

**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
中間報告書
(23-002-R-009)**

**2023年 9月
(財) 衛星システム技術推進機構**

1. はじめに

2. 調査報告

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な技術の調査分析

まとめ

※：上期重点調査項目

本資料は、文部科学省殿から委託された下記委託業務について、中間段階での成果を報告する物である。

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

1. はじめに

2. 調査報告

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

まとめ

※：上期重点調査項目

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-009

令和4年度の調査項目概要を如何に示す。これら項目は本年度関連調査項目でアップデート予定。

詳細はhttps://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/space/jigyou/detail/1347482_00012.htm

令和4年調査項目	令和4年度まとめ	令和5年関連調査項目
(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による性能面・価格面の飛躍を要請し、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.ユーザニーズ(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。	(3-3-1) オンボード処理技術
(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。	(3-3-1) オンボード処理技術
(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。	(3-2-1) 衛星分野でのDX (3-5-1)多数機開発・試験手法
(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	(3-3-1) オンボード処理技術
(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。	(3-3-2) 誘導制御技術

1. はじめに

2. 調査報告

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

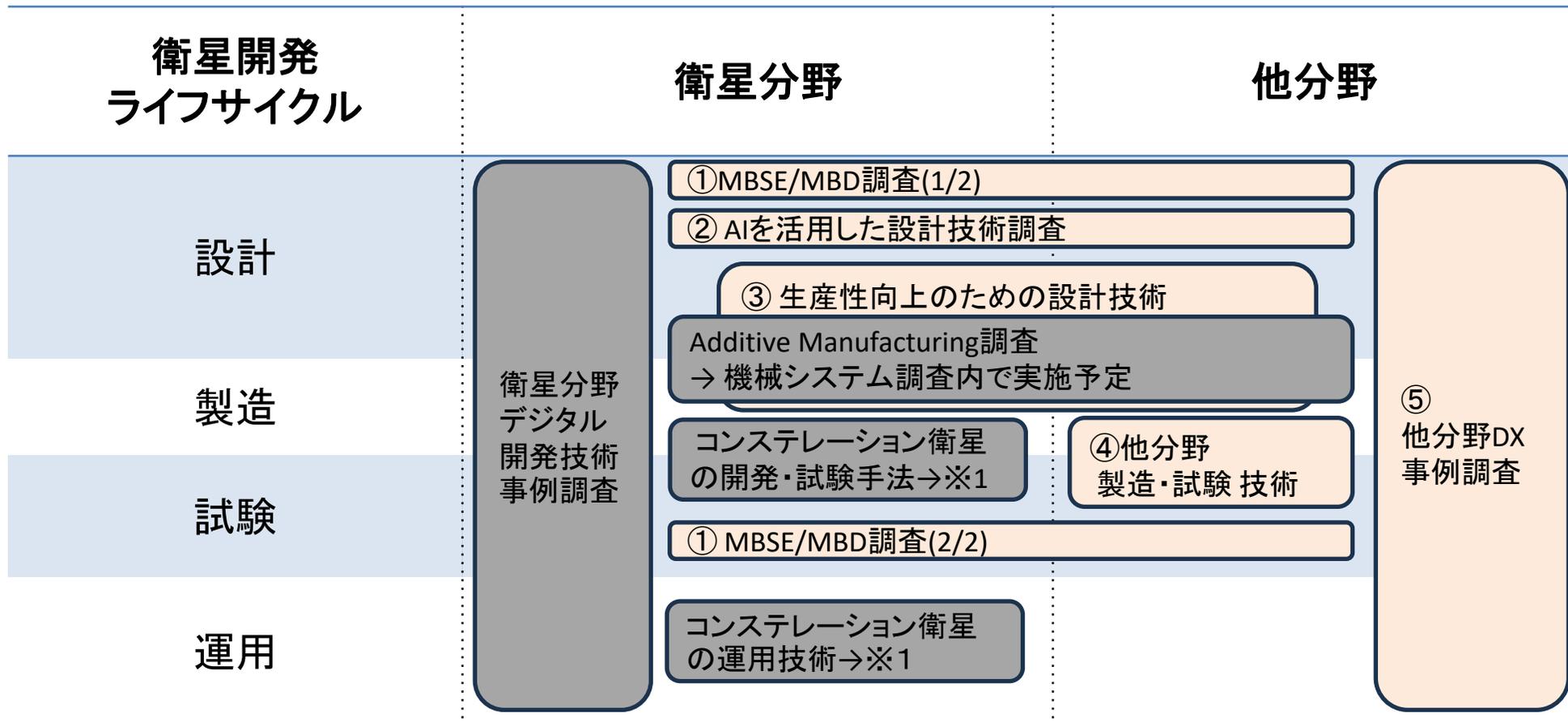
2.5 コンステレーション構築等に必要技術の調査分析

まとめ

※：上期重点調査項目

2.2.1 調査状況まとめ(概要)

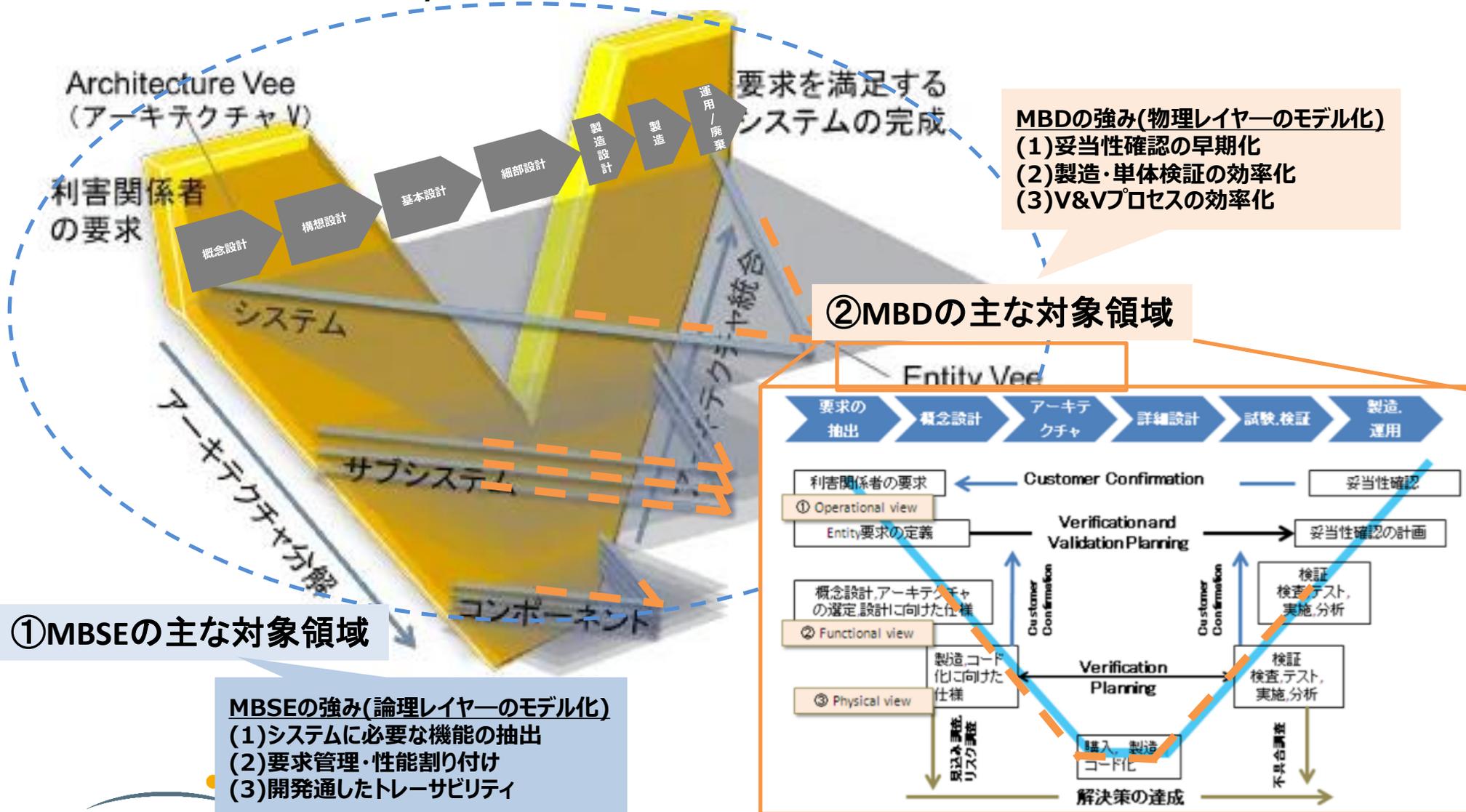
調査を実施したデジタル開発技術の項目と、各項目が衛星開発ライフサイクル、および、衛星/他分野のどの領域に対応するかを以下の図に示す。



 下期調査予定項目

※1 コンステレーションに関わる技術調査内で実施予定

◆ 開発プロセスにおけるMBSE/MBDの主な対象範囲



2.2.1 調査状況まとめ(①MBSE/MBD調査)

- MBSE:世界的に普及が進む。日本衛星分野もDX研究会を通じ取り組みを進めているが本格適用はこれから。
- MBD:日本衛星分野でも活用が進む。さらにモデル→製品実装間を大幅に効率化するMBD-AC(MBD AutoCoding)の採用も進むが、日本衛星分野でのQA(Quality Assurance)については今後の課題。

他分野

衛星分野

海外

【MBSE】

- ✓ INCOSE:2025年までにすべてのシステムズエンジニアリングがモデルベースになると予測。今日の大きな問題は「なぜモデル化する必要があるのか」ではなく、「どのように効果的かつ効率的にモデル化するか」。

【MBD】

- ✓ 早期プロトタイプング、V&V(MILS、SILS、HILS)等の効果から普及が進む。
- ✓ MBD-ACによる更なる効率化が進む。

【MBSE】

- ✓ 米：NASAのMIAMIやBoeing/ Lockheed Martinの取り組み例のように積極的に推進
- ✓ 欧：ESA,TAS,Airbus,OHBでのMBSEの取り組み等、官民一体となって推進。

【MBD】

- ✓ 数学モデル活用による設計段階での各種解析作業手法は既に浸透
- ✓ MBD-ACも採用が進む。QA確保等を目的に、ESAではHandBook制定

日本

【MBSE・MBD】

- ✓ 自動車：業界コンソーシアム JAMBE、および、JMAABを通じて普及を促進。
- ✓ 航空機：業界コンソーシアム MBACを通じて普及を促進。

【MBSE】

- ✓ JAXA 刷新PJ DX研究会にて、普及に向けた取り組みを実施中であるが、実PJへの本格的な適用はこれからの状況。

【MBD】

- ✓ 数学モデル活用による設計段階での各種解析作業手法は既に浸透。
- ✓ MBD-ACによる効率化も採用報告例などあり、進んでいるがそのQA方法等は各社の取り組みに依存している状況。

近年の生成AI等のAI技術の進展に伴い、AIを活用して設計効率を向上させる技術が急速に進んでいる。

- AI活用した設計技術は、従来と比べて大幅に設計効率を向上させる可能性がある。
- 一方、AI生成物は不備混入が原理的に起こりうるので、レビュー等の品質確保の仕組みと併せて導入が必要

