

**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
(23-002-R-013)
2024年 3月**

(財) 衛星システム技術推進機構

1. はじめに

2. 調査要求と実施した調査内容

3. 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術の調査分析

3.6 定常・動向分析

3.7 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. 調査要求と実施した調査内容

3. 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術の調査分析

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

2. 調査要求と実施した調査内容

23-002-R-013

3-1:令和 4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析

調査要求	実施した調査内容	本報告書における記載
3-1 令和 4年度技術調査項目にかかる最新動向の調査分析		
<p>(1) 令和4年度に実施した「将来衛星システムにかかる技術調査」の各項目について、最新の技術動向調査を行い、情報の最新化を行うこと。</p>	<p>(1-1) 令和 4 年度に実施した「将来衛星システムにかかる技術調査」の各項目について、最新の技術動向調査を行い、情報の最新化を行った。</p> <p>(1-2) また左記調査要求（最新化）に加えて、昨年度を含めた最近数年の顕著な衛星システム技術動向の変化点を調査し今後の動向を分析した。</p>	3.1項
<p>(2) 国内外の将来衛星システムに関する動向や技術情報の最新化を行い、その上で改めて日本の強み・弱みの分析を行うこと</p>	<p>(2-1) 最新化の状況を受けて、昨年度実施した日本の強み弱み分析のアップデートを行った。</p> <p>(2-2) さらに、強み弱み分析結果に基づき、日本にとって重要なユースケース・技術開発項目等の候補(ロングリスト)を抽出した。</p>	

2. 調査要求と実施した調査内容

23-002-R-013

3-2:衛星開発のライフサイクル(設計・製造・試験・運用)におけるデジタル開発技術調査分析

調査要求	実施した調査内容	本報告書における記載
<p>(1) 国内外における衛星開発のライフサイクルにおいて、デジタル技術の活用がますます拡大し重要性を増していることを考慮し、国内外の衛星製造・運用事業者におけるデジタル技術の導入事例または検討事例を調査すること。</p>	<p>(1-1) 国内外の衛星開発製造企業、運用事業者に関して衛星のライフサイクルの中で、開発設計におけるMBSE/MBD/シミュレーションの利活用事例、製造試験における3Dデータベースの製造や自動化、運用における多数機自律運用による省人化等に関し調査を行った。</p> <p>(1-2) 重要な観点として適用事例だけではなく、背景としてどのような動機があったか、どの程度の効果があったか(可能な限り定量的)に関しても深掘り調査を行った。</p>	<p>3.2項</p>
<p>(2) 調査にあたっては、国外の他の製造業界(自動車業界、航空業界など)におけるデジタル開発の動向を調査し、分析比較の上整理すること。</p>	<p>(2-1) 国外の衛星製造業と製品が類似している製造業(飛行機・自動車・ロケット等)に関してデジタル開発を調査分析した。</p> <p>(2-2) 更に衛星や類似の業界に関係なく、最もモデリング・MBSE/MBD・シミュレーションによる試験・デジタルツイン運用・ロボティクス活用等で優れた成果を出している企業を選定し、深掘り調査を行い、そこからのインサイトを整理した。</p>	
<p>(3) 本分野において日本の保有する技術の強み・弱みを分析するとともに、今後日本が取るべき技術戦略・生産戦略、そのために取り組むべき研究開発計画について提案すること。</p>	<p>(3) 日本の強み弱みを分析し、今後日本が取るべき技術戦略・生産戦略、そのために取り組むべき研究開発計画について提案した。</p> <p>ライフサイクルにおける戦略はことなるため設計・製造・試験等の分野で整理した。</p>	

2. 調査要求と実施した調査内容

23-002-R-013

3-3:衛星電気システム基盤技術調査分析(1/2)

調査要求	実施した調査内容	本報告書における記載
<p>(1) オンボード基盤技術の調査分析を行うこと。国内外の小型・中大型衛星に搭載されている、または搭載が検討されているオンボード基盤技術について調査分析の上整理を行うこと。</p> <p>日本の保有する技術の強み・弱みを分析し、今後日本が取るべき開発戦略や取り組むべき研究開発計画について提案すること。</p>	<p>(1-1) オンボード処理に関して小型の観測・通信衛星(LEO)、中大型の観測・通信衛星(MEO/GEO)を対象に最新技術を調査した。これらの技術に対する日本の保有技術の強み弱み分析を行った。その上で今後日本が取るべき開発戦略や取り組むべき研究開発計画について検討を行った。</p> <p>(1-2) 令和4年度の調査分析結果を基に最新化を図るとともに、オンボード処理は進化の早い分野であるため、昨年度を含めた最近数年間ASTECで重点的に調査分析を実施している。今回の最新調査分析結果をこれら調査資産と比較分析することで技術動向の変化の抽出に資するものとした。</p>	<p>3.3.1項</p>
<p>(2) 誘導制御技術の調査分析を行う。観測衛星等を軌道上で効率的に稼働するためのAI等を用いた新たな誘導制御技術について、国内外の技術的な検討状況、技術レベル、実現性、実証実用計画等を調査分析の上、整理すること。</p> <p>また国内外における新しい慣性基準装置、恒星センサ、画像センサ、GNSS 受信機（シスルナ圏対応含む）の最新動向を調査すること。本項では日本の保有する誘導制御技術の強み・弱みを分析の上、日本が取るべき戦略や研究開発計画を提案すること。</p>	<p>(2-1) 誘導制御技術及び最近のAI等を用いた新たな誘導制御技術について、国内外の技術的な検討状況、技術レベル、実現性、実証実用計画等を調査分析の上、整理した。</p> <p>姿勢センサに関して慣性基準装置、恒星センサ、画像センサ、GNSS 受信機（シスルナ圏対応含む）の最新動向を調査した。</p> <p>以上から日本の誘導制御技術の強み・弱みを分析し、日本が取るべき技術戦略や研究開発計画を整理した。</p> <p>(2-2) 更にLEO・GEOの各軌道、観測・通信の各ミッションに対応した従来の誘導制御系だけではなく、近年軌道上サービスや探査機で重要な要素となっている対象との近接時相対的航法・姿勢制御・着陸のためのVBN(Visual[またはVision]-Based Navigation)に関して重点的に調査分析を行い日本の強み弱み分析を行った。</p>	<p>3.3.2項</p>

2. 調査要求と実施した調査内容

23-002-R-013

3-3:衛星電気システム基盤技術調査分析(2/2)

調査要求	実施した調査内容	本報告書における記載
<p>(3) 電源系技術の調査分析を行うこと。</p> <p>(3-1) 国内外の衛星に搭載または搭載予定の電源系技術について調査分析を行い整理する。特に電気推進電源や高効率で耐電力の高いパワーデバイス、電圧変換機等の要素技術について調査に含める。</p> <p>(3-2) 国内外の新しいバッテリー方式を調査分析し整理する。特に全個体電池や電解液やセパレータ及び電極等の性能が物性や構造に依存するパーツ、また新しい技術が必要とされる探査用電源等の要素技術について調査に含める。</p> <p>(3-3) 国内外における新しい太陽電池パドルの方式について調査分析し整理する。特に昨今開発や実用が進む高効率な収納方式であるフラットパックやロールアップやその他方式、また高効率あるいは低コストセル等の要素技術について調査に含める。</p> <p>(3-4) 本分野において、日本の保有する技術の強み・弱みを分析の上、日本が取るべき戦略や研究開発計画について提案する。</p>	<p>電源系は、各衛星のパワー供給を担う重要なサブシステムであり、下記に関して仕様に従い調査分析を行った。</p> <p>(3-1) 電源系サブシステム(定電圧制御系、非安定制御系)、電力制御器(PCU)、電気推進電源系(PPU):ホールスラスト用及びより高圧を要するイオンエンジン用、高電圧の高効率パワーデバイス(ダイオード、トランジスタ等)を含めて調査を行った。</p> <p>(3-2) バッテリー(BAT):液系リチウムイオン電池の最新技術と性能の調査を行う。また重要な構成要素もしくは材料である電極・セパレータ・電解液等の最新部品の調査を含む。自動車を中心に開発が進められている固体リチウム電池の宇宙適用の調査を行った。</p> <p>(3-3) 太陽電池パドル(SAP):フラットパックやロールアップの最新製品と重要な構成部品である展開機構や展開メカニズム、発生電力ごとの質量・収納容積競争力の比較を含む。</p> <p>(3-4) 以上調査結果と日本の保有する技術の強み・弱みを分析の上、日本が取るべき技術戦略や研究開発計画を整理した。</p> <p>(3-5) 上記は宇宙用製品の調査として重要であるが、電源制御器、高電圧供給電源、パワーデバイス、バッテリー等は車載・航空機等での進化も早く、過去これら新規技術を宇宙でいち早く導入したリチウムイオンやGaAS太陽電池セルの例もある。</p> <p>今回これら実績を鑑みて電池・パワーデバイス・太陽電池セル等に関して民生技術とその製品を調査し宇宙用としていち早く取り込めないかを整理した。</p> <p>整理にあたっては耐放射線やサイクル数、圧力容器安全性等の課題を含めた。</p>	<p>3.3.3項</p>

2. 調査要求と実施した調査内容

23-002-R-013

3-4:衛星機械システム基盤技術調査分析

調査要求	実施した調査内容	本報告書における記載
<p>(1) 熱制御系技術の調査分析を行う。国内外の衛星に搭載または搭載予定の熱制御技術について調査分析し整理すること。</p> <p>日本の保有する技術の強み・弱みを分析の上、日本が取るべき戦略や研究開発計画について提案すること。</p>	<p>(1-1) 熱制御系技術に関して国内外の衛星・宇宙機・探査機等の搭載熱制御系の調査を行った。現在開発中の搭載予定のものを含む。受動的熱制御系はデジタル化やメモリ・アンプのソリッドステート化、高集積化に起因する熱処理をマイクロヒートパイプ等で輸送する方式やその他新規方式を調査した。また能動的熱制御系も二相流体やヒートポンプを使った方式を調査した。</p> <p>以上から日本の保有する技術の強み・弱みを分析の上、日本が取るべき技術戦略や研究開発計画について整理した。</p> <p>(1-2) 更に熱制御系に関しては学会の資料も限定されているため、NASA technology taxonomyから宇宙機の熱制御ロードマップを調査した。</p>	<p>3.4.1項</p>
<p>(2) 構造系技術の調査分析を行う。国内外の衛星に搭載または搭載予定の構造系技術について調査分析し整理する。世界における構造系サブシステム技術の調査分析を行い整理すること。</p> <p>特に国内外のAdditive Manufacturingの活用状況について調査し整理する。その際衛星企業で試みられている技術やその背景を含めて導入事例を調査する。日本の保有する技術の強み・弱みを分析の上日本が取るべき戦略や研究開発計画について提案すること。</p>	<p>(2-1) 構造系技術に関して国内外の衛星・宇宙機・探査機等の構体系・構造系・新規構造材料の調査を行った。現在開発中の搭載予定のものを含む。特に海外の衛星・搭載機器(推進系やRF系など)、ロケット製造企業のAdditive Manufacturingの活用状況について調査し整理した。日本企業も同様に調査した。</p> <p>(2-2) 更にNASA technology taxonomyから宇宙機の構造系ロードマップや材料開発を調査した。</p>	<p>3.4.2項</p>

2. 調査要求と実施した調査内容

23-002-R-013

3-5:コンステレーション構築等に必要技術の調査分析

調査要求	実施した調査内容	本報告書における記載
<p>(1) 多数機開発・試験手法 国内外の衛星コンステレーションを構築する多数機衛星の短期間での開発手法や試験手法等に関して調査分析の上整理すること。 また国内外の数100機以上の衛星コンステレーションを運用するための運用計画立案システムや、異なる衛星コンステレーションの運用を統合する技術等について調査分析の上整理すること。</p>	<p>(1-1) 現在整備運用中の数100機レベルの海外コンステレーションにおいて、多数機衛星の短期間での開発手法やアライアンス、バッチごとの改良状況、また製造試験手法等に関して調査分析の上整理した。 またこれら海外の衛星コンステレーション運用時の運用計画立案システムや、省人化のための方策、更に異なる衛星コンステレーションの運用を統合する新しい技術（運用統合系）等について調査分析の上整理した。 上記二点を踏まえ、国内でコンステレーションを構築する場合の開発・バッチ改良・製造・試験・運用システムへの指針を整理するとともに、日本の強み弱みを分析した。</p> <p>(1-2) 上記に加え、海外における豊富な資金を背景にした数百機～数千機レベルの商用コンステレーションや軍が主導するPWSAの構築方法と、日本のようにこれから数10機レベルでの観測・中継をまず早急に考える必要がある場合は自ずとアキテクチャ方針が大きく異なると思われるため、日本にとって現実的な数10機で実用運用に資する構築方法を上記調査分析結果も踏まえて整理した。</p>	<p>3.5.1項</p>
<p>(2) コンステレーションセキュリティシステム 国内外における衛星コンステレーションの運用に際し採用されているセキュリティレベルや抗たん性について調査分析の上整理すること。日本の保有する技術の強み・弱みを分析し、日本が取るべき戦略や研究開発計画について提案すること。</p>	<p>(2) 海外の衛星コンステレーションの運用に際し採用されているセキュリティレベルや抗たん性について調査分析の上整理した。 この調査を踏まえて日本の場合に想定されるセキュリティシステムの実装上のポイント（衛星技術面、地上装置面、運用面）を整理した。 またこれら調査結果から日本の保有する技術の強み・弱みを分析し、日本が保有すべき技術戦略や研究開発計画について整理した。 開発や実装面の課題も踏まえて整理を行った。</p>	<p>3.5.2項</p>

2. 調査要求と実施した調査内容

23-002-R-013

3-6:コンステレーション構築等に必要技術の調査分析

調査要求	実施した調査内容	本報告書における記載
3-6 定常調査・動向分析		
<p>(1) 衛星システムに関する国内外の主要なシンポジウムや分野毎ワークショップに2件以上参加し、3-1～3-5に定める範囲に限らず、広くその内容について概要を作成の上まとめること。特に日本において重要な発表内容等については、重点的に説明を追加すること。なお、感染症等の流行により現地参加が難しい場合は、オンライン参加とする。</p>	<p>以下に示すシンポジウム・ワークショップ等に参加した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ◇MATLAB EXPO2023@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を行った。 ◇ESA GNC & ICATT Conference @Sopot Poland, 12-16, June, 2023 → 誘導姿勢制御に関わる最新動向の情報収集を行った。 ◇Small Satellite Conference@Utah, Aug 5-10,2023 ⇒ 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を行った。 ◇European Data Handling & Data Processing Conference for Space (EDHPC2023) @Juan-Les-Pin France 2-6 Oct.2023 → 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を行った。 	3.6項
<p>(2) 本調査において、日本にとって必要となる技術等について分析すること</p>	<p>特に3-1～3-5に関連する日本にとって必要となる技術等については、他の調査結果とあわせて分析を行い、委託業成果報告書に分析結果を記載した。なお、3-1～3-5に関連しない項目についても日本にとって必要となる技術については分析を行い、委託業成果報告書に分析結果を記載した。</p>	
<p>(3) 作成した概要は、シンポジウムやワークショップ参加後2週間以内に当課に提出すること。また、当課の問合せに対応すること。</p>	<p>作成する概要報告書は、シンポジウム・ワークショップ等の参加後2週間以内に提出した。</p>	

2. 調査要求と実施した調査内容

23-002-R-013

3-7:適時調査・事実確認

調査要求	実施した調査内容	本報告書における記載
<p>3-7 適時調査・事実確認</p> <p>(1) 受注者は、その他、3-1～3-5に係る範囲内で当課が指定する事項について、適時調査（A4で5～10枚程度）を6件程度、事実確認（A4で1枚以内）を最大12件程度行う。随時かつ即時に対応すること。適時調査のうち最大4件程度まで、原則として国内若しくはオンラインで開催されるワークショップや会合等への出席を要する調査を実施する。</p> <p>(2) 当課と受注者が協議をして定めた期日までに、当課と受注者が協議をして定めた報告方法で報告すること。また、当課の問合せに対応すること。</p>	<p>今年度は適時調査・事実確認の依頼はなく、調査は発生しなかった。</p>	<p>左記のとおり、調査は発生しなかったため、記載箇所はなし。</p>

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.1.1 SDS/SDR/SDP (Software Defined Satellite/Radio/Payload)

3.1.2 オンボード処理

3.1.3 運用の効率化

3.1.4 SWアーキテクチャ

3.1.5 衛星推進システム

3.2 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

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術

3.5 コンステレーション構築等に必要技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析 まとめ

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"> ・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
(3-1-4)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"> ・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。
(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 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.1.1 SDS/SDR/SDP (Software Defined Satellite/Radio/Payload)

3.1.2 オンボード処理

3.1.3 運用の効率化

3.1.4 SWアーキテクチャ

3.1.5 衛星推進システム

3.2 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

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要な技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

Executive Summary

1. 通信衛星SDS・SDR

- ①通信衛星特にGEOではSDSの通信事業上の利便性に着目。
- ②**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。**
- ③この5～6年で大手3社が100Gbps超で一度に3機打上可能なSDSを開発し欧州勢は欧米日豪から受注。
- ④各社デジタルペイロードとコンパクトな全電化バスの一体開発。
- ③**なお通信でのSDSはA/D変換とFFTによる分波と帯域・ルート変更・合波・DBFビーム制御・D/A変換を意味し、SDRではない。100Gbps超の高速変復調は今現在ではデバイスのハードル高くまだ困難。**

2. 観測衛星SDS・SDR

- ①観測衛星のSDSは通信ほど明確に定義されていないが、**エッジプロセッシングによる観測エッジ処理やニーズに合わせた観測アプリケーション変更等の機能(Spire,Unibap)。**
- ②実装の動機はプレーヤごとに異なり、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)を踏まえて判断されている。**
- ③**但し可能な限りエッジを進め、地上処理との処理を選択できることは今後の大きな流れであり、デバイス進歩と情報レイテンシ要求がそれを後押し。**
- ④観測衛星のSDRに関しては、観測はULデータ/CMDの復調と観測データ変調が必ず必要であること、データレートは～10Gbpsで通信衛星より桁少ないことから広帯域(～Ka)で変復調可能な標準SDR機器のSupplierも多い。

3. 今後の大規模通信SDR

- ①衛星間通信では最低限経路データ(≒IPアドレス)の再生中継が必要(NDSAではMPLを採用とのこと)。
- ②5G地上局機能のLEO搭載化が欧州ロードマップの狙上に上り、**衛星間通信やIoT向けの比較的データレートが低いものだけでなく、5G地上局の過疎域での衛星RAN局実現も見据えている。**日本としてもロードマップが必要。

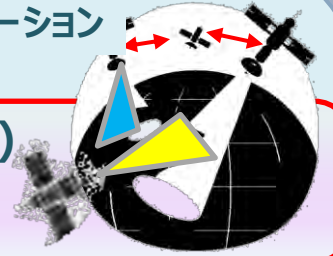
参考：MPLS：マルチプロトコラベルスイッチング/Multi-Protocol Label Switching：パケットにあて先の情報を記載したラベルを付加することで、高速ルーティングを実現する転送技術。ルータの経路選択はIPヘッダ方式よりローカルだが処理負荷は少ない。

Executive Summary

1機通信帯域 **大**
GEO/MEO

1機通信帯域 **小～中**
LEOコンステレーション

観測コンステレーション



[A] 通信データをデジタル処理⇒サービスの軌道上フレキシビリティの確立(TT&C含む)

- a. サービス可変性：帯域・周波数・ビーム配置・ビーム形状・ビーム間接続
- b. データの復調なし (Transparent) SDS≠SDR

[B] 上記+通信データ変復調⇒宇宙メッシュ・Secure・gNodeB搭載化

- a. LEO通信や宇宙メッシュ通信ニーズ、gNodeB搭載は欧州で検討が開始 (GEO、LEO)
- b. 現在、数GbpsのSDRは標準品。宇宙メッシュ対応は各所で検討中 SDS≒SDR

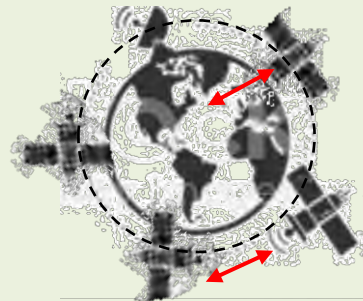
① 静止通信SDS(≒SDR)

～数100Gbps、Transparent中継器
機能：帯域・ch周波数・最大数千のビーム配置/形状



LEO通信SDS(≒SDR)

～数10Gbps、一部再生中継
機能：帯域・周波数・最大数10ビーム配置・通信Secure機能・メッシュ通信



LEO観測SDS

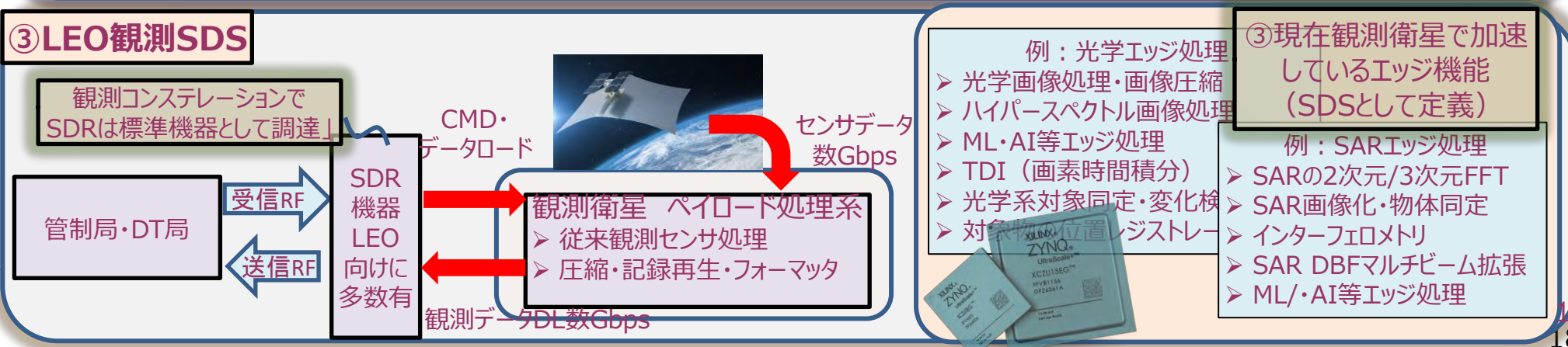
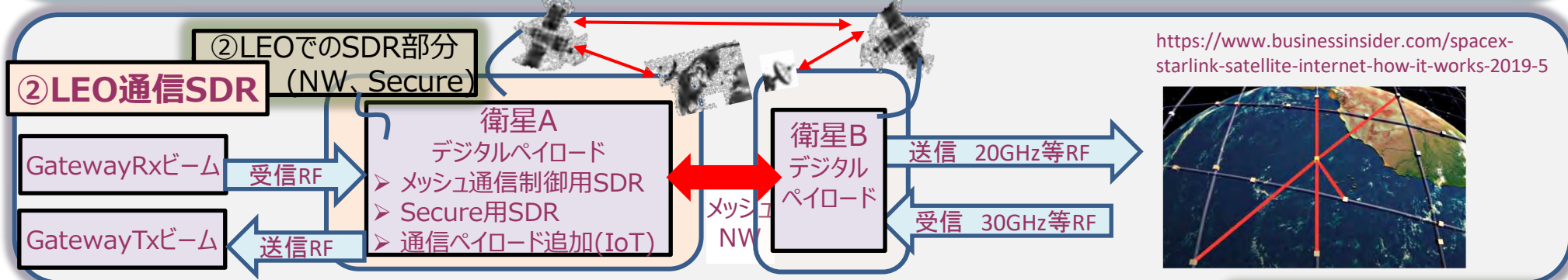
(≒SDR + 観測エッジ処理)
左記SDR + 観測データのオンボードエッジ処理 (各所で試み)

[C] 観測データのエッジ処理

- a. 画像化/差分/ML/AIによる情報化・圧縮・再訪頻度・情報レイテンシ削減ニーズへの対応のオンボード化
 - b. 顧客やアプリケーション変更
 - c. Hosted的衛星利用
- SDS≒ML/AI高次処理⇒SDR機能

3.1.1 SDS/SDR/SDP 令和4年度調査

Executive Summary



令和5年度アップデート

1.通信衛星SDS・SDR

GEO

- 容量はMax100Gbps程度に抑え、柔軟性を重視した中規模SDSが受注面では支配的になるも、製品化フェーズにて課題が発生中。(3.3.1.1②(5)参照)
- ESAは中規模SDS後を見据え、再生中継、B5G/6Gへの取り組みを加速中。(3.3.1.1②(6)参照)

LEO

- Starlink Ver2の仕様からMobileダイレクトアクセスの性能拡大、20kW級のKa/Eバンド大型衛星コンステ計画。
- gNodeBの搭載レベルの見極めが開示されていないため不透明(G/Wビーム大幅拡充計画からRUのみ搭載の可能性有)(3.3.1.1②(3)参照)
- AST mobile の衛星-携帯直接通信 試験の成功等、LEOコンステでの衛星-携帯直接通信の実現が加速

2.観測衛星SDS・SDR (3.3.1.1③参照)

- 観測データのオンボード処理は実証段階から実用段階へ移行しつつある。
- オンボード処理の高度化に伴い、SWの開発効率向上が注目されている。
- オンボードでの観測運用の自律化に関しても、実証レベルでの開発が進みつつある。
- 観測分野のオンボード処理と並行して軌道上データセンタ、衛星間光通信ネットワークの開発が進んでいる。
- これらの開発進捗状況により、衛星側でのエッジ処理の最適範囲は変わりうるため、注視が必要。
- 国内では、革新3号機にて高性能なSDS向け計算機となる民生GPUやSDR機器の実証を計画していたが、イブシロン6号機の打上失敗により実証が遅延。(3.3.1.2参照)

3.1.1 SDS/SDR/SDP SWOT分析

本年度のアップデートを受けて、昨年度のSWOT分析より赤字部分を更新。
技術項目リストは3.1.2項で併せて検討。

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	<p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 日本の得意なすり合わせ型開発により、各分野で比較的高性能・高信頼で国際的にも不具合の少ない衛星システムを長年提供して来た b. 開発プログラムの中で必要性に紐づいた開発で技術力維持向上を図る土台があった c. 衛星・地上の役割や分担が明確で比較的既定のエコシステムが存在した d. 通信ではSDS向けのETS-9のような実証開発プログラムが少数だが機会あり e. 国内に軌道上データセンタ構想を持つ、事業者が存在。 	<p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> a. ハードウェアへの依存が強く衛星の信頼性が高い反面、S/Wによる高機能化や軌道上機能拡充の波に遅れた。 b. 衛星事業の動機を持つグローバルIT・通信企業がなく、またESAのような多国籍機関に属さないため単独国予算での宇宙利用事業になっている c. OSやファームが宇宙業界乃至は固有企業・固有プログラムでクローズし民生進化を取り入れるリードに欠けた d. 国内官需や輸出市場が小さくS/W標準化や生産性に関する投資動機に欠けた e. 新規SDS等に関する実証機会が少ない(革新3号機の失敗により、SDS/SDR技術の軌道上実証が遅延)
外部環境	<p>機会</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 観測や探査宇宙機、測位、防衛通信、安全保障など官分野で多くの種類の衛星を国産化し、宇宙利用拡大につなげてきた。 b. 大学を中心とした小型衛星文化が日本ユニークな民間衛星事業とエコシステムを形成して来た。 c. 欧米の中規模SDS通信衛星は製品化で躓き 	<p>脅威</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 海外企業(欧米・中国)が開発したSDS衛星及びコンステレーションの海外導入による官需への提供機会の縮小 b. 逆に海外企業(欧米・中国)によるCOTS・SDS対応の衛星競争力格差により、海外市場の衛星レベル及び機器参入機会の縮小 c. 諸外国にSDS関連技術・デジタル技術を川下・川上両方から押さえられることによる安全保障・経済安全保障・宇宙製造事業・技術の縮小。国内には利用事業のみ残る脅威 d. ESAでは次世代向け再生中継、B5G/6Gへの取組を加速 e. LEO衛星での衛星-携帯直接通信の流れ f. 観測衛星のデータ処理のニーズ動向は、軌道上データセンタ、衛星間光通信ネットワーク網の開発状況からの影響を受ける可能性がある。

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.1.1 SDS/SDR/SDP (Software Defined Satellite/Radio/Payload)

3.1.2 オンボード処理

3.1.3 運用の効率化

3.1.4 SWアーキテクチャ

3.1.5 衛星推進システム

3.2 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

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

Executive Summary

1.動向

- 各企業はLEOでは先端の産業用デバイスにRHBD(設計によるCOTSの耐放射線強化)を適用。
- **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。

2.大手・NewSpace、欧米での動き

- 欧米では各新興企業(Spire等)や大手のLockheed MartinもLEOではRHBDによる評価が定まりつつあるXilinx (AMD)のMPSoC Zinq(生産ライン等産業用、ManyコアMPU/GPU/VPU /Secureモジュール/メモリ/高速IO等を一体化、ヘテロジニアスと呼ばれる)を採用。
- 欧米は宇宙用ハイエンド品も開発継続しており、**宇宙・民生ハイブリッド化も含め3方向**でオンボード化で進展。
- 米国では産官学33機関連携組織SHREC(Center for Space, High-Performance, and Resilient Computing)で宇宙用開発及び産業用RHBDを実施。LockheedはSHRECで開発したCPU (ARM Cortex A9、Xilinx Zinq) をPWSAのTransportレーヤで採用(3月Tranche0打上予定)。
- 欧州は最近EU域内だけではなく米国・イスラエルへも並行して投資。**(EU域内⇒西側内へ拡大、欧米接近)**
- 競争領域はこういった産官学による**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。LEOでの活用中心

3.国内外強み弱み分析

- 日本は今まで宇宙用ロバストH/Wとその上に載る専用S/Wで**多種ミッションの成功を重ねてきた。** **強み弱み ⇒強み**
- 宇宙のあらゆるで領域で**ミッション性能向上が最も重要**
そのためには産業用先端H/W・S/Wを中心に宇宙用ロバストH/Wで**監視したり、RHBDを蓄積し、性能は産業用、耐環境性や信頼度は宇宙用を実現していく必要がある。** **⇒弱み**
- 従ってRHBDの産官学蓄積と共有化、**実証プログラムの充実、実用へ適用する動機づくり**が未開拓 **⇒弱み**

Executive Summary : 大手のデバイス戦略

米国の次世代動向

1. 大手の産業用ベースの宇宙コンピューティング取り組み

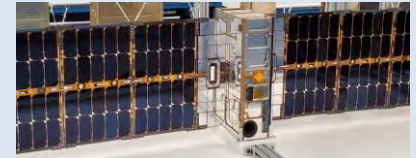
Lockheed 高性能化のためARMコアベースのXilinx ZynqをPWSAに採用

