術開発の重要性と進め方

世界における宇宙開発のサイクルが高速化するとともに大規模化している。我が国が宇宙活動の自立性を今後も維持・強化するためにも、こうした世界の開発の潮流を踏まえ、世界に伍していかなければならず、開発・製造プロセスの変革に取り組むのは喫緊の課題である。

開発サイクルの高速化に向けては、我が国においては JAXA を中心に MBSE¹³²/MBD¹³³、デジタルツイン等のデジタル技術を活用した開発プロセスの検討が進められている状況であり、これを着実に進めるとともにアーキテクチャの標準化を進めるなどにより下流設計・実装により踏み込む

¹³² MBSE: Model Based Systems Engineering。システムズエンジニアリングモデルを用いて進めるアプローチであり、概念設計段階から始まり、開発全体を通じて継続される、システム要件、設計、分析、検証、検証活動をサポートするためのモデリングアプリケーション。

¹³³ MBD: Model Based Design。制御及び開発対象をモデル化し、シミュレーションを実施することで、効率的に検証を行いながら設計開発を行う手法。

形で、今後、実設計への適用を進めていくことが非常に重要である。また、衛星シミュレータなど開発におけるデジタルツインの実現に向け、モデリング技術の統合化が必要である。特に、静止軌道上での光学アンテナ技術の開発・実証を進める中で、高精度デジタルモデルを構築する研究開発を行う取組や、多数の衛星や地上システムが連携するコンステレーションにおける取組等が重要である。今後、宇宙利用の拡大に迅速に対応するため、目的に応じ、アジャイル・スパイラル開発手法の適用を可能にすることも必要である。

宇宙機の量産化に向けては、前述のとおり、小型衛星コンステレーション構築に向けて激化する国際競争環境を踏まえれば、民間市場における資金調達をうまく活用しつつも、政府としては可能な限り早期にアンカーテナンシーの可能性を追求するとともに、高頻度実証・量産化技術の確立・商業化加速に向けた更なる支援の強化が非常に重要である。

また、衛星やロケット等のサプライチェーンを継続的に支え、増加する需要に応じていく上で、要求される QCD を満たすコンポーネントの製造・試験の自動化や部品、材料の量産化技術の開発及び軌道上実証による実績の獲得に取り組むとともに、アーキテクチャやプロセスの標準化を通じてアクセス可能な市場を拡大することが非常に重要である。

さらに、複数の宇宙機で汎用的に利用できるコンポーネントやソフトウェア等を実現する COTS 品の宇宙機への適用拡大に向けては、耐放射線性、耐真空性、耐熱性、及び耐衝撃性等の環境試験、信頼性評価、対策等に取り組む必要がある。また、宇宙機製造機数の増加も見込まれる中、国内の各種環境試験設備が不足しており、これを解消することも喫緊の課題である。したがって、試験手法の最適化や効率化、試験結果や各種ノウハウを業界内で共有する仕組みの構築等を進めるとともに、新たな試験装置の導入も非常に重要である。

また、宇宙転用可能な COTS 品のカタログやデータベース、試験評価結果、宇宙環境における性能の評価技術等の各種ノウハウを業界横断的に確立・集約する体制強化や、各種ノウハウを業界横断的に集約する体制強化、さらに海外の先行事例を踏まえれば、COTS 品に関するコンサルティングサービスを専門的に提供する民間事業者の育成・支援が求められる。

なお、技術開発を実施する事業者においては、長年の使用実績のある宇宙機部品等（部品・コンポーネント・材料・ソフトウェア）を含め、宇宙機部品の信頼性を継続的に維持・強化するための信頼性評価や検査・試験・検証に関する技術の強化が不可欠である。こうした信頼性強化に係る技術のほか、部品サプライヤーを含め、信頼性強化に責任を持つ組織体制や専門人材の育成・配置、製品の受入検査の強化、定期的な製造・検査工程の監査、データベース構築等が求められる。