例: AIによるソフトウェア設計支援 [GitHub Copilot](#)

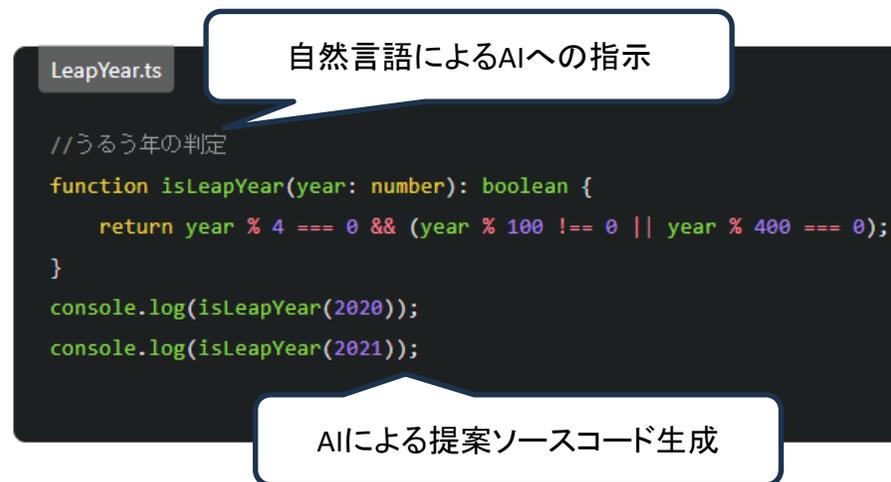
- 大規模言語モデル (LLM) を使用し、自然言語での指示に対して、ソースコードの提案が可能。
- ZOZOでの[導入事例](#)

効果

- 使用した開発者の60-75%が開発満足度が向上したと回答
- 使用した開発者の73%が集中して作業ができ、87%が繰り返し作業中の精神的疲労を軽減できたと回答
- **使用した開発者群が55%早くタスクを完了**

課題

- セキュリティ上の課題
- ライセンス侵害のリスク
- 費用対効果



コード生成例: 出典([Qiita](#))

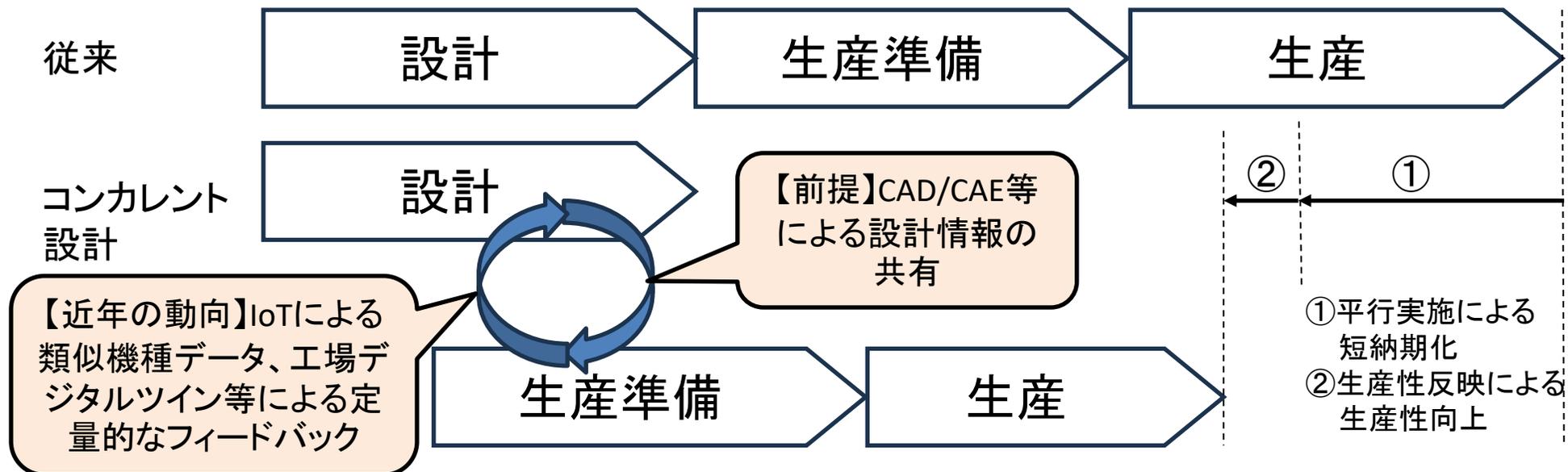
その他のAI活用の設計技術例: PCBパターン自動生成、3D解析メッシュの自動生成、3Dモデルの自動生成、半導体配置配線、デジタル回路設計リグレッションデバッグ等

生産性向上のための設計技術として幅広く活用されているコンカレント設計の最近の動向を調査。

→ IoT/デジタルツインを活用し、コンカレント設計の生産性向上効果を最大化

コンカレント設計:

- 1980年代頃、自動車業界にて開発された設計、生産準備、生産等のプロセスをシリーズに実施するのではなく、一部のプロセスを平行実施する設計手法。平行実施による工程前倒し効果だけでなく、設計完了前に製造関連の検討を進め、生産性の観点から設計に反映することで、生産性向上効果も見込める。
- 設計完了前に製造関連の検討を進めるため、CAD/CAE等を活用した設計・生産部門間の情報共有が必須。
- 製造側からのフィードバックは製造着手前となるため、定性的な情報となることが多かったが、近年IoTにて収集した類似機種データやそれらを活用した工場デジタルツイン等により、定量的なフィードバックが可能となり、生産性向上効果を増加させる例が増えつつある。



2.2.1 調査状況まとめ(④他分野 製造・試験 技術)

- 他分野での優れた製造・試験技術例として、第四次産業革命を推進しているとして、Lighthouse(※1)に認定されている工場のうち、少量多品種の高付加価値工業製品を取り扱う向上を3例抽出し調査を実施
- 一元管理されたデータ(設計データ、IoT取得データ等)を部門間で共有し、データをツールとして**各工程間(設計-生産、生産の工程間含む)の生産性向上**を実現している例が多い。
- 生産性向上に**やみくもな最新設備導入・自動化は不要**という意見が2社で共通。

※1 世界経済フォーラムがマッキンゼー社と選定している第四次産業革命を推進している工場。世界で132工場、日本は3工場
調査工場サマリ

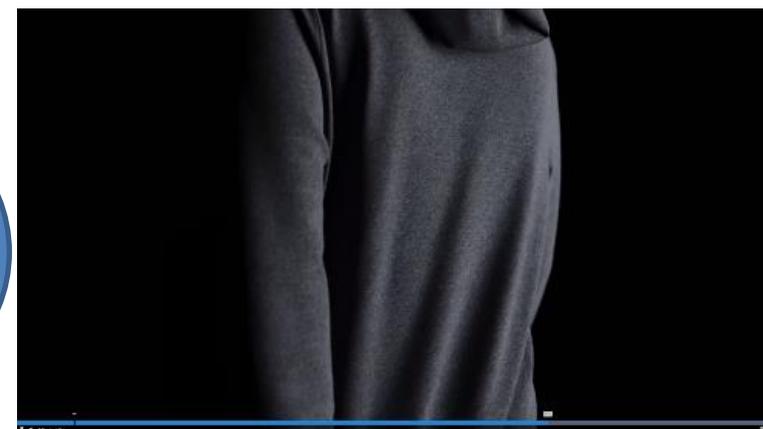
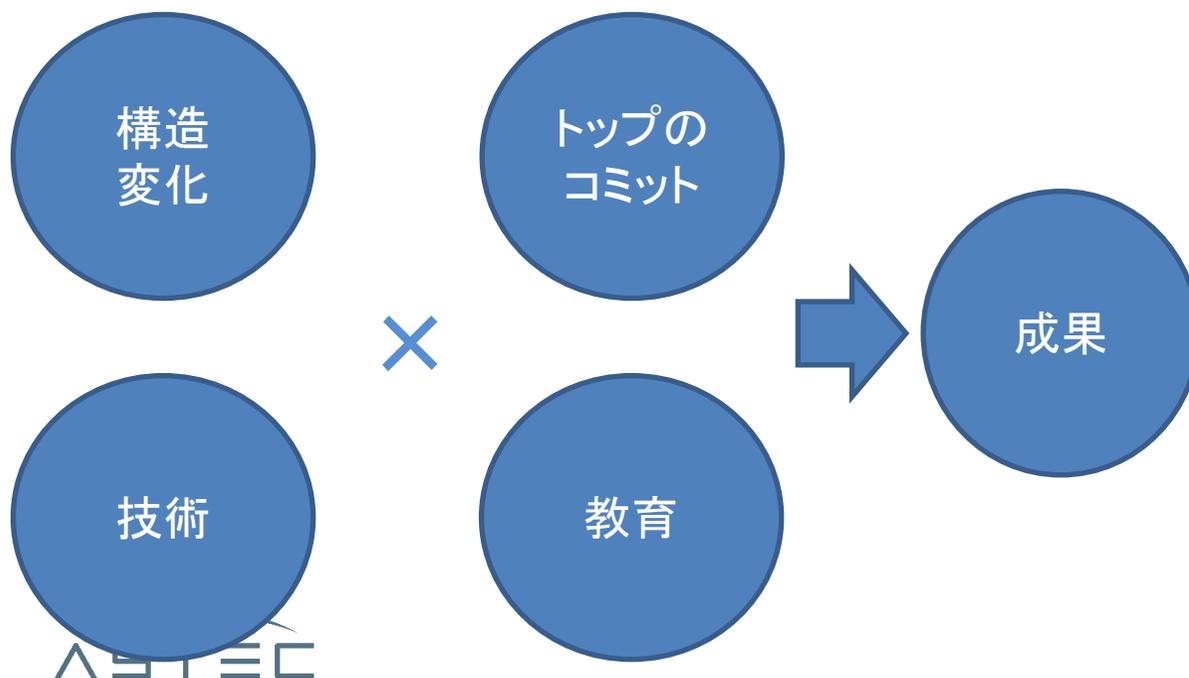
調査工場	工場立地	製品	概要
Siemens Amberg工場	ドイツ	FA製品	<ul style="list-style-type: none"> ➤PLMによるデータ一元管理と、一元管理したデータを活用したデジタルツインの活用による各工程間の生産性向上 ➤生産性向上にやみくもな最新設備導入・自動化は不要 先端工場でも工程の25%は人手による作業
GE 日野工場	日本	X線CT装置等の医療機器	<ul style="list-style-type: none"> ➤作業者に負荷をかけないデータ測定、そこからの工程間を含む知見抽出・最適化により生産性を向上 ➤生産性向上にやみくもな最新設備導入・自動化は不要
日立 大みか工場	日本	鉄道等の情報制御システム	<ul style="list-style-type: none"> ➤設計データ、および、IoTによる生産工程全体のフィジカル情報のデータを一元管理し、製品のライフサイクル全体で活用 ➤「設計から生産に移行する際に存在した作業の削減」、「設計側含めた生産IoTデータの共有」により改善サイクルの実現 3D CADデータからの組立て手順書自動生成