- ①米国の産官学33機関連携組織**SHREC**(Center for Space, High-Performance, and Resilient Computing)で開発、**Transportレーヤ衛星**に採用。今年打上げ予定。
- ②**Seakr社(Raytheon傘下)**も同様に産業用ARMのマルチコアプロセッサと複数のGPUを組み合わせ、**DARPAのBlackJackの実証衛星二機**で実証。

2. 大手の宇宙用コンピューティング開発

- ①**BAE社**は宇宙用**RAD5500シリーズ(IBM)**でFPGA機能、他IP、I/O、アナログ機能(AFE)を混載しMPSoCチップ化。数千MIPSクラスのミッションコンピュータとして製品化。

Transportレーヤ Lockheed



- 産官学開発⇒LM50
- Xilinx Zynq-7020プロセッサ。
- Artix-7系FPGA + デュアルコアのARM Cortex A9 CPUのSoC

欧州の次世代動向

1. 宇宙用MPUの高性能化開発を継続

例：**GR765** (CAES[米/元Sweden Geisler・Cobham])

2. 産業用ARMを宇宙用へ転用。GNSS機能も実装。

例：**DAHLIA Airbus/TAS/STMicro/CNES/ESA**

産業用や車載ARMのエコシステム

3. ハイブリッドコンピューティング。

例：**TAS** MPSoC(宇宙用FPGAが民生を監視)

Airbus (宇宙用ASICが民生CPUを監視)

Airbus



欧州 DAHLIA
ARM CortexR52(4コア)

<https://markets.businessinsider.com/news/stocks/seakr-mandrake-i-delivers-success-for-darpa-blackjack-on-orbit-tech-demonstration-1030421203>

Executive Summary : AWSの動向

1. AWS社(Amazon Web Service社)の従来衛星ビジネスモデルはタイムライン的地上局とクラウド提供

AWS宇宙部門は、衛星事業者がユーザであり、地上局やクラウドサーバ環境をDigitalGlobe、BlackSky、Spire、Capella Space、Open Cosmos、HawkEye 360等に提供。地上局・運用SW・D/B・観測データ処理・記録

①局 + 観測クラウド⇒装置事業

②地上クラウドを宇宙に拡大⇒サービス実証

2. 一方、昨年ISSでクラウド端末稼働し(2022)、地上と同水準のクラウドの宇宙展開を開始

- AWSクラウドサービス用のエッジコンピューティングデバイス「Snowcone」をISSに搬入し地球から操作(※1)。
- 傘下のML Solutions Lab (AWSの機械学習専門家と顧客を結びつけ、機械学習活用コンサルティングを行うAWSサービス(※2))はAxiom社と協力して、Nikon製カメラで観測した写真を処理するMLモデルを開発。これらの画像データをISSに保存し、Snowconeで処理(※2)。

※1:<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGN240CY0U2A620C2000000/>

※2:<https://www.codexa.net/aws-ml-solutions-lab/>

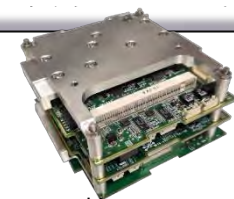
③衛星搭載クラウド環境の提供

3. 小型衛星搭載のUnibapシステム(ARMコア)上で自社のML・AI・IoT実証中

- 衛星は輸送サービスプロバイダのD-Orbit社のSCV004を使用、Unibap社のiX5-100
- 雲や山火事等自然オブジェクトと、建物や船などの人口的オブジェクトをAWSのAIおよびML処理で迅速かつ自動的に識別。地上顧客も自身IPを適用可能。
- AWSのオープンエッジソースであるIoT GreenGrassを実証



D-Orbit社の小型衛星SCV004(バスを提供)



Unibap社のiX5-100 Space Cloud infrastructure computer ARMマルチコア

④最終的事業戦略は？

令和5年度アップデート

- 数多くのプレイヤーが従来の宇宙用計算機より数桁上の性能を実現できる宇宙用計算機を開発。そのうち、いくつかは軌道上実績を獲得。使用されているデバイスは、Ramon.Spaceの自社開発デバイス例を除くと、ほとんどがCOTSとなるNVIDIA社製 Jetsonシリーズ、AMD社製 Ryzen V1000, Zynq MPSoC, Intel社製 Myradを活用した計算機となる。(3.3.1.2参照)
- 高性能な宇宙用計算機が実現しつつあることから、従来の「非力な計算機上で如何に性能を出すかというSW開発」から、「如何に効率的にSWを開発するか」にSW開発技術の焦点が変わってきている。(3.3.1.1③)
- オンボード処理に欠かせないデバイスとして、デジタル処理デバイスの調査を実施。昨今のオンボード処理では、従来の宇宙用CPUの数桁上の性能を有する演算量を要求されてきており、デバイスとしてはSEU等のある程度許容しつつ最先端のCOTSを活用する流れが確認された。これら最先端のCOTSはデバイスの開発費が数1000億にも達してきており、同等性能の宇宙専用デバイスを開発することは困難と考え、高信頼性用途向けにおいても、高性能なCOTSと高信頼性デバイスを組み合わせたHybridな計算機開発が加速されると想定される。(3.3.1.3.1 参照)
- 高信頼性宇宙用デジタル処理デバイスとしては、欧州のNG-Ultra/Ultra-7, 米国のHPSC等開発が進んでいる(3.3.1.3.1 参照)
- オンボード処理に欠かせないデバイスとして、メモリの調査を実施。メモリ分野においても近年、宇宙用デバイスの急速な性能向上が確認される一方、高性能なオンボード処理を実現できる宇宙用国産メモリはなく、海外メモリに依存していることが確認された。(3.3.1.3.2 参照)

3.1.2 オンボード処理 SWOT分析

本年度のアップデートを受けて、昨年度のSWOT分析より赤字部分を更新。

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	<p>強み</p> <p>a. 通信(RF衛星間・APAA・再生中継等・光)・測位・観測(光学・SAR・気象)・宇宙機HTV・惑星探査機等で信頼性の高い多種類のミッションを近年まで成功させて来た</p> <p>b. バス姿勢系・電源/熱/充放電制御などH/WとS/Wを組み合わせた高い制御精度・高機能なシステムを各利用で保有</p> <p>c. FDIRや観測・テレコマデータ処理、自律的航法など自律・自動運用のモチベーションと蓄積が豊富、衛星を故障からプロテクトする技術の実績がある</p>	<p>弱み</p> <p>a. 通信・観測とも単品大型＋低リスク開発が第一優先、高信頼性と新規性の両立のハードルが高い。</p> <p>b. CPU開発・FPGA開発の間隔が空き、海外と比較して低リソースの国産デバイスによる高度化導入に近年格差</p> <p>c. 上記オンボード処理のための産業デバイスの耐放射線設計のデータベースが産官学に分散し、日本企業の共通基盤として整備されていない</p> <p>d. 経済安全保障や宇宙産業維持発展のための部品・計算機戦略やロードマップが産官学で共有化されていない</p> <p>e. 高信頼性宇宙用デバイスと高性能COTS品を組み合わせたHybrid計算機に関する欧米との技術格差</p> <p>f. 高度なオンボード処理に必要なメモリデバイスが海外依存</p>
外部環境	<p>機会</p> <p>a. 民間利用や喫緊の防災・国防など宇宙利用拡大が進み、ミッションオンボード処理への量的・質的要求が高まっている</p> <p>b. コンステレーションや軌道上作業・ロボティクス、探査機、シスルナ圏宇宙機、ローバーなどオンボード処理に依存するミッションが近年増えており技術進化の機会が豊富</p>	<p>脅威</p> <p>a. 諸外国(欧米・中国)の確立されたオンボード処理高度化・衛星SW化・低コスト化攻勢による国産技術基盤の弱体化、宇宙製造業が利用事業のみになる産業・技術立国としての脅威</p> <p>b. 諸外国にオンボード処理技術を押さえられることによる国防・経済安全保障の利用面の進化や技術的飛躍機械逸失の脅威</p> <p>c. 欧米での高信頼性宇宙用デジタルデバイスの開発が進捗</p>

3.1.2 オンボード処理開発技術項目リスト

23-002-R-013

本年度のアップデートを受けて、昨年度の開発技術項目リストより赤字部分を更新。

大分類	小分類	技術項目
オンボードコンピューティング・SDS	情報処理デバイス (部品レベル)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 宇宙用情報処理デバイス技術・メモリー ➤ 産業用情報処理デバイスの耐放射線技術 (CPU周辺回路技術・スクラビング等) ➤ 次世代通信用高速デバイス
	ミッション計算機システム (VBNやテレメトリのAI監視等、バス計算機においても性能向上が必要)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 計算機システム(ミッション用または統合化) ➤ 産業用ベース計算機システム(ハイブリッド含む) ➤ 通信DPP(デジタルペイロードプロセッサ)
	ソフトウェアアーキテクチャ	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ヘテロジニアス計算機に対応したソフトウェアアーキテクチャ ➤ クラウドベース・アジャイル開発やOSS活用も可能なソフトウェアアーキテクチャ ➤ オープンクローズ戦略を明確化した上での業界内での標準化、及び、エコシステムの確立
	アプリケーション	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 観測高次処理の実装技術 光学補正・SAR画像化・対象抽出・差分抽出等 ➤ スペースNW制御や測位オンボード処理技術 衛星間NW制御、測位信号やRF再構成、電波情報収集等 ➤ 高機能なオンボードエッジ処理 AI/MLの活用 ➤ B5G向けの通信技術 再生中継、D2D等 ➤ オンボードでの観測運用計画立案

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.1.1 SDS/SDR/SDP (Software Defined Satellite/Radio/Payload)

3.1.2 オンボード処理

3.1.3 運用の効率化

3.1.4 SWアーキテクチャ

3.1.5 衛星推進システム

3.2 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

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

- 従来の衛星運用は単機衛星の打上から初期のチェックアウトそして**実運用に多くの人員が24時間対応している。**
- **数10機の同時打上や数100機以上の実運用となる**LEOコンステレーションは周回衛星であることもあり、短い可視時間(常時⇒10分)での運用や1機当たり数10ビームの通信系のユーザトラッキング、観測運用等、衛星数の上で大規模の運用負荷となり、自律化機能前提にしても**人手の地上運用の最小化はコスト上重要。**
- Oneweb現世代は**一軌道面の運用(49機)を三名三交代×12チーム(軌道面)**で実施とのこと(Interview)。
⇒それでも単純計算で36名であり、運用コストと負荷は大きいと推察。

<エグゼクティブサマリ>

- 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。**
- 同時打上げ数の増加と地上局数の制約から、軌道投入時にすべての衛星と通信することができないため、数10機の衛星の**初期チェックアウトをオンボードで衛星が自動的に実施**することも行われている。地上局-衛星間の通信は従来通り1対1通信でありここも多数機打上や運用では自動化の動機になっている。
- ミッションの観点では、バージョンの異なる多くの衛星が軌道や**可視時TT&C動作、観測・通信ミッション運用、観測ポインティングなどを常時異なる動作**を行うため、**コンステレーションのシミュレーション技術(⇒デジタルツイン的運用)の重要性**が増しており、今までよりシミュレーションの重要性が増している。
- 但しコンステレーション衛星の運用技術の観点では、総じて大きく運用システムを変更するのではなく、従来の衛星運用の延長で課題が生じた場合に逐次対処している傾向がある。
- 一方これに**衛星間通信を搭載して宇宙メッシュ通信が出現すると運用の複雑さは、より増すため**、衛星への自動化運用機能の要求も大きく高度化する(衛星間通信制御、衛星間追尾、多くの衛星の軌道伝搬等)

3.1.3 運用の効率化 令和4年度分析 + 令和5年度アップデート

23-002-R-013

令和4年
海外動向
分析

- ✓ 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
- ✓ 数10機程度を超えると運用省力化の重要性が増す。海外では初期チェックアウト(Planet社)やAIによる軌道維持(AIKO社)等をオンボードで自動的に実施する例も出現。
- ✓ 現状の自動化レベルはECSSのLEVEL3「イベント単位での自律か運用をオンボード機能で可能」までがほとんど。LEVEL4「ミッションとしての目標を設定しそれに向けてオンボードで実行」には達していないものの、LEVEL3のオンボードと地上運用支援で多数機運用効率化を進めている。

令和4年
日本動向

- ✓ 官需：短期運用～数機程度の複数機運用を考慮すると、従来実績を重視しドラスティックな変革は少ない。
- ✓ 商用：国内商用衛星運用では24H/7D前提であったが、従来ベースの改善にて対応は可能であった。

令和5年
アップ
デート

- ✓ 観測分野にてオンボードでの観測運用の自律化の開発が実証レベルで進む。(3.3.1.1③参照)
- ✓ 誘導制御分野にて、欧米でのAutonomyの向上を実現するカギとなるV&V技術へ顕著な取り組み(3.3.2.1③)
- ✓ SDS衛星での運用効率化の1要素となるオンボードSW更新に対するStarlinkでの取組(3.5参照)

強み

創成期からの実績

- ✓ 初期の宇宙開発プログラムから搭載系は自動化・自律化の動機が強く実績も豊富。
- ✓ 国内でもCloudベースの地上局を提供したり、大規模衛星事業者の空いている地上局をI/FするGround as a service的な事業も出現
- ✓ 複数機観測衛星事業者ではクラウドを用いて伝送設備やストレージのコスト削減を図る動きもみられる。

弱み

多数機運用の動機 (赤字が令和五年を受けての更新部分)

- ✓ 左記の通り単数機乃至は複数機でも既存のオンボード自動化機能と地上運用をベースに考えているため、数10機規模のコンステレーション運用に関する効率的運用方策検討が未定と思われる。
- ✓ 国内ではオンボードでの撮像運用自律化、コンステレーション衛星での効率的なSW更新技術等への取組が見受けられない。
- ✓ 運用効率化を進める際に鍵となる自律化に対する検証技術への企業をまたいだ取組が見受けられない。

3.1.3 運用の効率化 技術項目リスト

23-002-R-013

本年度のアップデートを受けて、昨年度の開発技術項目リストより赤字部分を更新。

大分類	技術項目
運用の効率化	<ul style="list-style-type: none">➤ ML/AI等の開発環境を提供するクラウドベースの事業との連携➤ 多数機軌道維持アルゴリズムの開発➤ 通信分野でのML/AIを用いた移動体通信NWのトラフィック予測と制御➤ 観測分野でのエッジ処理による観測データ処理の高速化➤ セキュリティを確保したオンボードソフトウェアの効率的なアップデート方法➤ 観測分野でのオンボードでの観測運用立案による観測計画の効率化➤ 非定常運用を対象とした運用の自律化➤ 自律化の進展に伴い必要となるV&V技術

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.1.1 SDS/SDR/SDP (Software Defined Satellite/Radio/Payload)

3.1.2 オンボード処理

3.1.3 運用の効率化

3.1.4 SWアーキテクチャ

3.1.5 衛星推進システム

3.2 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

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術

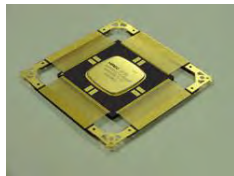
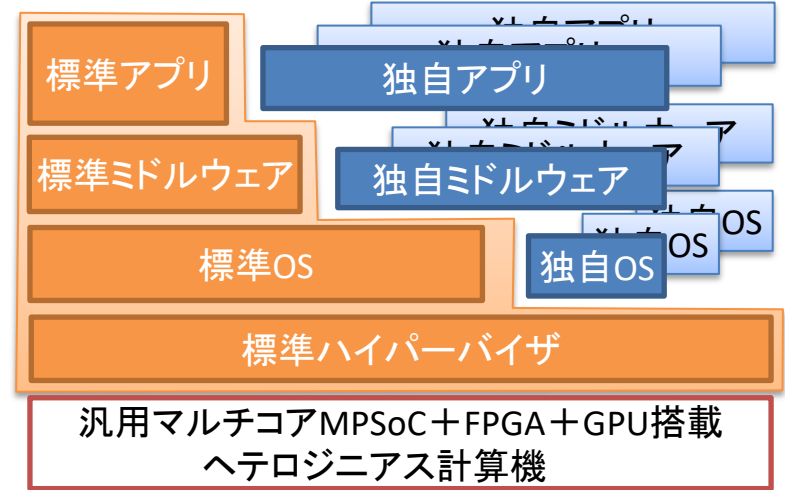
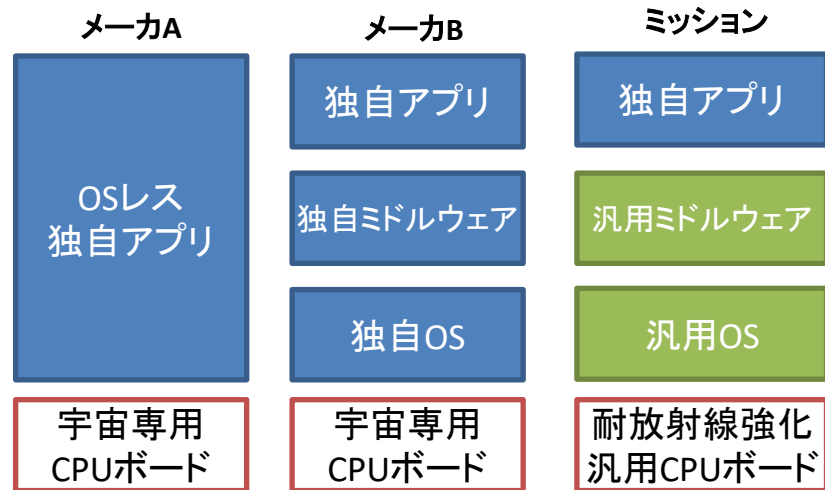
3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

オンボード処理技術の発展（3.2項）に伴い、搭載されるソフトウェアのアーキテクチャも変化

- 耐放射線化された宇宙専用CPUを搭載したメーカー独自のCPUボード
- 高信頼性RTOS含めた専用ソフトウェア
- ミッションではVxWorks等組込OSを使用
- メーカー・ミッション毎の専用アプリSW
- 再利用性が低い独自SWを多用

- 汎用CPUコアを搭載したMPSoCや書換可能FPGA、GPUを搭載したCOTS計算機
- Linux等をベースとした汎用RTOS
- 放射線対策は計算機レベルで実施
- 最新の民生AI/MLアプリ(OSS)を活用
- 再利用性が高い標準SWを多用



宇宙専用CPU HR5000S

ASTEC ©JAXA



RAD6000 CPUボード

©Lockheed Martin



COTSヘテロジニアス計算機

©Unibap

3.1.4 SWアーキテクチャ 令和4年度分析 + 令和5年度アップデート

23-002-R-013

令和4年
海外動向
分析

<米国>
ロッキードマーチンは、ソフトウェア開発プラットフォームとしてSpaceCloudとHiveStarと呼ばれるコンセプトを推進
 ✓ SpaceCloudはDevSecOps設備としてミッションアプリケーション開発のための信頼できるプラットフォームを提供
 ✓ HiveStarは、自動的に衛星コンステレーションにタスクを効果的に分配
<その他、欧米新興企業>
COTS品プロセッサを活用した新興メーカーが台頭し、新たなソフトウェアアーキテクチャを提案
 ✓ AI/ML等を活用できるアプリケーション開発環境を提供し、宇宙関係メーカー以外の参入障壁を排除して市場を拡大
 ✓ AWSと連携して地上と同様のクラウドベースでの開発環境を提供

令和4年
日本動向

<JAXA>刷新プロジェクトで軌道上エッジコンピューティングを使った新たなサービスアーキテクチャを検討中
 ✓ 軌道上における高度な衛星利用サービス実現に向けたハイエンドヘテロジニアス計算機
 ✓ ハイエンドヘテロジニアス搭載計算機を用いた高度な衛星利用サービス
 ✓ 上記に必要なソフトウェアプラットフォームコンセプト構築・実証を推進中

令和5年
アップ
デート

✓ オンボードでのSW処理の範囲が広がるにつれて、SW開発の効率化という観点が重要視されてきている。それに従い欧米各社がSWのフレームワーク、ツールボックス、ECOシステムの開発を進めており、実際に活用されつつある。

強み

- ✓ 従来型計算機の耐放射線性向上技術は保有。
- ✓ 高信頼性ソフトウェアの開発実績は豊富。

弱み

- (赤字が令和五年を受けての更新部分)
- ✓ クラウドベースの衛星搭載ソフトウェア開発経験の不足
 - ✓ アジャイル型の衛星搭載ソフトウェア開発経験の不足
 - ✓ 最新のAI/MLを用意に実装できるOSSの活用経験も不足
 - ✓ 刷新PJでの取組はあるものの、海外での開発、実用化のスピードは速く、更なる加速が必要な状況。

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.1.1 SDS/SDR/SDP (Software Defined Satellite/Radio/Payload)

3.1.2 オンボード処理

3.1.3 運用の効率化

3.1.4 SWアーキテクチャ

3.1.5 衛星推進システム

3.2 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

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

(Executive Summary)

(1) 【新しいニーズ】 推進系はGEO/MEO/LEOとも運用軌道への移動や軌道維持だけではなくコンステレーション変更やLEO群のEOLでのReorbit(離脱)、機動性を要する軌道上サービス、シスルナ圏や重力天体での離着陸などで、従来と異なる**多くの機能要求が顕在化し、先進的な開発が進められ宇宙機競争力の源泉になっている。**

(2) 【新しい中規模推力電気推進】 電気推進だけでなく、従来小型向けであった**MEP、FEFPも数10mN/1500s-2500sの中型向け開発も進められ、実用レベルの開発が非常に活発。**

MEP (Magnetogradient Electrostatic Plasma: HETより低圧で低コスト、HET同等性能 例: BALL社/USAF)
FEFP(Enpulsion社、電界放出型電気推進)

(3) 【低毒性推進のエンジン: グリーンエンジン】 小型衛星は、ライドシェアの利用・射場作業短縮化のためヒドラジン系(毒劇物)の化学燃料から**非毒劇物燃料(コールドグリーン、水分解スラスタ)への置換えに向けた動向が進むが、主な適用先は小型のライドシェア打上。**中型以上への適用は、寿命/性能/コストの改善がキー。

(Executive Summary)

(4) 【小型衛星推進パッケージ】 **小型衛星では**、化学推進系（コールドグリーン、モノ、水分解反応、固体モータ）、電気推進系（全ヨウ素、ハイブリッドエレクトロスタティック、エレクトロスプレー）、水蒸気熱電推進系等、各規模の企業で多くの種類の開発と実用化が進行中、実証例も多い。Cube/小型（～数百kg）は「**スループット仕様（～数千Ns）や推力（数mN）、比推力（100s～）で、性能要求は低い**代わりに、推進系も1U～2U程度にパッケージ化した**衛星へのアタッチメント・パッケージ型の低コストモジュール化**が進んでいる。

(5) 【新しいニーズに対応する推進系】 更に、軌道維持・変更マヌーバでの**Isp（燃費）と作業時の機動性（推力）を兼ねそろえたハイブリッドエンジン**や**重力天体への離着陸に必要な高推力エンジン**も重要である。

(6) 【調達性の課題】 昨今のロシア情勢により、ホールスラスタは実績豊富で比較的安価な露Fakel社SPTシリーズから欧米製（Safran社やAstra社）への置換えが進められており、**最新状況として仏製のSafran社からの調達性は悪化**（2022年夏期時点でL/Tは2年以上）。同様にTi材であるタンクや特殊金属の耐熱性スラスタも価格・納期が増大している。また**電気推進の推進薬である希ガスのXe高騰**、更に代替推進薬Krの今後の高騰も考える必要がある。

3.1.5 衛星推進システム 令和5年度調査 (ESA動向)

23-002-R-013

萌芽的な推進系の技術調査として、ESAのIP-CCIのワークショップ2023の技術トピックを調査。ESAでは以下に示すトピックに関して中期的な開発・実証の議論を進めていることが確認された。なお日本においても核反応等を除き、ほとんどのトピックは研究が進んでいることを確認。

IP-CCI(Innovative Propulsion-Cross Cutting Initiative):ESA 主体の推進系の画期的な技術に関心のある特定のトピックに焦点を当て、横断的な議論を進める研究開発活動。IP-CCIのワークショップが2023年は2023/6/28~30でオランダ ESTECにて開催された。ワークショップはESA域内のみの参加ではあるが、公開されているプログラム (参照: [IP-CCI イベントHP](#))より技術トピックの調査を実施した。

技術トピック	概要	日本での開発例
High Efficiency Atmospheric-Breathing Electric Propulsion	吸気口より収集される大気ガスを推進剤とする電気推進。VLEO等での利用が想定される。	JAXA
Advanced Airbreathing Propulsion	酸化剤を大気より吸気する推進系。人工衛星用途ではない。	
Rotating and Pulse Detonation Propulsion	回転/パルス デトネーション(超音速で燃焼が進む)エンジン技術	JAXA
Water Propulsion	推進剤として無害で入手が容易な水を用いた推進系	Pale Blue社 2023/3/3 軌道上実証
Long Term Storability and Hydrogen Peroxide	無毒推進系の酸化剤候補となる過酸化水素を長期保存する技術	JAXA PulCher
Innovative Aerodynamic Surfaces	革新的な空気力学的な表面。人工衛星用途ではない。	
Long-term In-space Cryogenic Propulsion and ISRU Propellants	極低温推進剤長期保存技術、及び、現場資源利用(ISRU)推進系技術	名古屋大学
Space Tethers	帯電テザーと地磁気、太陽風等との相互作用により、推力を得る技術	BULL社
Beamed Energy Propulsion	レーザー/マイクロ波等のビームを外部から供給する推進系	東京大学
Nuclear Electric Propulsion	核反応を利用して発電し、電気推進スラスターにより推力を得る技術	NA
Nuclear Thermal Propulsion	核反応の熱エネルギーにより直接推力を得る技術	NA
Metallic Propellant for Chemical Propulsion	現地資源として存在する金属を推進剤として用いる技術。	NA
Advanced High Altitude Platform Systems	HAPS用の推進システム技術。人工衛星用途ではない。	
Innovative Propulsion on Non-Terrestrial Bodies	非地球天体上での推進系システム技術。人工衛星用途ではない。	

3.1.5 衛星推進システム 令和5年度調査 (NASA動向)

23-002-R-013

萌芽的な推進系の技術調査として、NASA STMDにて現在、開発中の推進系開発PJに関して調査を実施した。TX01.4, TX01.Xでは将来的なシスルナ・惑星間の移動のための核熱推進の研究が進められている。

ID	分類	実行中PJ数							
		現在のTRL	1	2	3	4	5	6計	
TX01.1	化学推進			7	1	7	1	16	
TX01.2	電気推進		1	17		2	1	1	22
TX01.4	先進推進			3	2			5	
TX01.X	その他 推進系					1			

LN	PJ名	分類	PJ期間	TRL	概要
1	Beamed Microwave Energy Propulsion Leveraging Lunar Resources and Dual-Use Infrastructure Systems	TX1.4.3	2022~2026	2->3	月資源を活用した月からの宇宙船打ち上げを可能とする推進系となりうるビームマイクロ波エネルギー推進 (BMEP) システムの開発。
2	In-Space Manufacturing, Assembly, and Repair Technologies for Space Structures (I-SMART)	Primary TX12.1 Cross TX01.4	2023~2024	2->3	表面浸食、外部からの衝撃による損傷、および/または層間剥離を受けたカーボン-カーボンおよびセラミックマトリックス複合材料の宇宙空間での高温修復および再生技術の開発。
3	Ultrahigh-Temperature Material Property Testing Above 2000C in Vacuum and Hot Hydrogen, Phase II	TX01.4.3	2022~2024	3->6	超高温真空および大気条件におけるNTP(核熱反応推進系) 材料の機械的評価が可能なシステムを調達、組み立て、校正、実証を行う。
4	Diffraction Solar Sailing	TX01.4.1	2022~2024	3->4	太陽光の反射ではなく、回折を用いたソーラーセイルの開発。これによりより小さなセイル、より複雑でない誘導、ナビゲーション、および姿勢制御スキーム、低減された電力、および非回転バス等が実現可能。
5	Knudsen-Pump-Based Propulsion for Atmospheric and Martian Exploration	TX01.4.3	2020~2024	2->3	火星や中間圏のような希薄な大気での飛行を可能とする推進系の開発。
6	Space Nuclear Propulsion(SNP)	TX01.X	2020~	4->7	核熱推進のための高性能核燃料の開発と評価、および飛行実証

3.1.5 衛星推進システム 令和5年度調査 (NASA動向)

23-002-R-013

STMDにて現在ActiveなTX01.1(科学推進)関連のTRL4~6の開発PJを調査。
 機器レベルのようなまとまった開発ではなく、シミュレータの開発等要素技術レベルに分解して開発を進めている。

LN	PJ名	分類	PJ期間	TRL	概要
1	Particle Impact Simulation and Ignition Prediction	TX01.1.1	2023~ 2024	6->7	化学推進系の燃焼に関する粒子動作のシミュレータツールの開発。
2	A Reduced gravity Chilldown and Transfer Investigation using Cryogens (ARCTIC)	TX01.1.1 TX01.2	2021~ 2024	4->6	微小重力での極低温推進剤の流体輸送に関する調査
3	Green Propellant Zero-G Control Methods	TX01.1.3	2022~ 2025	4->6	標準的な高排出ガス推進剤の代わりに、より再生可能で毒性の低い推進剤を使用する推進系の開発。そのため、新しい推進剤のタンク壁や弁などの周辺での微小重力下での非線形な挙動を調査する。
4	High Performance Pump-fed Transfer Stage for Venture Class Cislunar & Deep Space Missions, Phase II	TX01.1.2	2022~ 2024	4->5	Virgin OrbitのLauncherOneやABLのRS-1などの小型打ち上げ機を使用して、月星や深宇宙(火星ランデブーなど)への専用ミッションを可能にする、低コスト、コンパクト、高性能の転送ステージの開発と実証。転送ステージはマイクロポンプと非毒性推進剤を組み合わせ高密度比推力を実現する推進系を有する。
5	Demonstration of Multiphase Microfluidics for Chemical Analysis Systems	TX01.1	2021~ 2024	4->6	毛細管駆動上の多相流体の評価を行うための実験装置の開発。
6	Development of cryogenic propellant storage tank inner surface coating for elimination of cryogen boiloff in reduced gravity	TX01.1.3	2021~ 2024	4->5	減重力下での極低温推進剤のボイルオフを排除するための極低温推進剤貯蔵タンク内面コーティングの開発。さまざまなコーティング材料と表面仕上げの組み合わせの評価を実施する。
7	Investigation to Determine Rotational Stability of On-Orbit Propellant Storage and Transfer Systems Undergoing Operational Fuel Transfer Scenarios Testing	TX01.1.1	2011~ 2024	4->6	軌道上での推進剤の貯蔵および輸送技術の開発
8	Lightweight, Hybrid Screen-Channel Device for Advanced Cryogenic Fluid Management	TX01.1.3	2021~ 2024	4->6	排出効率を改善するために燃料タンク内の残留液体の位置を最適化するように設計された液体捕捉装置の開発・評価