⑤ 次世代の宇宙システムに向けた複数宇宙機の高精度協調運用技術

i. 環境認識

複数の宇宙機が互いの相対位置・姿勢を制御しながら高精度に協調する編隊飛行（フォーメーションフライト）技術は、単一の宇宙機では成し得なかった高度な宇宙システムを実現可能な技術であり、自律衝突回避を含む衛星コンステレーションの運用高度化やランデブー・ドッキング等においても共通的に重要となる基盤技術である。このため、その高度化によって、通信・地球観測・探査等の多分野においてブレイクスルーを生み出すことが期待される。

編隊飛行する宇宙機の機数、宇宙機間の距離、要求精度は様々で、多様なミッションに応じて適切なシステムが定義される。例えば NASA では、2023 年から 2024 年にかけて、約 64km 間隔のキューブサット4機による4つのアルゴリズムに関するミッションを実施し、地上からの指示信号なしで衛星同士が自律して互いの相対位置を把握、編隊の維持を行う能力等を実証した。ESA では2機の衛星が約 150m の相対距離をミリメートル精度で制御しつつ編隊飛行するオカルター観

測ミッションを実証した。これらの他にも、複数の国においてバイスタティック SAR 観測や宇宙重力波望遠鏡といった編隊飛行による多様なミッションが進行しており、技術獲得競争の最中にあり、我が国においても技術開発検討する必要がある。

ii. 技術開発の重要性と進め方

複数宇宙機による高度な編隊飛行の実現に当たっては、宇宙機間の相対位置を把握し編隊するための姿勢制御技術やセンサ技術、データ処理、時刻同期技術、複数宇宙機の自律的運用のための衛星間通信や衝突回避等の運用技術、これらの地上試験技術やシミュレーション技術等の様々な要素技術の開発と結合が非常に重要である。