事例：アパレルメーカー Tommy Hifiger社

3D Design※¹による試作品の製造を不要とすることで、製品開発期間短縮、環境負荷低減を実現

以下4要素が噛合い、DXが実現できた好事例

- 構造変化：アパレル業界に対する環境負荷低減
- トップのコミット：CEO自らが3D Designの推進を宣言
- 技術：実物と遜色なく、シミュレーション環境上に衣服を再現できる技術を開発。
- 教育：3D Designツールを全てのデザイナー、関連スタッフにトレーニングを実施。



3D Design例

MBSEの導入は製品の機能の整流化に資するものであり、事業や外部環境の“構造変化”と“トップのコミット”のハイレベルなモチベーションを背景に導入が進んでいる模様。

MBSE導入に係るモチベーション

	MBSEの適用先	MBSE導入のモチベーション	
		構造変化	トップのコミット
MBAC	<u>業界共通での設計プロセス・インターフェイス</u> の策定	低下する国内業界全体の競争力強化	機体メーカーの副事業部長などのハイレベルメンバが主導
デンソー	OEM要求を分析し、 <u>設計を共有できる箇所とカスタマイズが求められる箇所を同定</u>	顧客となるOEMメーカー数の拡大	全社主導でデジタル改革を推し進めることを宣言
ヤンマー	複数のアーキテクチャ候補を、コストと性能で評価し、 <u>設計オプションを絞り込み</u>	製品の電動化に伴うアーキテクチャ変更の要請	設計開発のデジタル化をサポートする役員が存在
Sky Drive	<u>認証対応～パイロット育成まで一気通貫</u> で利用できる統合モデルを作成	世の中に存在しない新たなモビリティ開発	認証対応やパイロット育成などの経営マターへの対処策として検討

構造変化に直面している衛星業界にあっては、DX研究会などのボトムアップでの取り組みが進むが、今後はトップのコミットを引き出せるかが重要

衛星業界の現状と示唆

	生じている構造変化	対応の現状
業界全体	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 安全保障を含めた変化の激しい<u>ユーザーニーズのタイムリーな取り込み</u>の必要性 ✓ 宇宙新興国の増加やグローバルサービスプロバイダの勃興による<u>グローバル市場化</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ JAXA・ASTECが事務局として<u>DX研究会を運営</u>しており、競争力強化をめざした<u>開発プロセスのDX</u>に関する議論を進めている
中・大型衛星	<ul style="list-style-type: none"> ✓ SDS (Software Defined Satellite) 化への<u>アーキテクチャ変更</u> ✓ <u>サプライチェーンの多様化・多元化</u>への対応 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 現状、Stardustプログラムなどを通じてSDR等の製品開発を進めているが、<u>伝統的な開発プロセス</u>を踏襲 ✓ サプライチェーンでも<u>個社間の文書ベースやり取り</u>が主流
中・小型衛星	<ul style="list-style-type: none"> ✓ <u>コンステレーション構築のための効率的な設計開発～製造プロセス構築</u>の必要性 ✓ 運用も含めた<u>全体最適スキーム構築</u>の必要性 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 当面は技術実証を進めており、<u>量産化は今後の課題</u>とする事業者も多い ✓ 一部の事業者においては、<u>量産を見据えた設備投資</u>などを行っている

業界ニーズは明確であり、今後MBSEの実装に繋げるには、
(特に中大型衛星に関する) **トップのコミットが重要**となる

個別工程の大幅な設計効率化を実現する技術の出現により、今後はより製品のライフサイクル全体に関わり、各工程間の効率化に寄与する技術が重要となる。

個別工程の大幅な設計効率化技術の出現

設計効率に大きく関わるため、
該当設計技術を使いこなすことは
必要

該当設計工程は従来必要であった
専門的な知識・ノウハウを持つ技術者への
依存度が低下し、コモディティ化するため、
該当設計工程の製品競争力への影響は低下
今後このような設計工程は増加見込み。

設計の1工程ではなく、製品ライフサイクル全体に
関わり、各工程間の効率化に寄与する
技術の重要度が高まる

※他分野製造・試験 技術の調査結果は
製造分野では、自動化によって効果がで
る部分にはすでに十分使いこなし技術が進
展し、該当工程単体の製品競争力影響が
小さいため、設計と同様に工程間の効率化
が重要になっていると考えられる。

2.2.2 強み・弱み分析

製品のライフサイクル全体に関わり、
各工程間の効率化に寄与する技術

特定工程を効率化する技術

MBSE技術

設計・生産データの一元管理、
及び、活用技術

設計自動化技術
(MBD-AC/AI活用等)

世界の
動向

- ✓ INCOSE:2025年には全てのSEがMBSEになると予測。
- ✓ 宇宙分野でもNASA/ESA等の宇宙機関、Boeing, Lockheed Martin, Airbus, TAS等主要メーカーが積極的に推進

- ✓ 民生少量多品種分野でのlighthouse認定工場ではデータ一元管理・活用を重視。
- ✓ ESA/Airbus/TASはIndustry 4.0を連携して開発を実施。

- ✓ MBD-ACに関しては、ESAでHandbook策定を進めるなど、普及と併せて、QA分野も進捗
- ✓ AI活用に関してはまだ新しい技術ではあるが、ツールベンダーによると、急速な普及が見込まれている。

強み

- ✓ JAXA DX研究会にて、宇宙業界としてMBSE推進を取り組み
- ✓ 国内で自動車、航空機等MBSE推進例がある。

- ✓ 設計各工程はMBDや3D CADの使用等のデジタル化は浸透
- ✓ 製造各工程は小集団活動等の改善活動の普及で効率化が図られている。

- ✓ MBDは普及している。
- ✓ MBD-ACに関しても、実衛星開発に適用し、設計効率向上を実現している例あり。

弱み

- ✓ 実PJにてMBSE本格採用し、効率化を果たした報告例はない。
- ✓ 衛星向けMBSEの開発フローやオントロジーの標準がない。
- ✓ 多数の部門間にまたがる技術開発は日本は不得意。

- ✓ 設計・生産データの一元管理、及び、活用技術により、大幅に生産性を向上させた報告例はない。
- ✓ 多数の部門間にまたがる技術開発は日本は不得意。

- ✓ 日本宇宙分野での開発標準では新しい技術に対応できておらず、特にQAは各社の裁量に依存。
- ✓ AI設計技術に関して、QA等への懸念から、採用が遅れる可能性あり。

2.2.3 開発戦略の検討

各技術とも何らかの形で開発が必須となる技術であることから、ここでは開発の進め方について検討を行う。

	MBSE技術	設計・生産データの一元管理、及び、活用技術	設計自動化技術 (MBD-AC/AI活用等)
日本の現状	<ul style="list-style-type: none"> ✓ JAXA DX研究会にて、宇宙業界としてMBSE推進を取り組んでおり、革新プログラムを通じて、より大きなPJへの展開を検討中。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Industry4.0 等を標ぼうして、人工衛星の設計・生産データを一元化、効率化を進めている報告例はない。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ MBD-ACは各社取り組み例ありだが、QA確保に課題。 ✓ AI設計技術のような新しい設計技術を如何に迅速に取り込めるかは課題あり。
論点	<p>論点① MBSEの実PJへの採用が進まない主要因は何か？</p> <ul style="list-style-type: none"> -外圧(要求)がない。 -初期投資が大きい -明確な次号機以降の計画がないと、投資回収計画立案が困難 -なくてもなんとかできている。 -採用PJの失敗リスクが大きい。 <p>論点② MBSEの実PJへの普及を進めるために効果的な国の支援の在り方は？</p>	<p>論点③ 衛星工場のIndustry4.0化を進めるために、効果的な国の支援の在り方は？</p> <ul style="list-style-type: none"> - 官民共同でベストプラクティスを共有するコンソーシアムを運営。 - シリーズ衛星の一括契約・長期の観測データのアンカーテナンシー化等の中長期の予見性確保 	<p>論点④ 迅速に“新しい設計技術”を実用化するための国の支援の在り方は？</p> <ul style="list-style-type: none"> - “新しい技術”を試行するプロジェクトを官民で推進 + 官民でのガイドライン化 - 民での技術開発 + 官民でのガイドライン化 - 民での技術開発

中間報告の前に実施した有識者検討会にて以下に示すようなコメントを頂いており、下期における調査の深堀、分析、及び、開発計画の検討に反映していく。

対象	有識者	主要コメント抜粋
MBSE 技術	A様	<ul style="list-style-type: none"> ➤ MBSEの普及に重要な観点として、発注側から仕様で指定してしまうという観点も重要。 ➤ ボトムアップの活動も十分ではなく、以下の取り組みも重要。 <ul style="list-style-type: none"> ・業界を跨いで成果や知見を共有するための仕組み作り（データベース化、組織間での連携） ・MBSEを取り扱える人材の育成・確保 ・開発ツールの整備。ベンダー間互換性や日本の開発プロセスにあわせたツール開発の自在性。
	E様	<ul style="list-style-type: none"> ➤ TOPのコミットという意味では、ESAでは技術ロードマップというトップの文書の中で、MBSEへの取り組みを宣言しており、推進の原動力となっている。日本も宇宙技術戦略、技術ロードマップの中でMBSE推進を宣言することは大きな力となると考えている。
設計・生産データの一元管理、及び、活用技術	B様	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 設計と製造が同じデータをデジタルでみるという点は極めて重要と考えている。一方で、製造に関わる部分は各社個別(設備、ツール等)であるため、業界内で共有が難しい点は課題。
	C様	<ul style="list-style-type: none"> ➤ スタートアップという目線からは、より直近への課題(人手不足の中、衛星のことをわからない他業界の人を集めてきて、多数機の製造ラインを立ち上げなければならない、開発機種から量産機種への移行等)に対して、より効果的な技術・良好事例がないか調査を広げてほしい。 ➤ まずは実際の現場の課題について調査し、そのうえで対策を考えることも重要ではないか。
設計自動化技術	D様	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 先進的なツールは問題が発生した際の原因究明がより困難となる。そのため、JAXA側としては簡単に導入できない状況にある。対策としては、業界として事例集積を行う際にうまくいった例だけではなく、問題が発生してしまった際にリカバリーできた例等含めて集積することが重要と考える。

1. はじめに

2. 調査報告

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

まとめ

※：上期重点調査項目

2.3.1.1 調査状況まとめ（概要）

- 本調査でのオンボード処理のスコープは「AI/ML/画像処理等の高負荷な処理を、専用のHW(アナログ回路、書き換えできないASIC)ではなく、再プログラム可能なSW※²やFPGA※³等を用いてオンボードで行う処理」とする。
- 本調査では以下の観点で調査を行った。
 - ① アプリケーション、サービス
 - ② 計算機、OS、MW等のオンボード基盤技術
 - ③ デバイス