3.1.5 衛星推進システム 令和5年度調査 (NASA動向)

23-002-R-013

STMDにて現在ActiveなTX01.2(電気推進) 関連のTRL4~6の開発PJを調査。
STMDの開発では、実用化レベルに近いものとしてはホールスラスタの高性能化の実証が進められている。

LN	PJ名	分類	PJ期間	TRL	概要
1	Propellant Mass Gauging in Microgravity with Electrical Capacitance Tomography	TX01.2.1	2021~ 2024	4->6	打ち上げロケットや宇宙船の推進薬タンクの質量測定精度が向上すると、不確実性、残差、必要なマージンが減少し、リスクが軽減され、パフォーマンスが向上します。電気容量トモグラフィー (ECT) を使用した微小重力下での推進剤質量測定実験は、ECTがすべての充填レベルでより優れた質量測定精度を可能にするかどうかを判断することを目的としている。
2	Solar Electric Propulsion (SEP)	TX01.2.2	2014~ 2028	4->9	太陽光発電推進プロジェクトは、電力および推進要素 (PPE) を含む、人間/ロボット探査および商業宇宙飛行ミッションに適用可能な、先進的な 12 kW 磁気シールド EP ホール スラスタを開発し、認定する。Aerojet Rocketdyne とスラスタの設計および製造を契約したこのプロジェクトの下で行われる作業では、環境認定試験と23,000時間の寿命認定試験を通じて2つの認定スラスタを製造および試験を実施する。この技術により、火星への貨物輸送などの長期ミッションで高出力電気推進システムの使用が可能となる。
3	High Current Plasma Cathode for Efficient Space Propulsion, Phase II	TX01.2.2	2022~ 2024	5->8	イオン化および中和用の大電流(> 100 A) プラズマ放電カソード電極の開発。
4	A Reduced gravity Chilldown and Transfer Investigation using Cryogens (ARCTIC)	TX01.1.1 TX01.2	2021~ 2024	4->6	微小重力での極低温推進剤の流体輸送に関する調査 (TX01側の再掲)

3.1.5 衛星推進システム 令和5年度調査（その他動向）

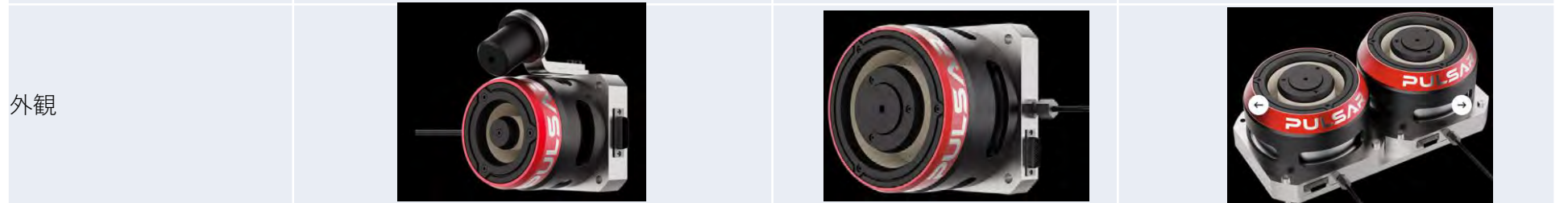
23-002-R-013

米英でのHET共同開発等、大きな動向があったPulsar Fusion社について調査を実施した。
20kW級、Ar対応のHETと製品情報上は記載あり、開発状況は不明なもの今後注視が必要。

Pulsar Fusion 社概要

- 2011年に設立した、イギリス拠点の企業
- 核融合技術を用いた推進系やハイブリッドエンジンと併せて、電気推進システムの提供を行う。
- 2023/8/16 UKSAより米国のミシガン大学とのHET共同開発(￦ 20M)が発表された (出典:[Spacewatch](#))

HET製品概要	1.5kW HET	5kW HET	20kW
方式	ホールスラスタ	ホールスラスタ	ホールスラスタ
燃料	Ar, Kr, Xe	Ar, Kr, Xe	Ar, Kr, Xe
酸化剤	—	—	—
比推力	1725sec	2000~2600sec	2025-2700sec
推力	100mN	295~325mN	1010mN
質量	4.75kg	12.4kg	43kg
サイズ	94x94x114.5 mm	144x144x117	189x189x127mm
Total Impulse	7.2MNs (20000Hrs)	23MNs(20000Hrs)	72MNs(20000Hrs)
効率		50%	50%
電圧	350V	300-600V	450-600V
電流	4.25A	6-16A	14-18.2A



3.1.5 衛星推進システム 日本の強み・弱み分析(1/2)

23-002-R-013

本年度のアップデートを受けて、昨年度のSWOT分析より赤字部分を更新。

	推進系	強み	弱み	備考
内部環境	グリーン推進	<ul style="list-style-type: none"> ・MHI社のスラスタは開発済みであり、軌道上実績あり。 ・IA社のスラスタは開発済み。低価格化への取組、モジュール販売あり。 	<ul style="list-style-type: none"> ・海外と比べ、採用機会が少なく、軌道上実績が少ない。 ・他の推進システムと比べて寿命が短く、適用範囲が限定的。 	軌道上実績あり
	水を推進剤とする方式	<ul style="list-style-type: none"> ・水という安全、調達性に優れた推進剤の採用であり、環境に優しい。 ・他の推進系システムと比べて安価。 ・PaleBlue社のスラスタが軌道上で実証実績あり。 	<ul style="list-style-type: none"> ・他の推進系と比べて採用機会が少なく、軌道上実績が少ない。 	開発中→軌道上実績あり
	ホールスラスタシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・官民に研究者/有識者が多い。 ・海外調達実績もあり、関連する搭載性技術も保有。 	<ul style="list-style-type: none"> ・海外勢に比べて開発が遅れている。 ・実績を積む機会が少なく、搭載機会も限定的 ・使用する部品は海外調達が多い。 	開発中
	イオンエンジンシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・数mN級スラスタははやぶさでフライト実績あり。 ・25mN級スラスタはETS-8,SLATSでフライト実績あり。 ・官民に研究者/有識者が多い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・他の推進系に比べて高価 ・海外勢に比べて実績を積む機会が少なく、搭載機会も限定的 ・ETS-8/SLATSのイオンエンジンは製造困難な状況 	軌道上実績あり
	その他の推進系	ESA等で進めている新しい推進系に関して、核反応等を除けば研究機関等にて開発を実施。	核反応を活用した推進系に関しては、開発が見受けられない。	

3.1.5 衛星推進システム 日本の強み・弱み分析(2/2)

23-002-R-013

本年度のアップデートを受けて、昨年度のSWOT分析より赤字部分を更新。

	推進系	強み	弱み	備考
外部環境	グリーン推進	・環境志向の高まり(従来の化学推進系に比べて取り扱いが容易)	・水を推進系とする方式、1液化学推進系との競合 ・推進系の追加搭載による価格上昇	小型衛星向け
	水を推進系とする方式	・環境志向の高まり(従来の化学推進系に比べて取り扱いが容易、推進剤の入手性もよい)	・推進系の追加搭載による価格上昇	CubeSat向け
	ホールスラスタシステム	・ペイロード搭載質量の増加により高性能な電気推進システムの採用増加 ・衛星側ΔV増加傾向もあり、電気推進システムの採用増加	・海外競合メーカーの高品質。低コスト化(露Fackel, 仏Safran, 米Astra他実績が豊富な海外競合が多数、 新興のPulsar Fusion等の出現) ・希ガス(Xe)の入手性悪化 (海外メーカーは代替材料(Kr,Ar)への対応を進めている。)	小型衛星～大型衛星向け
	イオンエンジンシステム	・ペイロード搭載質量の増加により高性能な電気推進システムの採用増加 ・衛星側ΔV増加傾向もあり、電気推進システムの採用増加	・低価格電気推進(ホールスラスタシステム等)の台頭 ・希ガス(Xe)の入手性悪化	惑星探査、大型静止衛星
	その他の推進系	VLEO・シスルナ・惑星間等の新たな推進系に対するニーズの高まり。	欧米は核反応を活用した推進系の開発を進めている。	

3.1.5 衛星推進システム 開発技術項目リスト

23-002-R-013

本年度のアップデートを受けて、昨年度の開発技術項目リストより赤字部分を更新。

大分類	技術項目
推進系	<ul style="list-style-type: none">➤ 電気推進：軽量、低コスト化、代替推薬への対応➤ 化学推進：低毒性推進、水推進➤ 推薬タンク：Ti（タンク素材）の入手性悪化に対する代替品開発➤ 電気/化学の長所を使い分けられるマルチモード推進系➤ VLEO向けエアブリージング推進系➤ シスルナ・惑星間等で有力な技術と想定されている核エネルギーを活用した推進系 に関しては、日本として開発する必要がないか検討の必要あり。

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.2.1 デジタル開発技術調査

3.2.2 強み・弱み分析

3.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

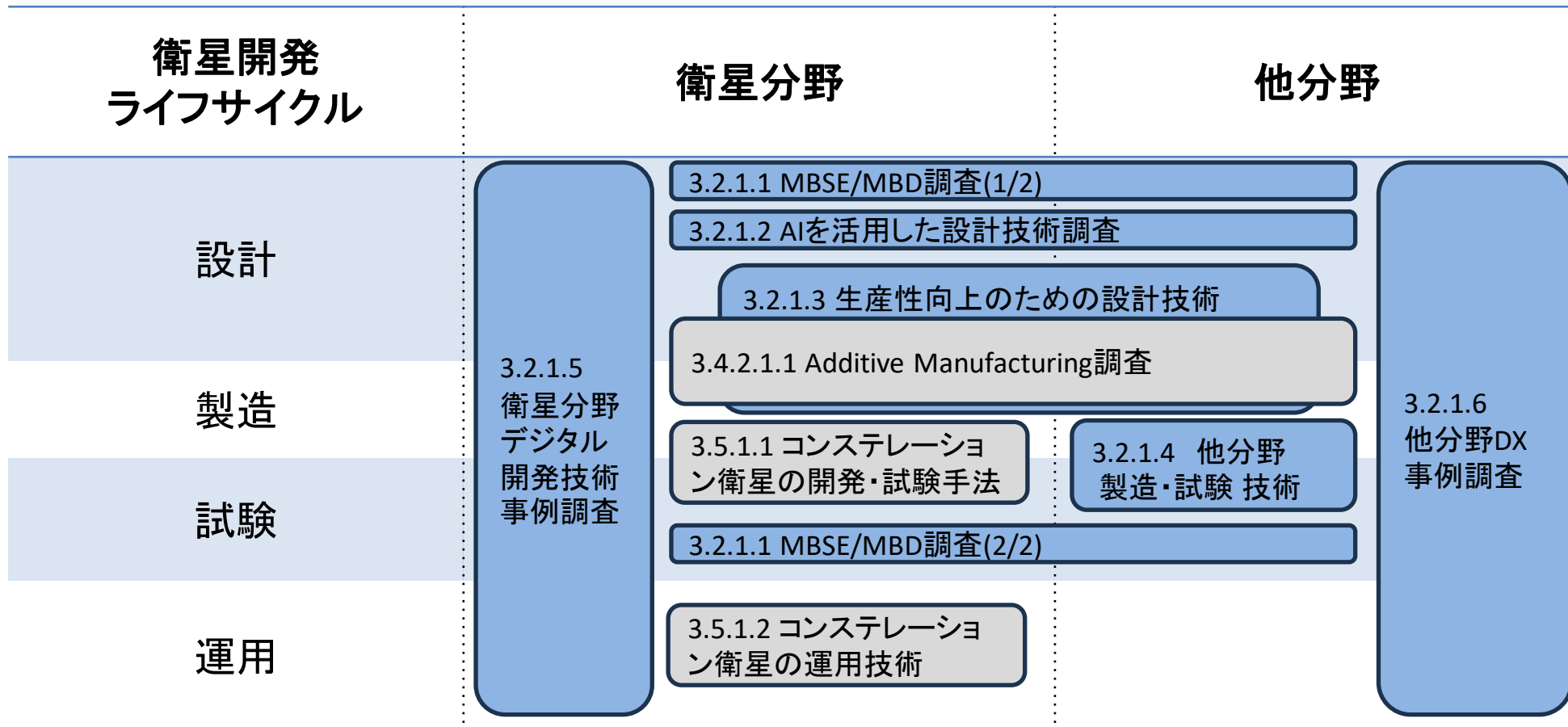
3.5 コンステレーション構築等に必要な技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

3.2.1 デジタル開発技術調査

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。



デジタル開発技術を含めて該当項番にて調査

3.2.1 デジタル開発技術調査 まとめ

生成AIを活用した技術等、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がより重要となる。

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。

3.2.1 デジタル開発技術調査 まとめ

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。

- 3 調査内容詳細
 - 3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析
 - 3.2 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
 - 3.2.1 デジタル開発技術調査
 - 3.2.1.1 MBSE/MBD調査
 - 3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査
 - 3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査
 - 3.2.1.4 他分野 製造・試験技術調査
 - 3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査
 - 3.2.1.6 他分野DX事例調査
 - 3.2.2 強み・弱み分析
 - 3.2.3 戦略・研究開発計画の検討
 - 3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析
 - 3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析
 - 3.5 コンステレーション構築等に必要な技術
 - 3.6 定常・動向分析
 - 3.7 適時調査・事実確認

3.2.1.1 MBSE/MBD調査

- ① MBSE/MBD概要
- ① まとめ
- ② 民生分野MBSE
- ③ 衛星分野MBSE
- ④ MBD

① MBSE/MBD概要

MBSEの特性とは？

横断的な適用による効果が高く、複雑なシステム、サプライチェーン多様化等の実現に期待
→ 文書からモデルへの「デジタル化」だけでなく「トランスフォーメーション」も考慮が必要か

ASTEC見解

【SE : Systems Engineering】

システム思考により「真の問題」を解決するアプローチ(「改善」からの変革) → 複雑なシステムの実現

- 複雑なシステムをライフサイクルにわたっていかに設計、統合、管理するかに焦点をあてた知識体系であり、システム思考の原則を利用する。最小限のコストと時間で高品質のアウトプットを達成するための反復的な活動(改善)に焦点を当てている製造プロセスとは異なり、発見的なプロセスとして、解決すべき真の問題を特定し、リスク発生確率、および影響の大きさ考慮できるプロセスにより、真の問題を解決するための複雑なシステムの開発を実現する。

*1:International Council on Systems Engineering

【MBSE : Model-Based Systems Engineering】

SEにおける情報伝達手段を文書からモデルへ → 再利用可能で効率化+(実証・検証機会の増加)

- INCOSE^{*1}によるとMBSEは、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です。すなわち、ドキュメントベースの情報伝達ではなく、情報伝達の主要な手段としてのモデル作成と活用に焦点を当てたSEへの技術的アプローチである。
- ESA Technology Strategy : モデルは開発、再利用が可能で、文書からモデルへの移行により、宇宙プロジェクトはより効率的なものになる。これは「完全なデジタル化とMBSEへの移行は、軌道上での実証と検証の機会を増大させる重要なイネーブラとなる」と考えている。(複雑化により文書だけでは管理が難しい → システムのアーキテクチャ設計、構築戦略を定義し、サブシステムを横断的に統合、システム全体の検証と妥当性確認が必要であり、有益なソフトウェアツールを使うための基礎となりうる)

【MBD : Model-Based Design】 → SEとは目的が異なる ←

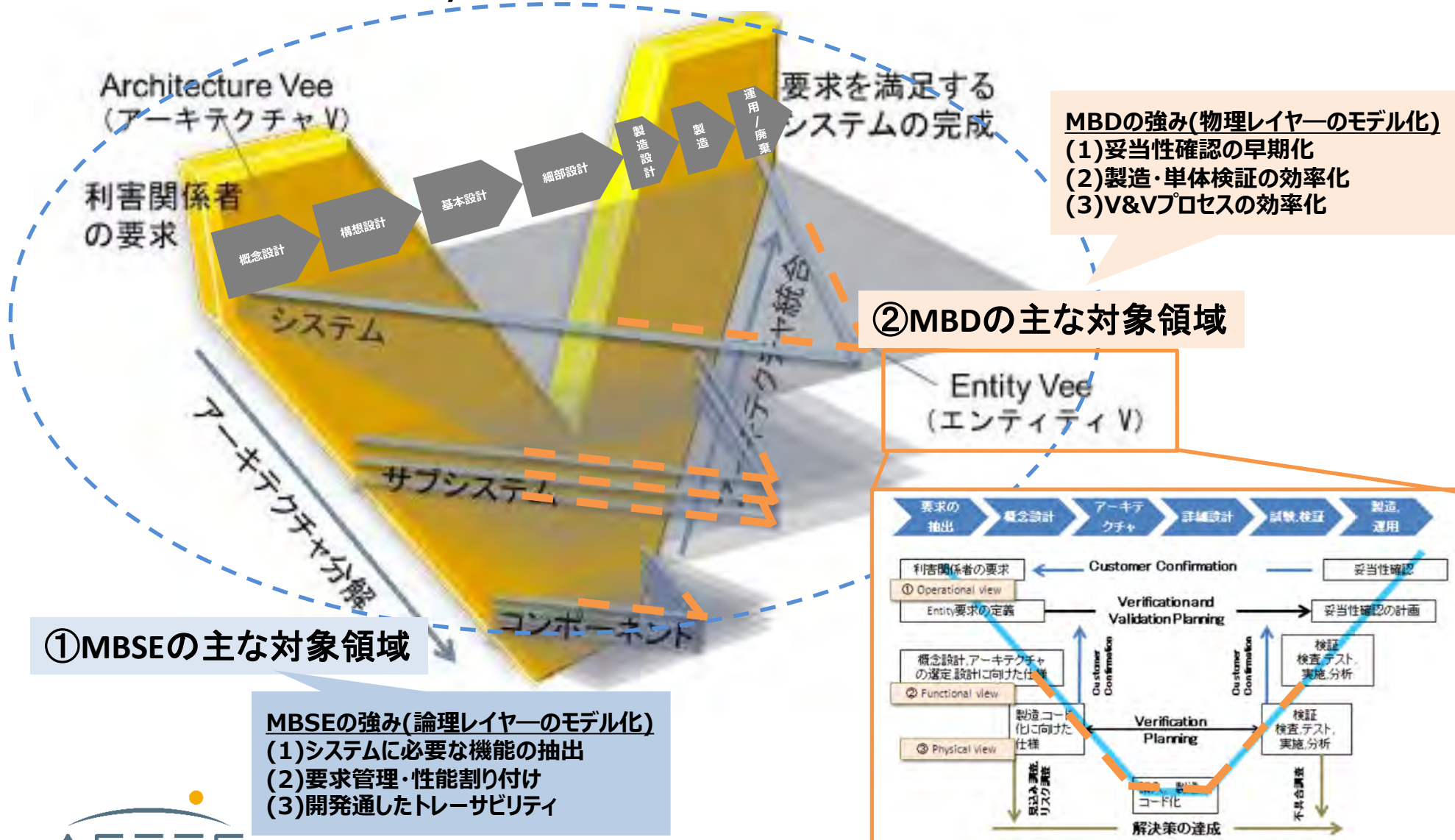
モデルを用いたシミュレーション → 迅速なプロトタイピングや検証・妥当性確認

- MBDは、開発サイクル(V字モデル)を支援するために、複雑な構造や膨大なソフトウェアコードを使用するのではなく、ビルディングブロックを前提とした高度な機能特性を持つモデルを定義し、このモデルを用いたシミュレーションにより、迅速なプロトタイピング、ソフトウェアのテスト、および検証を行うことである。

親和性高い

① MBSE/MBD概要

◆ 開発プロセスにおけるMBSE/MBDの主な対象範囲



① MBSEの主な対象領域

MBSEの強み(論理レイヤーのモデル化)
 (1) システムに必要な機能の抽出
 (2) 要求管理・性能割り付け
 (3) 開発通したトレーサビリティ

② MBDの主な対象領域

MBDの強み(物理レイヤーのモデル化)
 (1) 妥当性確認の早期化
 (2) 製造・単体検証の効率化
 (3) V&Vプロセスの効率化



① まとめ

- 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。FPGA向けのAutoCodingのQAについては今後の課題か。

民生分野

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のか」。

【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。
- ✓ AutoCoding技術による更なる効率化

【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MB4SE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
- ✓ AutoCodingに対するQA確保等を目的に、ESAではHandBook制定を進めている。

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】

- ✓ 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。

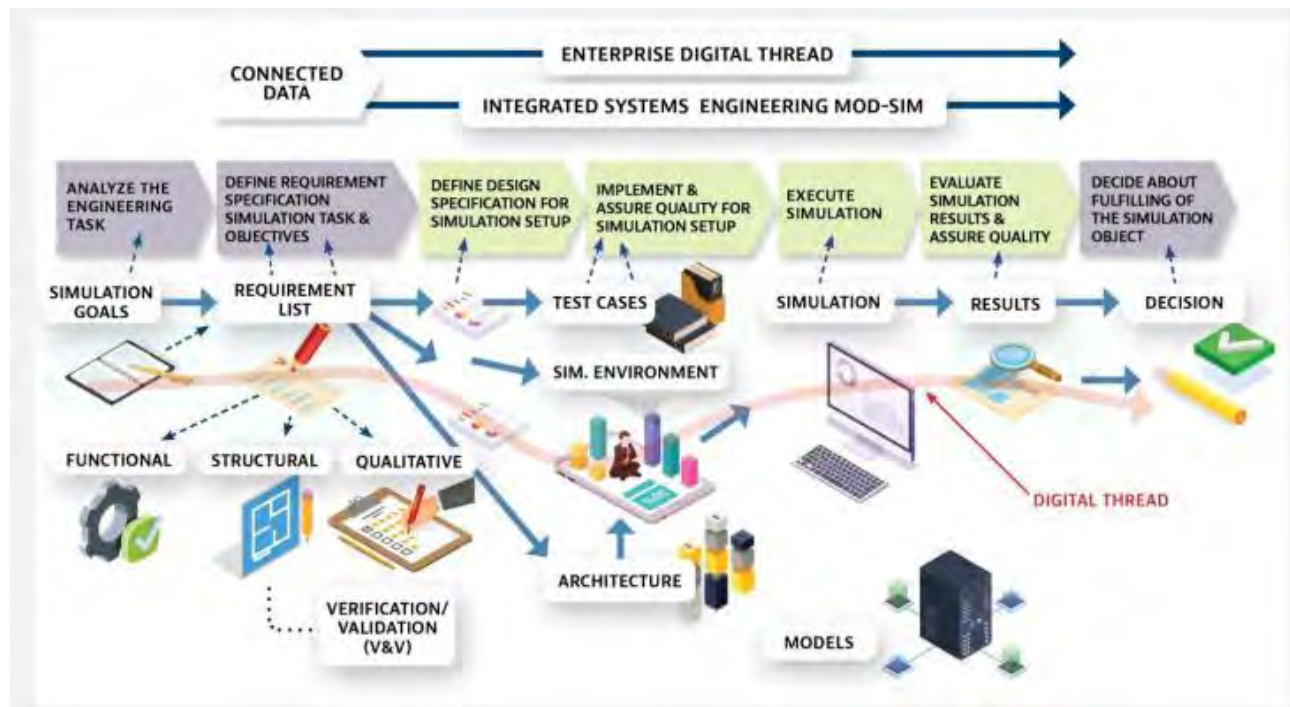
【MBD】

- ✓ 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。
- ✓ AutoCodingによる効率化も採用報告例などあり。SWに関しては開発標準も制定。FPGA向けのQA方法等は各社の取り組みに依存している状況。

②民生分野MBSE 世界：INCOSEの動向

23-002-R-013

- INCOSE(The International Council On Systems Engineering)は、1990年に設立されたシステムエンジニアリングの非営利な国際組織。18,000人のメンバー、120の企業メンバとシステムエンジニアリング関連の組織では世界最大規模。
- 2014年に発表したINCOSE Vision 2025にて10年後のVisionを以下の通り掲げた。
 - ・「2025年までに全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」と予想
 - ・「今日の大きな課題は「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」
- 2022年に発表したINCOSE Vision 2035においても、モデルベースはデジタルツイン等の活用によりさらに効率的なシステム設計が可能となる主流な手法になると予想されている。



②民生分野MBSE 日本：自動車業界の動向

➤ 日本の自動車業界ではJAMBE/JMAABの二つの業界コンソーシアムがMBSE/MBDのガイドラインの制定や標準モデルの作成等を通じて、普及をすすめている。

JAMBE

- JAMBE:Japan Automotive Model-Based Engineering center
- 2015年より、経済産業省主導で活動していた「自動車産業におけるモデル利用の在り方に関する研究会」の活動を引き継ぎ2021年7月に任意団体として発足。2023年4月より一般社団法人化。
- 参加企業は完成車メーカーに加えて、Tier1/Tier2メーカー。
- 事業は【MBD普及促進】、【モデル流通促進】、【共通課題解決領域の拡大】でありMBSE/MBDに関する各種ガイドラインの制定や、ジェネリックモデルの配布等を実施している。

JMAAB

- JMAAB:Japan MBD Automotive Advisory Board
- 2001年に設立されたMBDの推進活動を行っているMATLABユーザー会。
- MATLABツールベンダーであるMathworks社が事務局となり、完成車メーカー、Tier1/Tier2メーカー25社をコアメンバーとして活動している。
- Mathworks社のツールSystem Composer/MATLAB/Simlink を活用したMBSE/MBDの普及活動を実施しており、同ツールに絞った形で各種ガイドライン、モデルの標準化等を進めている。

No	カテゴリ Category	対象1 Target1	対象2 Target2	種類 Type	名称 Title	作成機関 Authoring agency	作成年月 Year	DL
20001	モデル接続/ガイドライン	車両	車両全体	ガイドライン	平成28年度の取組（経済産業省プレスリリースにて公開） https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10941376/www.meti.go.jp/press/2016/03/20170331010/20170331010.html	経済産業省MBD研究会	2018/03	DL
20002	モデル接続/ガイドライン	車両	車両全体	ガイドライン	自動車開発におけるプラントモデル/ガイドライン※異語あり	経産省MBD研究会 ガイドライン編纂委員会	2021/03	DL DL
20003	モデル接続/ガイドライン	システム	エンジン	ガイドライン	エンジンシステムにおけるプラントモデル/ガイドライン（P-D形式）	ACE	2021/03	DL
20004	モデル接続/ガイドライン	システム	トランスミッション	ガイドライン	動力伝達システムにおけるプラントモデル/ガイドライン	TRAM	2021/03	DL
20005	モデル接続/ガイドライン	システム	電動化	ガイドライン	EV・電動化車両の電マナシステムにおけるプラントモデル/ガイドライン	デジタルソルブズ	2021/03	DL
20007	ジェネリックモデル（JFガイドライン準拠モデル）	車両	燃費	モデル（Matlab Simulink） 説明書	(1) シリーズハイブリッド自動車燃費モデル、Simulink及び説明書	ガイドライン編纂委員会	2021/03	DL DL

	WG/ws/委員会	形態	幹事	活動年度	カテゴリ
43	MBD管理ツールWS	WS	トヨタ自動車株式会社	2011	MATLABプロダクト改善
44	ECU H/W Modeling WS	WS	本田技研	2011	コントローラモデリング
45	ETSS-JMAABフォローアップWS	WS	三菱電機	2011	教育
46	Plant Modeling WS Part2	WS	トヨタ自動車株式会社	2011	制御対象モデリング
47,48	メトリクスWG	WG	ジヤコ株式会社	2011-2013	MBDプロセス改善
49	Plant Modeling WS Part3	WS	トヨタ自動車株式会社	2012	制御対象モデリング
50,55,61	ETSS-JMAABフォローアップWG	WG	三菱電機株式会社	2012-2014	教育
51,56,62	ガイドラインWG	WG	アイシン・エイ・ダブリュ株式会社	2012-2014	コントローラモデリング
52,57,63	車両全体モデル規格化WS	WS	株式会社ミツバ	2012-2014	制御対象モデリング
53	モデルファイル権限コントロールWS	WS	日産自動車株式会社	2012	MBDビジネスモデル
54,58,64	いまさら聞けないMBD委員会	委員会	ヤマハ発動機株式会社	2012-2014	教育
59,65	Plant Modeling WS Part4	WS	トヨタテクニカルディベロップメント株式会社	2013-2014	制御対象モデリング
60,66	SLSF技能レベル作成WG	WG	アイシン・エイ・ダブリュ株式会社	2013-2014	教育
67	可読性分析WG	WG	三菱自動車株式会社	2014	MBDプロセス改善
68	成果物公開見直し委員会	委員会	日立オートモティブシステムズ株式会社	2014	啓蒙
69	MBD中部セミナー企画委員会	委員会	アイシン・エイ・ダブリュ株式会社	2014	啓蒙



JAMBE制定ガイドライン例
出典：[JAMBE](#)

JMAAB活動WG例
出典：[JMAAB](#)

② 民生分野MBSE 日本：航空機業界の動向

23-002-R-013

- 日本の航空機業界では業界コンソーシアムとなるMBACがMBSE/MBDのガイドラインの制定や標準モデルの作成等を通じて、普及をすすめている。

MBAC

- MBAC: Mode Based Aviation development Consortium
- 2020年設立、自動車のJMAABと同様にMathwork社が事務局となり、主にSystem Composer/ MATLAB/ Simlink等のツールに絞った形でMBSE/MBDの各種ガイドライン、モデルの標準化を進めている。
- メンバ企業は、2023年5月時点でコアメンバ企業(IHI, SUBARU, 東京計器, 日本航空電子工業, 三菱重工業)を含む13社(団体)が参加。
- コアメンバに機体メーカーだけでなく、装備品メーカーも参加しているのが特徴。
- MBAC設立の主要目的は以下の二点
 - ① 個社ではなく、日本として欧米との競争に打ち勝つ
 - ② 益々複雑化するシステムの設計効率・品質を向上させる

		～2021年度	2022年度	2023年度
プロセス検討	MBSE推進WG		→	課題抽出
	開発プロセス課題検討WG			→
標準化	企業間モデル流通WG	→		課題抽出
	レポート標準化WG			→
ツールのスキルアップ	モデル作成規約WG	→		新規
	標準化調査WG			→
ツールのスキルアップ	MBD/ACG社内普及WG		→	課題抽出
	DO-331 ^(*) ・モデル検証WG			→