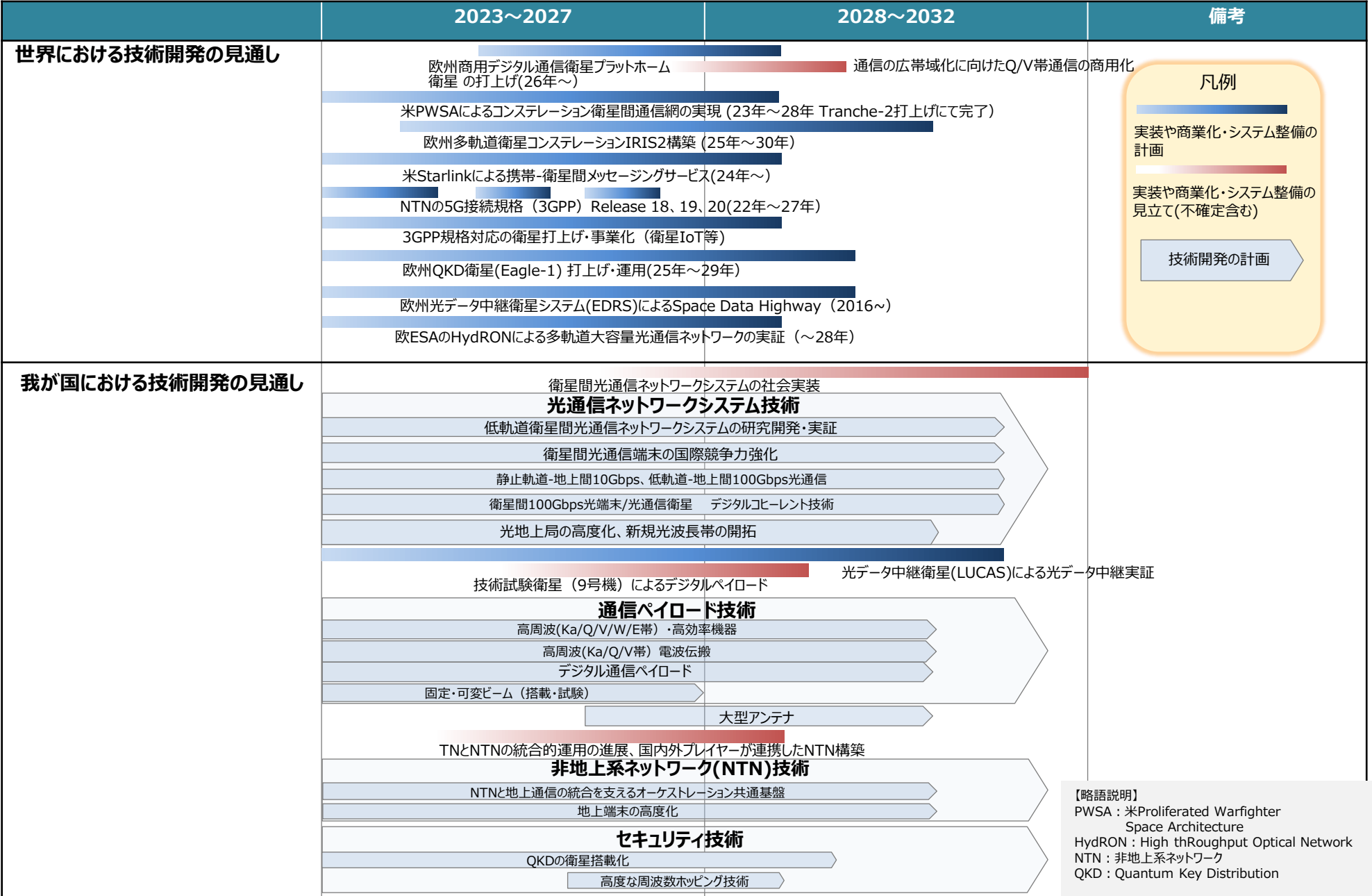
その際、編隊飛行により実現を目指すミッションや事業構想は多岐にわたり、要求精度も様々であるが、これらの実現のために必要な技術は共通する部分が多く、技術やノウハウ等に関する相互の連携及び発展をしていくことが必要となる。したがって、編隊飛行技術の高度化に際しては、実現を目指すミッション内容に応じた衛星等の機数や相対距離、制御精度等の要求水準をあらかじめ設定する、ミッションオリエンテッド型の技術開発が有効であり、加えて、それらのミッションが、異なるコミュニティ間で相互に連携し、各ミッション実現に当たって技術力を高め合える有機的な枠組みを構築することが必要である。

