

**令和5年度 地球観測技術等調査研究委託事業
将来衛星システムにかかる技術調査
最終報告書(概要版)
(23-002-R-014)
2024年 3月**

(財) 衛星システム技術推進機構

1. はじめに

2. 調査概要

2.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

2.2 衛星開発のライフサイクルにおけるデジタル開発技術調査分析

2.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

2.3.1 オンボード基盤技術

2.3.2 誘導制御系技術

2.3.3 電源系技術

2.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

2.4.1 熱制御系技術

2.4.2 構造系技術

2.5 コンステレーション構築等に必要技術の調査分析

2.5.1 多数機開発・試験・運用手法

2.5.2 セキュリティ

2.6 定常・動向分析

2.7 適時調査・事実確認

本報告書は、文部科学省殿から委託された下記委託業務について、最終成果の概要を報告する報告書である。

令和5年度 地球観測技術等調査研究委託事業 将来衛星システムにかかる技術調査

2.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

23-002-R-014

令和4年度の調査項目の概要、及び、今年度の主なアップデート内容を以下に示す。

令和4年 調査項目	令和4年度 まとめ	令和5年 主要アップデート内容
(3-1-1) SDS/SDR/SDP ※Software Defined Satellite/Radio/Payload	<ul style="list-style-type: none"> ・通信衛星：多くのグローバルオペレータがSDSによる柔軟性の飛躍を要請し、開発・製造側も段階的に対応した。 ・観測衛星：a.実現可能なデータ伝送系容量、b.取得データ規模、c.地上処理規模、を含めたトレードオフによりd.ユーズケース(レイテンシ、ローデータニーズ)を踏まえて、観測エッジ処理等が実装されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・通信・観測分野ともにSDS化の流れは進展。 ・通信分野においては、「LEO衛星での衛星—携帯直接通信」、「ESAでの次世代向け再生中継・B5G/6Gに対する取組」が顕著 ・観測分野においては、観測データのオンボード処理は実証フェーズから実用フェーズに移行しつつあり、並行して観測計画のオンボード化が進む。 ・計算機技術としては欧米ともに、COTSを活用した高性能計算機、及び、宇宙用高信頼性デバイスの開発が並行して進む。
(3-1-2) オンボード処理	<ul style="list-style-type: none"> ・オンボードエッジ処理の実装やアプリケーションの柔軟性等が大きなトレンド、今後も進展が大きいものと推察。 ・競争領域は産官学によるデバイス開発競争を既に一周完了し、地上のIT・NW・産業ライン制御レベルの高度なアプリケーションをいかに柔軟でかつ高信頼性で実装できるかに移行。 	<ul style="list-style-type: none"> ・誘導制御分野や観測計画の分野にて、オンボードでの自律化に対する実証が進む。 ・ソフトウェアの更新の観点でStarlinkにて更新データの衛星側からの自発的な更新チェック・ダウンロード等顕著な取り組みが見られる。
(3-1-3) 運用の効率化	<ul style="list-style-type: none"> ・観測衛星事業においてはタスキングやデータ伝送のための地上通信NWシステムは重要であるが、設備のCAPEXを抑制することも重要であり、観測衛星事業と既存地上局をクラウドで結び付け提供するNW提供型ビジネスが多く出現 ・コンステレーションシステムの衛星機数が数10機程度を超えてくると、衛星側は自動化自律化機能を実装するものの、地上における運用省力化の重要性が増してくる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・誘導制御分野や観測計画の分野にて、オンボードでの自律化に対する実証が進む。 ・ソフトウェアの更新の観点でStarlinkにて更新データの衛星側からの自発的な更新チェック・ダウンロード等顕著な取り組みが見られる。
(3-1-4)SWアーキテクチャ	<ul style="list-style-type: none"> ・オンボード処理技術の発展に伴い、搭載されるソフトウェアアーキテクチャも汎用性を重視した構成に変化 	<ul style="list-style-type: none"> オンボード処理の進展に伴いSW開発の効率化が重要視。SWのフレームワーク、ツールボックス、ECOシステムの開発が進む
(3-1-5) 推進システム	<ul style="list-style-type: none"> ・推進系は従来の要求に加えて、コンステレーションの構築・運用、軌道上サービス、シスルナ圏等の新たなニーズが顕在化しつつあり、宇宙機競争力の源泉となっている。 ・低毒性燃料の化学推進、Xe代替の電気推進等、新たなニーズに対応した推進系の開発が活発に進んでいる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・VLEO向けエアブリージング電気推進、惑星間輸送向けの核熱エネルギーを活用した推進系等、新たな推進系の開発例が見受けられる。