③衛星分野 MBSE 世界(米国) : NASAの取り組み

23-002-R-013

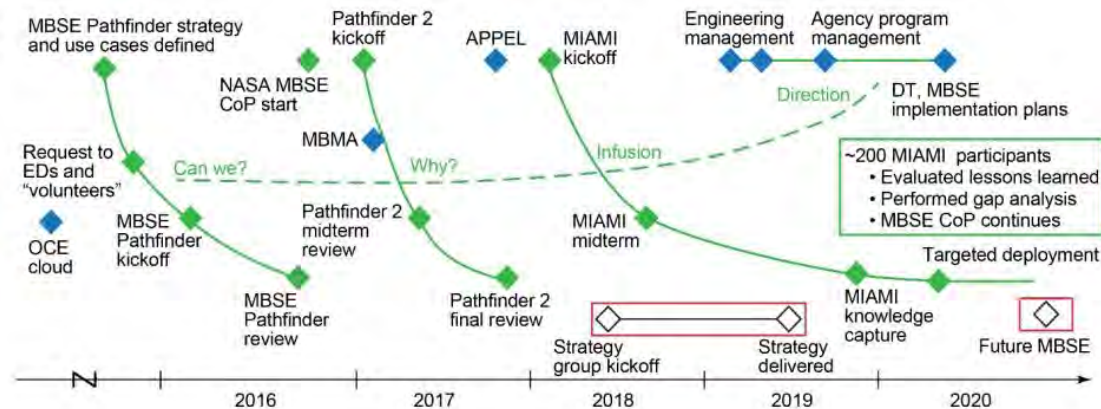
- MIAMI(元MBSE Pathfinder) : 2016-2020年に実施したNASAのMBSE推進活動
- 上記取り組みのL&Lを元に2029年に向けた将来ビジョンおよび戦略を“Future Model-based Systems Engineering Vision and Strategy Bridge”2021年に策定

MIAMI

- MIAMI:MBSE Infusion And Modernization Initiative
- 2016年にMBSE Pathfinderとして開始し、2020年の5年間で200名以上参加したMBSE推進活動
- 5年間の活動の中で主目的が“Can We?” -> “Why?” -> “Infusion” and “Direction”に進化
- 活動の主要L&Lは以下の通り。
 - 目的をもって、問題を解決するために実行する。
 - ゆっくり着実に物事を進める。
 - 大胆で献身的なリーダーを見つけ、彼らに権限と資源を与える。
 - 新しい考え方と新しい方法で問題を見る。
 - MBSEに関わる全ての関係者とMBSEに対応した関係を構築 or 再構築する必要がある。

将来ビジョン

- NASAが2029年に前例のないミッションを遂行するためのNASAのシステムエンジニア、及び、デジタルマシンのあるべき姿、及び、そこに至るための戦略について記載。



NASAのMBSE取り組みスケジュール

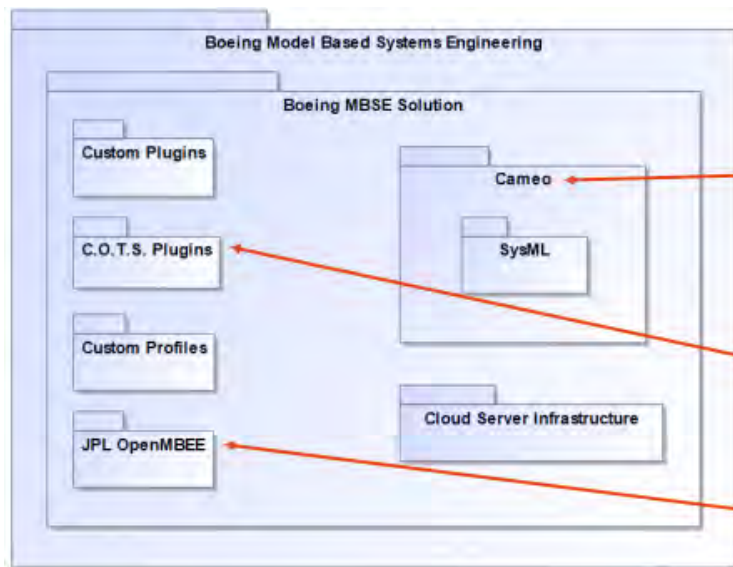
出典: [Future Model-based Systems Engineering Vision and Strategy Bridge](#)

③衛星分野 MBSE 世界(米国) : Boeingの取り組み

- 2005年より、MBSEツールとプロセス開発の取り組みをスタートさせた。
- 2016年より、Boeing 2ndCentury Enterprise Systems(2CES)なるBoeing全体のDXの取り組みの一環として、MBSEを全社展開。

BoeingのMBSE開発の主な特徴は以下の通り。

- フレームワークはCameo Enterprise Architectureをベースとしつつ、自社のプロセスにあうよう追加部分を開発。
- MBSE開発チームは以下の2チーム体制 (実際のプロジェクト以外にMBSEプロセスの専属開発チームがいる)
 - ①エンジニアリングチーム: 能力定義、リリース、テスト、プログラム実施主体へのサポート、トレーニングを実施
 - ②ITチーム: ツールの開発・整備、MBSE物理インフラの管理を実施
- MBSE開発チームの活動はアジャイル開発をベースに開発を実施。



Boeing MBSE Schematic

The foundation of the Boeing MBSE Solution is Cameo Enterprise Architecture

But we also conduct trade studies to find the best additions to Cameo that meet our needs



③衛星分野 MBSE 世界(欧州) : ESAの取り組み

23-002-R-013

- ESAでは“ESA Technology Strategy”にて、MBSEを軌道上実証・検証の機会増大のための主要イネーブラーとし、普及に取り組んでいる。
- ESAは、産業界共同の導入・標準化を進めるワーキンググループの運営から、先端的技術への資金提供、および、実プロジェクトへの適用と幅広い取り組みを行っている。

標準化

- MB4SE は、MBSEのプロセスやツールに関する調整を促進するための官民共同のプラットフォーム。
- 宇宙機関(ESA, CNES, DLA等)と衛星プライム(Airbus, TAS, OHB)等からなるMB4SEアドバイザリーグループが議論を主導する形で、2021年より活動を行っている。
- サブワーキングとなるOSMoSE(Overall Semantic Modelling for System Engineering)にて、宇宙機器用のOntology等の標準化を進めている。

先端技術 開発

- ESAの萌芽的技術を募集するプラットフォーム OSIP(Open Space Innovation Platform) にて、MBSE関連技術のキャンペーンを実施。
- 計24件のプロジェクトに資金提供が行われた。

実プロジェクト への適用

- ESAでは、Euclid, Plato, Ariel, ClearSpace-1, TRUTHS, the European Large Logistics Lander, Mars Sample Return and Galileo 等複数のミッションでMBSEを適用(次ページ参照)。
- 特にEuclidは2012年より開発が行われており、ESAの科学ミッションでのMBSEのテンプレートとなっている。

出典: [ESA](#)

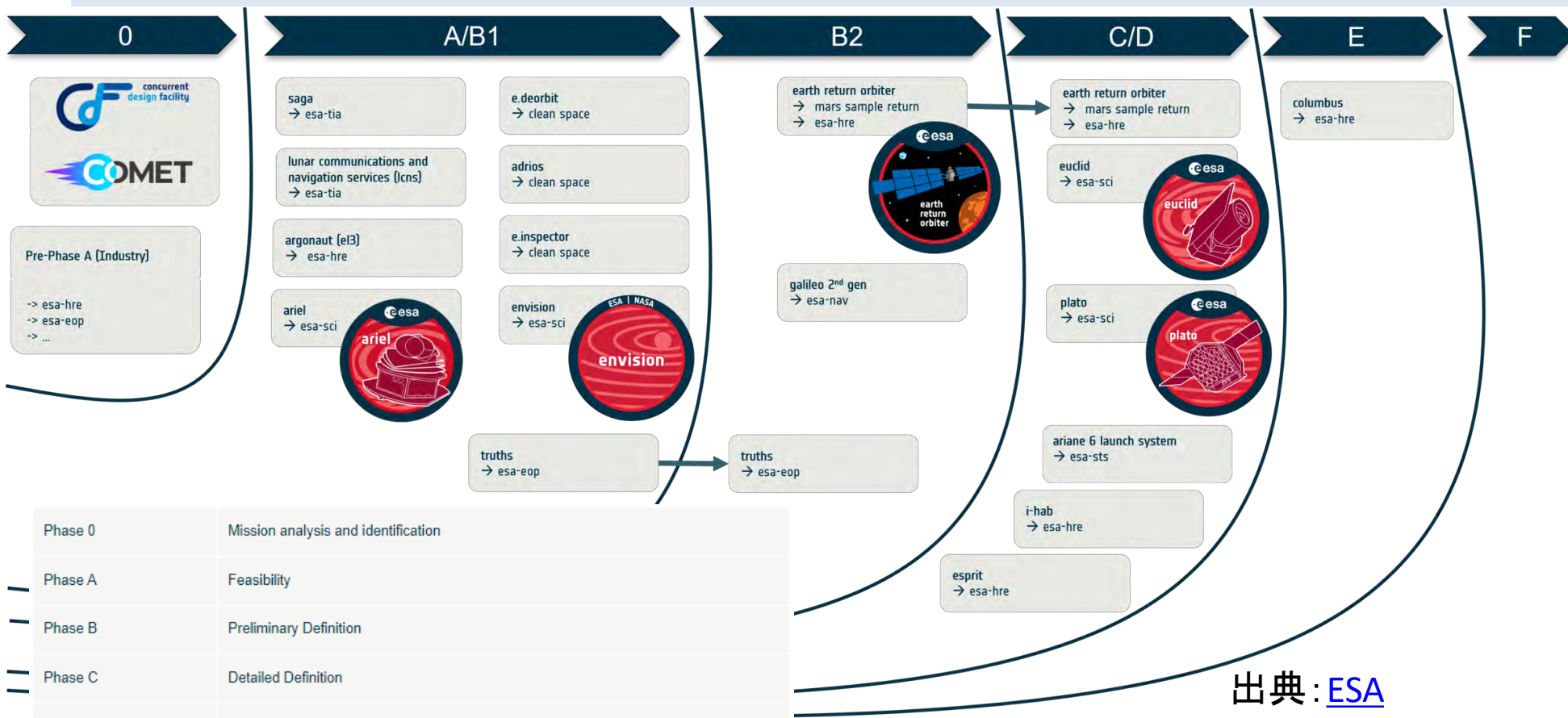
OSIPにて資金提供されたMBSE関連プロジェクト例

- MBSE2DL: MBSEデータレイクの構築と分析プラットフォームの開発
- MBSE4AI: 人工知能を用いたMBSEの自動化と最適化
- MBSE4CPS: サイバーフィジカルシステムのためのMBSEフレームワークの開発
- MBSE4DM: データマイニングを用いたMBSEの品質評価と改善
- MBSE4EO: 地球観測システムのためのMBSE手法の開発
- MBSE4ML: 機械学習を用いたMBSEモデルの生成と検証



③衛星分野 MBSE 世界(欧州) : ESAの取り組み

➤ ESAでのミッションへのMBSE適用状況：2012年より開発を開始したEuclidがパイロットミッションと呼ばれているが、本開発が完了後に他PJに展開という形ではなく、完了前から他PJでの適用が始まっている。各フェーズでの有効性が確認できれば、そのフェーズには適用する等の運用が考えられる。



出典: [ESA](http://esa.eu)

③衛星分野 MBSE 世界(欧州) : Airbusの取り組み

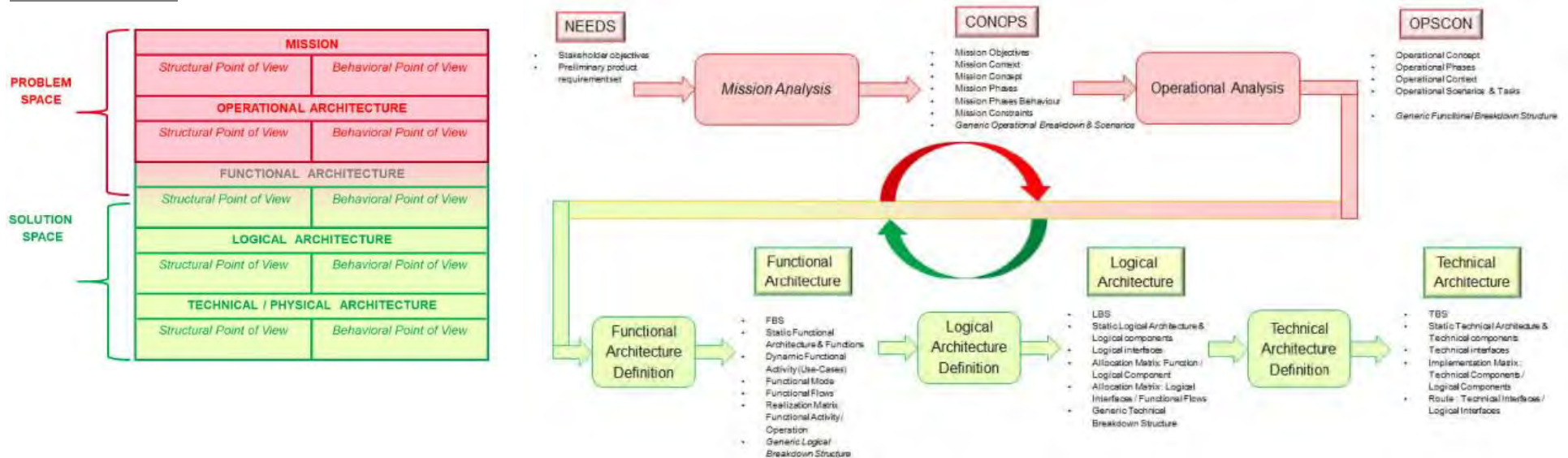
- MOFLT: Mission & Operational Analysis, Functional, Logical, and Technical Architectures に着目したMBSEのフレームワークを活用
- 数多くのESAミッションにてMBSEは適用済み

適用ミッション例

- OPS - SAT: ESAのオープンソースナノサテライトミッション。MBSEにてリバースエンジニアリングを実施。
- EnVision: ESAの金星探査ミッション。ミッション、システムアーキテクチャ設計にMBSEを活用。
- MSR-ERO : NASA/ESA共同での火星からのサンプルリターンミッション。

MSR-EROでのL&L

- MBSEの効率を最大化するためには、単一のモデルを上流から下流まで使えるようにすることが重要。
- システム初期検討からMBSEを使用することが重要。



MOFLT概要

出典: [MB4SE2021](#)

③衛星分野 MBSE 世界(欧州) : OHBの取り組み

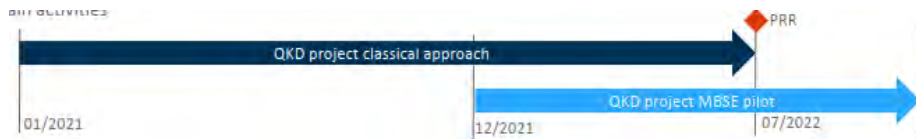
- OHBはAirbus/TAS等と比べて、MBSEへの取り組みは後発であったが、実プロジェクトへの適用を開始。
- 最初のプロジェクトでは従来手法とMBSEを独立に実施。コスト面では当然悪化するものの、初めて適用するPJのリスク低減、及び、MBSEの効果の測定という点ではメリットがあり、日本でも一つの手法として検討価値あり。

適用 ミッション

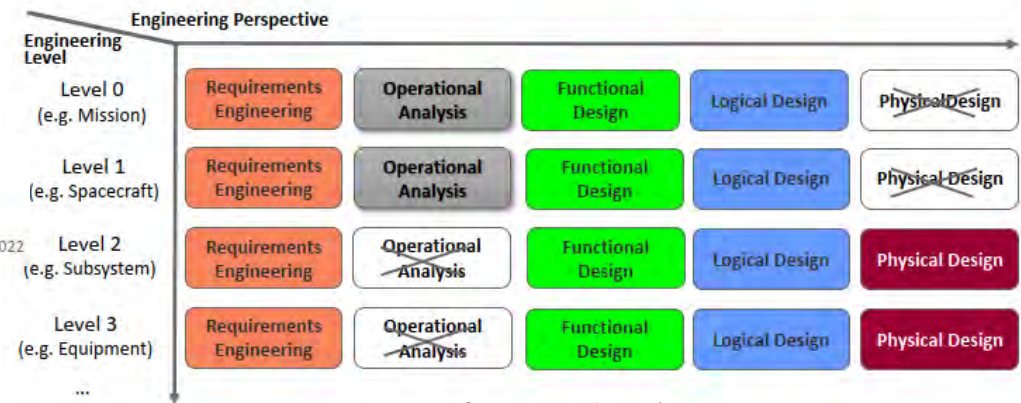
- QKD PILOT PROJECTの初期検討フェーズに適用
- 従来ベースのシステム設計とMBSEによるシステム設計を並行・独立に実施
- MBSEとしては、Requirement/Operation/Function/Logic/Physic解析をミッション、衛星、サブシステム、コンポーネントのレベルで実施。

L&L

- MBSEを使用することで、各項目についてより詳細に検討を行えた結果、従来手法では識別できなかった要求項目を識別することができた。(複雑なシステムの検討にはMBSEはやはり有効)
- MBSEを実施するためには、設計者に教育が必要(OHBでは1週間程度の教育が必要であった)
- 従来手法とMBSEをHybridで実施することは重複も多く非効率であるため、試行という形でなければプロジェクト毎に採用・非採用を明確に決めて進めるのがよい。



適用PJスケジュール



適用メソドロジー



出典: [MB4SE 2022](#)

③衛星分野 MBSE 世界(欧州) : MBSE 2023

- ESA主催のMBSEに関するワークショップ MBSE2023は今回で第4回目の開催。ADCSS2023の一部として開催された。
- MBSE 2023への参加者は130人。今回はワークショップには参加せず、後日公開された資料から実施内容の調査を実施。
- 今年度のテーマは“reducing the gap between model-based systems engineering and domain-specific model-based approaches” (システム、各サブシステム等の各ドメインでのモデル間のギャップにESAも課題感を感じている)
- 今年度は上記テーマに沿った5つの議題に関してWorld Cafe形式でワークショップが実施された。

議題	内容	ワークショップでの主な意見
Integration of software in model-based systems engineering	SWの世界でのMBSE(ここではMBSwE)と人工衛星システム等のMBSE(MBSyE)のギャップを埋めるための意見交換。	MBSwE, MBSyE双方項のコミュニケーションが重要。DevOps等のSW技術の取込みも重要。
Digital continuity between Systems Engineering and on-board software	MBSEをオンボードSW開発の効率化につなげるためにはどのようにすればよいのかについて意見交換。	カスタマイズされたビュー／意味論的レビュー／尋問／会話型AIの使用／長期アクセス等が重要
Model-based engineering data hub architecture: centralised versus decentralized – what are the pros and cons? Are there alternatives?	様々なドメインで活用可能なモデルのデータハブを実現することは可能か、仮にあった場合どのようなメリットがあるかに関して、意見交換。	データハブの実現には、構造的なオントロジーの定義が重要。モデルの不確定性、不完全性、制約等をどのように取り扱うのかの観点も必要。
SysML version 2, is it the catalyst to improve digital engineering?	SysML 2.0に関して、ユーザ/ツールベンダー/コンサル・学术界それぞれの観点からのSWOTに関して意見交換。	<ul style="list-style-type: none"> ・採用に向けては慎重な戦略が必要。 ・一方で恐れすぎてもいけない。 ・移行に対するガイドライン、トレーニングが必要。
Can artificial intelligence and machine learning help to link data across domains?	複数のドメインのモデルをリンクさせていく際に、従来手作業が必要であった部分にAI/MLを活用することは有効か？	モデル間のリンクについては共通の理解はなく、多くの問題はあるが、AIは必ずその実現に有効。

③衛星分野 MBSE(日本) : JAXAの取り組み

- 衛星DX研究会 テーマA “デジタルモデルによる組織間インタフェースの改善” にて、衛星メーカー含めてMBSEに関するガイドライン制定、インタフェースの標準化等を目標にMBSE普及活動を推進
- 革新的衛星技術実証3/4号機の小型実証衛星3/4号機等パイロットプログラムにてMBSE実証を進めている。

衛星DX研究会 テーマA

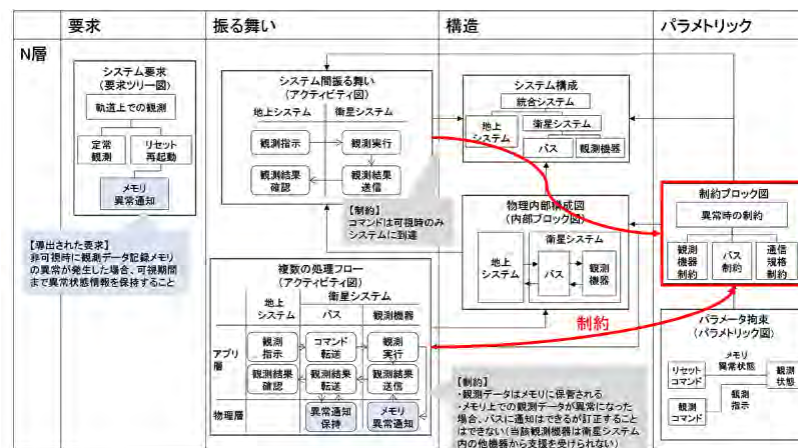
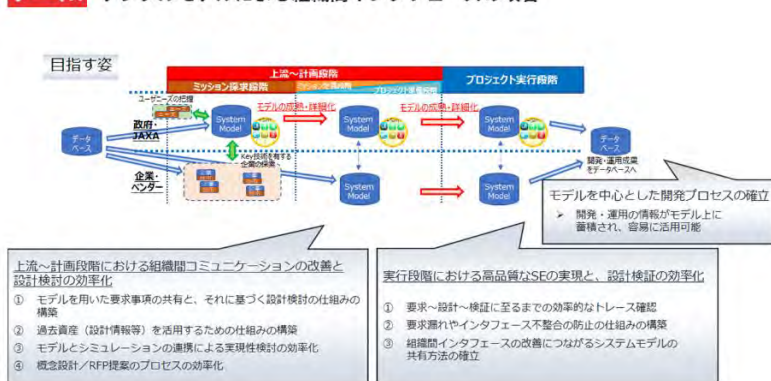
以下を目的・目標とし、日本の衛星メーカー・サービス事業者と共に共同研究を実施中。

- モデルの一元管理方と、取り扱うモデルのイメージを合わせる。
- それぞれのありたい姿と実現を阻むハードルへの解決方法を議論し、以下に取り組んでいる。
 - モデル構築時のガイドラインの制定、インタフェースの標準化
 - モデル開示範囲の取り決め(必要な情報の共有⇔ノウハウ流出防止の観点)
 - モデル作成・共有のためのツールのデータベース化(+選定指針)

パイロットプログラム 実証

- 革新的衛星技術実証3号機の小型実証衛星3号機
開発企業と共同でSysMLを使用したMBSE実証に取り組み。従来の自然言語記述ベースの開発と並行して、モデル化を実践。
- 技術試験衛星9号機
ホールスラスト周辺のFailure Mode AnalysisにMBSEを適用。

テーマA デジタルモデルによる組織間インタフェースの改善



衛星DX研究会テーマAの目指す姿

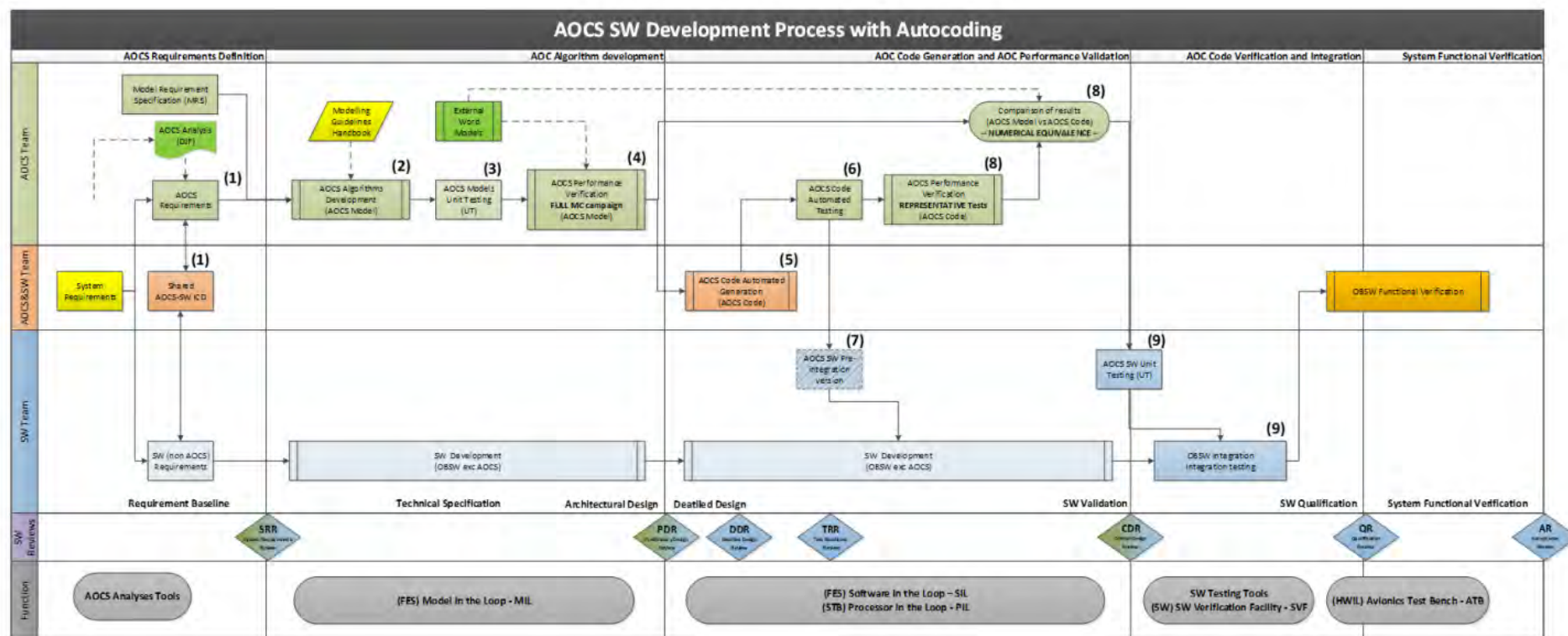
出典: JAXA

革新3号機モデリング例

出典: JAXA

④ MBD 欧州衛星分野での取り組み例

- ESAが進める標準化への取り組みSAVOIR(Space Avionics Open Interface Architecture)内のワーキンググループの一つ、AutoCoding Working Groupにて、AutoCodingを用いた開発の標準化・QA確保のため、HandBook制定を実施している。
- 2部構成で第一編は開発検証フローの定義等一般的な手法について記載。
- 第2編は、MathWorks社のツールに特化して、モデルの定義方法のガイドライン等を記載



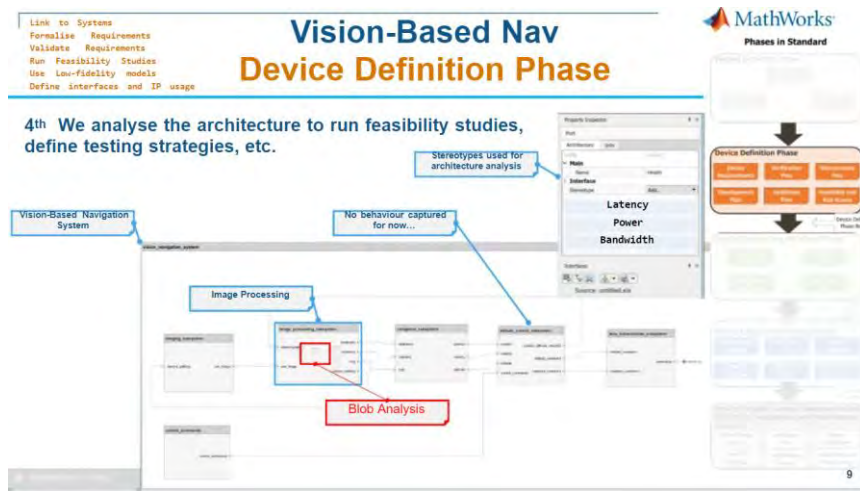
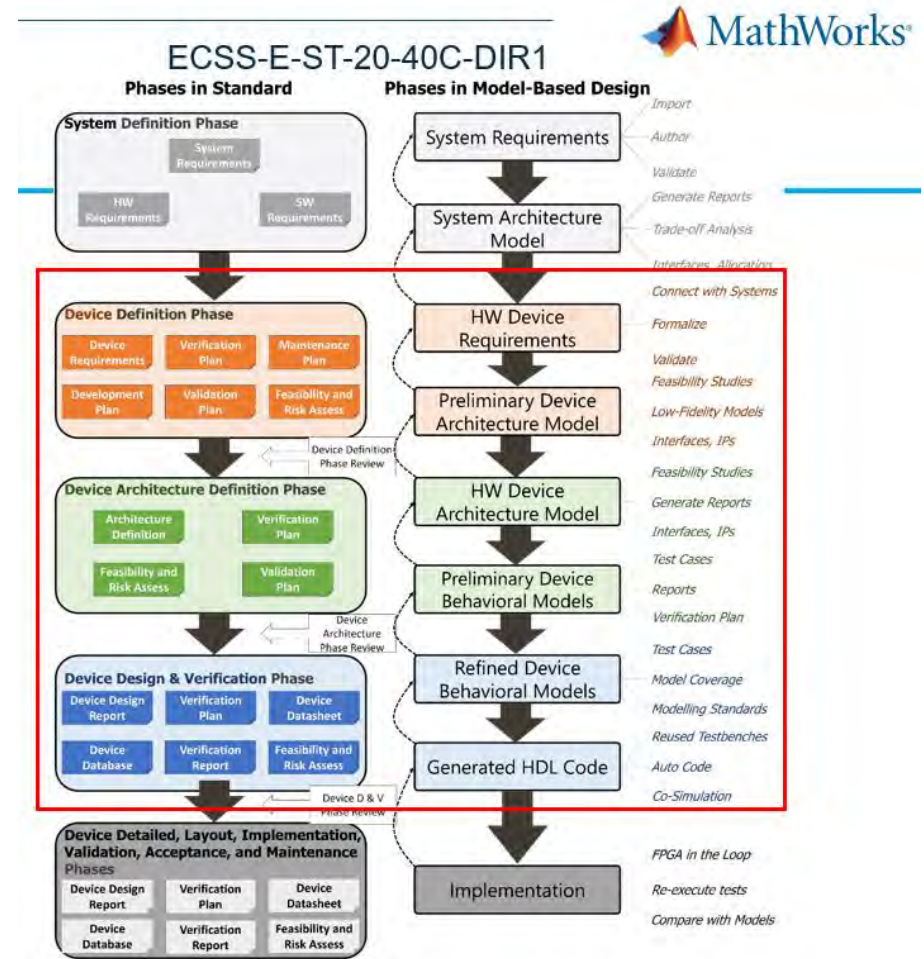
ハンドブックに定義されたAOCS SWの開発検証フロー

出典: [15th ADCSS](#)

④ MBD 欧州衛星分野での取り組み例

- ESAの標準化の動きに対応したツールベンダーの活動も見受けられる。
- 標準、ツールベンダー、ユーザーの連携した活動が普及には必要。

- EDHPC2023にてMBDツールのデファクトスタンダードである Matlab/SimulinkのベンダーであるMathWorksが、ESAの ASIC/FPGA開発標準であるECSS-E-ST-20-40C DIR1に従った、Matlab/Simulinkを活用したMBD開発フロー例を報告
- 標準にて規定された各フェーズでのアクティビティとそれに対応した MBD設計の中での作業例をツールベンダーがリファレンスとして示すことで、ユーザーの規格活用が進み、ユーザーの設計品質向上につながると推察される。