2.3.1.1 調査状況まとめ（アプリケーション・サービス全体）

- 通信・観測分野を中心にオンボード処理の実用化が進む。
- 上記に対応して、各衛星に演算リソースを提供する宇宙データセンタの構想も進んでいる。

アプリケーション	オンボード処理トレンド	備考
通信	DBF、チャネライザ、変復調、より上位のプロトコル等のオンボード処理が、適用される衛星毎に柔軟性、通信総帯域、計算リソースのトレードオフ結果に従い実装、実用化されている。	DBF:Digital Beam Forming
観測	観測データのデータ帯域削減・レイテンシ削減のため、オンボードでの画像生成(SAR画像再生、HSデータキューブ化等)、圧縮、ML/AI等を用いたターゲット抽出等の開発が進む。	ML/AI: 機械学習、人工知能
測位	抗堪性向上のため、測位信号のSW無線化(DBF、変調方式・暗号化方式変更等)の検討が進められている。 (米国: Navigation Technology Satellite-3(NST-3))	※1
軌道上サービス	近接航法等のため、ML/AI等を用いた画像航法の開発が進む。	※2
従来アプリケーション以外のサービス	宇宙データセンタ(軌道上クラウドと呼ぶベンダーもあり)と呼ばれる豊富な演算リソース、衛星間通信I/Fを持つ衛星を上げ、他の衛星に演算リソースを提供するサービスの構想が進んでいる。	

2.3.1.1 調査状況まとめ（アプリケーション：通信）

- 通信では業界変化に対応するため、オンボード処理による柔軟性確保が進展。
- オンボード処理DBF/チャネライザ機能による通信ビーム配置・周波数帯域の柔軟性確保はGEO/MEO/LEOともに実用化が進む。
- GEO/MEOでは、総通信帯域が優先。変復調や上位プロトコルへの対応は限定的。
- LEOでは、上位プロトコル対応やMobileダイレクトアクセスのため、基地局一部機能のオンボード処理化開発が進む。

顧客ニーズ の変化

場所によらない/移動体対応ユビキタスインターネット接続

- ✓ 地上通信網の発達
 - ✓ 放送からVoDなどのダウンストリームの事業変化の加速
- ➔衛星通信と地上通信網との競争激化

衛星通信 業界の変化

衛星通信オペレータとプロバイダの契約短期化

- ・不確実性の高まりに起因
- ・従来15年程度の契約が3-7年程度に短縮化

提供サービスの変化

- ・放送→インターネットへのシフト
- ・地域/時間帯など需要変化に対する柔軟な運用

トレンド

オンボード処理による柔軟性確保

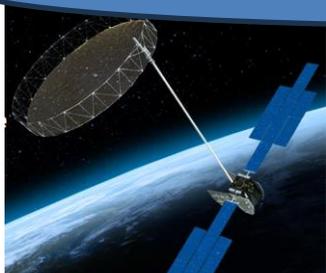
GEO/MEO

LEO

DBF/チャネライザ機能による通信ビーム配置・周波数帯域の柔軟性確保

総通信帯域の拡大

上位プロトコル対応・Mobileダイレクトアクセス



ViaSat-3: 総帯域~1Tbps



O3b mPower: 総帯域~数百Gbps



Starlink V2 mini
総帯域~60Gbps



AST Mobile
総帯域~10Gbps

2.3.1.1 調査状況まとめ（アプリケーション：観測）

23-002-R-009

- オンボード処理の動機は、データ量削減、および、それに伴うレイテンシ削減であり、そのために圧縮からターゲット抽出まで多くのアプリケーションが開発され、実証フェーズから実用フェーズに移行。
- 今後は衛星間光通信、宇宙データセンタ等の発展状況によって、観測分野でのオンボード処理の対応範囲も変わってくる可能性が高い。

ダウンリンク通信容量をはるかに超える観測衛星のデータ量の急増(年平均27%成長)
観測データの高精細化、ハイパースペクトル化
観測衛星のコンステレーション化

発生する問題
観測量が制限される
レイテンシ増大
従量課金アンテナ使用料の増大

解決手段1：直近の取り組み オンボードでのデータ量削減処理

- 画像生成、圧縮、ML/AI等を用いたターゲット抽出
- Capella(SAR画像再生)等の観測コンステレーションや、HyTI(データキューブ圧縮)等のハイパースペクトルミッションより実証から実用フェーズに移行中

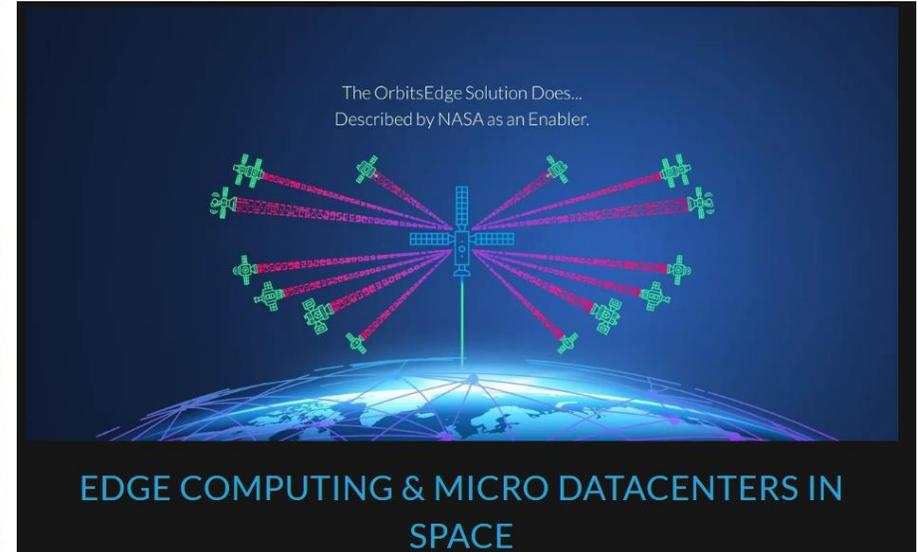
解決手段2：近い将来の実現を目指した取り組み
衛星間光通信網
宇宙データセンタ

2.3.1.1 調査状況まとめ（サービス）

- 急増する観測衛星等の衛星-地上間のデータ帯域ボトルネック解消のため、軌道上でのデータ処理を行う宇宙データセンタの構想を複数のベンダーが進めている。
- 成長条件は、衛星間光通信の標準化、低価格化、および、データセンタの演算・通信費用の低価格化
- 大容量・高信頼ストレージの実現により、観測データの軌道上保管が可能となれば、大きな成長可能性。



SpaceCompass宇宙データセンタ構想
出典：[NTT](#)



Orbits Edge Micro DataCenter構想
出典：[Orbits Edge](#)

2.3.1.1 調査状況まとめ(オンボード処理計算機に関わるプレイヤー)

世界では垂直統合型/水平分業型双方多数プレイヤーが存在。一方、日本は垂直統合型プレイヤーに偏り。水平分業による多様なアプリケーションの効率的な開発に課題

垂直統合型

アプリケーションと計算機を一体となって開発する形態。計算機とアプリケーションが一体となって開発するため、最高性能を出しやすい。一方、計算機の汎用性確保が課題で、多種多様なアプリケーション開発時に開発コストが増大。

水平分業型

計算機、OS、MW(開発環境含む)までの提供を行い、アプリケーションについてはユーザー側で開発させる形態。計算機の汎用性が必須。従来は演算性能が足りず、高度なオンボード処理への適用が困難であったが、近年のデバイス性能向上により、対応範囲が拡大。多種多様なアプリケーション開発に利点。

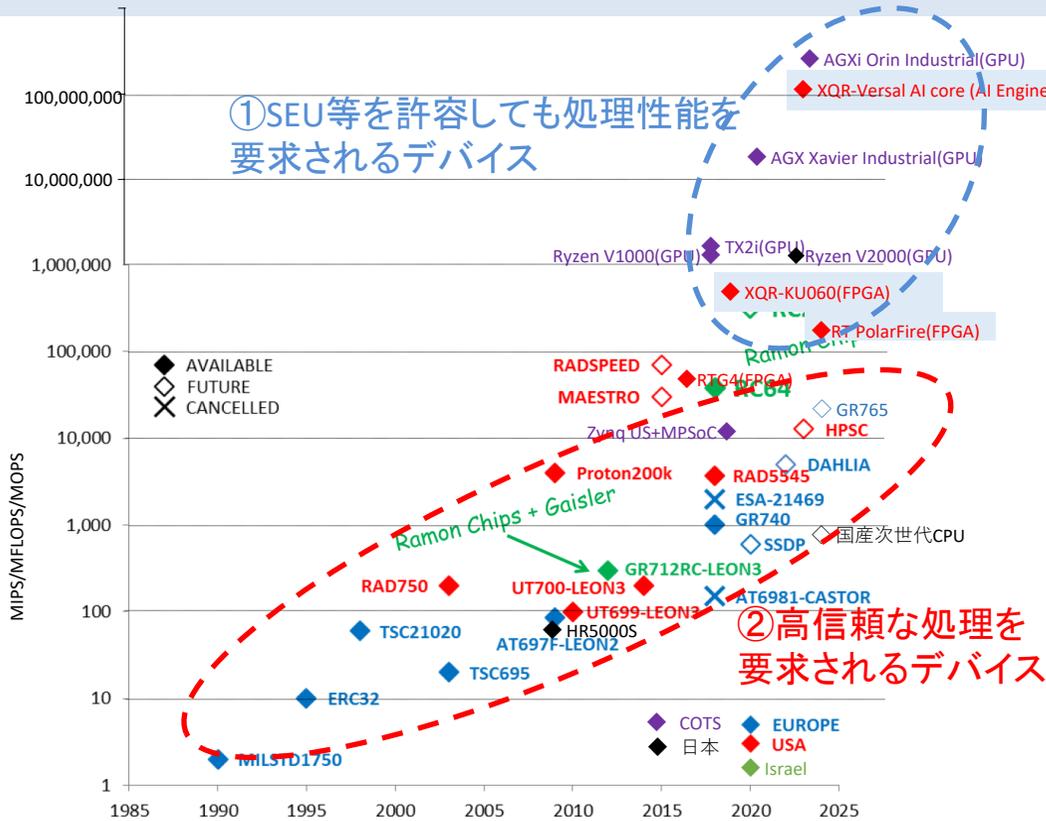
世界 ※1

日本 ※2

	世界 ※1	日本 ※2
垂直統合型	<ul style="list-style-type: none"> • Spire Global(NVIDIA Tx2i) • CESIUM ASTRO(AMD Zynq US+) • Spiral Blue (NVIDIA Xavier NX) (一部アプリ) • Planet (調査中) 	<ul style="list-style-type: none"> • 三菱電機 (ETS-9 フルデジタルペイロード) • NECスペーステクノロジー (SDRX) • QPS (FLIP)
水平分業型	<ul style="list-style-type: none"> • Unibap(AMD Ryzen V1000) • KP Labs(AMD Zynq US+) • Zephyr Computing Systems (NVIDIA TX2i) • Ramon Space(独自RHBDデバイス RC64) • Aitech (NVIDIA TX2i) 	<ul style="list-style-type: none"> • JAXA刷新PJテーマB:“オンボードコンピューティング能力獲得”にて取り組んでいるものの、オンボード計算機は現状Unibap製品を購入。 • 三菱電機(GEMINI) 軌道上実績未

2.3.1.1 調査状況まとめ(デジタル処理デバイス)