(3) 横断的課題【先端技術・人材基盤の強化】

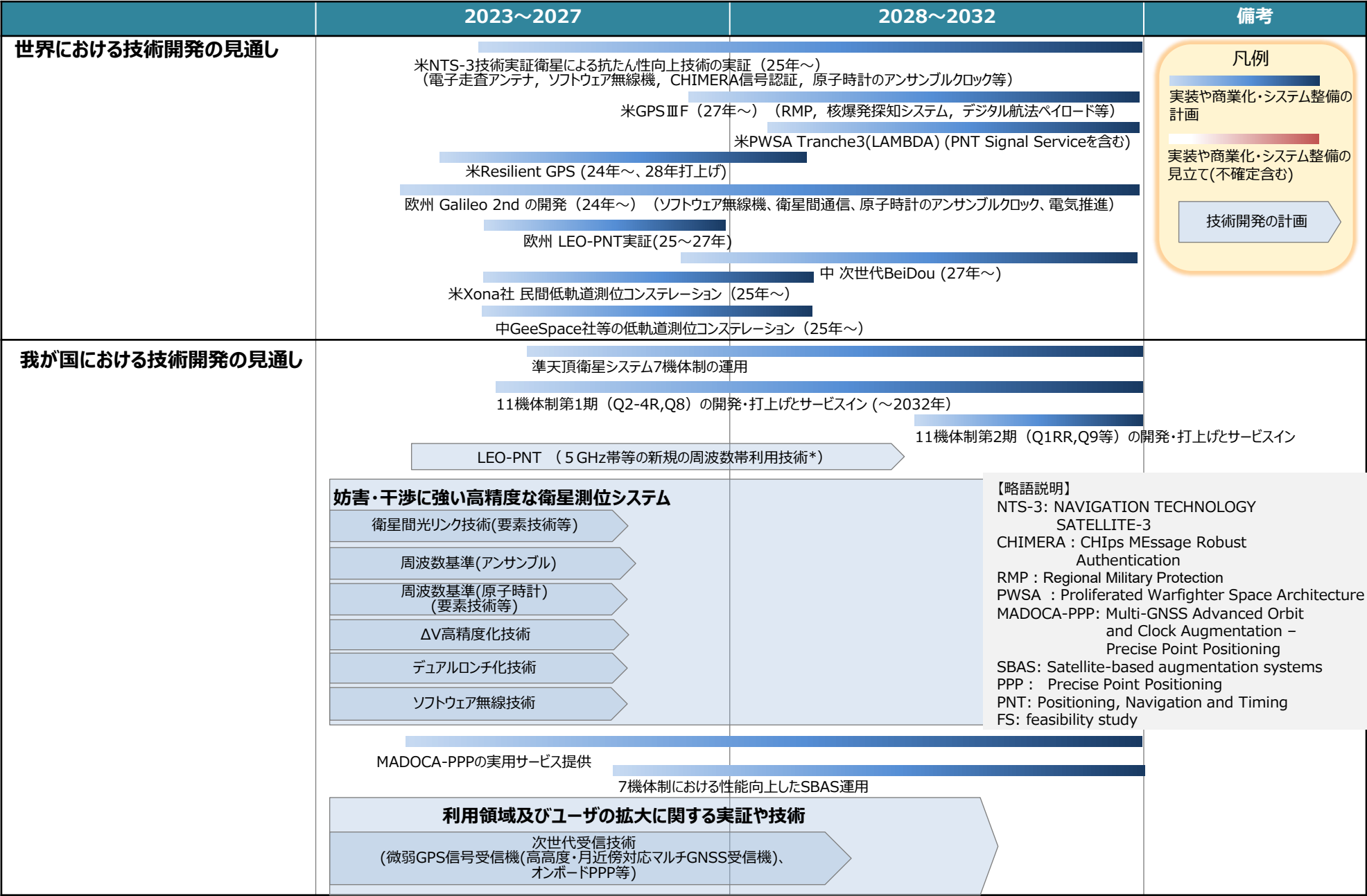
技術成熟度がまだ低く、コンポーネント・部品・材料・アプリケーション・システム開発技術に分類できない先端技術を、いち早く宇宙分野に応用することも重要である。そのため、開発支援を行う政府・関連機関は、宇宙関連の先端分野に加え、宇宙以外の先端分野の関連学会や大学に関しても関連を密にし、宇宙・非宇宙先端技術の宇宙への適用を促すための連携の機会を探ることも重要である。

また、こうした技術の研究開発や実装の担い手として需要が拡大する宇宙人材を確保することは、衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の分野に共通する課題である。そのため、宇宙機器の製造分野に加え、リモートセンシング等のデータ利用側を含めた民間事業者のニーズ等を継続的に把握しつつ、産学官における技術開発や教育・研修等を通じた高度な技術者の育成や、宇宙人材の流動化促進、他産業の人材の宇宙分野への流入促進を図ることが重要である。

通信の技術ロードマップ[°]