● 各フェーズでのアクティビティ概要

全体フローの整理

④ MBD MATLAB EXPO 2023 JAPAN調査結果

◆ MATLAB2023の事例：衛星は他業界に比して対象領域も広く先進的な取り組みが見受けられる
⇒ 日本の衛星：「業界標準」と「適用範囲拡大」による効果の向上が重要か

MatlabExpo2023における事例

課題

取り組み

パワーエレクトロニクス
制御
(東芝インフラシステムズ株式会社)

- 検証作業が開発後段に集中
→ 手戻りリスクが高くなっている
- 同一ではない類似製品の開発が多く、低コストで多数導入できることが条件

- 汎用ボード+SimulinkによるSWパッケージの活用(設計者が関心領域に集中)
→ 「(3)V&Vプロセスの効率化」に主眼

自動車
(マツダ株式会社)
(名古屋大学/パーソルクロステクノロジー株式会社)

- 評価プラットフォームを技術アイデア毎に開発
- 技術評価に用いるモデル再現度のばらつき大
→ 信頼度の低下、工数の増加
- AUTOSAR AP(プラットフォーム)の導入コストが高く日本において広く普及するに至っていない
→ SWにおける移植性や柔軟性の低下

- 技術分野を横断した共通プラットフォームを開発(信頼度の高いモデルを共通利用)
→ 「(1)解析の確度を高める」に主眼
- Simulinkを用いたオートコードを試行/動作確認
→ 「(2)製造・単体検証の短縮」に主眼

衛星
(日本電気株式会社/NECスペーステクノロジー株式会社)

- 設計フェーズにおいて新規機能の計算負荷が簡易的にしか見積もれない
- モデルベースとソースコードベースの検証・解析が存在し製造プロセスを通じた品質管理の負荷大
→ 手戻りリスク増大、品質の低下
- デジタルとアナログが混在することで複雑性が増加、妥当性検証の負荷大
→ V&Vプロセス負荷の増大

- オートコーディングを開発プロセスに取り入れ、設計フェーズにおける確度の高い計算負荷見積りや製造に必要な文書(IF文書等)を削減
→ 「(1)解析の確度を高める」、
「(2)製造・単体検証の短縮」に主眼
- アナログ部をモデル化して妥当性確認を実施(Simscape Electrical)
→ 「(3)V&Vプロセスの効率化」に主眼

④ MBD MATLAB EXPO 2023 JAPAN調査結果

◆ 「標準プラットフォーム」・「教育/人材」による業界標準(協調領域)の形成に加え、「オートコーディング」等により設計と試験/妥当性確認を接続する技術が衛星業界のトレンド追従には必要ではないか

● MBDの強み

① 妥当性確認の早期化

② 製造・単体検証の効率化

③ V&Vプロセスの効率化

● 期待される技術/アクション

標準プラットフォーム

業界標準

- ✓ AUTOSARのように標準プラットフォームの体系化により移植性・柔軟性向上や解析の共通化が期待 (参考事例：[AUTOSAR](#), [JMAAB](#))

オートコーディング

適用範囲拡大

- ✓ 設計と試験を整合性を持って連携させるキー技術(ソースコードだけでなく図面との接続技術等も含む) (参考事例：[OHB](#), [TAS/Airbus](#)にて競争領域として独自の取り組みあり)

教育/人材

業界標準

適用範囲拡大

- ✓ 数多く存在するデジタル技術と妥当性検証プロセス(V&V)を連携させるためには多様な分野の専門家、および関連技術の習熟機会が必要 (参考事例：[V&V Seminar](#), [AICE](#))

衛星業界のトレンドを追従

複雑度の高い衛星システムの開発

*ミッション高度化やSoftware Defined化やAI/MLの影響

[補足]

複雑度の増加は、中大型衛星だけでなく、小型衛星においてもシンプル化による短期開発のトレンドからSoftware

Defined化による柔軟性向上、複雑度増加へのシフトは顕著

両立

Agile Philosophyな開発 (短期間でPDCAをまわし価値を高める)

[補足]

海外市場への対応を想定すると、引き続き変化の早いニーズに如何に早く適応できるエコシステムを構築できるかが重要

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.2.1 デジタル開発技術調査

3.2.1.1 MBSE/MBD調査

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

3.2.1.4 他分野 製造・試験技術調査

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査

3.2.1.6 他分野DX事例調査

3.2.2 強み・弱み分析

3.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査 : まとめ

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

AIを活用した設計技術例

LN	技術例	例	備考
1	AIによるソフトウェア設計支援	GitHub社 GitHub Copilot Microsoft社 Intellicode	
2	AIによるPCB※1のパターン自動生成	Cadence社 Allegro X AI	
3	AIによる解析メッシュ自動生成	インテグラル・テクノロジー社 FORTUNA8s	
4	AIによる3Dモデルの自動生成	アビスト社/Pluszero社	
5	NASAでのAMへの生成AIの適用	Autodesk社	

※1 PCB: Printed Circuit Board

補足: Cadence社へのヒアリング結果

- 設計ツールの三大トレンドはAI/ML, クラウド活用, 各設計工程間をつなぐプラットフォーム化
- 特にAI/MLを活用したツール開発は進んでおり(Cadence内でも上記含め4ツール)、また、顧客の採用例も多い(半導体の配置配線ツールに関しては、半導体TOP20社のうち10社が採用)。

AIによるソフトウェア設計支援 例：[GitHub Copilot](#)

ZOZOの導入事例においても、AI生成結果をそのまま使わず、通常設計時と同様にコードレビュー等が重要となる旨の記述があり。平均して55%の設計効率化を実現

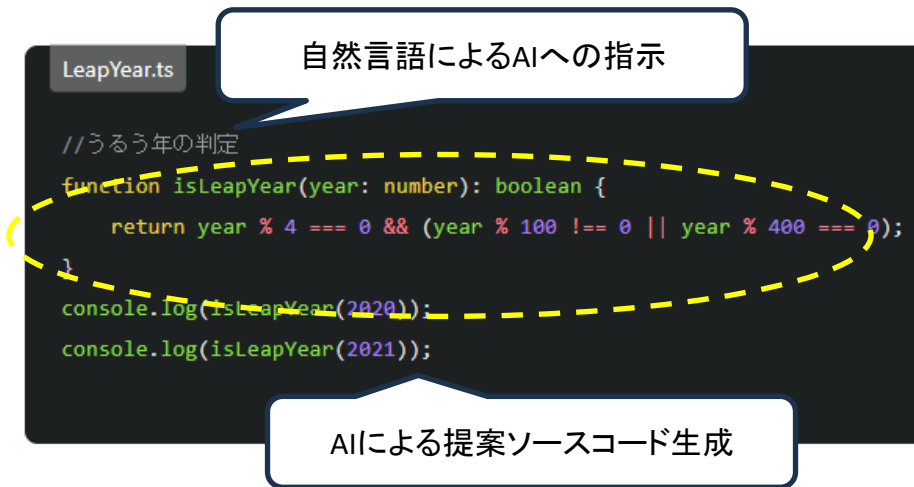
- 大規模言語モデル（LLM）を使用し、自然言語での指示に対して、ソースコードの提案が可能。
- ZOZOでの[導入事例](#)

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
学習データとして社外へ流出：for Businessプランの使用で対応可能
脆弱性の混入：そのままブラックボックスとしては使わない。レビューアによるコードレビュー等の実施が必要。（通常設計時と変わらない）
- ライセンス侵害のリスク
学習データにはOSS(Open Source Software)が含まれているため、提案ソースコードがOSSライセンスを侵害しているリスクがある。
→ Copilotの設定で、公開されたコードと一致する提案をブロックする対応が可能。
- 費用対効果
ツールのライセンス費用が発生する。ZOZOの場合は試験導入での評価により、効果の方が大きいと判断され正式導入が決定された。



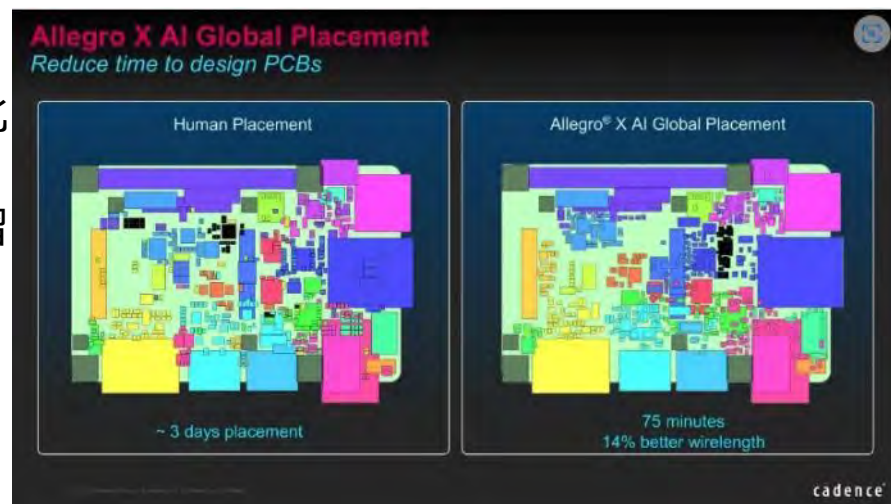
コード生成例：出典([Qiita](#))

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

AIによるPCBパターン自動生成例：出典 [Cadence社 Allegro X AI](#)

AIにより電氣的、熱的、機械的な制約を満たした 部品配置・電源/GND層の生成/クリティカル信号配線 を自動生成することによって、人手以上の品質で、PCB設計期間を1/10以下に短縮

- PCB(Printed Circuit Board)設計は機器の高度化に伴い、高密度実装化、信号の高速化、電源の大電流化が進み、近年、設計複雑度が増加。
- PCB設計は、電気設計制約だけではなく、熱設計制約、機械設計制約等の複数の制約を満たす最適解を見つけ出す必要があり、複雑度増加と併せて設計期間の長期化が製品開発期間に大きな影響を与えていた。
- Cadence社のAllegro X AIは、過去のPCB設計の学習データを活用することにより、AIにより各種制約を満たした
 - ・ 部品配置
 - ・ 電源/GND層の生成
 - ・ クリティカル信号の配線を人手以上の品質で自動的に生成する設計ツール。
- 本製品により、PCB設計の所要時間を1/10以下に短縮することが可能となる。

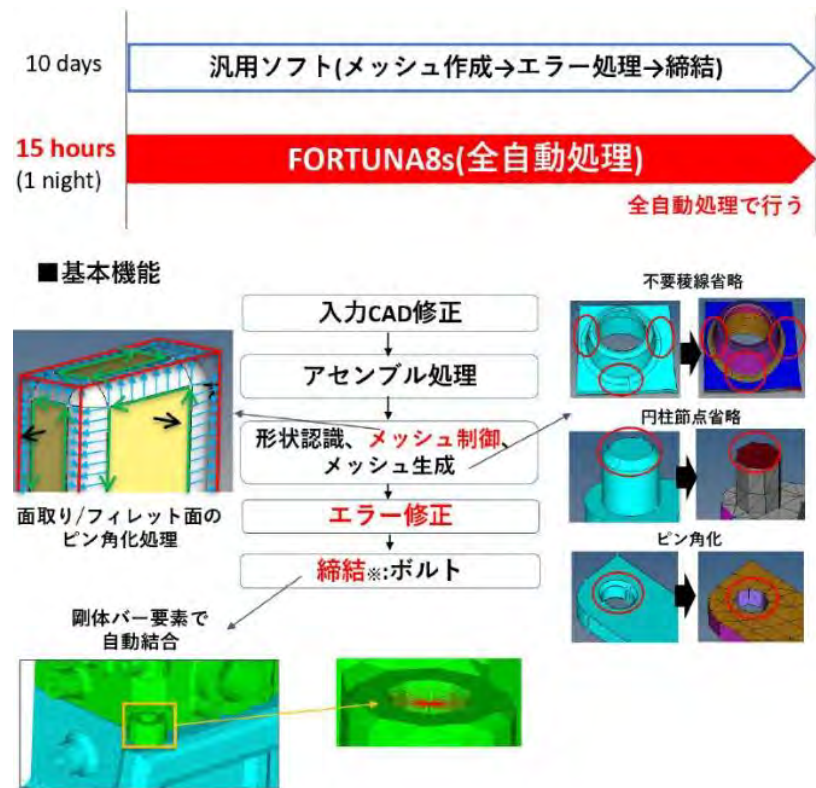


3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

AIによる解析メッシュ自動生成：出典[インテグラル・テクノロジー株式会社 FORTUNA8s](#)

AIにより3Dモデルの形状認識を行い、CAE解析(熱解析、構造解析等)のためのメッシュ生成を自動で実施することにより、従来人手で10日かかっていた作業を15時間に短縮

- CAE解析(熱解析、構造解析)を実施するためには、3Dモデルより適切な解析メッシュを作成する必要がある。
- 解析メッシュは細かくすれば解析精度は上がるが、解析にかかる時間が増加するというトレードオフの関係にある。特にモデル形状によって、メッシュが荒くても解析精度の劣化が少ない箇所、わずかでも荒くすると大きく解析精度が劣化する箇所など存在する。そのため、従来はメッシュ作成は知見を有した技術者のみが試行錯誤の時間をかけて実施する作業であった。
- 本ツールはAIによる3Dモデルの形状認識を行い、自動で解析精度、解析時間を最適化した解析メッシュを自動で生成する。これにより、従来、知見を有した技術者で10日必要としていた作業が15時間に短縮され、CAE解析にかかる工数が大幅に削減することが可能となる。



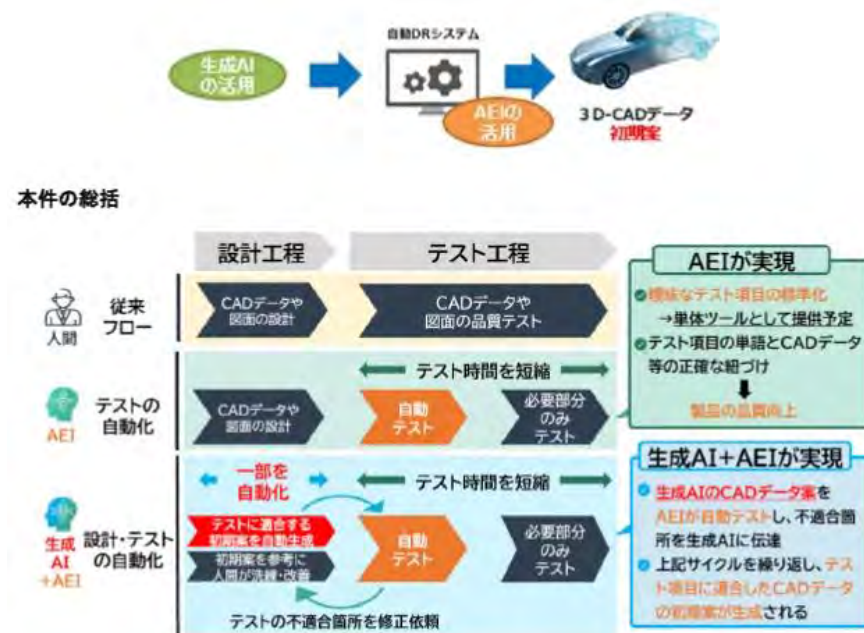
出典：[インテグラル・テクノロジー株式会社](#)

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

AIによる3D モデルの自動生成：出典[アビスト社/Pluszero社](#)

生成AIにより、品質チェックに適合した3D-CAD設計の初期案を自動生成することで、設計者の負担を低減

- アビスト社は主に自動車部品の3D-CADによる機械設計・解析を実施する設計会社。
- アビスト社/Pluszero社は設計工程以降のテスト工程に対して、AEI(Artificial Elastic Intelligence:特定の限られた業務範囲に特化したAIでPluszero社独自の技術)を用いて、自動化を進めてきた。
- 今回の事例は、後段のテスト工程が自動化されていることから、初期モデルを生成AIで生成し、後段の自動テストとのループを回すことにより、品質チェックに適合した3D-CAD設計の初期案を自動生成することができるようになった。
- 自動生成された初期案をベースに設計者は検討をスタートできることから、検討範囲を抑えた設計が行えるようになり、設計者負担の軽減が実現できた。
- 一般に生成AIによる生成物には問題が含まれることがあり、そのまま設計に用いることが難しいことに課題がある。本事例は後段の自動テストと組み合わせることにより、実用が可能になっていると推察(ASTEC考察)。



出典：[アビスト社](#)

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

NASAでのAMへの生成AIの適用：出典[Autodesk社](#) Fusion 360
生成AIによるAdditive manufacturing向けの構造最適化

- NASAでのAutodesk社の3D CADツールFusion 360によるジェネレーティブデザインの適用事例
- Fusion 360では人間のエンジニアが最終的な構造体にかかる荷重や宇宙空間で受ける力などの技術的要件を指定する。その後、AIが多数の適合しそうなデザインを生成、有限要素解析や製造性のシミュレーションを実行するループを回すことにより、最適な設計解を得ることが可能となる。
- 本技術をEXCITE(EXplanet Climate Infrared TElescope)やMars Sample Return Mission等に適用し、人手での設計と比べて、質量2/3程度の削減を実現している。
- 構造解析の技術者は貴重な人材であるため、本技術を適用することによって、設計効率を上げ、人手不足への対策にもなるとNASAは考えている。



EXCITEの望遠鏡支持構造

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.2.1 デジタル開発技術調査

3.2.1.1 MBSE/MBD調査

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

3.2.1.4 他分野 製造・試験技術調査

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査

3.2.1.6 他分野DX事例調査

3.2.2 強み・弱み分析

3.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要な技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

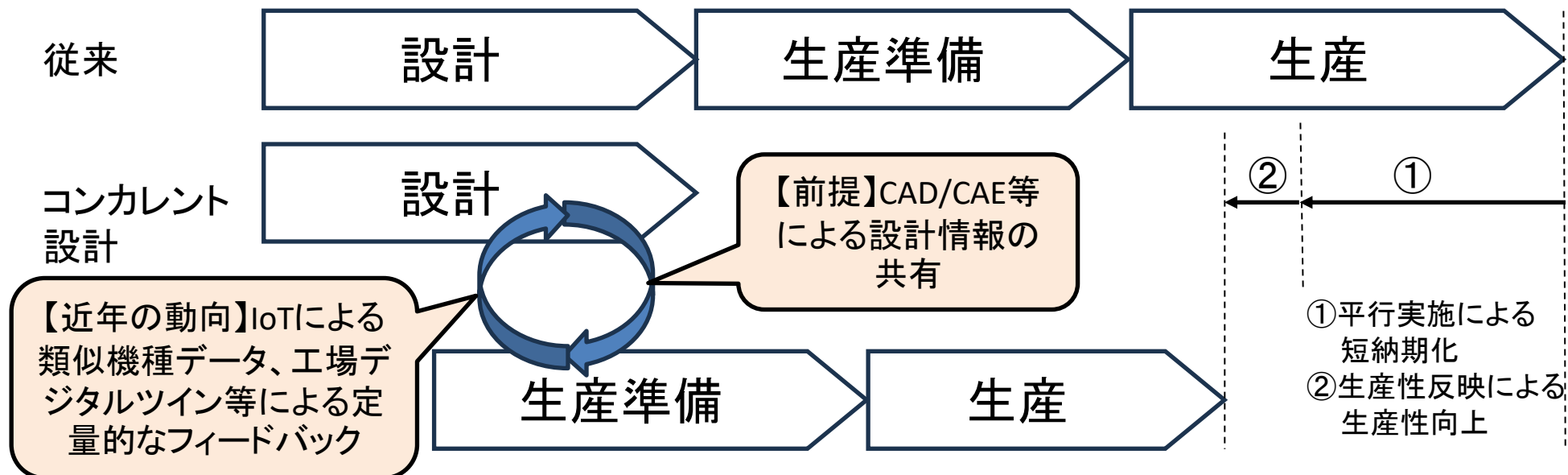
3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

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。



3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

富士通株式会社の事例：

仮想大部屋による設計部門、製造部門、品質保証部門合同レビューによるコンカレント設計の促進

- 仮想大部屋は富士通の提唱するデジタルモノづくりを支えるプラットフォーム「FTCP(Flexible Technical Computing Platform)」の一機能
- VR/AR技術による臨場感のあるレビューや、過去に蓄積された製品データ、クレーム情報等のデータの一元管理を活用することにより、設計、製造、品証間の情報共有レベルが向上。コンカレント設計がより効率的に進められるようになった。

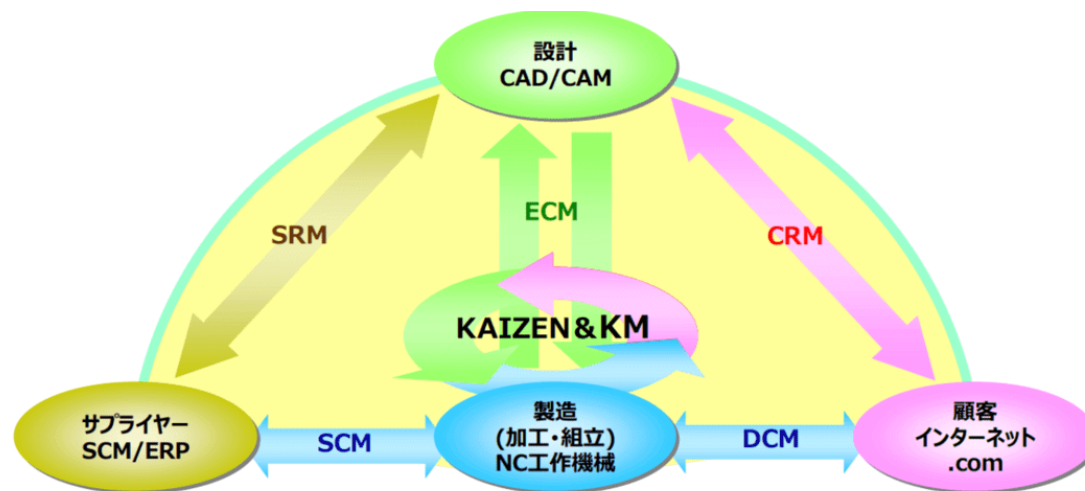


出典：[経済産業省 製造業DX取り組み事例集](#)

3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

オークマ株式会社の事例： 「IT Plaza」による

- IT Plaza: 下記3つの軸を一つの生産システムに統合したもの
 - ・設計から製造までデータを一通貫させて行うコンカレント・エンジニアリング
 - ・変動する生産計画への柔軟な対応のため生産管理情報をつなぐ生産効率の最大化
 - ・日々生まれる技術・技能を蓄積・共有して活用するナレッジマネジメント
- 3Dバーチャモニタ: PC上の仮想機械で、正確な機械モデルと機械仕様を考慮したNC機能で実際の機械さながらの動作を確認、3Dバーチャモニタで生産の垂直立ち上げを実現。コンカレント設計の効率最大化。



ECM : Engineering Chain Management KM : Knowledge Management
 SCM : Supply Chain Management DCM : Demand Chain Management
 SRM : Supplier Relationship Management CRM : Customer Relationship Management

出典: [経済産業省 製造業DX取り組み事例集](#)

3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

国内New Space各社の生産性向上のための取組：各社**コア領域にリソースを集中**し、それ以外の領域についてはその領域を**得意とする企業と分業**することで生産性を向上させようとする取組が見受けられる。分業を進めるにあたり、企業間での円滑な情報共有のためのデジタル技術の重要性がより高まると推察される。

NewSpace企業	取組例
Synspective	東京計器株式会社と小型SAR衛星の量産工場に向けたパートナーシップを締結し、量産に向けた協議を開始。東京計器は新たにクリーンルームを備えた衛星組立棟を新設して、数年以内の量産開始を目指す。 出典： 2022.06.15 Synspectiveプレスリリース
AXELSPACE	近年の多様な衛星製造要求に迅速に対応するため、株式会社ミスミグループ本社及び由紀ホールディングス株式会社と「宇宙機製造アライアンス」構築に向け覚書を締結。宇宙機製造アライアンスでは、アライアンス参加社間において、例えば設計意図なども含めた情報共有（同時性、透明性、双方向性）を図り、無用なマージンの排除、徹底的なDX化、他業種の製造業のノウハウ導入等を積極的に進め、全体最適を図ることで、高品質・迅速な衛星製造を可能することを目指す。 出典： 2022.04.26 AXELSPACEプレスリリース
QPS研究所	スカパー J S A T 株式会社と株式会社QPS研究所は、QPS研究所が開発する小型SAR衛星の運用業務について協業を開始する契約を締結。30年以上の衛星運用実績のあるスカパー J S A T がQPS研究所の小型SAR衛星の運用業務を担い協業することにより、日本企業発の衛星コンステレーションの早期実現を目指す。 出典： 2023.07.18 スカパーJSATプレスリリース
	株式会社QPS研究所は、東京海上日動火災保険株式会社と、衛星データを活用したサービス開発に向けて協業を開始。 出典： 2023.12.22 QPS研究所 プレスリリース

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.2.1 デジタル開発技術調査

3.2.1.1 MBSE/MBD調査

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

3.2.1.4 他分野 製造・試験技術調査

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査

3.2.1.6 他分野DX事例調査

3.2.2 強み・弱み分析

3.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要な技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

3.2.1.4 他分野 製造・試験技術調査

- ① まとめ
- ② Lighthouses概要
- ③ Siemens Amberg工場 事例
- ④ GE 日野工場事例
- ⑤ 日立 大みか事業所事例

- 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。
- 1工程に特化した生産性向上(最新設備の導入等)に関しては効果が限定的。

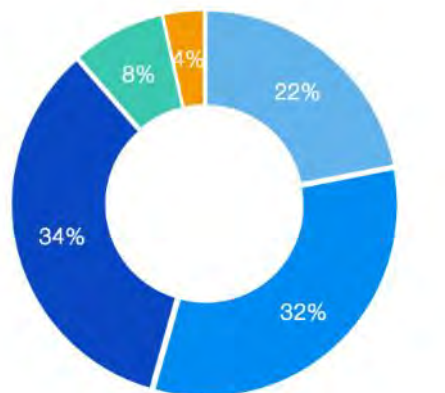
調査工場サマリ

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
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

Lighthouses:世界経済フォーラム（WEF:World Economic Forum）がコンサルティング会社マッキンゼーとともに選定する第四次産業革命の推進にリーダーシップを発揮している工場。

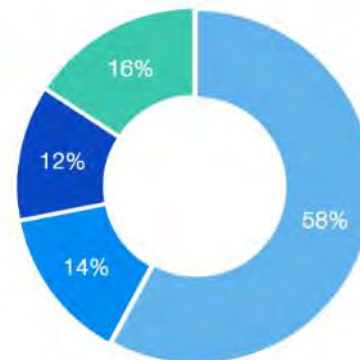
- 第4次産業革命推進として、デジタル化、予知予兆分析、AR/VR、産業用IoTなどのデジタル技術の導入のみならず、自動化による生産効率向上、人材育成や働き方、企業や業界の持続可能性、社会や環境へのインパクトといった観点から選定される。
- 2023年5月現在で全世界で132工場が選定されている。
- 選定工場を地域別で見ると中国が34%と最多。製造関連技術での中国の成長を伺うことができる。
- 日本からは、日立 大みか工場、GE 日野工場、P&G 高崎工場の3工場が選定されている。
- 産業分野としては先端産業分野(自動車、機械、電子機器、半導体等)が58%と最も多く、残りをプロセス産業分野(鉄鋼、化学、石油・ガス等)、消費者製品分野(アパレル、消費財等)、医薬品・医療品分野が占める形となっている。

Geographical diversity



■ APAC ■ EMEA ■ CHINA ■ USA ■ LATAM

Industry diversity



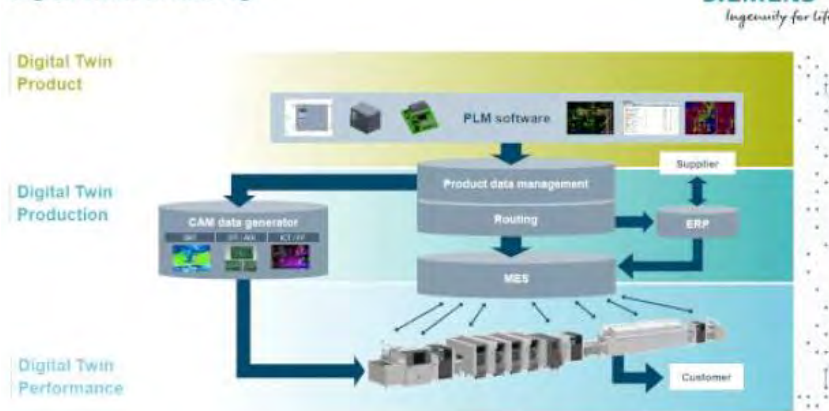
■ Advanced Industries ■ Consumer Packaged Goods
■ Process Industries ■ Pharma and Medical Products

- 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

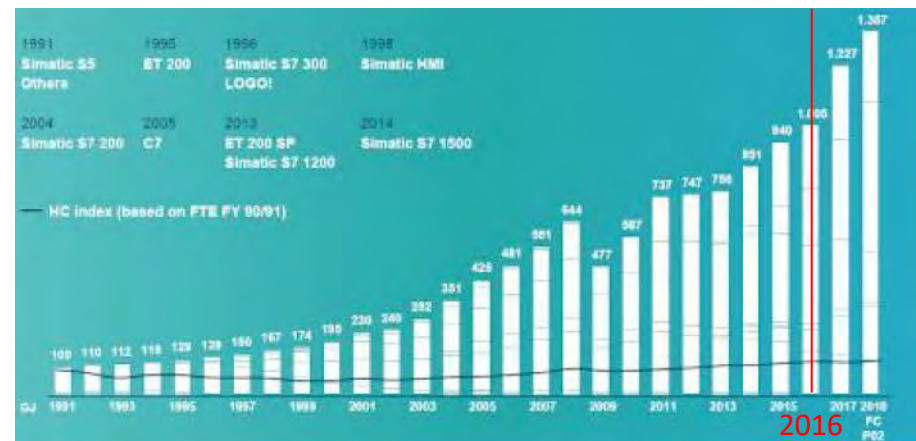
工場名	Siemens Amberg工場	工場立地	ドイツ	製品	FA製品
------------	-------------------------	-------------	------------	-----------	-------------