- 人工衛星で使用されるデジタル処理デバイスは大きく下記①②の領域に分類される。
- ①はCOTS品や民生品から転用された宇宙用デバイスとなり、②に対して数桁上の性能を示す。
- ②は多くは国家プロジェクト等で宇宙専用品として開発されたデバイスとなる。
- デジタル処理デバイス性能向上の源泉となるプロセス微細化の発展を背景として、①②ともに継続的な性能進化が続いているが、併せて必要な開発費も急激に増加



● 出典: [ESA OBDP](#)にASTEC情報追記

最近のデバイス開発費例:

- ①AGX Xavierシリーズ 20億ドル
(参考: NVIDIA 2022年売上 269億ドル、営業利益104億ドル)
- ②次世代HPSC 0.5億ドル(開発スタート時)
高信頼性衛星は年間高々100機。10年間すべての衛星に2石ずつ搭載されたとして、2000石→1石あたりの開発費 375万円

図補足:

- 縦軸はMIPS, MFLOPS(FP64/32/16), MOPS(INT8)等を同系列に並べているため、厳密な演算性能比較にはならないので注意すること。
- COTSデバイスに関しては、放射線による影響が発生するため、ユーザー側等での対処が必要となる。
- 宇宙用のデバイスに関しても網掛けのものは、デバイスとしてRHBD(Rad Hard By Design)とはなっておらず、放射線による永久故障はしないものの、SEU等は一定確率で発生するため、ユーザー側での対処が必要となるデバイスである。
- FPGAに関しては、実装されているDSPを全数100%帯域で使用した仮定で算出。

2.3.1.1 調査状況まとめ(メモリデバイス)

- 主要メモリとなるDRAM/NAND FLASH/不揮発性メモリの進化は民生分野での進化継続
- 宇宙用途に関しては、長らく民生品と大きな差がついていたが、オンボード処理要求の高まりに伴い、近年急速に民生品をキャッチアップ
- 国内では宇宙用メモリ提供の担い手がおらず、海外製品に依存している状況。

メモリ種別	民生用途	宇宙用途 (海外)	宇宙用途 (国内)
DRAM	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 成長速度は鈍化しつつも、微細化継続。 ➤ アプリケーション毎の最適化が進む。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2010年中盤:SDR DRAMが一般的。 ➤ 2020年頃:DDR4 DRAMにジャンプアップ。 	明確な開発計画・提供ベンダーなし
NAND FLASH	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 大容量化トレンドは継続(10倍/10年) ➤ メモリ制御方法が複雑化 ➤ 大容量に関してはメモリ/コントローラが一体となった製品が一般化 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 小容量品(SLC※¹)が主流。 ➤ 大容量品(TLC※¹)も登場。 ➤ メモリ/コントローラ一体型となった製品が出始めている。 	明確な開発計画・提供ベンダーなし
不揮発性メモリ (NAND 以外)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 現状、NOR FLASHが一般的(成長は限定的)。 ➤ MRAMの大容量化/低価格化により今後NOR FLASHからの置き換えが進む見込み 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2010年中盤までEEPROMが主流 ➤ 2020年頃、EEPROMの容量不足によりNOR FLASHへの置き換えが進む。 ➤ MRAMの大容量化により、今後NOR FLASHからの置き換えが進む見込み 	JAXAにてMRAM開発を進めているものの、明確な製品化時期は未定。



※1: SLC(Single Level Cell) メモリセル1セルに1bitの情報を保存する方式。メモリ1セルの多値化により、1セルに2bit保存する方式をMLC(Multi Level Cell), 3bit保存する方式をTLC(Triple Level Cell)と呼ぶ。

世界の
動向

アプリケーション・サービス

- ✓ 通信・観測分野で一般的に普及
- ✓ PWSAではSDS化の恩恵も活用し、スパイラル開発によるアプリケーション開発スピードの加速化を実現
- ✓ 軌道上クラウドサービスの実証を進めている企業あり。

MW/OS/計算機

- ✓ 様々なプレイヤーが高性能で汎用的なMW/OS/計算機を開発中。
- ✓ その中にはUnibap社のiX5等、実証評価フェーズから実用フェーズに移行しつつあるものあり。

デバイス

- ✓ 高性能COTSデバイス採用が進む。
- ✓ 一定のSEUレートの許容が必要な超高性能宇宙用デバイス開発が民間ベンダー主導で進む。
- ✓ 高信頼・高性能な宇宙用デバイス開発が欧米にて官主導で進む。

強み

- ✓ PJ毎にアプリ・計算機垂直統合開発。用途特化計算機を用いた低リソース・高性能アプリケーションの実現
- ✓ JAXA刷新PJテーマB:“オンボードコンピューティング能力獲得”の取組
- ✓ SpaceCompassにて軌道上クラウド構想あり。

- ✓ ETS-9 DPP、QPS社 FLIP、革新3号機 SDRX等、用途に特化した計算機の開発は実施。
- ✓ 革新3号機にて汎用的で高性能な「民生GPU実証機」の開発例はあり。

- ✓ HR5000S等、高信頼性デバイスの開発経験あり。
- ✓ JAXAにてFinFET等の微細プロセスにも適用可能なRHBD技術を開発

弱み

- ✓ PJ毎にアプリ・計算機垂直統合開発により、用途特化計算機依存にしたアプリ開発例が多く、アプリ開発が高コスト・長期間化。
- ✓ 競争力のある国産軌道上クラウドを構築するための必要な技術が共有されていない。

- ✓ 多くの開発済み計算機が用途特化、垂直統合型の計算機であるため、汎用的な活用が困難。
- ✓ 汎用的で高性能なオンボード計算機の軌道上実証成果がない。

- ✓ 国内の放射線評価機会が少なく、COTSの評価技術の蓄積が少ない。
- ✓ 超高性能デバイス開発技術が民生含め国内にはない。
- ✓ 官主導の高信頼・高性能な宇宙用デバイスの明確な開発計画、開発体制がない。

2.3.1.3 開発計画の検討

	アプリケーション・サービス	MW/OS/計算機	デバイス
日本の現状	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 専用計算機と一体化した高機能なオンボード処理は実現しつつある。しかし、その一方専用計算機に依存しているため、アプリケーション開発コストが高く、多様なアプリケーション開発に繋がっていない。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 高性能なオンボード計算機は特定用途のものに偏っており、汎用的な国産高性能オンボード計算機がない。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ COTS評価が少ない ✓ 民主導の超高性能宇宙用デバイス開発技術は国内にはない。 ✓ 官主導の高信頼・高性能宇宙用デバイスの開発も道途中。
日本の現状	<p>論点① 従来の個別PJ特化の開発によりガラパゴス化しがちであった、アプリ開発を活性化させ、多様なアプリを生み出すための開発の在り方は？ -ウォーターフォールからスパイラル開発への転換 -水平分業開発を必要とする契約形態 等</p> <p>論点② 我が国における軌道上クラウドの在り方は？</p>	<p>論点③ 我が国の保有すべきオンボード計算機に関する技術は何か？ 方針1: 特定用途計算機開発技術 現状保有技術の継続的発展 方針2: 汎用計算機開発技術 海外製汎用高性能計算機以上の性能、汎用性を有する計算機を開発する。 方針3: 計算機仮想化技術 計算機は海外製を購入。自律性確保のため、複数ベンダーの計算機活用を可能とする仮想化技術を開発する。</p>	<p>論点④ 我が国のオンボード処理向けデバイスの開発方針は何か？ 方針1: 欧米と比する高信頼・高性能デバイスを独自に開発する。 方針2: ハイブリッド計算機向けの高信頼性デバイス(高性能は緩和可能)を独自に開発する。 方針3: 欧州等と共同開発 方針4: 自律性のリスクは許容し、開発リソースを別の所に充てる。</p>

中間報告の前に実施した有識者検討会にて以下に示すようなコメントを頂いており、下期における調査の深堀、分析、及び、開発計画の検討に反映していく。

対象	有識者	主要コメント抜粋
アプリケーションサービス	A様	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 軌道上データセンタに関しては、新たなサービスの構想であるため、まだまだユーザーニーズの掘り起こしができていないのが現状であり、まずはそれに取り組む必要がある。 ➤ 欧州等でも軌道上データセンタ/衛星間通信コンステレーション開発の話が出てきており、今後、世界的に競合していく形となるため、日本の強みをどこに出していくのか議論が必要。
	C様	<ul style="list-style-type: none"> ➤ アプリケーションとして秘匿性についても重要なニーズがあると考ええる。
MW/OS/計算機	C様	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 開発環境の使いやすさ等はユーザーが選択する際に重要な項目となる。 ➤ オンボード処理に関して、まずは垂直統合で早く実証することが重要と考えている。次のフェーズでどうオープンアーキテクチャにしていくのかという流れになると想定。国として衛星コンステレーションに資金を投じている状況であるので、その中でオープンなアーキテクチャやユースケースが実証できる形がよい。
デバイス	D様	<ul style="list-style-type: none"> ➤ デバイス開発に関して、最近ではデバイスはユーザーアプリを載せる器となってきており、CPUコアの種類等のこだわりは少なくなっている。そのため、研究開発としては低消費電力等、差別化できる部分に注力していく事が重要。

1. はじめに

2. 調査報告

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

まとめ

※：上期重点調査項目

2.3.2.1 調査状況まとめ

- 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

✓ 複雑化・低価格化

Autonomy/オンボード経路設計、画像航法に加え、AI/ML等の機能が付加されることで複雑度が高まっており、コスト低減が喫緊の課題
⇒ MBD*1、ビルディングブロック等による再利用性能向上