システム全体の複雑化、個別工程の高度化に伴い、ライフサイクル全体に関わり工程間をつなぐ技術が重要化

トレンド

全体トレンド

- コンステレーション化等による衛星システムの複雑化、サプライチェーンの複雑化等の**衛星ライフサイクル全体が複雑化**する一方、設計/生産/試験の**各工程の高度化**が進んでいることから、ライフサイクル全体の各工程間をつなぐ技術の重要度が上がっている。

ライフサイクル全体の工程間をつなぐ技術

【設計】

仕様－システム設計－サブシステム設計及びその検証を繋ぐ**システム設計の効率化技術としてMBSEの適用**が、他産業、海外宇宙分野で進む。日本としても JAXA刷新PJ DX研究会として、開発を実施中。

【生産】

設計-生産間や生産の各工程間、ベンダー間等のやり取りを円滑に進めるため、**設計・生産データを一元的に管理・活用する技術**(PLM等)により、生産性を上げる事例が衛星分野と近いFA/医療機器等の少量多品種の他業界において顕著。日本においてもNewSpace中心に、**設計・製造分業化**の流れがあり、ベンダー間での情報共有の仕組み等はより重要となる見込み。

特定工程効率化技術

【設計】

設計した**モデルからSW/FPGAのソースコードを自動生成**するMBD-AC(Model Base Design Auto Coding)や**AIを活用した新しい設計技術**等、大幅に特定工程の設計効率を向上させる技術が出現。普及が進んでいる。

【生産】

生産現場としては、従来より改善活動等にて生産フェーズの各工程の効率化は進んでいる。そのため、特定の工程に特化した設備・技術導入を行っても、少量多品種の生産工場では大きな効果は出しにくい傾向がある。

2.3.1 オンボード基盤技術 調査まとめ

- オンボード基盤技術としては、アプリケーション、計算機(開発環境等含む)、デバイスそれぞれが相互に影響しあいながら、成長を加速させている。
- 半導体の微細化等の恩恵を受け、数年前までは現実的ではなかったアプリケーション等が実用化されつつある。

技術分野

アプリケーション

トレンド

- 通信・観測分野ともに**処理のオンボード化・SDS化の流れは進展**。
- 通信分野においては、「LEO衛星での**衛星—携帯直接通信**」、「ESAでの次世代向け**再生中継・B5G/6G**に対する取組」が顕著
- 観測分野においては、観測データのオンボード処理は実証フェーズから実用フェーズに移行しつつあり、並行して**観測計画のオンボード化**が進む。
- **宇宙データセンタ**等、新規アプリケーションに対する取組も見受けられる。

計算機
(開発環境含む)

- **COTSを活用した高性能計算機**が実証フェーズから実用フェーズに移行
- 計算機の高性能化により、性能制約を乗り越えやすい**垂直統合**から、開発効率を確保しやすい**水平分業**への流れが加速
- オンボード処理の進展に伴い**SW開発の効率化が重要視**。SWのフレームワーク、ツールボックス、ECOシステムの開発が進む

デバイス

- **COTSの利活用技術** (放射線評価、システム上の耐性強化等) と並行して、欧州での微細な7nmプロセス開発等、宇宙用高信頼性デバイスの開発も進む。

- ミッション高度化に伴い、ミッション実現を支える姿勢・軌道制御系においてもオンボードで判断すべき事柄・複雑な機能が増加しており、中大型衛星中心にV&Vが課題となっている。
- デジタル技術等によるV&Vの強化は高度なミッションの実現すなわち「衛星」競争力に直結するため、欧米の業界全体の取り組みを注視するとともに、積極的に日本も参画することが望ましいと考える。