- FA※1製品は多品種を需要変動に応じて製造する変種変量生産が必要
該当工場においても、1200種類の製品に対応するため、年5000回の作業計画変更、毎日350の段取り替えを実施。
- PLM(Product Life cycle Management)システムにより、製品の設計・サプライチェーン・製造・フィールド等の情報を一元管理。設計時のCAE解析結果、日々の生産での測定データ、試験データ等をどの工程からも活用できるようになっている。
- PLMにて一元管理されたデータを元に「製品」、「製造プロセス」、「パフォーマンス」の三つの領域でデジタルツインを構築。製造プロセスにおいては、仮想空間上でレイアウトやライン構築等のシミュレーションを活用して、生産性の向上を行っている。
- 1991年から2018年の28年間で、同程度の生産スペース、人員での生産性が13.5倍に拡大。特にデジタル技術を本格採用した2016年以降生産性改善ペースが拡大（2016→2018で30%の改善）。品質面もトレーサビリティの向上により、99.999%以上のプロセス品質を達成
- このような生産性向上を実現した工場においても、25%は人手による作業。生産性向上には、やみくもな最新設備導入・自動化ではなく、設計・生産情報の一元管理による部門間をまたいだプロセス改善、品質改善が効果的。

Digital Twins in Amberg



デジタルツインの構成イメージ



Amberg 工場の生産性推移

- 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

工場名	GE 日野工場	工場立地	日本	製品	X線CT装置等の医療機器
-----	---------	------	----	----	--------------

- 年間生産台数 450 台程度の少数高付加価値製品の生産工場
- 工場のスマート化の方針は「つなげる」、「知見を得る」、「最適化する」の3段階（やみくもな最新設備導入・自動化は不要）
- 例1「つなげる」：作業員がネームタグに小型ビーコンを装着。1～数m置きに設置されたビーコンレシーバで作業員の位置を自動測定
「知見を得る」：ビーコン情報を元に各作業員の動きをスパゲッティチャートとして作成、無駄な工場内の動き等を抽出
「最適化する」：上記から得た知見より、工場レイアウトの最適化を実施
従来、スパゲッティチャート作成のためには、担当者が各作業員に一日付いて動画作成し、数か月かけて手作業で解析を行っていたため、改善のサイクルを細かく回すことができなかった。上記により簡易に測定・解析が行えるため、数歩レベルの細かいから、改善を積み上げることが可能となった。
- 例2「つなげる」：部品供給を行うキットカートは工程毎に1台で1時間分の作業となるように調整。キットカートにRFIDを取り付け、キットカートの動きを自動で測定。これにより、各工程の進捗状況に関して、作業員の特別なデータ入力を不要として、入手できるようになった。
「知見を得る」：リアルタイムに取得できる進捗データより、一時間単位で遅れが発生した工程に即座にアラートがあげられるようになった。また、作業員毎に作業時間のばらつきが多い工程の抽出が可能となった。
「最適化する」：工程遅延の影響が拡大する前での対策、サポートや、ばらつきの大きい工程の作業プロセスの改善を実施。



● スパゲッティチャートの例

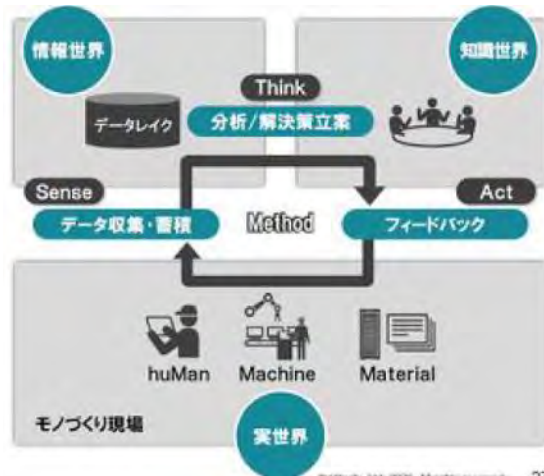


キットカート写真

- 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

工場名	日立 大みか事業所	工場立地	日本	製品	鉄道等の情報制御システム
-----	-----------	------	----	----	--------------

- 鉄道システムや鉄鋼の製造システムなど、一品ごとにカスタマイズが入る製品の開発・製造、システム構築、運用保守を行う事業所。
- 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3D CADデータから、独自のアルゴリズムで分解順序や手順を分析し、組立て作業手順書を自動で生成する組立てナビゲーションシステムを開発。設計から生産に移行する際に存在した作業を削減した。
また、IoTで取得した生産データを設計側とも共有することで、生産効率の悪い工程の明確化、該当部分の設計に問題がないか確認が行えるようになった。上記、設計→生産の容易化と併せて、設計含めた生産性改善のループを回せるようになった。
- 併せて一元管理されたデータから、工場全体の生産計画の最適立案を行うシステムを開発。納期・受注量に応じたリソースの最適化を実施。
- 上記取り組みなどで、主要製品における組立て生産のリードタイムを約50%削減



組立てナビゲーションシステム例

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.2.1 デジタル開発技術調査

3.2.1.1 MBSE/MBD調査

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

3.2.1.4 他分野 製造・試験技術調査

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査

3.2.1.6 他分野DX事例調査

3.2.2 強み・弱み分析

3.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要な技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査

- ① まとめ
- ② Satellite Innovation 2023調査

衛星分野のデジタル開発技術事例としてSatellite Innovation 2023にて調査を実施した。

主なトピックは以下の通り。

- 衛星製造分野ではMBSEやデジタルツイン等のなんらかのデジタル技術の利用が一般的になっている。しかし、その技術の洗練度や統合度には企業毎に大きな違いがある。Terran Orbital社やNorthrop Gramman社のような**大企業、生産を拡大している企業は、より積極的に**デジタル技術の製造への導入について投資を進めている。
- デジタル技術の利用が進む一方、検証技術としてはFlatSat(実際の衛星ハードウェアとソフトウェアを地上上テストベッドとして複製したもの)を活用する企業が多い。**全てをシミュレーションに頼るのではなく、適切に実機検証と組み合わせることが重要**と推察される。
- 検証技術としては、Terran Orbital等、軌道上でのミッションを終えた衛星を**軌道上テストベッド**としてソフトウェアをアップデート、新技術の検証を行う企業が出現し始めている。SDS(Software Defined Satellite)化の流れの中で、今後より新規技術の早期検証手法として重要性が増してくると推察される。
- 衛星製造において、垂直統合を目指すべきか、水平分業を目指すべきかの議論あり。垂直統合は複雑性が伴い、高いコストが必要となるが、その分大きな価値を会社にもたらす。大きな投資やリソース投入が難しい企業は、自社のコア領域に集中すべきであり、安価で信頼性の高いメーカーに製造は依存する等、水平分業を進めるのがよい。
- **衛星開発・製造に一番必要なことはスピード**とSatellite Innovationに参加した多くの企業が述べている。

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査 ②Satellite Innovation 2023調査

Satellite Innovation 2023の調査結果として、以下に示すネットワーキングタイムでのインタビュー結果及びカンファレンスでの講演の聴講結果を示す。







✓ ネットワーキングタイムでのインタビュー内容は以下の通り。

- i. 開発・設計・製造・試験・運用といった製品のライフサイクルにおいてどのようなデジタル技術を採用しているか。
(例： Product Lifecycle Management システムの導入、設計段階でのDigital Twinの活用など)
- ii. Boeingと Millennium Space , LMとTyvack, AirbusとOneweb/Airbusのように1つの資本の下で異なるタイプの衛星を設計・製造しているようなケースにおいて、どのような差異や共通化の取り組みがあるか
- iii. NewSpace事業者では、TRLが低い技術を早期に軌道上での実証につなげていくために、設計や試験においてどのようなデジタル技術を採用しているのか。
- iv. デジタル技術の導入によって、Engineering ChainあるいはSupply Chainにおいて製造事業者はどのようなメリットを得ることができたか。
(例： 設計リードタイムの短縮、品質向上、歩留まり向上など)
- v. iv.とは逆に、製造事業者はデジタル技術の導入に際しての障壁や課題があればそれはどのようなものか。またその障壁や課題をどのようにクリアしたか。(あるいは、デジタル技術導入に係る推進体制、ルール／制度としてどのようなものがあるか。)
- vi. 衛星製造事業者が導入しているデジタル技術は、自動車や航空など他産業において導入されているデジタル技術とどのような共通性あるいは差異があるのか。

✓ カンファレンスでの調査内容は以下の通り。

- i. 演題「SCALING SATELLITE PRODUCTION FOR THE NEW SPACE ENVIRONMENT」の聴講

9:30 am - 10:15 am SCALING SATELLITE PRODUCTION FOR THE NEW SPACE ENVIRONMENT

	MODERATOR Noel Rimalovski Managing Director GH Partners		Marc Bell Executive Chairman and Co-Founder Terran Orbital
	Gabrielle Carlisle VP of Manufacturing Millennium Space Systems, a Boeing Company		Erik Daehler VP Orbital Systems & Services Sierra Space
	Tina Ghataore CEO Aerospacelab		Edward Mehr Co-founder and CEO Machina Labs

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査 ②Satellite Innovation 2023調査

衛星製造では、モデルベースシステムズエンジニアリング（MBSE）やデジタルツインの利用など、デジタル技術の利用が一般的になっている。しかし、衛星のライフサイクル全体におけるこれらの技術の洗練度や統合度には大きな違いがある。

No.	インタビュー事項
i	開発・設計・製造・試験・運用といった製品のライフサイクルにおいてどのようなデジタル技術を採用しているか。 （例： Product Lifecycle Managementシステムの導入、設計段階でのDigital Twinの活用など） また、PLMを導入していない場合、その理由や、どのような代替手段を用いているか。

インタビュー結果

- ✓ 衛星製造では、モデルベースシステムズエンジニアリング（MBSE）やデジタルツインの利用など、デジタル技術の利用が一般的になっている。しかし、衛星のライフサイクル全体におけるこれらの技術の洗練度や統合度には大きな違いがある。
 - MBSE、デジタルツイン、および関連するデジタル技術は、衛星製造（およびすべての製造部門）で何らかの形で一般的になっている。
 - Terran OrbitalやMillennial Space Systemsなどの一部の企業は、デジタル変革の取り組みを継続的に改善することに、他社よりも熱心である。
 - 一方、MomentusやSpace Flight Laboratory (SFL) などの組織は、デジタル変革の取り組みに多額の資金を投じないことを選択している。そのような投資が現時点で大きな利益をもたらすとは考えていない。
 - 多くの企業は、衛星のハードウェアとソフトウェアを地上テストベッドとして複製する、いわゆる「FlatSat」も使用している。これらの取り組みは、テスト/シミュレーションおよび検証のためのより正確なプラットフォームを提供することができる。
 - NASAのグレン研究センターはまた、米国の宇宙企業に物理的なテスト施設へのアクセスを提供しており、デジタルツインや関連するデジタルツールを補完して、衛星の性能をテスト/シミュレーションおよび検証することができる。



図 ESAによるFlatSatの例（参考）[1]

1つの資本の下で異なるタイプの衛星を設計・製造しているようなケースにおいて、子会社の設計/製造プロセスを統合する取り組みはみられなかった。一方で、部品調達の容易性向上による垂直統合の促進を目的としているケースが多く見られた。

No.	インタビュー事項
ii	BoeingとMillennium Space, LMとTyvack, AirbusとOneweb/Airbusのように1つの資本の下で異なるタイプの衛星を設計・製造しているようなケースにおいて、どのような差異や共通化の取り組みがあるか。

インタビュー結果

- ✓ 一般的に、Rocket LabやNorthrop Grummanなどの宇宙企業は、子会社の設計/製造プロセスを統合していない。つまり、会社と子会社は製造設備を別にしてしているため、両者の生産活動の共通性は低い。
 - Northrop Grummanは、子会社のSpace Logisticsと設計や製造設備を共有していないと述べた。その代わりに、ビジネス上の取り決めにより、Space LogisticsはNorthrop Grummanが製造した宇宙機用の部品をより容易に入手できるようになっており、垂直統合の促進に役立っている。
 - Rocket Labは、設計や製造を新たに買収した子会社と統合する計画もない。Northrop Grummanと同じように、Rocket Labも垂直統合を促進するためにこれらの買収先を利用することを目指している。同社は、社内での組み立てやテストを含め、高性能なアビオニクスや飛行コンピュータシステムを設計してきた。これらのシステムは、最先端のFPGAアーキテクチャを利用しており、ハードウェアの共通性を維持しながら機能を大幅にカスタマイズできる。

TRLが低い技術の軌道上での早期実証を可能にするために衛星運用者が設計と試験に採用している主要技術には、**FlatSat**と**軌道上テストベッド**が多く挙げられた。

No.	インタビュー事項
iii	NewSpace事業者では、TRLが低い技術を早期に軌道上での実証につなげていくために、設計や試験においてどのようなデジタル技術を採用しているのか。

インタビュー結果

- ✓ TRLが低い技術の軌道上での早期実証を可能にするために、衛星運用者が設計と試験に採用している主要技術には、**FlatSat**と**軌道上テストベッド**が多く挙げられた。
 - デジタルトランスフォーメーションによる衛星開発のスピードアップは、**新技術の軌道上実証の推進**に繋がる。
 - ソフトウェア定義の衛星は、軌道上での新しい技術のテストを可能にする。例えば、Terran Orbitalは、**ミッションを終えた衛星を軌道上テストベッドとして使用**している。同社は、これらの**軌道上テストベッドにソフトウェアアップデートを送信**して、さまざまな新技術をテストおよび検証している。
 - Quindar社のSatellite Mission Management as a Service (SMMaaS) は、クラウドにホストされたSaaSプラットフォーム上で、顧客のために衛星の設計、テスト、運用を自動化することが可能。

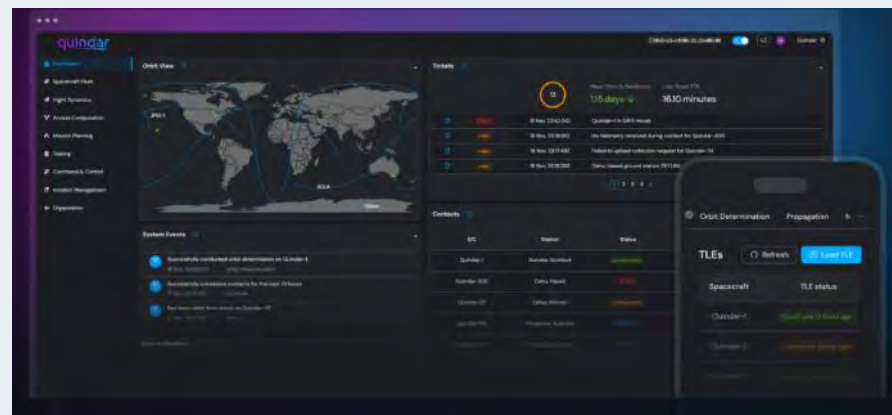


図 Quindar社のSatellite Mission Management as a Service (SMMaaS)

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査 ②Satellite Innovation 2023調査

デジタル技術の導入により、製品品質の向上、リスクの低減、設計・生産・運用を通じた衛星性能の監視の強化などのメリットを得ることができる。

No.	インタビュー事項
iv	デジタル技術の導入によって、Engineering ChainあるいはSupply Chainにおいて製造事業者はどのようなメリットを得ることができたか。（例：設計リードタイムの短縮、品質向上、歩留まり向上など）

インタビュー結果

- ✓ 各社の担当者は、製品品質の向上、リスクの低減、設計・生産・運用を通じた衛星性能の監視の強化など、デジタル技術の導入には数多くのメリットがあると述べた。
 - Novaworks社は、「Slegos」（「スペース・レゴ」の語呂合わせ）と呼ばれるツールを使って衛星バスを設計している。
 - 複数のSlegosを組み合わせて、顧客の要求を満たす小型衛星バスを形成することができる。
 - 上記技術により、顧客のために衛星バスのコンセプトを迅速に設計することができる。最短6日で顧客に設計を提供できたケースもある。
 - Morpheus社のJourney software platform（ベータ版）は、衛星の最適な推進システムを決定するために、衛星のライフサイクル（設計、製造、運用、退役）の各段階をシミュレーションすることが可能。
 - また同社は衛星製造を行うスタートアップ企業（Proteus Space）にも投資しており、上記技術を利用して製造コスト削減を図っているとみられる。

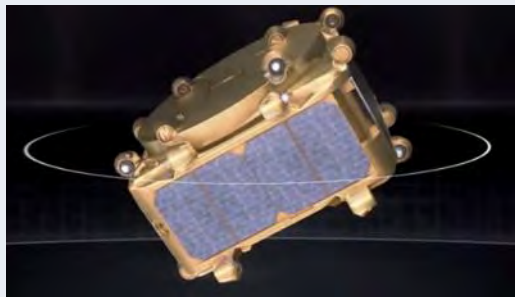


図 Novaroks社のSlegos



図 Morpheus社のJourney software platform

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査 ②Satellite Innovation 2023調査

デジタル技術の導入により、製品品質の向上、リスクの低減、設計・生産・運用を通じた衛星性能の監視の強化などのメリットを得ることができる。

インタビュー結果（続き）

- ▶ Northrop Grumman社は、デジタル技術の導入による製造コスト削減とパフォーマンス向上を理解しており、宇宙セクターを含むすべてのビジネス・セクターでデジタル変革を推進するために多大な努力をしている。なお、米国国防総省 (DOD) は同社の主要な顧客であり、米空軍の大陸間弾道ミサイルシステムの製造におけるデジタル技術の導入プログラムも担っている。
- ▶ Terran Orbital社の最高収益責任者Marco Villa氏は、デジタルツールが製品の品質と価格を向上させる生産効率につながるため、製造業におけるデジタル変革は「考えるまでもない」と述べた。
- ▶ 上記Northrop Grumman社やTerran Orbital社、その他の大企業は、デジタル技術の製造への導入について内部投資を行うためのリソースを持っている。
- ▶ 一方、小規模な企業は、クラウドベースのデジタルツインサービスを提供するAntaris社やSedaro社などのサードパーティー企業からデジタル変革サービスを調達することも考えられる。

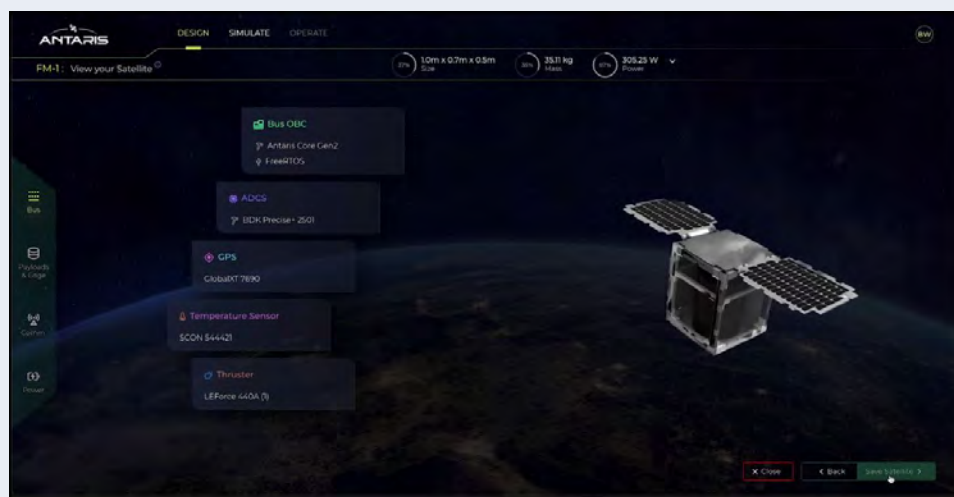


図 Antaris社のデジタルツインプラットフォーム^[1]

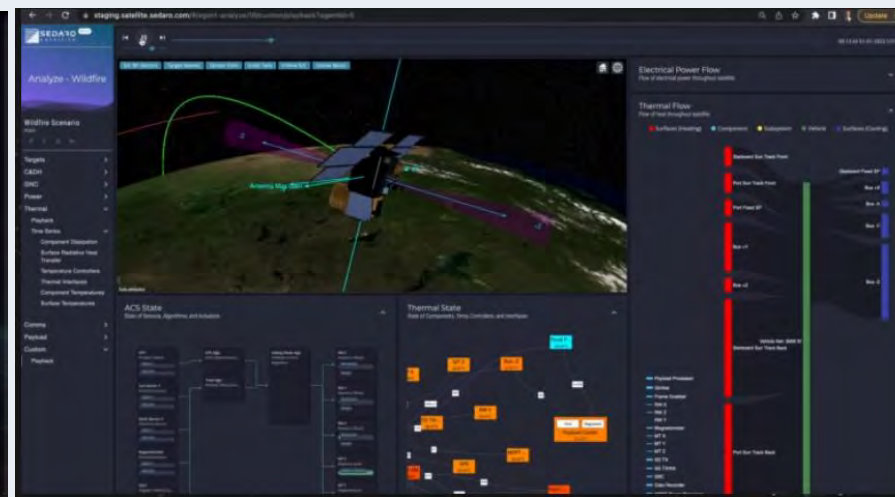


図 Sedaro社のデジタルツインプラットフォーム^[2]

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査 ②Satellite Innovation 2023調査

デジタル技術の導入は、生産規模を拡大している衛星メーカーにとっては、より大きな投資収益率（ROI）を持っていると思われる。一方、生産規模拡大の計画がないメーカーはデジタル技術の導入に消極的である。

No.	インタビュー事項
v	iv.とは逆に、製造事業者はデジタル技術の導入に際しての障壁や課題があればそれはどのようなものか。またその障壁や課題をどのようにクリアしたか。（あるいは、デジタル技術導入に係る推進体制、ルール／制度としてどのようなものがあるか。）

インタビュー結果

- ✓ デジタル技術の導入は、生産規模を拡大(すなわち、生産数を増加)している衛星メーカーにとっては、より大きな投資収益率（ROI）を持っていると思われる。一方、生産規模拡大の計画がないメーカーはデジタル技術の導入に消極的である。
 - MomentusやSFLなどの一部の企業は、近い将来に生産設備を拡張する計画は無い。従って、新しい最先端のデジタル技術への投資に大きなROIがもたらされるとは考えていない。要するに、彼らは現在の製造プロセスが適切だと信じている。
 - さらに、多くの企業は、デジタル変革に投資している企業でさえ、テストやシミュレーション、検証のための物理的な装置(ハードウェアベース)に価値を見出している。実際、衛星のハードウェアとソフトウェアの機能をテストする方法として、FlatSatは非常に人気が高いようである。

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査 ②Satellite Innovation 2023調査

衛星製造事業者が使用するデジタル技術と他の業界との差異は、顧客の要求に依存するものである。MBSEなどのデジタル技術や概念は他の製造業界を含めて一般的なものであるが、顧客要求により製造方法・場所が制限される場合などがある。

No.	インタビュー事項
vi	衛星製造事業者が導入しているデジタル技術は、自動車や航空など他産業において導入されているデジタル技術とどのような共通性あるいは差異があるのか。

インタビュー結果

- ✓ 衛星製造事業者が使用するデジタル技術と他の業界との差異は、顧客の要求に依存するものである。
 - MBSEなどの一部のデジタル技術や概念は、製造分野で一般的であり、あらゆる業界の製造事業者によって定常的に使用されている。MBSEは本質的に製造工程におけるリスクを低減する方法である。
 - 衛星メーカーと他のメーカー（自動車メーカーや航空メーカーなど）との違いは、各顧客の具体的な要件によって異なる（すなわち、差異はケースバイケースで決定される）。
 - 例えば、国家安全保障の顧客のために製造される衛星の中には、「SCIF」（Sensitive Compartmented Information Facility）と呼ばれる機密区域で製造されなければならないものもある。

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査 ②Satellite Innovation 2023調査

演題「SCALING SATELLITE PRODUCTION FOR THE NEW SPACE ENVIRONMENT」はパネルディスカッション形式で、衛星製造業界の最近の変化、垂直統合化の動向など、衛星製造における重要なテーマについて議論が行われた。

■ 演題「SCALING SATELLITE PRODUCTION FOR THE NEW SPACE ENVIRONMENT」の聴講結果

本演題はパネルディスカッション形式で、デジタルトランスフォーメーション、衛星製造業界の最近の変化、垂直統合化の動向など、衛星製造における重要なテーマについて議論が行われた。パネリストは下表に示す通り。

社名	パネリスト	会社概要・概況等
Machina Labs	Edward Mehr	次世代の「適応型生産施設」を開発中。本施設では、工具を交換することなく、製造された製品のデザインを変更することができる構想。現在は、ロボット技術とAI技術を活用して板金部品を製造している。
Aerospacelab	Tina Ghatoaore	5年前に設立されたばかりであり、軌道上に3機の衛星を保有している。更に、最近製造施設を離れたばかり（打ち上げ前）の3機の衛星を保有している。独自の衛星バスと独自の地球観測（EO）ペイロードを製造しており、「スマート」技術を使って、垂直統合によって衛星を安価に設計、製造することを目指している。
Terran Orbital	Marco Villa	衛星製造のサプライチェーン全体に注力している。一部の顧客向けには特注設計された衛星を製造することもできるが、ほとんどの顧客向けのモジュール式衛星の大量生産に特化している。
Millenium Space Systems	Gabrielle Carlisle	衛星システムのエンドツーエンドの主要請負業者である。
Sierra Space	Erik Daehler	衛星部品を製造してきた実績があり、この知見を衛星のフル生産に活用することを最近決定した。

衛星製造において、垂直統合は会社に大きな価値をもたらしたと述べる企業がある一方、高いコストと複雑さが伴うため、全ての衛星事業者が垂直統合を目指すべきではないと述べた企業もあった。

■ 演題「SCALING SATELLITE PRODUCTION FOR THE NEW SPACE ENVIRONMENT」の聴講結果

＜衛星製造業界の発展＞

- ✓ Villa氏（Terran Orbital）は、過去数年間の衛星製造業界の目覚ましい進歩を強調した。実際、5年前には小型衛星の大量生産は「口先だけ」だった。現在、複数の企業が小型衛星を大量生産している。
- ✓ Ghatooore氏（Aerospacelab）は、衛星生産における生産設備設計の考慮の重要性を強調した。
 - 衛星製造の内製化を断念した企業もある（垂直統合を中止した企業もある）。
 - 事業者は自社のコアコンピタンスに集中すべきであり、その一方で、安価で信頼性の高い衛星を製造してくれる衛星メーカーに依存すべきであると考えている。
 - 言い換えれば、垂直統合には高いコストと複雑さが伴うため、全ての衛星事業者が垂直統合を目指すべきではないということである。
- ✓ Carlisle氏（Millenium Space Systems）によると、同社は衛星のライフサイクルに合わせて設計と製造を進めているという。垂直統合は会社に大きな価値をもたらしたと考えている。
- ✓ Daehler氏（Sierra Space）は、異なる部品の生産を容易に切り替えできる生産設備を設置することが重要だと述べた。

デジタル技術の導入が生産効率向上に寄与するものの、一つの技術そのもののみならず、技術や人間等の複数要素を組み合わせることが重要である。

■ 演題「SCALING SATELLITE PRODUCTION FOR THE NEW SPACE ENVIRONMENT」の聴講結果

＜新しい衛星生産技術＞

- ✓ Mehr氏（Machina Labs）は、ロボット工学は一般的なものになったと述べた。
- ✓ Carlisle氏（Millennium Space Systems）は、同社が「デジタル変革」に取り組んでいると述べている。
 - 具体的には、データを活用したサプライ・チェーンのボトルネックの把握、および自動化の活用を挙げた。
- ✓ Villa氏（Terran Orbital）は、新しい技術や人間などの要素を組み合わせることで効率的に連携させることで、企業は生産規模の拡大に成功できるかもしれないと述べた。
 - 言い換えれば、一つの技術そのものが製造を改善するのではなく、その技術がどのように連携し、現場のオペレーターと相互作用するかが改善の真の原動力になるということだ。
 - ソフトウェアとハードウェアを組み合わせることで、ソフトウェアのアップグレードによって常に改善することができるため、システムの「終わりのない革新」が可能になる。
 - 生産設備を改善するための重要な要素としてロボット工学を挙げた。
 - これらの新技術を組み合わせることで、同社のROI（投資収益率）は向上した。
- ✓ パネリストたちも全員、顧客が最も必要としているのはスピードだという点で意見が一致した。要するに、顧客はメーカーにスケジュール通りに衛星を提供してもらう必要がある。

衛星製造のサプライチェーンにおいて、二次電池や太陽電池パドル等の供給不足が課題となっており、各社は垂直統合等の取り組みにより対応を図っている。

■ 演題「SCALING SATELLITE PRODUCTION FOR THE NEW SPACE ENVIRONMENT」の聴講結果

＜衛星分野における垂直統合＞

- ✓ Daehler氏（Sierra Space）によると、衛星製造のサプライチェーンにおける「Tier 3」では、供給不足が懸念されているという。すなわち、二次電池や太陽電池パドルのような特定のコンポーネントの生産者が不足している。同氏は、より多くの企業がこれらのTier 3市場に参入し、衛星メーカーに多様性と選択肢を提供することを期待している。
- ✓ Ghatoaore氏（Aerospacelab）はまた、垂直統合は資本集約的であると指摘した。
 - 彼女はまた、サプライチェーンの重要な分野、特に二次電池や太陽電池パドルの供給業者が非常に少ないことにも同意している。
- ✓ Villa氏（Terran Orbital）によると、垂直統合は大規模な取り組みであるため、すべての企業にとって正しいアプローチではないという。とはいえ、垂直統合は同社にとってプラスになっている。これにより、供給不足をより綿密に監視し、緩和することができている。
- ✓ Carlisle氏（Millenium Space Systems）によると、同社は80%を垂直統合しているが、コンポーネントの20%は信頼できるサプライヤーに依存している。同社は、難局を乗り切るためにサプライチェーンの選択肢を常に見直している。

＜要員開発＞

- ✓ パネリスト全員が、宇宙産業にソフトウェア技術者を誘致することについて同様の懸念を表明した。また各社は、リモートワークの方針に関する文化的な問題にも直面していると指摘した。要するに、多くのソフトウェアエンジニアは、衛星企業が製造現場での作業を必要としているにもかかわらず、リモートでの作業を希望している。
- ✓ これは、**衛星メーカーの労働力とリーダーシップ**の間の継続的な課題/議論になるだろう。

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.2.1 デジタル開発技術調査

3.2.1.1 MBSE/MBD調査

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

3.2.1.4 他分野 製造・試験技術調査

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査

3.2.1.6 他分野DX事例調査

3.2.2 強み・弱み分析

3.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

3.2.1.6 他分野DX事例調査

- ① まとめ
- ① アパレルメーカー事例：Tommy Hilfiger社
- ② 航空機・防衛業界事例
- ③ 自動車・医療機器業界事例

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ①まとめ

他分野でのDX事例として、アパレル、航空・防衛事業、自動車・医療機器事業の調査を実施した。衛星分野にて活用できる知見は以下の通り。

- DXを成し遂げるためには、**環境変化(必要性)、技術、教育、トップのコミットメント(意思)**の4要素が必要。
- 複雑で高度なシステムであり、実機での検証機会が限定されるミサイルシステム開発において、**大量の設計パラメータに対する最適化等に対してデジタルツインの活用事例**が見られる。同様な特性を持つ人工衛星に関してもデジタルツインは有効と考えられるが、米国安全保障分野の投入リソースの大きさを考慮すると、**同種取り組みは技術面・コスト面におけるハードルが高いものと考えられる**。従って、まずは**物理的なプロトタイプ（3.2.1.5項におけるFlatsatの取り組み等）等を組み合わせた上で、地上実機試験では評価が難しい箇所等に絞った適材適所でのデジタルツインの導入**が衛星開発には適していると考えられる。
- サプライチェーン間での情報共有による効率化や、同種企業間での標準化によりツール等のサポートを受けやすくする取組等、**1社のみでは解決できない課題に対して、複数社が集まり、そこにデジタル技術を合わせるによりDXを実現**している例が多数見受けられる。衛星分野においても、導入コストの低減、成果の最大化のためには、複数企業での協調した取組が重要と考えられる。