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

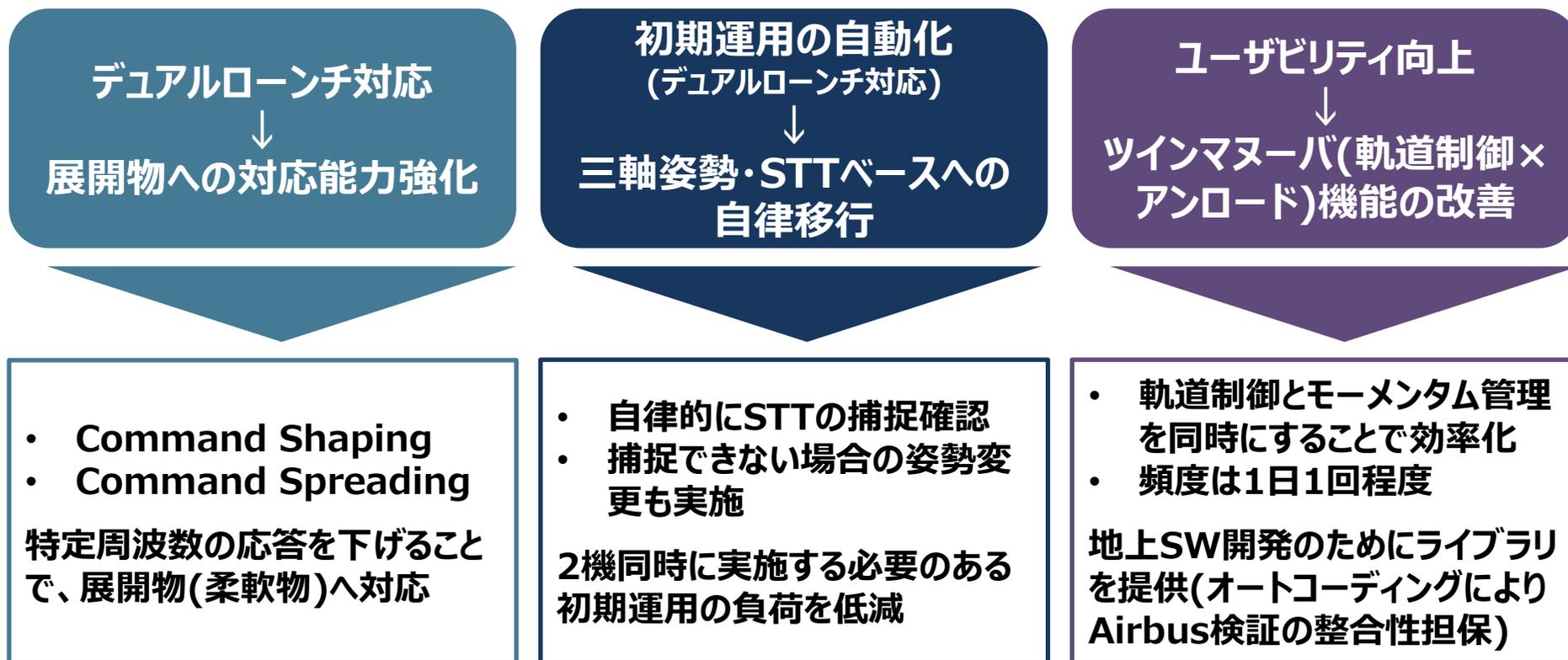
小型軽量化等に加え、軌道上サービスのような複雑なシーケンスの実現をサポートする機能付加が見受けられる
⇒ LiDARの再プログラミング(FOV, スキャン機能のソフトウェア化)等

2.3.2.1 調査状況まとめ (姿勢・軌道制御系)

Airbus ONESAT PLATFORM(通信向け)での取組

➤ 精度だけでなく、「デュアルローンチ対応/初期運用の自動化」、「ユーザビリティ」等の機能面の改善は着実に進んでいる

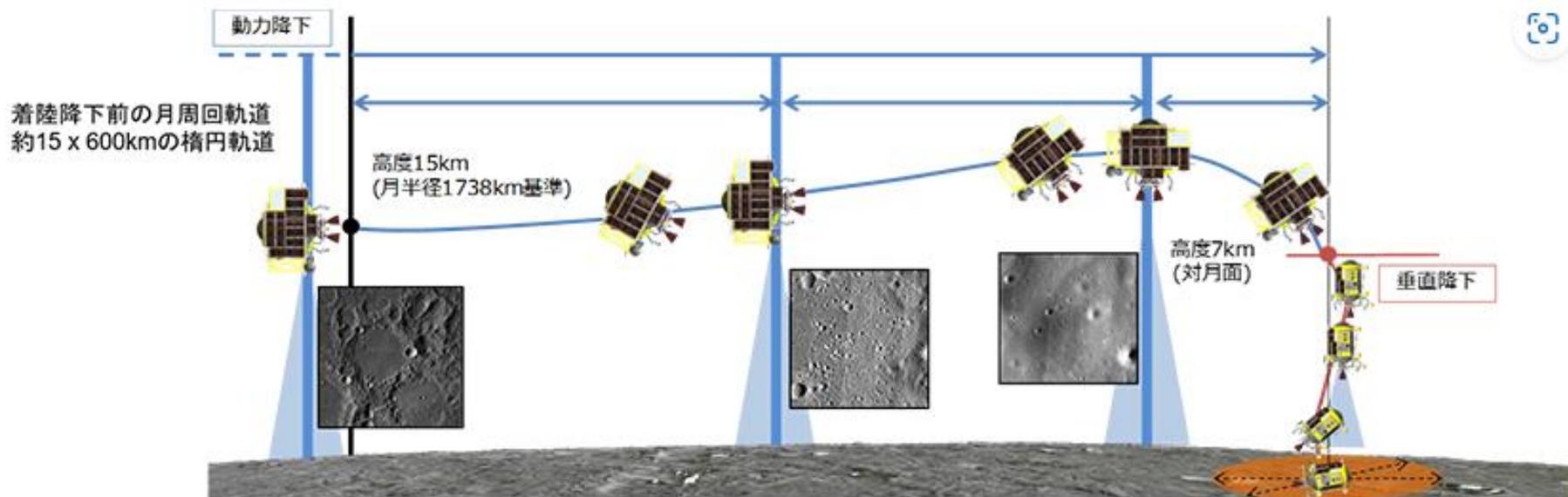
- **AOCSアーキテクチャ**：Eurostar NEOをベースにミッション特有ニーズさせるためにOneSatを開発
[補足]OneSatの製品ラインは、ESA, 仏, 英の支援を受けて開発)



画像航法採用例：

SLIMではピンポイント着陸を実現するため、月面表面の撮像画像を元にした画像航法を採用している。

- SLIMでは画像航法を用いたピンポイント着陸を実現する。動力降下中に3回の画像照合およびIMUによる軌道決定をオンボードで実施する。着陸フェーズにおいては、RAVおよびLRFも組み合わせた着陸降下制御を実施する。

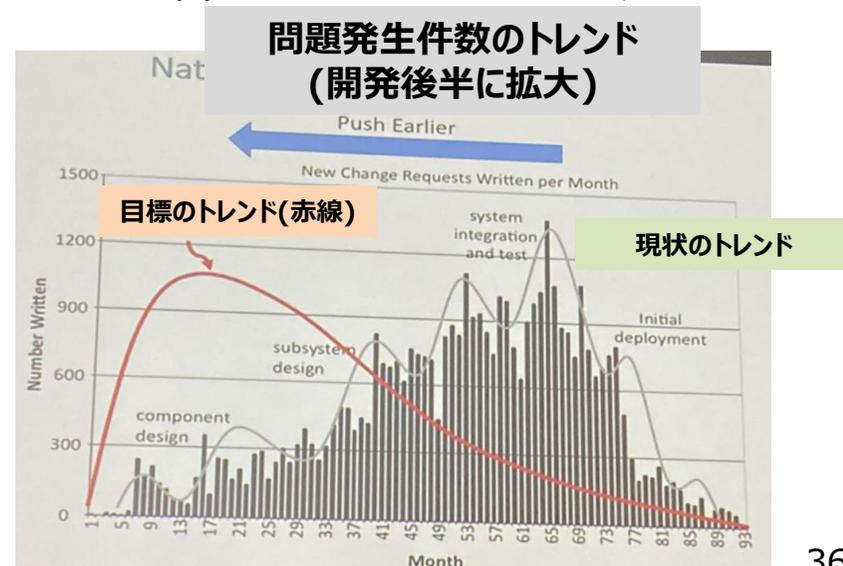
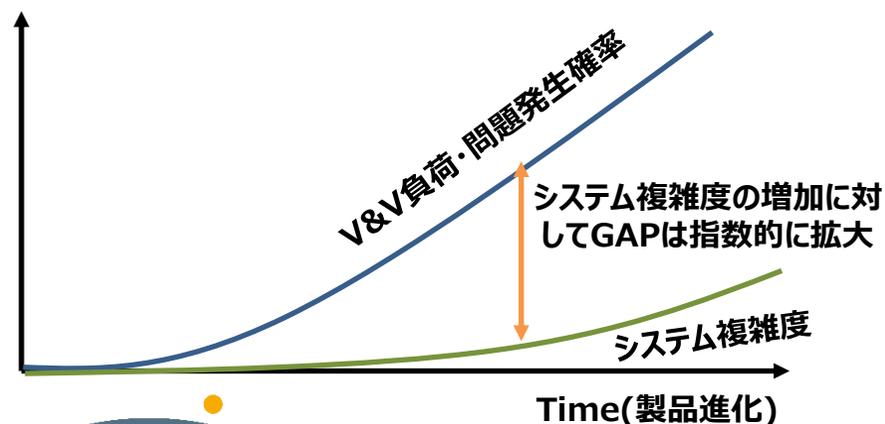


©JAXA

GNC V&V Seminar

- 欧米を中心とし、産官学が連携したAOCSの進展を検討する枠組みが存在
- システム複雑度が増加するに従い指数的に増加するV&V(問題顕在化)の改善に取り組む

- 2020年9月：近未来のミッションを可能にするために、従来のアプローチに比してより高度なAOCSへの移行の課題を検討する一連のセミナーを開始
 - ✓ 約470の登録者、42のセミナーを実施済み(参照：<https://indico.esa.int/event/350>)
 - ✓ 2021年4月/5月には、Virtual Workshopを実施
[構成比率] Agency(32%), Academia(31%), Industry(37%)
ESA関連国(84%), 米国(16%)
 - ✓ 活動支援：ESA, NASA, CNES, DLR, ISAE, JONS HOPKINS, ONERA
- 直近は、システムの複雑性が増すにつれて拡大しているV&Vの課題への対処が主な焦点



1. はじめに

2. 調査報告

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

まとめ

※：上期重点調査項目

➤ 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 実用段階への移行
- ✓ 電気推進用 高電圧・大電力電源の精力的な開発継続

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。

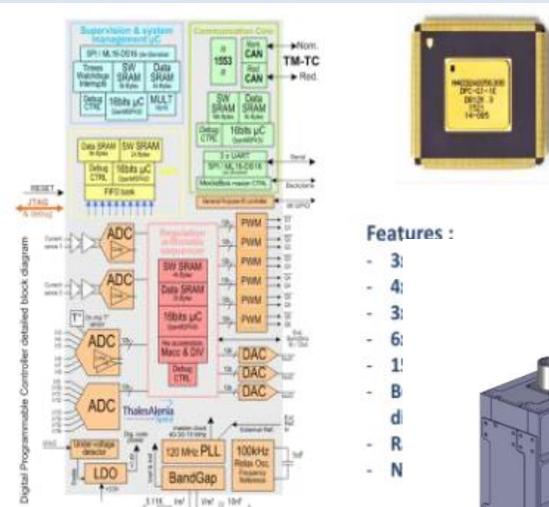
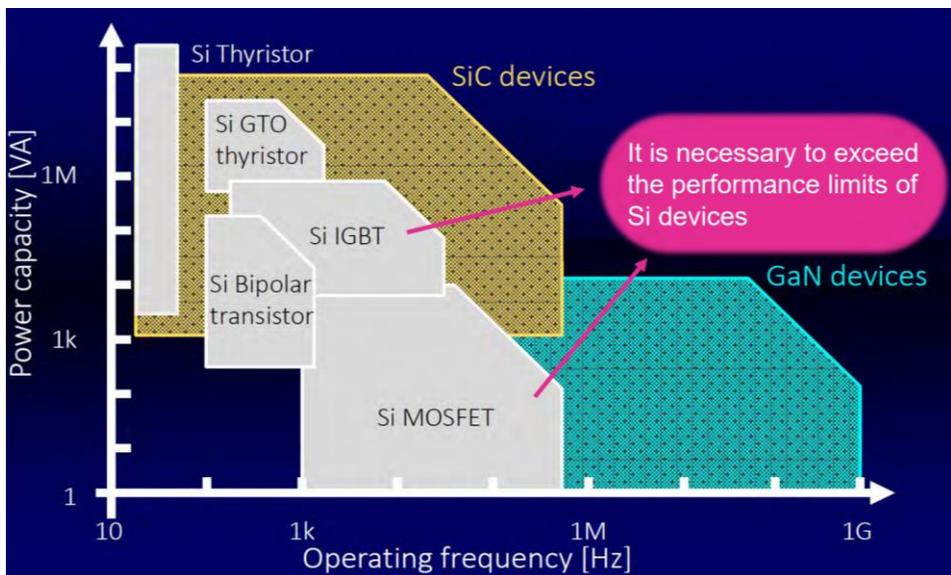
太陽電池
パドル