技術分野

姿勢・軌道制御系

トレンド

ミッション高度化に伴う複雑化

- 運用負荷低減、応答性向上のための自律化
- 軌道上サービス、探査等に活用される画像航法
- 上記実現のためのAI/MLの活用

Verification &
Validation
(V&V)

✓ **問題発生 of 早期化**

姿勢・軌道制御系の特性に加え、複雑化の影響もあり、**設計とV&Vの負荷比率が2:8**となっており、V&Vの改善が急務
⇒ 欧米がともに参加したV&V Seminarによる業界横断で対策検討

センサ/
アクチュエータ

✓ **機能拡張**

小型軽量化等に加え、軌道上サービスのような**複雑なシーケンスの実現をサポートする機能付加**が見受けられる
⇒ LiDARの再プログラミング(FOV, スキャン機能のソフトウェア化)等

➤ 小型・軽量・低コストを目的に精力的な開発が進む。

技術分野

電源制御系

トレンド

- ✓ 次世代パワーデバイス： GaNの実用段階への移行
- ✓ 電気推進用 高電圧・大電力電源：精力的な開発継続
- ✓ デジタル電源：開発は多数あるが、研究段階が多い。
SLIMの軌道上実証は世界的にも先行

バッテリー

- ✓ 液系リチウムイオンバッテリーセルに関しては仏SAFT社が開発をリード
- ✓ 次世代バッテリーセルとして有望な全固体セルは各国取り組みを進めており、日本としても追従が必要。
- ✓ 産業用民生電池の宇宙適用に関する動向が見受けられる。

太陽電池
パドル

- ✓ パドル
ロケットへの複数衛星搭載を念頭とした高収納パドル開発が進む
- ✓ セル
欧米の高効率な3接合太陽電池が主流であるが、低効率でも安価、大量生産が可能な太陽電池への注目も集まっている。

➤ 通信衛星の大容量化・フルデジタル化に伴う発熱量増大への対応として熱制御系も急速に進化

技術分野

能動熱制御技術

トレンド

- 各国でフルデジタル衛星の開発・実用化が開始されており、大容量の排熱システムについても研究開発段階から、実用化段階へと移行しつつある。ただし、技術の難易度の高さからか、全面的な移行には至っていない。
- 二相流体ループの排熱システムを採用している衛星は、発熱箇所と放熱面の ΔT が下げやすいため、ラジエータの温度を上げることが可能となり、ラジエータの小型化が可能となる。

受動熱制御技術

- 機器内の局所的な排熱効率の向上のため、従来より使用されていたMHP(Micro Heat Pipe)をLHP(Loop Heat Pipe)/PHP(Pulsating Heat Pipe)等、より熱輸送効率の高い手法を適用する試みが見受けられる。
- 小型衛星等の低リソース衛星や、月面探査での越夜等に、潜熱を利用した蓄熱材(PCM:Phase Change Material)の活用例が見受けられる。

➤ AMの適用先が拡大。実用化フェーズに移行。

技術分野

新規材料技術

Additive
Manufacturing
(AM) 技術

トレンド

- 衛星主構造を構成する部材としてはスキン材とハニカムコア材を組み合わせたハニカムコアサンドイッチパネルが主体である点は従来と変化はない。
- 素材開発には長期スパンを要するため、相対的に製造方式の開発が進んでいる状況。必要な機能を新規素材で満足させるのではなく、AM等の形状に従来以上の自由度を持たせた製造方式によって課題解決を図る傾向がみられる。

- AMを用いたRF機器、熱制御デバイス等の積極的な開発を確認実証フェーズから実用フェーズに移行しつつある。
- 生成AIを用いた最適化や、従来個別に設計、製造後インテグレーションをしていた、構造、熱、計装系の一体成型等により、衛星設計・製造プロセスの変革をもたらす技術となりつつある。

2.5.1 多数機開発・試験・運用手法 調査まとめ

各社のコンステレーション構築戦略まとめ

SpaceX/Starlink

圧倒的な資金力を背景に、順当に工場設備の投資を行うと共に、事業化にできると判断したコンステレーションを継続的に製造・打上げを行っている。

Starship向けのStarlink V2を変更したV2 MiniをV1.5と一時は並行して展開するなど、**一定の互換性を持たせながら機数の増強・サービス品質の向上を行っている**。また相当数の衛星があることからソフトウェア更新について**データ配信は自律的に、データ利用は中央集権的に**運用されている。