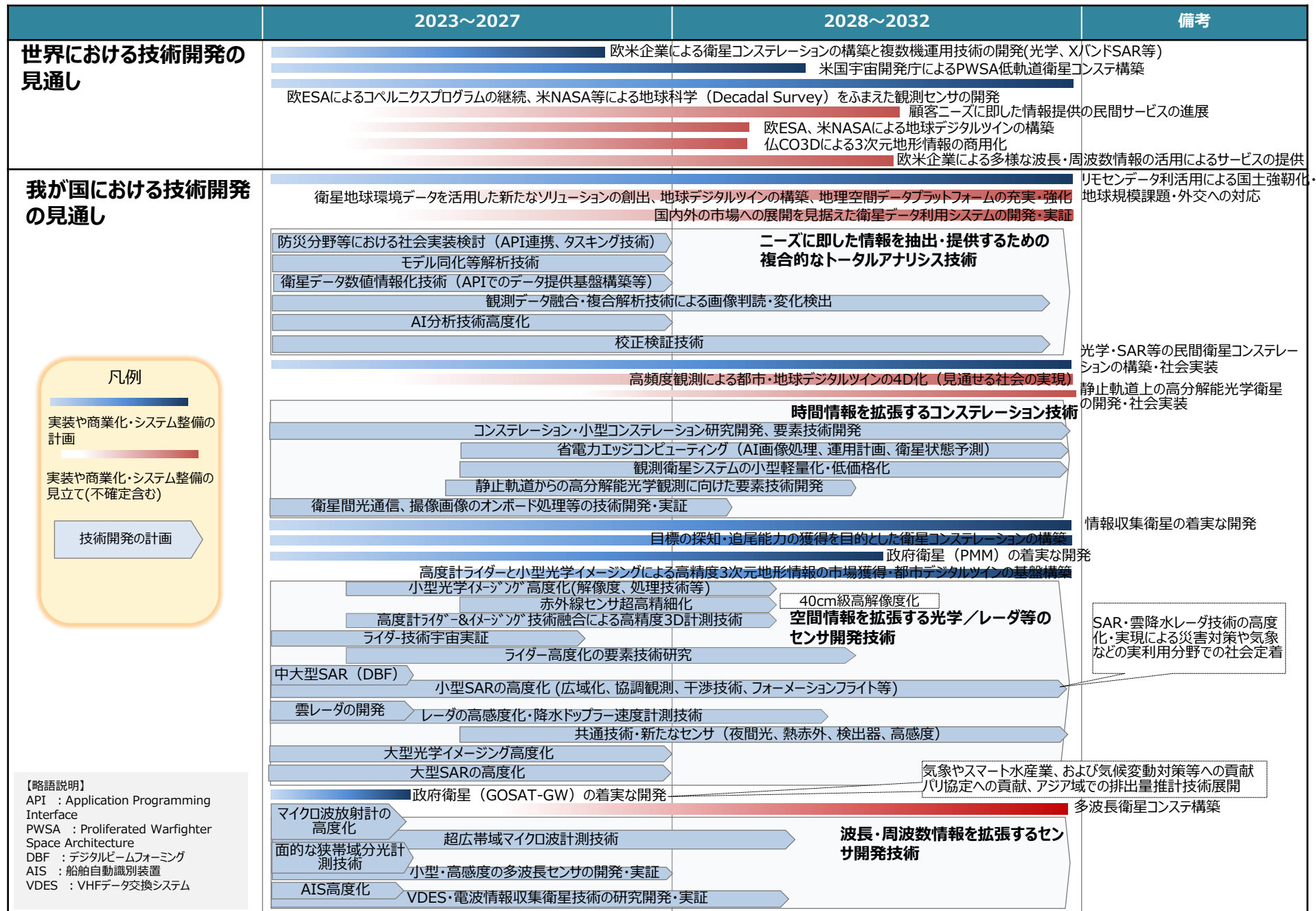


衛星測位システムの技術ロードマップ°

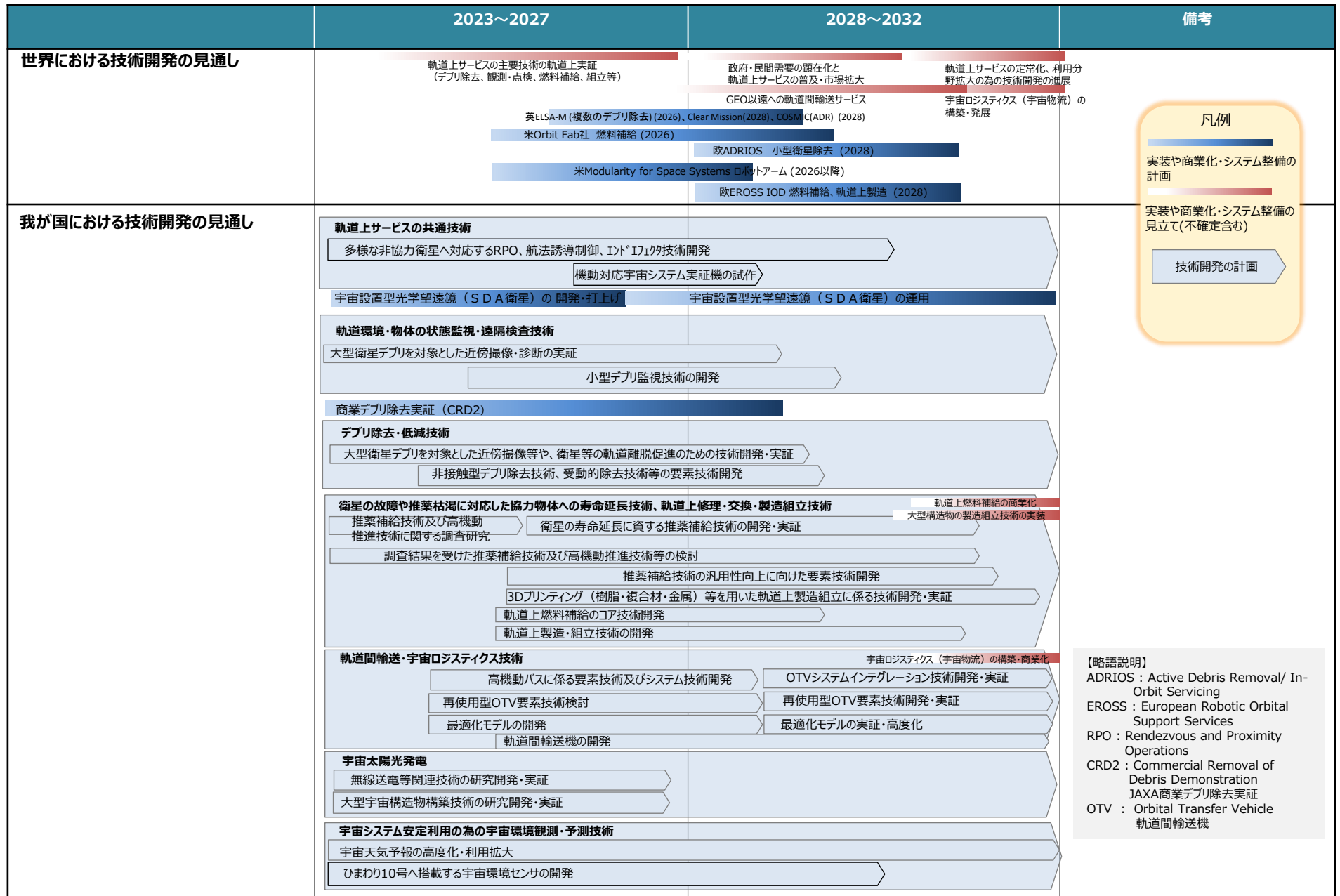