- ✓ 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。

2.3.3.1 調査状況まとめ 電力制御系

電源制御系の技術トレンドとしては以下の2点が挙げられる

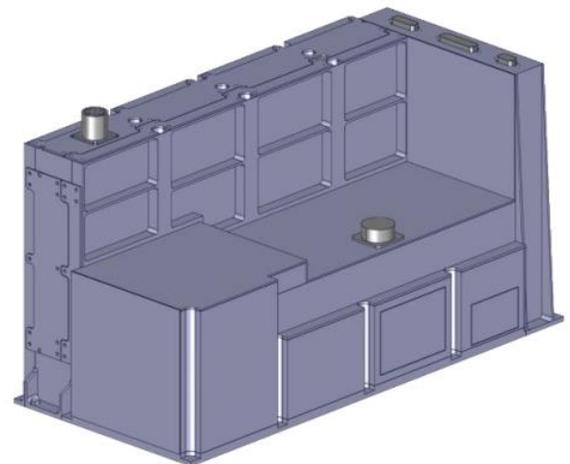
- 次世代パワーデバイス：従来のSiと比較して高速、高耐圧、高耐熱という特徴を持つ化合物半導体であるGaNの活用例が増え、実用段階へと移行しつつある。
- 電気推進電源：電気推進の大推力化、低燃費化を実現するため、高電圧・大電力の電気推進電源の精力的な開発が継続。



- Features :
- 3:
 - 4:
 - 3:
 - 6:
 - 1:
 - B
 - d
 - R
 - N

Anode supply and telemetries

- Single power module deliver
- Full-bridge with competitive I
- Digital control implemented
- GaN transistors
- Isolated output current sensor
- Technologies dedicated to high power management



TAS 開発中の7kW級PPU
出典: [EPIC WORKSHOP 2023](#)



2.3.3.1 調査状況まとめ バッテリー (詳細調査中)

I. 開発状況	分析
(1)欧州	<p>【セル】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・宇宙用バッテリーに組み込むリチウムイオンセル(以後セルと呼ぶ)の開発は、仏SAFT社がリードする状況に変わりがなく、従来からの液系セル中心である。VL10ESに代表されるニッケルベースの正極活物質を採用し、220 Wh/kgの高エネルギー密度化を達成したので、国産のセルはこれより20%重い。 ・安全性とのトレードオフにより、高エネルギー密度化の限界は230 Wh/kg前後と見ており、目標とする400 Wh/kgからは大きく乖離する。これ以上の高エネルギー密度化は、現行の液系セルの延長線上の材料系では無理と判断しており、安全性の高いセル開発にシフトする方針を打ち出している。高安全セルの筆頭候補は全固体セルと見て、2025年に全固体セルのギガ工場建設を念頭においているが、同時に開発の困難さも課題と認識している。ただし、全固体セルとしては、酸化物フィラー入りの有機系のポリマーセルも候補としている。 ・もう一つの主要課題である低コスト化については、ESAの開発支援を受け、COTSセルである自動量産タイプのMPセルを宇宙用に適用する戦略を進めている。
(2)米国	<p>【セル】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現行セルの正極活物質に必須の元素であるニッケル、コバルト、マンガン、リチウムは、米国でほとんど産出しないため、資源安全保障の面から、他の材料系のセル開発を積極的に推進している。その中の一つが米国ベンチャー企業が開発する資源的制約の少ないリチウム-硫黄セルであり、安全性の検証はこれからであるが、現行セルに匹敵する225 Wh/kgを達成し、来年270 Wh/kgを目指している。最エネルギー密度600Wh/kgである。 <p>【バッテリー】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・セル技術以外に宇宙用バッテリーとして必要な技術は、バッテリーモジュール技術、バッテリーシステム技術であるが、上限に近づきつつある液系セルの性能をさらに向上させるには、バッテリーモジュール技術による軽量化と放熱性向上、バッテリーシステム技術による保護機能や管理機能のインテリジェント化が必須である。特にBMS機能の高度化は、バッテリーシステムの自律化が要求される宇宙用では今後期待される技術である。

2.3.3.1 調査状況まとめ 太陽電池パドル

太陽電池パドル：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。

太陽電池セル：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。

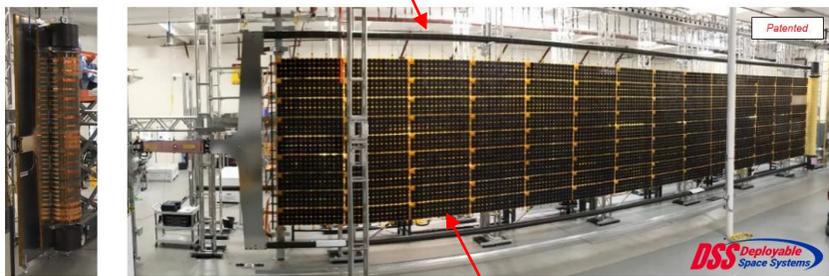
太陽電池パドル

MAXSAR/REDWIRE (ROSA)

ロールアウトタイプ

ステム（巻きだされると、平面から円筒に曲がり、パイプとしての構造的な強度を有する形となる）上下2本

15kW to 25kW class ROSA wing sizes (30kW to 50kW array with two wings)

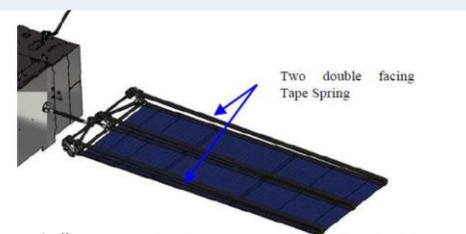


- ・ISSでの軌道上デモ実証
 - ・SSL-500バス等
- 規格化された太陽電池セルシートをつないでいると推定
収納時は円筒（マンドレル）に巻き取られる。

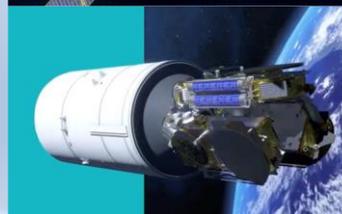
THALES (Inspireバス)

ロールアウトタイプ

・複数機打上げ



出典：DOI: 10.1051/e3sconf/20171601005



ロールアップ型（太陽電池を搭載した膜状のセルシートをロール状に巻き取り収納・展開させる方式）の太陽電池セルシートの収納方式を採用していると推測

太陽電池セル

SPECROLAB -米国-

宇宙用太陽電池 3大メーカーの一つ。

名称	変換効率	タイプ	備考
XTE family	32%	化合物 3J	用途別 3種
XTJ Prime	30.7%	化合物 3J	
XTJ	29.5%	化合物 3J	
実績	生産力	価格	
A	B	D	

mPower -米国-

2015年に米国Sandia National LaboratoriesからのSpin Offで設立。モジュール化した太陽電池を販売。

名称	変換効率	タイプ	備考
DS-100	18.7%	薄膜Si	
実績	生産力	価格	
B	C=>B	B	

実績：A=累計生産量100M枚以上又は1MW以上で打上実績有り

B=打上実績あり C打上実績無し

生産力：A=10MW/年以上 B=500KW/年以上 C=50KW/年以上 D=立ち上げ中

価格：A=\$5/W以下 B=\$50/W以下 C=\$100/W以下 D=\$300/W以下

1. はじめに

2. 調査報告

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な技術の調査分析

まとめ

※：上期重点調査項目

➤ 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

受動熱制御技術

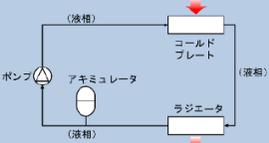
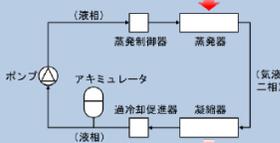
トレンド

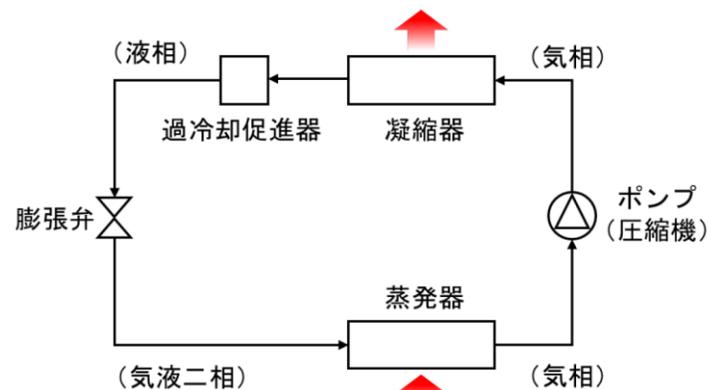
- 各国でフルデジタル衛星の開発・実用化が開始されており、大容量の排熱システムについてももの研究開発段階から、実用化段階へと移行した。
- 二相流体ループの排熱システムを採用している衛星は、大容量の排熱に対応した大面積ラジエータ面を有しており、衛星サイズの大規模化に繋がっている。

下期調査予定

(参考) 能動熱制御概要

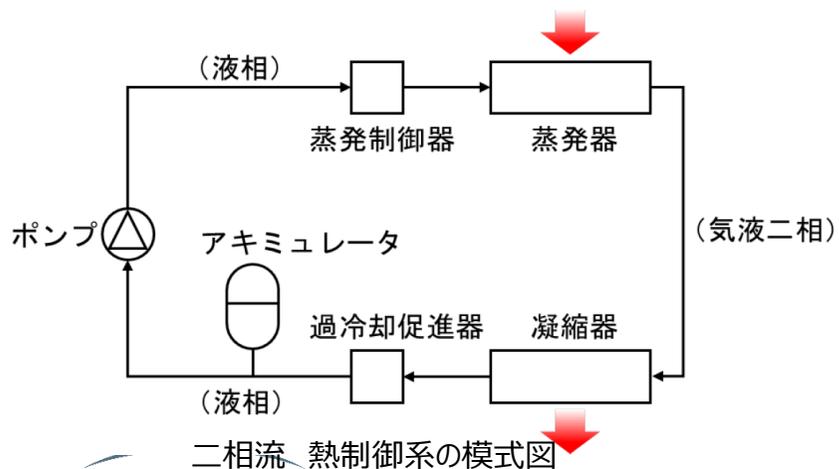
各種能動熱制御系の特質

ポンプ方式	単相流体ループ	二相流体ループ	ヒートポンプ
排熱方式	顕熱利用	潜熱利用	潜熱利用
質量	大	中	小～中
ポンプ動力	中	小	大
熱交換器内温度分布	大きな温度分布が生じる	温度分布は小さい	温度分布は小さい
放熱面上限温度	搭載機器許容温度上限以下	搭載機器許容温度上限以下	搭載機器許容温度上限より高温化可能
重力の影響	小	大	大
ループ構成			