OneWeb

トールーズでの量産試作と製造ラインの検証、フロリダでの本格量産を行うなど、**Step by Stepの量産プロセス**を進めてきている。Starlinkとの比較という観点では、大きな性能変更なく600機以上を製造している一方で、2023年の打上げ**一旦コンステレーションとしては完成とし**、Starlinkのような継続的な行っていない。加えて第二世代については2028年頃のサービス開始、と言われているように、**後方互換性を持たせた次世代機を順次打上げるような構成にはなっていない**。

Planet

(Doveによるコンステレーションについて)

3Uのキューブサットをとにかくばらまき、ニーズを広げていくという戦略から、**営業の状況を踏まえながら徐々に衛星の世代や投入軌道を変化させていった**と考えられる。一方でここ数年はSuper DoveをSSOに投入する形で軌道上の機数を維持しており、コンステレーションは**成熟段階**にあると考えている。加えて技術の進展の早いキューブサットであり、ミッション部の世代に限らず、**バス部や地上システムを含めた改良頻度が高く、ハードウェアではなくサービスの向上に注力している**と思われる。

Capella

今回比較している中では機数としての例に乏しいが、初号機から第2世代で大きく設計を変えているが、第2世代から第3世代では**衛星サイズ・性能が向上する形で、順当な進化**を遂げていると思われる。この観点で想定される顧客や競争環境からよりPlanetと比較して**高性能化に競争力を見出す段階**にあると考えられる。

2.5.2 セキュリティ 調査まとめ

衛星製造フェーズと対応するセキュリティ対策：

- 国内民間衛星事業者においても採用が進んでいる「民間宇宙システムにおけるサイバーセキュリティ対策ガイドライン」は幅広い対応に強み。
- 従来、衛星本体は地上での設計・製造時にセキュリティへの対応を行い、打上げ後、それを変更する必要はなかった。そのため、現状打上後の衛星本体に対する記述はいずれのドキュメントにも詳細な記載無い。→今後のセキュリティ開発のポイントとなる。

対策対象 文書名	調達		製造			運用・保守	
	衛星本体	衛星本体	開発・製造設備	衛星運用設備	衛星データ利用設備	衛星運用/ 衛星データ利用 設備	衛星本体
民間宇宙システムにおけるサイバーセキュリティ対策ガイドライン	△(高いセキュリティレベルが求められる際として記述)	△(高いセキュリティレベルが求められる際として記述)	○	○	○	○	× (記述無)
SPARTA	○	○	△(IT系ガイドラインを参照)	△(IT系ガイドラインを参照)	△(IT系ガイドラインを参照)	△(IT系ガイドラインを参照)	× (記述無)
AWS Ground Station Azure Orbital Ground Station	× (対象外)	× (対象外)	× (対象外)	○	○	○	× (対象外)

いずれのガイドラインも、衛星本体の運用時点におけるセキュリティ対策について、現時点では記載されていない。今後、衛星間通信の一般化(不特定多数との通信)や、ソフトウェア更新の一般化、非宇宙用のハードウェア・ソフトウェアの利用が増えるにつれて、リスクが発生・上昇してくると考えられ、対策の重要性が徐々に高まると考えられる。

2.6 定常・動向分析 調査まとめ

23-002-R-014

定常・動向分析として、下記カンファレンスに出席した

L N	カンファレンス名	開催場所	開催時期	目的
1	MATLAB EXPO 2023 JAPAN	日本 東京	2023/5/31	民生分野含めたデジタル開発技術最新動向の情報収集
2	ESA GNC AND ICATT 2023	Poland Sopot	2023/6/12 ～6/16	誘導姿勢制御に関わる最新動向の情報収集
3	Small Satellite Conference	アメリカ Utah	2023/8/5 ～8/10	小型衛星に関する衛星システムやサブシステム全般の情報収集
4	EDHPC2023(※1)	フランス Juan-Les- pin	2023/10/2 ～10/6	デバイス・SW等を含むオンボードデータ処理に関わる最新動向の情報収集

今年度は適時調査・事実確認に関する依頼は発生しなかった。



(財)衛星システム技術推進機構