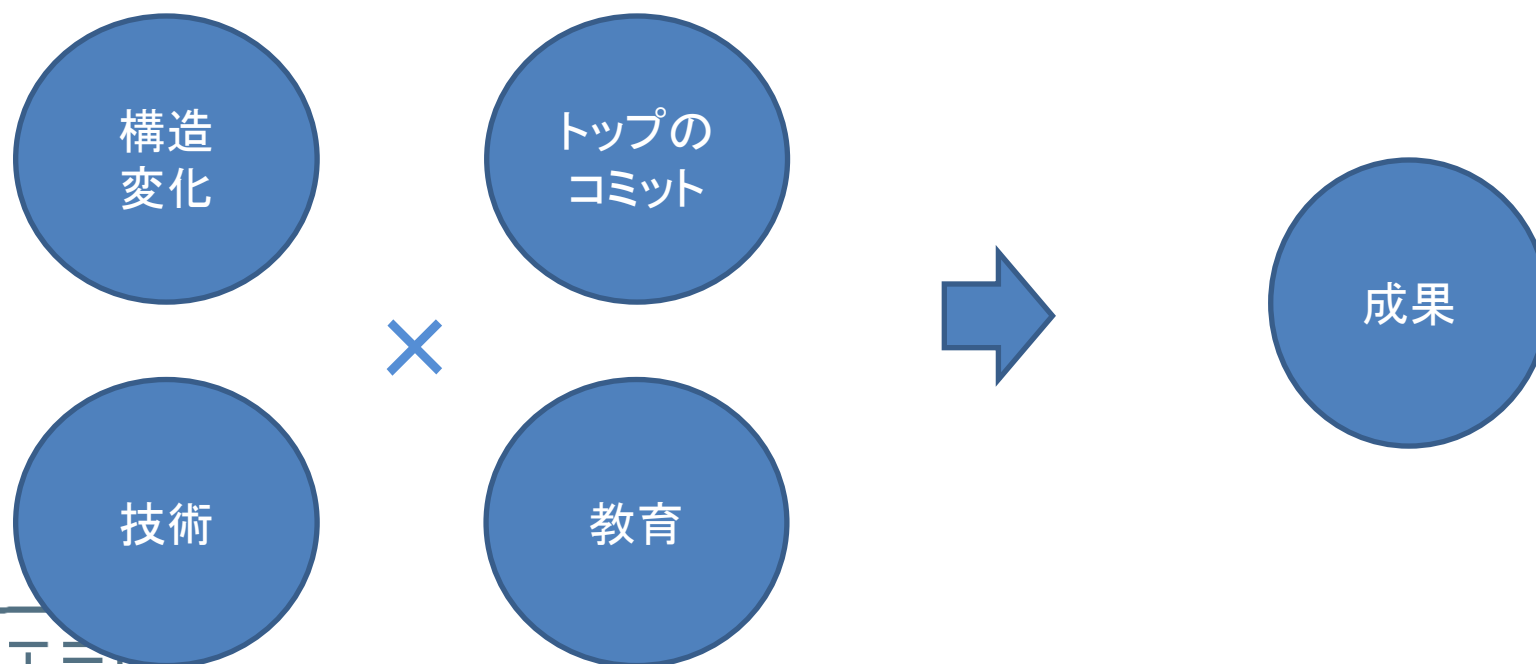
3.2.1.6 他分野DX事例調査 ①Tommy Hifliger社：概要

事例：アパレルメーカー Tommy Hifliger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。



【構造変化】

- アパレル業界は国際貿易開発会議(UNCTAD)にて、「世界2位の環境汚染産業」と指摘される業界であり、SDGsに関する取り組み状況がブランドイメージ向上のため重要となってきた。
- 従来のアパレル業界の商品開発プロセスは、大量の素材サンプル、複数回の試作を要する物であり、その開発過程の中で、大量の廃棄物が発生していた。また、これら試作プロセスは製造期間・輸送期間等が必要になるため、商品開発期間長期化の主要因の一つとなっていた。

【トップのコミット】

- Tommy Hilfiger社では上記、資源、および、時間の無駄に着目し、商品開発のプロセスを全てシミュレーション環境上で再現する3D Designに変えることにより、これら素材サンプル、試作品を不要とすることで、環境負荷低減、および、開発期間の短縮を合わせて実現することを目的に、2018年より、3D Designへの投資を進めた。
- CEO自らが、本3D Designの推進を宣言

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ①Tommy Hilfiger社：技術

- 3D Designによる試作レスを実現するためには、衣服の印象のような非常にアナログに近い部分まで、シミュレーション環境上で再現できる必要がある。
- 上記目的のため、Tommy HilfigerではSTITCHという技術インキュベータを設立。3D Design技術の開発を実施した。
- 3D Design上、最重要となる素材に関しては
 物理的特性：weight/Thickness/Stretch/Bend/Shear/Shrinkage
 視覚的特性：Texture/Weave・Knit type/Yarn Thickness・Depth/ Shine & Sheen/Roughness
 等、多岐にわたる項目を素材毎に自動で測定しデータベース化する仕組みを専門ベンダーと協力して構築。
- 上記データベースと、設計データ(型紙、縫製方法 等)より、実際にシミュレーション環境上で、単にTexture等の再現だけでなく、衣服を着た際のしわや動いたときのはためき方含めて再現するレンダリング技術を開発。

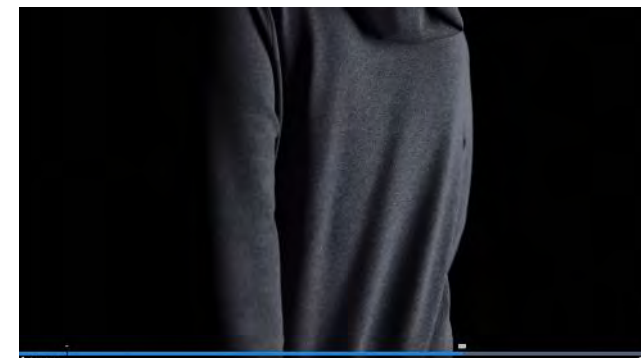


物理的特性測定装置：Browzwear社

ASTEC



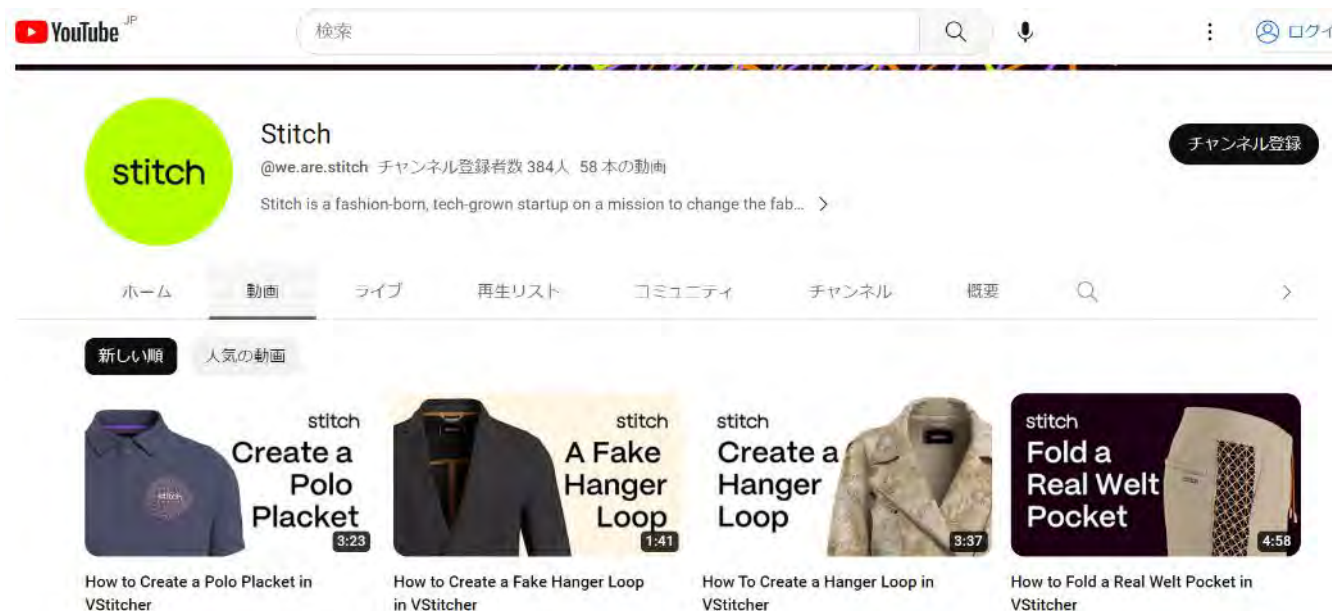
視覚的特性測定装置：Vizoo GmbH社



レンダリング例

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ①Tommy Hilfiger社：教育

- 3D Design は完全に新しいデザイン手法となるため、技術開発だけでは使えるようにはならない。
- Tommy Hilfiger社は同社のデザイナー全員、および、関連スタッフに対し、3D Designのトレーニングを実施。
- 技術開発のSTITCH側もSTITCH ACADEMYとして、Onlineでのトレーニングプラットフォームの整備、各種ワークショップの立ち上げ、Youtubeでのオンライン教材の整備等、3D Designの普及に必要な教育環境を整備



3.2.1.6 他分野DX事例調査 ①Tommy Hilfiger社：成果

- Tommy Hilfiger社は2018年頃より、3D Designに対して投資を開始し、いくつかのパイロットプロジェクトでのTry & Errorを繰り返した結果、2022年時点で、Tommy Hilfiger社にて開発する商品の半分近くに3D Designを適用している状況であり、試作品レスによる環境負荷低減、開発期間の短縮を成し遂げている。2025年には、全開発製品を3D Designによるものとする計画でさらなる拡大が進行中。
- ECサイトやデジタルショールーム等にも3D Designの結果を使用することで、企画～開発～製造～販売まで、全プロセスに関わるDXを成し遂げている。
- 開発期間短縮に伴い、企画～販売までの期間が短くなることから、商品の需要予測精度が向上。機会損失リスクを低減しながら、余剰生産による損失、廃棄物の低減を行えるようになった。
- 3D DesignはTommy Hilfiger社の内部だけではなく、Calvin Klein等の同一親会社(PVH)の他ブランド、さらには他社にまで拡大しており、業界全体で環境負荷低減が進んでいる。
- 3D Designの素材のデータベースの中に、素材のリサイクル率などサステナビリティに関する評価を付与。デザイナーが環境負荷が少ない素材を選択しやすい環境を整えることで、更なる環境負荷低減を進めている。

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ②航空機・防衛業界事例

業界	事例	概要	適用目的		
			システムの機能・性能向上	運用省力化・高度化	品質・コスト・リードタイムの改善
航空機	Smart-Kプロジェクト (川崎重工業)	川崎重工業では、 <u>デジタル技術の導入による航空機の製造プロセスの効率化</u> を目的としたSmart-Kプロジェクトに取り組んでいる。 <u>エンジニアリングチェーンとサプライチェーンの情報連携により、頻繁な設計変更への対応が可能</u> となっている。			○
	型式認証のための標準データモデル (航空機OEM企業8社等)	航空機OEM企業8社等は共同で「型式認証のための最小モデルベース」というドキュメントを発表し、ソフトウェアベンダー等に対応を求めている。 <u>航空機の型式認証の取得に最低限必要な内容について、標準データモデルセットを定義</u> することを目的としている。			○
	Skywise (Airbus)	SkywiseはAirbusの提供する <u>航空業界(航空会社、サプライヤー等)向けのプラットフォーム</u> であり、 <u>機内データ、エンジニアリングデータ、運航データ等を組み合わせることで、航空機運航の課題に対処</u> することを目的としている。		○	
防衛	F-16近代化 (米空軍 / Lockheed Martin)	米空軍では、世界中で運用されているF-16戦闘機の維持と近代化のため、Lockheed Martin社と共同で2機の <u>F-16を実際に分解してスキャン</u> することにより、 <u>エンジン部分を除く他すべての実物大の3Dモデルを作成中</u> である。			○
	WeaponONE (米空軍)	米空軍では、WeaponONEと呼ばれるプログラムにおいて、 <u>デジタルツインを活用することにより現実世界の兵器で取得したデータを仮想空間上へフィードバック</u> し、兵器システムの性能向上を図る取り組みを行っている。	○		
	Sentinel ICBM (Northrop Grumman)	Northrop Grummanが開発中の大陸間弾道ミサイルSentinelは <u>デジタルツイン</u> を用いて開発が行われている。本取り組みにより、 <u>様々なパターンの設計をスキャンして評価</u> することを可能とし、 <u>能力とコストのバランスが最も良いものを選択</u> することができた。	○		

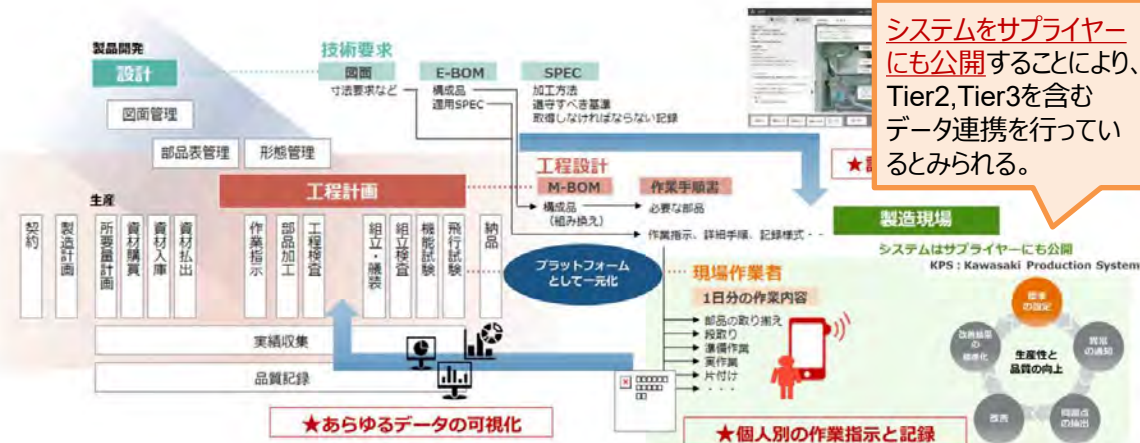
3.2.1.6 他分野DX事例調査 ②航空機・防衛業界事例

川崎重工業では、デジタル技術の導入による航空機の製造プロセスの効率化を目的としたSmart-Kプロジェクトに取り組んでいる。エンジニアリングチェーンのデータをプラットフォーム上でサプライチェーンへ情報連携することで、頻繁な設計変更への対応が可能。

業界	航空機	適用目的	品質・コスト・リードタイムの改善
事例	Smart-Kプロジェクト（川崎重工業）		

<概要>

- 川崎重工業では、デジタル技術の導入による航空機の製造プロセスの効率化を目的としたSmart-Kプロジェクトに取り組んでいる^[1]。
- エンジニアリングチェーンとサプライチェーンの情報連携^[1]
 - エンジニアリングチェーンが生み出した様々なデータ（図面、E-BOM、仕様書等）を一元管理されたプラットフォーム上で管理し、サプライチェーンに連携。
 - 最前線である現場作業員一人一人の作業にまで行われ、作業員自身が行う作業がどのような技術情報に基づいてなされているか、確認することが可能。
- データの活用^[1]
 - 一気通貫のプロセスで生まれるデータは「共通言語」としての性格を持たせることができ、これまで各部署で閉じられていた様々なデータが共有されるようになる。
 - 今後、AI等の最新技術を用いることにより、データを様々な角度から分析し、色々な立場の人間が同じデータを見て意思決定を行うことを目指している。

図 Smart-K プロジェクトの概要^[1]

<成果>

- プラットフォーム上でのデータ連携により、特に製造工程中の頻繁な設計変更がへの対応が容易となった。設計により部品が変更になった場合、E-BOM（設計部品表）が変更されるとその部品を使っている M-BOM（製造部品表）、作業手順書までが紐付けられ、変更や保留等の対応を行うことが可能^[1]。

衛星業界への適用可能性（案）

- 衛星開発においては、航空機製造に比べて1製品あたりの製造機数が少ないためプラットフォーム構築に対するコストメリットのトレードオフが必要と考えるものの、製造工程中の設計変更や廃版による部品変更等への迅速な対応が可能となることから、長期的な視点においては同技術の適用により品質・コスト・リードタイムの改善に寄与できると考えられる。
- 特に、サプライチェーンの規模が大きい大型衛星開発において、プライムメーカがサプライヤーや製造現場等を含めたプラットフォームを構築・公開することにより、エンジニアリングチェーンとサプライチェーンの全体を通じた情報連携が可能になるのではないか。

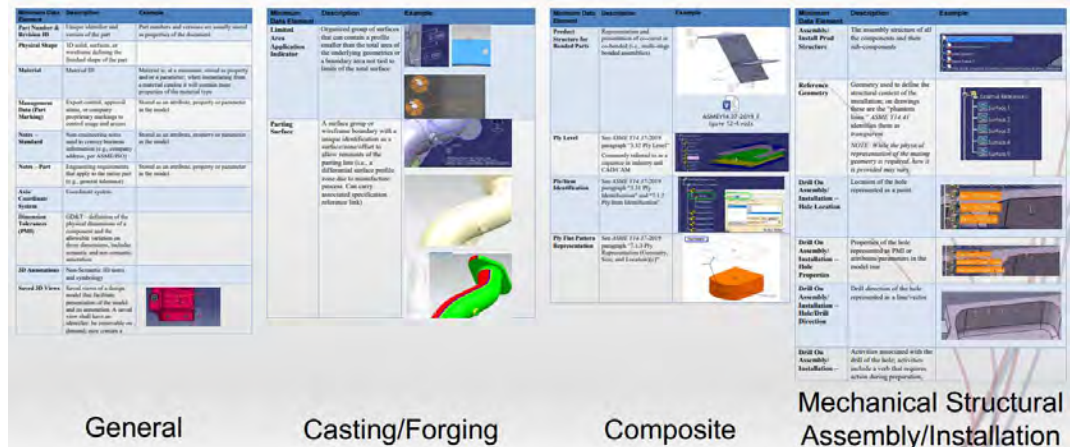
3.2.1.6 他分野DX事例調査 ②航空機・防衛業界事例

航空機OEM企業8社等は共同で「型式認証のための最小モデルベース」というドキュメントを発表し、ソフトウェアベンダー等に対応を求めている。航空機の型式認証の取得に最低限必要な内容について、標準データモデルセットを定義することを目的としている。

業界	航空機	適用目的	品質・コスト・リードタイムの改善
事例	型式認証のための標準データモデル（航空機OEM企業8社等）		

<概要>

- 航空機OEM企業8社等（Airbus, Boeing, Embraer, Gulfstream等）が共同で「型式認証のための最小モデルベース定義 “Minimum Model-Based Definition (MBD) for Type Design Certification”」というドキュメントを発表し、ソフトウェアベンダー等に対応を求めている^[1]。
- 本事例の目的は、航空機の型式認証の取得に最低限必要な内容について、標準データモデルセットを定義することである^[1]。
- データセットには、すべての設計要件（プロセス仕様書、幾何学的寸法公差（GD&T）、製品および製造情報（PMI）、その他の必要な情報など）が含まれており、以下のユースナリオをベースに定義されている^[1]。
 - 目視での組立と検査
 - フィーチャー（CAD上での部品単位）を利用した製造
 - 品質管理のための統計的工程管理(SPC)
 - 認証機関へのテクニカルデータパッケージの提出
- 各データモデルは製造方法により要件が異なるため、一般部品（General）、鋳造・鍛造（Casting/Forging）などの「部品タイプ」が定義されている^[1]。

図 部品タイプ毎の標準データモデル^[2]

<成果>

- 上記標準データモデルはPLMソフトウェアベンダーの商用製品ソリューションに実装されはじめているものの、未だ不十分な状況である^[1]。

衛星業界への適用可能性（案）

- 衛星開発においても、衛星バス等の衛星間で共通的に利用可能な部分については標準的なモデルを定義することで品質・コスト・リードタイムの改善に寄与できると考えられ、既に各社内では同様の取り組みが行われているとみられる。
- なお、衛星バス開発メーカを跨った標準化の取り組みについては各社ノウハウの秘匿等の観点からハードルが高いと思われるものの、バス/ミッション機器間のインタフェースをメーカ間で標準化し相互運用性を確保することにより、ミッション機器の選択肢の拡大や競争環境醸成によるコスト低減等のメリットが得られるのではないかと。

1. 製造業デジタル革新 - 最新情報と事例, ボーイング、エアバスなど協同でデータモデル案を提案
 2. CIMdata, Minimum Model-Based Definition (MBD) for

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ②航空機・防衛業界事例

SkywiseはAirbusの提供する航空業界（航空会社、サプライヤー等）向けのプラットフォームであり、機内データ、エンジニアリングデータ、運航データ等を組み合わせることで、航空機運航の課題に対処することを目的としている。

業界	航空機	適用目的	運用省力化・高度化
事例	Skywise (Airbus)		
<p><概要></p> <ul style="list-style-type: none"> SkywiseはAirbusの提供する航空業界（航空会社、サプライヤー等）向けのプラットフォームであり、機内データ、エンジニアリングデータ、運航データ等を組み合わせることで、航空機運航の課題に対処することを目的としている^[1]。 故障予測 <ul style="list-style-type: none"> 航空機センサーデータの分析により異常動作を分析し、コンポーネントの故障を予測可能^[1]。 従来は部品が故障してから行っていた整備や交換を、故障する前の最適な場所やタイミングで予防的に実施することが可能となり、スペア部品の在庫管理の効率化にも寄与^[2]。 航空オペレーションの改善 <ul style="list-style-type: none"> 匿名化された他の航空会社のベンチマーク指標にアクセスし、フライトオペレーションや機材管理等に関するパフォーマンスを自社のパフォーマンスと比較することで、自社の改善余地を探ることが可能^[2]。 生産プロセスの効率化 <ul style="list-style-type: none"> 自社だけでなく、エアバス社の生産ライン全体で発生している故障や不具合、遅延やその原因をリアルタイムで把握することが可能^[2]。 <p><成果></p> <ul style="list-style-type: none"> ピーチ航空をはじめとした航空会社が本プラットフォームを導入しており、機材が運航停止する時間の削減や、予防整備による整備コスト削減、フライトオペレーションや機材管理の最適化、客室内や地上での運用改善などを実現している^[3]。 品質監視作業の自動化により、ATA（米航空輸送協会）が策定した規格や航空機ごとに分類されている主要な評価基準を即座に得られるようになり、従来は数日かかったレポートが、数回クリックするだけで作成できるようになった^[3]。 			
<p>衛星業界への適用可能性（案）</p> <ul style="list-style-type: none"> 衛星運用においても、テレメトリデータ等を蓄積・活用することで故障予測や運用改善が可能となると考えられ、JAXA等により同種の取り組みが始まっている^[5]。 本事例のように、衛星バスの製造メーカがプラットフォームを提供することにより、同一のバスを利用する複数のユーザー間でのデータ活用（ユーザーの合意のもとに複数ユーザーのテレメトリデータを比較することによる故障予測や異常検知、次世代設計に向けたデータ解析等）が可能となるのではないかと考えられる。 			



図 Skywiseが改善対象とするサプライチェーン^[4]

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ②航空機・防衛業界事例

米空軍では、世界中で運用されているF-16戦闘機の維持と近代化のため、Lockheed Martin社と共同で2機のF-16を実際に分解してスキャンすることにより、エンジン部分を除く他すべての実物大の3Dモデルを作成中である。

業界	防衛	適用目的	品質・コスト・リードタイムの改善
事例	F-16近代化（米空軍 / Lockheed Martin）		

<概要>

- 米空軍では、世界中で運用されているF-16戦闘機の維持と近代化のため、Lockheed Martin社と共同でF-16のエンジン部分を除く他すべての実物大の3Dモデルを作成中である（2021年より4年間の計画）^[1]。
- これにより保守部品の供給に関するサプライチェーンリスクの軽減（3Dプリンティング技術の活用へつながるなど）、F-16の近代化改修へ向けた実機検証による手間とコストの削減が可能になる、としている^[1]。
- 本取り組みでは、2機のF-16を実際に分解してスキャンすることにより、エンジンを除いて航空機の実物大の3Dモデルを作成する^[1]。
- F-16のような実績のあるプラットフォームを使ってデジタルツインのデータモデルを進化させることで、ライフサイクルコストのさらなる削減を実証し、同時にデジタルスレッドの継続性によってさらなる能力を導入することを目指している^[1]。

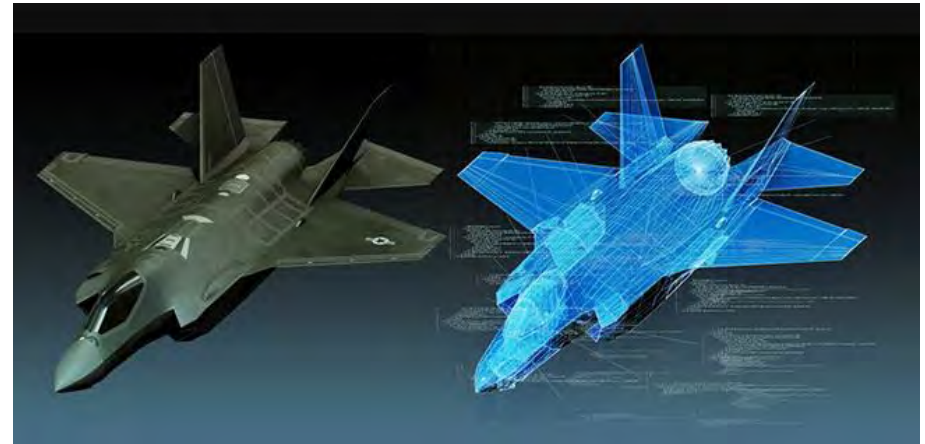


図 戦闘機へのデジタルツイン適用のイメージ^[2]

<成果（見込み）>

- 更新や修理のために航空機を分解するには多大な時間、費用、労力を要している。3Dモデルを活用することにより、整備士が取り外す必要のない部品を取り外す前に、仮想環境でさまざまな解決策をモデル化し、処置が有効どうかを確認することができる。その結果、整備作業の負担を軽減し、航空機が飛行スケジュールから外れるのを防ぐことが可能となることを見込まれる^[1]。

衛星業界への適用可能性（案）

- デジタルツインの構築において、新規システムに対する適用のハードルが高い場合には、実績のある既存システムをリバースエンジニアリングによりモデル化することにより、特にレポート開発の衛星や標準衛星バスを利用する場合等において、次に示すような既存システムの製造・維持管理コストの削減や、次世代開発へのデータ活用等が可能となるのではないかと見込まれる。
 - 軌道上で発生した事象を地上のデジタルツイン環境で再現することによる不具合事象の調査効率化や、当該事象処置の次号機設計へのフィードバック
 - 本事例のように実物大の3Dモデルを作成することによる、製造現場作業員向けのトレーニング（機器取付、ハーネス配線等）

1. USAF, Air Force to develop F-16 'digital twin'

2. PLM & ERP NEWS, The Lockheed Martin Aeronautics Win – Integration and Digital Twins the Secret to Siemens' A&D Success

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ②航空機・防衛業界事例

米空軍では、WeaponONEと呼ばれるプログラムにおいて、デジタルツインを活用することにより現実世界の兵器で取得したデータを仮想空間上へフィードバック（ハードウェアインザループ）し、兵器システムの性能向上を図る取り組みを行っている。

業界	防衛	適用目的	システムの機能・性能向上
事例	WeaponONE（米空軍）		
<p><概要></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 米空軍では、WeaponONEと呼ばれるプログラムにおいて、<u>デジタルツインを活用することにより現実世界の兵器で取得したデータを仮想空間上へフィードバック（ハードウェアインザループ）</u>し、兵器システムの性能向上を図る取り組みを行っている^[1]。 ● 米空軍は「Gray Wolf」と呼ばれる巡航ミサイルシステムを用いて以下に示すデモンストレーションを行った^[1]。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 24時間のATO（Air Tasking Order）サイクルの中で物理環境上のデータを収集 ➢ 人工知能/機械学習技術を活用した高性能コンピューティングシステム上でシミュレーションを実行し、<u>ソフトウェアアップグレードの可能性を評価</u> ➢ 最も適切な行動方針を決定した後、戦域内の物理兵器に迅速に展開 ➢ <u>ほぼリアルタイム、あるいは次の24時間のATOサイクルで、兵器の性能を改善</u> <p><成果（見込み）></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 上記デモンストレーションの成功により、<u>飛行中の兵器からデータを収集し、デジタルツインへフィードバックすることにより迅速なサイクルで性能向上を図ることが可能</u>であることが確認できた^[1]。 ● 今後、更なるデジタルツインモデルの開発、物理環境と仮想環境で相互にデータ交換する取り組みを加速し、実戦環境へ適用されていくことが見込まれる^[1]。 			
<p>衛星業界への適用可能性（案）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 運用中に常にデータの収集、地上との通信を行っている衛星システムにおいても、収集したデータをデジタルツインにフィードバックするハードウェアインザループの取り組みを行うことにより、以下に示すようなシステムの機能・性能向上を図ることが可能となるのではないかと見込まれる。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ <u>初期チェックアウト時の各種ゲインチューニングの効率化・最適化</u> ➢ <u>運用開始後の性能向上（擾乱に対する応答性能の向上、充放電サイクルの最適化等）</u> 			

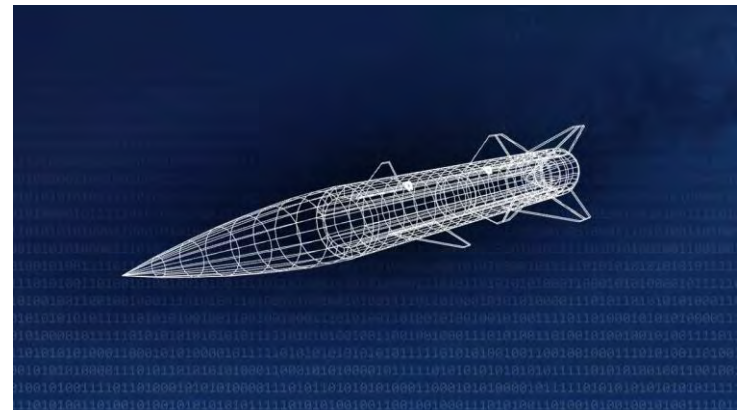


図 WeaponONEにおける巡航ミサイルに対するデジタルツイン適用^[1]