ヒートポンプ熱制御系の模式図

二相流熱制御系における各部位の役割



二相流熱制御系の模式図

構成機器	主な機能
ポンプ(Pump)	冷媒の圧送
蒸発制御器	ポンプから圧送された過冷却状態の冷媒を飽和蒸気温度・圧力に近づけて、蒸発器で冷媒を蒸発しやすくする。
蒸発器 (Evaporator)	冷却対象となる発熱機器に取り付けられた熱交換器。蒸発器内部の冷媒が熱を受け取って蒸発することで、蒸発潜熱による高い熱交換効率で発熱機器を冷却する。
凝縮器 (Condenser)	深宇宙へ放射冷却する放熱パネルに取り付けられる熱交換器。凝縮器内部の冷媒が熱を放出して凝縮することで、凝縮潜熱による高い熱交換効率で放熱パネルへ排熱する。
過冷却促進器	凝縮器のみでは冷媒の過冷却温度を十分に確保した完全凝縮状態にできない場合に使用し、気泡がポンプに流入することを防ぐ。
アキミュレータ (Accumulator)	システム全体の冷媒量と圧力、飽和蒸気温度を制御する機器。

他国のフルデジタル衛星の開発例①：SES-17

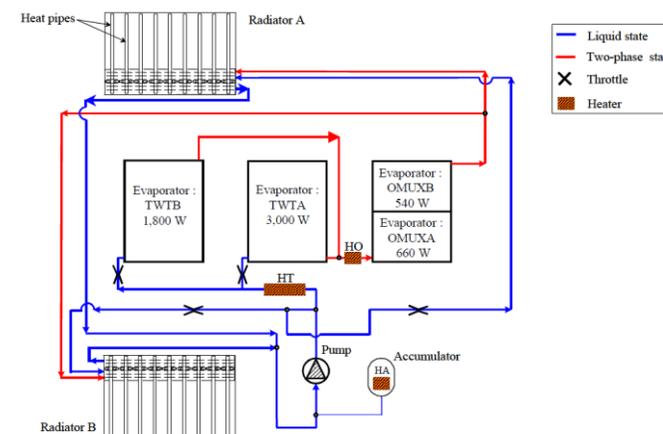
Satellite	SES-17
Satellite Bus	Space Neo
Operator	SES
Manufacturer	TAS
Launch date	24 October 2021, 02:10 UTC
Start Services	16 June 2022 (Fully Operation)
Power	15 kW
Life	15 years
Band	~200 Ka-band spot beams
Thermal Control Technology	two-phase Mechanically pumped loops (2ΦMPL)

■ 調査概要

- TAS社が開発した衛星バス(Space Neo)をベースとしたSES-17は15kW級の出力が可能な通信衛星であり、大容量通信に伴う大排熱システムとして、二相流メカニカルポンプ方式の排熱システム(2ΦMPL:two-phase Mechanically pumped loops)を採用している。
- 既に当該衛星は打上が完了しており、軌道上でのフルオペレーション運用も開始されていることから、フルデジタル衛星およびその排熱システムは実用段階にあると言える。



SES-17の外観図



TASの排熱システム(2ΦMPL)の概略図

国内のフルデジタル衛星の開発例：ETS-9

Satellite	ETS-9
Development	JAXA
Manufacturer	三菱電機
Power	25kW
Mass	4.9ton
Life	15 years
Band	Ka-band
Thermal Control Technology	ATCS(Active Thermal Control System)

https://www.mext.go.jp/kaigisiryoo/content/20210628-mxt_uchukai01-000016392_11.pdf



<http://www.mitsubishielectric.co.jp/society/space/satellite/communication/ets9.html>

■ 調査概要

- 静止通信衛星における通信の大容量化およびフレキシビリティ(照射域や帯域幅の可変機能)の獲得に対する市場の需要は以前として高く、フルデジタル衛星の開発・運用化は、欧州を中心に推進されている状況である。フルデジタル衛星においては、通信大容量化やフレキシビリティの獲得のための衛星の処理能力向上などにより、増大した通信系機器の発熱を排熱することが必要不可欠であり、フルデジタルペイロードの排熱システムの開発・実用化は急務となっている。
- 衛星バスの競争力を確保するためには、冷媒の蒸発潜熱を利用した二相流によるアクティブ熱制御技術が必要である。
- ETS-9ではペイロード排熱量の増大に伴い、メカニカルポンプを用いたアクティブ熱制御実証システム(ATCS)の実証をETS-9で行い、フルデジタル化による商用通信衛星市場における競争力を確保する。
- 将来に向け、さらなる排熱能力(効率)の向上、信頼度の向上(長寿命化を含む)、システムインテグレーション性の向上が必要である。

1. はじめに

2. 調査報告

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

まとめ

※：上期重点調査項目

➤ 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

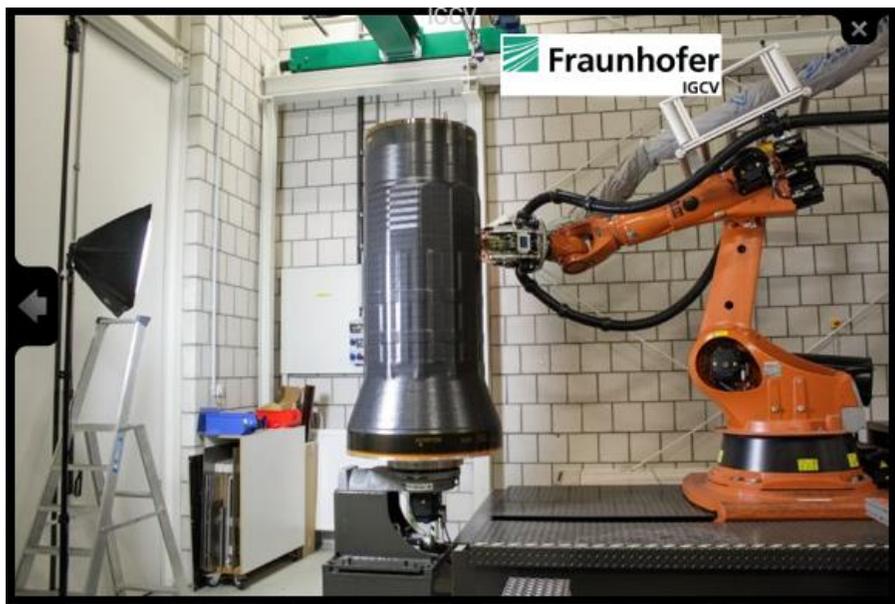
トレンド

- 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、製造方式の開発が進んでいる。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。

AM適用が様々な分野で進んでいる。

- セントラルシリンダ：AMによる形状自由度の向上
- RF機器：一体成型による高集積・小型化
- 熱制御機器：複雑で特殊な形状の実現、発熱機器との一体化による熱抵抗の削減

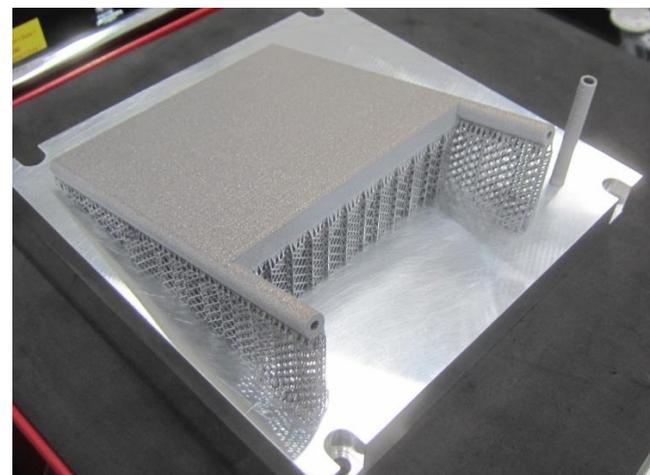


AMによるセントラルシリンダ製造例

出典：[MT AEROSPACE](#)



AMによるホーンアレイアンテナ AIRBUS



AMによる二相流体ループの蒸発器 三菱電機

1. はじめに

2. 調査報告

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

まとめ

※：上期重点調査項目

➤ 下記の通り調査中。

調査分野

多数機開発・
試験・
運用手法

セキュリティ

調査状況

- 大規模コンステレーションStarlink, Oneweb, Planet に着目し、打上履歴、製造工場、衛星の更新状況について調査中。
- 下期、上記調査結果から、多数機開発・試験・運用手法について、考察・検討を進める。

- 人工衛星のセキュリティに関わる下記2文書を調査中
 - ①経済産業省：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
 - ・ リスクシナリオ例はいずれもOA系システムへの侵入を契機として想定している。
 - ・ インターネット経由の攻撃、平文による通信、野良端末、DoS
 - ②Aerospace Corp：SPARTA
 - ・ 主に地上局～衛星そのものをターゲットにした攻撃手法一覧。
 - ・ 暗黙の前提として、地上局へのアクセスまたは近接する宇宙船が攻撃者に侵害された状態であるという事が挙げられる。
- 進む地上局のクラウド化に対応して、AWS Ground Station/Azure Orbital Ground Stationのセキュリティーについて調査中

Starlink のソフトウェア管理



- 2023/8 の Small Sat Conference で Starlink のソフトウェアについての発表があった。
- <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2023/all2023/72/>
- 以下のような戦略が示された
 - A/B boot (ファームウェアを2バージョン持つこと)
 - 1 機の Starlink 衛星内には多数 (数十～数百ある) のコンピューターノードが含まれる。それぞれのファームウェアバージョンは、“中央” ノードで管理される。
 - 衛星が主体となった、HTTPS を利用した自律的なバージョンアップ。(衛星「に」ファームウェアをダウンロードする)
 - 小規模な「カナリア」グループへのデプロイを含む、漸進的なロールアウト。
 - どのバージョンの適用するか、等においては中央集権管理をしているとみなせる。
 - 原則として、全てのソフトウェアを更新可能。
 - 現地での「アップデートできる対象は？」という質問に対して、「Any one bytes as principle」という回答があった。
 - 「データ配信は自律的」「データ利用は中央集権的」

1. はじめに

2. 調査報告

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

まとめ

※：上期重点調査項目

【上期調査概要】

① 上期重点調査項目とした以下の二項目について、技術動向調査、日本の弱み・強み分析、開発計画の検討を実施。有識者検討会にて、調査方向の妥当性の確認、及び、分析・開発計画検討状況に関する議論を実施した。

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

2.3.1 オンボード基盤技術

② 下記項目について技術動向調査を実施した

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

【下期調査計画】

②の項目に関して、継続した調査の上、日本の弱み・強み分析、開発計画の検討を行い、有識者会議を実施する。併せて、①の項目に関して有識者会議でのコメントを受け、調査・分析・検討の深堀を行う。



(財)衛星システム技術推進機構