*：他業務との干渉回避、SDR技術を用いた送受信装置の開発等

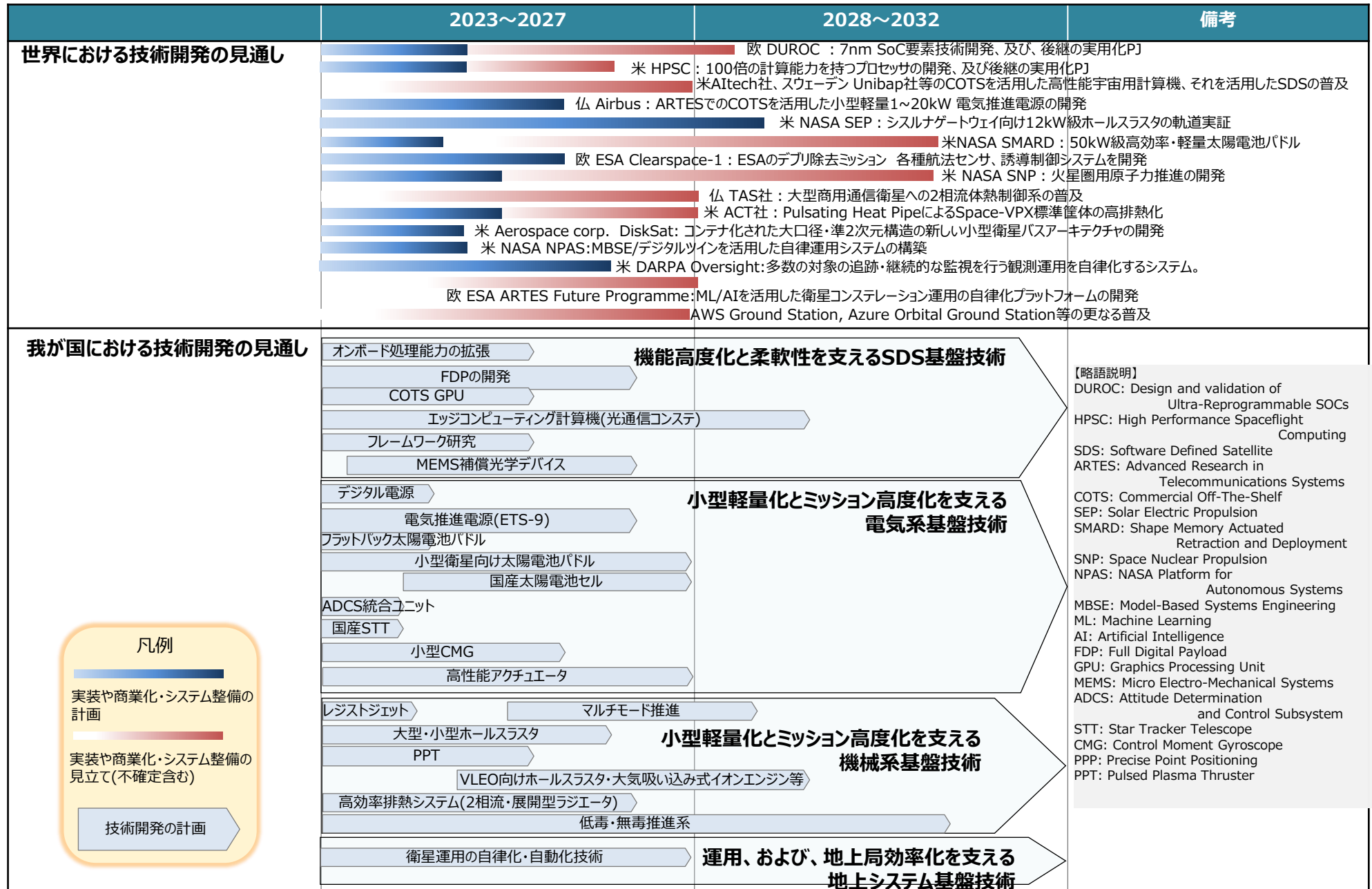
リモートセンシングの技術ロードマップ



軌道上サービスの技術ロードマップ°



衛星基盤技術の技術ロードマップ



分野共通技術の技術ロードマップ