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ②航空機・防衛業界事例

Northrop Grummanが開発中の大陸間弾道ミサイルSentinelはデジタルツインを用いて開発が行われている。本取り組みにより、**様々なパターンの設計を総当たりで評価**することを可能とし、**能力とコストのバランスが最も良いものを選択**することができた。

業界	防衛	適用目的	システムの機能・性能向上
事例	Sentinel ICBM (Northrop Grumman)		
<p><概要></p> <ul style="list-style-type: none"> ● Northrop Grummanが開発中の大陸間弾道ミサイル (ICBM) Sentinelはデジタルツインを用いて開発が行われている。この規模のプログラムでは初めて、完全デジタル環境で成果物が提供される^[1]。 ● プログラム開始時の初期の概念設計フレームから、プロトタイプを製造するEMD (技術・製造開発) フェーズ、初飛行の準備まで、プログラムライフサイクルのあらゆる段階でデジタルツインを採用している^[2]。 ● デジタルツインにおいては、製品や部品の外観だけでなく機能も再現したバーチャル3Dモデルを作成する。これにより、製造開始の前にテストし、フィードバックを得て、再テストを行うことが可能となる^[3]。 ● モジュール式のオープンシステム設計により、運用コストと維持コストが削減され、脅威の状況が進化し続ける中、適切なシステムを維持できるよう非常に高いシステム柔軟性が提供される^[4]。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 長期間の稼働が見込まれるICBMにおいて、デジタル技術の適用により、部品が突然時代遅れになったり材料が予期せぬ形で故障したりする等の問題を迅速に把握して軽減し、移行計画を維持し続けることを目指している^[5]。 ● 現行システム (GBSD) からの移行に向け、発射施設についてもGecko Robotics社のデジタルツインソリューションを用いて解析・構築が進められている^[6]。 <p><成果></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 上記取り組みにより、「60億もの異なるシステム設計」を総当たりで評価することが可能となり、能力とコストのバランスが最も良いものを選択することができた^[2]。 			
<p>衛星業界への適用可能性</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 本事例ように、設計フェーズにおいてモデル化による誤差を極力低減したデジタルツインを構築することにより、大量の設計パターンに対して総当たりでシミュレーションを行うことが可能となり、衛星システムの機能・性能の最適化に寄与できるのではないかと。 ● 但し、世界の中でも最先端の取り組みが行われている米国安全保障分野において、大規模システムにおけるエンジニアリングチェーン全体に対するデジタルツインの導入がようやく実現しつつある状況から、同種取り組みは技術面・コスト面におけるハードルが高いものと考えられる。従って、まずは物理的なプロトタイプ (カンファレンス調査結果におけるFlatsatの取り組み等)等を組み合わせた適材適所でのデジタルツインの導入が衛星開発には適しているのではないかと。 			

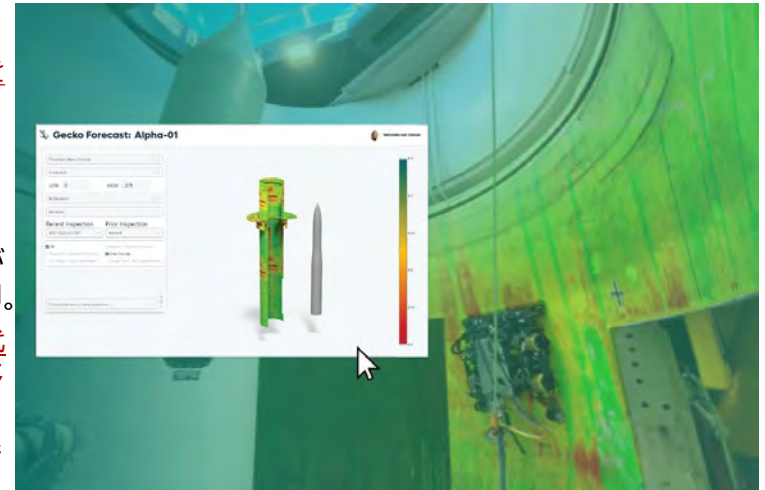


図 Gecko Roboticsによる発射施設解析^[6]

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ③自動車・医療機器業界事例

業界	事例	概要	適用目的		
			システムの機能・性能向上	運用省力化・高度化	品質・コスト・リードタイムの改善
自動車	iXacs (旭鉄工/i Smart Technologies)	自動車部品製造メーカーの旭鉄工は、 <u>製造工程のデータ収集による効率化・低コスト化</u> を目的とし、段階的にデジタル技術を導入。社内用に開発したIoTによる製造ラインモニタリングシステムについて、 <u>新会社を設立し「iXacs」という名称で外販を開始</u> した。			○
	Digital Product Passport (欧州)	欧州産業の国際競争力を高めるための製品政策の中で、EU域外を含む <u>サプライチェーンに関する詳細な一連の環境負荷情報や資源循環性に関わる情報を格納するデータパッケージ</u> である <u>Digital Product Passport(DPP)</u> の仕組みの導入が開始。			○
	電気自動車スタートアップの設立 (ボルボ/ルノー)	ボルボグループとルノーグループは、ソフトウェア定義の完全電気自動車を開発するためのスタートアップを設立。 <u>従来の働き方や企業システムの制限にとらわれずにスタートアップを設立</u> することで、最先端のテクノロジーの実装、イノベーションの実現を目指す。	○		
	ベトナムの「フルデジタル」自動車工場 (VinFast/Siemens)	ベトナムのスタートアップ自動車メーカーであるVinFastはSiemensと協力し、年間25万台の自動車の生産能力を備えた「 <u>フルデジタル</u> 」自動車工場を、 <u>わずか21か月でゼロから構築</u> 。			○

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ③自動車・医療機器業界事例

業界	事例	概要	適用目的		
			システムの機能・性能向上	運用省力化・高度化	品質・コスト・リードタイムの改善
医療機器	ソフトウェア検証プロセスの自動化 (Critical Manufacturing)	Critical ManufacturingのMES(製造実行システム)には米国のFDAや欧州のEMAなどの医療規制機関によって定義されたソフトウェア検証プロセスの自動化機能が搭載。要求～設計結果～テスト結果のトレーサビリティを常に確保することが可能。			○
	クラウドベースの3D CAD導入 (Onshape/Loop Medical)	医療機器製造のスタートアップ企業であるLoop Medicalは、導入コストの削減、スイス・ドイツ・フランスのエンジニアリングチーム間のコラボレーションの効率化を目的とし、クラウドベースの3D CAD製品であるOnshapeを導入。			○
	センサデータの遠隔監視による顕微鏡の故障予測 (ZEISS)	超高解像度顕微鏡メーカーのZEISSは、ハイエンド顕微鏡の顧客満足度の向上とサービスコストの低減を目的とし、顕微鏡のセンサデータを遠隔監視することで校正関連のダウンタイムを削減するサービスの提供を開始。		○	

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ③自動車・医療機器業界事例

自動車部品製造メーカーの旭鉄工は、製造工程のデータ収集による効率化・低コスト化を目的とし、段階的にデジタル技術を導入。社内用に開発したIoTによる製造ラインモニタリングシステムについて、新会社を設立し「iXacs」という名称で外販を開始した。

業界	自動車	適用目的	品質・コスト・リードタイムの改善
事例	iXacs (旭鉄工/i Smart Technologies)		
<p><概要></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 自動車部品製造メーカーの旭鉄工は2014年より、<u>製造工程のデータ収集による効率化・低コスト化</u>を目的とし、段階的にデジタル技術の導入を開始した^[1]。 ● 社内用に開発したIoTによる製造ラインモニタリングシステムについて、<u>新会社 (i Smart Technologies) を設立し「iXacs」という名称で2016年より外販を開始</u>^[1]。 ● <u>製造ラインの生産個数、停止時間、サイクルタイム等のデータについて、外付けのセンサにより収集し、AWSのクラウド上で管理、専用の端末により可視化</u>を行う^[2]。 ● <u>磁石や光を利用した外付けセンサにより、古い設備に対しても導入が可能</u>^[2]。 ● システム導入に際しては、コンサルタントやエンジニアが工場を訪問、またはリモートにより製造ラインを確認し、センサの設置場所の決定、改善箇所の提言等を行う^[1]。 <p><成果></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 旭鉄工は社内工場におけるIoT導入により、製造原価の見える化、人件費削減等を進め、<u>2013年 (デジタル技術導入前) 比で年間4億円を削減</u>することができた^[1]。 ● i Smart Technologiesによる外販においては、部品製造メーカー等を中心に<u>200社以上への導入実績</u>を有している^[3]。 			
<p>図 既存設備への外付けセンサの設置^[2]</p> <p>図 iXacsのシステム構成例^[2]</p>			
衛星業界への適用可能性 (案)			
<ul style="list-style-type: none"> ● 衛星システムメーカーに部品等を供給する<u>Tier2、Tier3のメーカー</u>においても、社内改善活動等の一環としてIoT機器の導入を進めていくことで、<u>比較的安価にデジタル技術の活用が可能</u>となるのではないかと。 ● 特に、簡易なセンサ等により、既存の設備に合わせた機器を用意することにより、更なる導入コストの削減が可能となるのではないかと。 			

1. 日経EXTREND, 老舗車部品メーカーがIoTのDXで改善 トヨタ式で年間4億円を削減
2. i Smart Technologies, iXacs(アイザックス) - IoTによる製造ラインモニタリング

3. i Smart Technologies, 導入事例

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ③自動車・医療機器業界事例

欧州産業の国際競争力を高めるための製品政策の中で、EU域外を含むサプライチェーンに関する詳細な一連の環境負荷情報や資源循環性に関わる情報を格納するデータパッケージであるDigital Product Passport(DPP)の仕組みの導入が開始。

業界	自動車	適用目的	品質・コスト・リードタイムの改善
事例	Digital Product Passport (欧州)		
<p><概要></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 欧州のDG GROW（成長総局）とDG ENV（環境総局）は共同で欧州産業の国際競争力を高めるための製品政策(Product Policy)を定めている^[1]。 ● 上記政策の中で、EU域外を含むサプライチェーンに沿ったすべての生産・流通・加工拠点に関する詳細な一連の環境負荷情報や資源循環性に関わる情報を格納するデータパッケージであるDigital Product Passport(DPP)の仕組みが導入されている^[1]。 ● DPPでは、製品に取り付けた二次元バーコードやICチップを読み取ることにより、製造元、使用材料、リサイクル性、解体方法や利用履歴等を確認することが可能^[2]。 ● 最終的にはあらゆる業界・製品を対象にする構想だが、直近では、2022年に採択された欧州電池規則に即し、車載電池を皮切りに開発が進んでいる^[2]。 ● サプライヤーはDPPに対応できなければ、サプライチェーンから締め出されるリスクがある一方、データ整備に伴い、車載電池を取り巻く診断／修繕・リース・保険などの事業機会創出も期待されている^[2]。 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="267 822 1002 1098" data-label="Diagram"> </div> <div data-bbox="1156 568 1947 1090" data-label="Diagram"> </div> </div> <p style="text-align: center;">図 サプライチェーンを通じた情報管理^[3]</p> <p style="text-align: center;">図 Digital Product Passportの概要^[4]</p>			
<p>衛星業界への適用可能性（案）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 衛星製造業界においても、今後欧州向けの衛星開発においてDPPへの対応が求められる可能性がある（最終的にはあらゆる業界・製品を対象にする構想）ことや、経済安全保障におけるサプライチェーンリスクへの対応等により、部品やコンポーネントの製造元や材料等の情報を含む、サプライチェーン全体における情報管理が必要となっていくのではないかと考えられる。 ● 規制対応等の消極的動機によるデジタル技術の導入であっても、副次的なメリット（サプライチェーン間のデータ連携や不具合情報の共有等）が得られるきっかけとなる可能性がある。 			

1. 企業間情報連携推進コンソーシアム、デジタル製品パスポート (DPP) とは欧州の世界戦略CNEXCHAIN

2. Roland Berger, 車載電池から始めるデジタル・プロダクト・パスポート (DPP)

3. Water magazine, New report suggests Digital Product Passports could be the key to driving carbon neutral decisions

ボルボグループとルノーグループは、ソフトウェア定義の完全電気自動車を開発するためのスタートアップを設立。従来の働き方や企業システムの制限にとらわれずにスタートアップを設立することで、最先端のテクノロジーの実装、イノベーションの実現を目指す。

業界	自動車	適用目的	システムの機能・性能向上
事例	電気自動車スタートアップの設立（ボルボ／ルノー）		
<p><概要></p> <ul style="list-style-type: none"> ● ボルボグループとルノーグループは、ソフトウェア定義の完全電気自動車を開発するためのスタートアップを設立した^[1]。 ● <u>従来の働き方や企業システムの制限にとらわれずにスタートアップを設立</u>することで、最先端のテクノロジーの実装、イノベーションの実現を目指す^[1]。 ● 2026年に生産開始予定の完全電気自動車は、「LCVスケートボードプラットフォーム」と呼ばれるプラットフォーム上に構築され、<u>ソフトウェア定義のアーキテクチャにより高いモジュール性が実現</u>される^[1]。 ● 両社は、デジタル技術の導入に際して既存の組織ではなくスタートアップの設立を選択した理由を以下の通りに述べている^[1]。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ <u>革新的な自由</u>：新たに始めることで従来の制約から自由になり、制限なく創造性と革新性を促進可能 ➢ <u>アジャイルな意思決定</u>：スタートアップ企業は迅速に適応し、大規模組織にとっての課題である、急速に変化する市場で優位に立つための迅速な意思決定が可能 ➢ <u>焦点を絞った戦略</u>：新会社を立ち上げることで、リソース、人材、専門知識を特定の影響力の高い製品にのみ集中させ、戦略的アプローチを確実にすることが可能 ➢ <u>ニッチ市場への浸透</u>：スタートアップはビジネスモデル全体をニッチ市場に合わせて調整し、市場への浸透と顧客満足度を高めることが容易 ➢ <u>リスク管理</u>：革新的な製品を独立した組織にすることで、管理された実験を行うことができ、組織全体を危険にさらすことなくリスクを最小限に抑えることが可能 			
			
<p>図 LCVスケートボードプラットフォーム^[2]</p>			
<p>衛星業界への適用可能性（案）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 長年のノウハウを保有する大型衛星メーカー等において、従来の開発プロセスにとらわれないデジタル技術の活用を進めていく一つ的手段として、IT業界等で盛んに行われている<u>社内ベンチャー制度の設立等の取り組みが有用</u>なのではないか。 ● 小規模で独立した組織を設立することで、<u>意思決定の迅速化やスモールスタート的な取り組み</u>が可能となると考えられる。 			

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ③自動車・医療機器業界事例

ベトナムのスタートアップ自動車メーカーであるVinFastはSiemensと協力し、年間25万台の自動車の生産能力を備えた「フルデジタル」自動車工場を、わずか21か月でゼロから構築。

業界	自動車	適用目的	品質・コスト・リードタイムの改善
事例	ベトナムの「フルデジタル」自動車工場 (VinFast/Siemens)		
<p><概要></p> <ul style="list-style-type: none"> ● ベトナムのスタートアップ自動車メーカーであるVinFastは、年間25万台の自動車の生産能力と、さらに多くの自動車に拡張できる柔軟性を備えた「フルデジタル」自動車工場を、わずか21か月でゼロから構築した^[1]。 ● 上記工場の構築には製造業向けのデジタル技術導入を手掛けるSiemensが協力しており、製品ライフサイクル管理 (PLM) ソフトウェアと製造オペレーション管理 (MOM) を組み合わせた、同社の包括的な製品を使用している^[1]。 ● デジタルツインを活用することにより、完全な仮想環境での物理ベースのシミュレーションとデータ分析の組み合わせ、物理的なプロトタイプの数を大幅に減らしながら、イノベーションをより迅速かつ確実に実現することが可能となる^[1]。 ● 生産工程および実際の製品のパフォーマンスデータを収集、分析し、開発サイクルにフィードバックすることも可能^[1]。 <p><成果></p> <ul style="list-style-type: none"> ● Siemens社のデジタル技術関連製品群を活用することにより、グリーンフィールド（整備されていない土地）に自動車工場を整備する同様のプロジェクトに比べ、2倍の速度で工場を構築することができた^[1]。 			
		 <p>図 VinFast社の自動車工場^[1]</p>	
		 <p>図 デジタル技術関連製品の活用^[1]</p>	
		 <p>図 デジタルツインによる開発プロセス^[1]</p>	

衛星業界への適用可能性（案）

- 衛星製造業界においても、新たに設備を整備する際に他産業でも導入されている既存のデジタル技術関連製品・ノウハウを導入し、設備間の連携や将来のスケラビリティ等を考慮した設備設計とすることにより、製品ライフサイクルに対するデジタル技術の導入を加速することが可能となるのではないかと。
- また、本事例のように生産工程および実際の製品のパフォーマンスデータを（新製品ではなく）現行製品の生産工程にフィードバックする取り組みにより、衛星コンステレーションにおける同一モデルの製造やEM製造後のFM製造に対する生産品質・効率の向上に寄与できると考えられる。

1. Siemens, The first fully digital automotive factory in South East Asia

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ③自動車・医療機器業界事例

Critical ManufacturingのMES（製造実行システム）には米国のFDAや欧州のEMAなどの医療規制機関によって定義されたソフトウェア検証プロセスの自動化機能が搭載。要求～設計結果～テスト結果のトレーサビリティを常に確保することが可能。

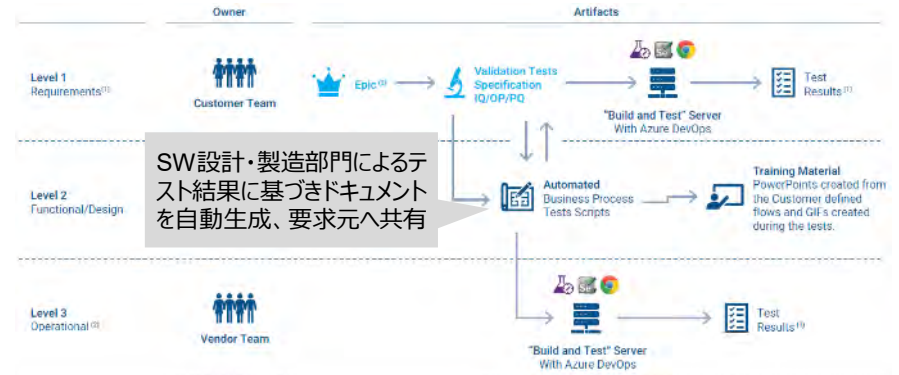
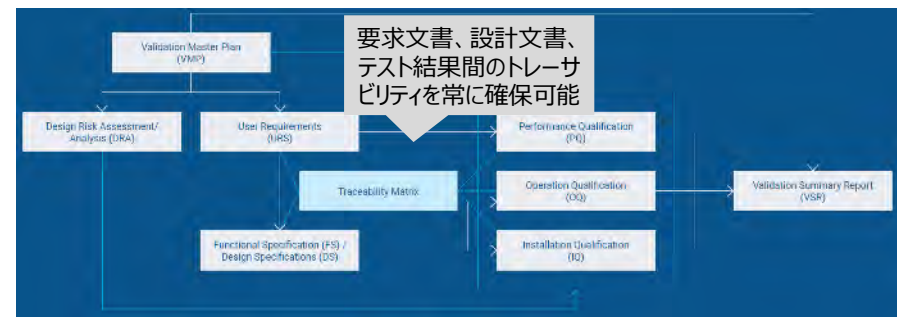
業界	医療機器	適用目的	品質・コスト・リードタイムの改善
事例	ソフトウェア検証プロセスの自動化（Critical Manufacturing）		

<概要>

- 医療機器メーカーは、患者の安全を確保するため、米国のFDAや欧州のEMAなどの医療規制機関によって定義されたソフトウェア検証プロセスへ対応し、大量のドキュメントを提出し承認を受ける必要がある^[1]。
- Critical ManufacturingのMES（製造実行システム）には上記プロセスへ対応したソフトウェア検証の自動化機能が搭載されており、要求部門／設計・製造部門等が開発環境を共有し、要求～設計結果～テスト結果のトレーサビリティを常に確保することが可能^[1]。
- 製造部門がテストを実行すると、自動的に規制機関による検証プロセスに対応したドキュメント（テスト結果）が生成され、要求部門に共有される。
- テスト結果と同時に、ユーザ向けトレーニング用のパワーポイント資料も生成される^[1]。

<成果>

- 本製品により、これまで数ヶ月かかっていた検証プロセスが数日程度まで短縮されるとされている^[1]。
- 米国の医療機器メーカーであるUltradentは、これまで40年間紙ベースのシステムを使用していたが、3年間のロードマップを策定し本製品の導入を進めており、ウォーターフォール方式からアジャイル方式へ開発プロセスを切り替える計画^[2]。

図 ソフトウェア検証プロセスの自動化^[1]図 トレーサビリティの確保と検証ドキュメント生成^[1]

衛星業界への適用可能性（案）

- 衛星製造業界においても、打ち上げ後の修正が困難である製品特性から、他産業に比べて要求に対するトレーサビリティ確認（設計審査等）に多くの時間を要していると想定されるため、検証プロセスの自動化はコスト・リードタイムに対するメリットが大きいと考える。
- 特に、今後ソフトウェア定義衛星等の取り組みにより製品におけるソフトウェアの占める割合が大きくなっていくと考えられるため、本事例のようなソフトウェア開発プロセスにおける設計結果と検証結果のトレーサビリティ確認の自動化が有効なのではないか。

1. Critical Manufacturing, Automated Validation
 2. Critical Manufacturing, A step to the future of manufacturing

医療機器製造のスタートアップ企業であるLoop Medicalは、導入コストの削減、スイス・ドイツ・フランスのエンジニアリングチーム間のコラボレーションの効率化を目的とし、クラウドベースの3D CAD製品であるOnshapeを導入。

業界	医療機器	適用目的	品質・コスト・リードタイムの改善
事例	クラウドベースの3D CAD導入（Onshape／Loop Medical）		

<概要>

- 医療機器製造のスタートアップ企業であるLoop Medicalは、導入コストの削減、スイス・ドイツ・フランスのエンジニアリングチーム間のコラボレーションの効率化を目的とし、クラウドベースの3D CAD製品であるOnshapeを導入した^[1]。
- Onshapeはクラウド上に構築されているため、デバイス（PC／タブレット等）やOS（Windows／Mac）等に依存せず、Webブラウザ上からアクセスすることが可能^[1]。
- ユーザ間のコラボレーション効率化のため、以下のような機能が利用可能^[2]。
 - CADデータのブランチとマージ、編集履歴の追跡
 - リアルタイムでのデザインレビュー（リアルタイムコメント）
 - コメントや会話スレッドの最新情報のリアルタイム通知
 - 個人またはチームに対するタスクの割り当てと進捗管理
 - CADデータの共同編集

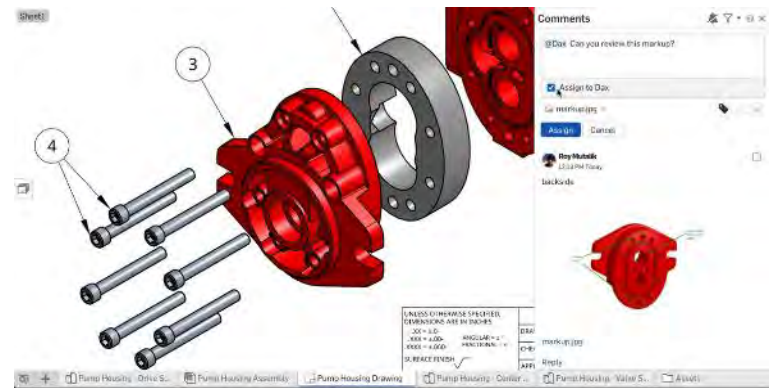


図 CADデータの共同編集^[2]

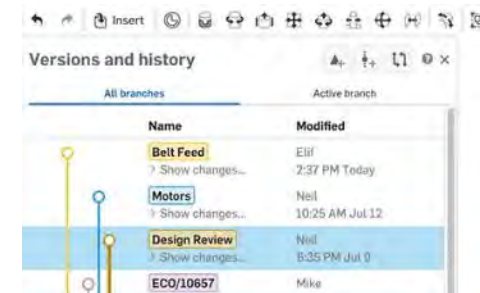


図 CADデータのブランチとマージ^[2]

<成果>

- Loop Medicalは事業立ち上げに際し、本製品の導入により高性能な動作環境の整備やCAD製品のインストール等の手間とコストを省くことができた。また、IT専任の担当者を配置する必要がなくなった。
- コラボレーション機能を利用することにより、遠隔地のチーム間での作業を30%効率化することができた。

衛星業界への適用可能性（案）


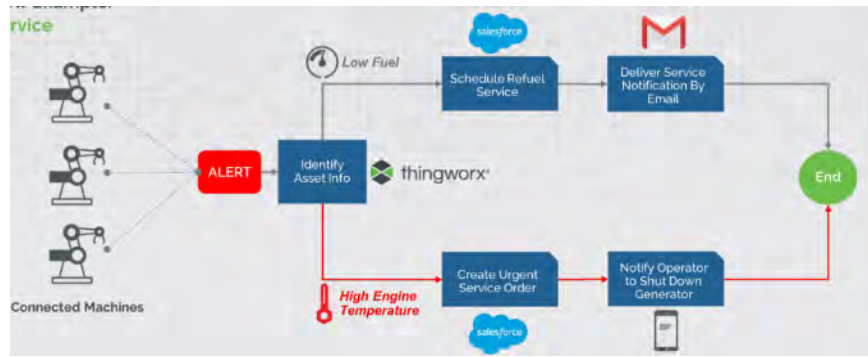
- 衛星業界においても、ソフトウェア開発については既に構成管理ツール（Git等）の活用が進んでいると考えるものの、多くの要素から構成されるハードウェア開発に対しても本事例のようにコラボレーション効率化のためのソリューションが有効なのではないか。
- 特にスタートアップ企業においては、本事例のようにクラウドベースの製品を利用することにより導入コストを抑えた事業の立ち上げが可能となるのではないか。
- また、Tier2、Tier3のメーカーも含めたサプライチェーン間の設計データのやり取りをクラウド上で実施することにより、情報連携の効率化を図れると考えられる。

1. gtc, [Loop Medical is Developing the First Business Planet Collection Device](#)

2. Onshape, [Unmatched Team Collaboration](#)

3.2.1.6 他分野DX事例調査 ③自動車・医療機器業界事例

超高解像度顕微鏡メーカーのZEISSは、ハイエンド顕微鏡の顧客満足度の向上とサービスコストの低減を目的とし、顕微鏡のセンサーデータを遠隔監視することで校正関連のダウンタイムを削減するサービスの提供を開始。

業界	医療機器	適用目的	運用省力化・高度化
事例	センサーデータの遠隔監視による顕微鏡の故障予測（ZEISS）		
<p><概要></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 超高解像度顕微鏡メーカーのZEISSは、ハイエンド顕微鏡の顧客満足度の向上とサービスコストの低減を目的とし、<u>顕微鏡のセンサーデータを遠隔監視することで校正関連のダウンタイムを削減</u>するサービスの提供を開始した^[1]。 ● 研究機関などにとって装置のダウンタイムは、プロジェクトの遅延や設備の貸出による研究費の捻出等に影響が発生するため、顧客満足度やサービスエンジニアの派遣コストへ直結する要素である^[1]。 ● センサーデータを収集・分析するためのThingWorxと呼ばれるIoTプラットフォーム製品と、Microsoft Azureのクラウド環境を組み合わせることにより、<u>顧客の顕微鏡を遠隔で監視し、問題が出る前に遠隔で機器の校正を行ったり、ソフトウェアのアップデートを行うことが可能</u>となった^[1]。 <p><成果></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 同社の顧客の約85%が本サービスを利用し、<u>初回対応率（FTTR※）が13ヶ月で7%向上</u>した^[1]。 ※サービスエンジニアが問題への対処を初回の訪問で完了させて原状復帰させる率 ● <u>これまで1日程度掛かっていた校正関連のダウンタイムについて、1～2時間に短縮</u>することができた^[1]。 			
 <p>顧客の稼働時間を最大化する 技術者の派遣を最小限に抑える サービス収益の最大化</p> <p>図 保守サービスを最適化する3つの方法^[2]</p>  <p>図 ThingWorxによる機器の接続例^[3]</p>			
<p>衛星業界への適用可能性（案）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 衛星運用においても、<u>テレメトリデータ等を蓄積・活用することで故障予測や運用改善が可能</u>となると考えられ、JAXA等により同種の取り組みが始まっている。 ● また、<u>衛星コンステレーションの運用時、故障予測・検知により当該衛星を一時的に除外</u>する等、運用計画の柔軟な変更にも対応可能となるのではないか。 			

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.2.1 デジタル開発技術調査

3.2.1.1 MBSE/MBD調査

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

3.2.1.4 他分野 製造・試験技術調査

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査

3.2.1.6 他分野DX事例調査

3.2.2 強み・弱み分析

3.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

3.2.2 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		
		MBSE技術	設計・生産データの一元管理、及び、活用技術	特定工程を効率化する技術
		設計自動化技術 (MBD-AC/AI活用等)		
世界の動向		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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	<ul style="list-style-type: none"> ✓ JAXA DX研究会にて、宇宙業界としてMBSE推進を取り組み ✓ 国内で自動車、航空機等MBSE推進例がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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。 ✓ MBD-ACの開発標準への取込み
日本の現状	弱み	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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。

3 調査内容詳細

3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析

3.2 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

3.2.1 デジタル開発技術調査

3.2.1.1 MBSE/MBD調査

3.2.1.2 AIを活用した設計技術調査

3.2.1.3 生産性向上のための設計技術調査

3.2.1.4 他分野 製造・試験技術調査

3.2.1.5 衛星分野デジタル開発技術事例調査

3.2.1.6 他分野DX事例調査

3.2.2 強み・弱み分析

3.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析

3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析

3.5 コンステレーション構築等に必要技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

3.2.3 開発戦略の検討 (MBSE開発戦略案)

開発の 必要性	<ul style="list-style-type: none"> ・SDS化、コンステレーション化、自動化/自律化等、システム(地上含む)は高度化/複雑化の一途 ・構成するサブシステム側の技術も高度化/複雑化。 ・一方で衛星の競争環境は激化。開発期間は短縮する必要あり。 <p>→ ニーズと開発、各設計/製造/検証間をより効率的につなぐ、システム設計手法の効率化が必須。その最有力候補はMBSE。</p>	
論点	MBSEを導入するか否かではなく、どのようにすれば効果的に導入できるか？	
調査 結果	<p>調査から見てきたMBSE導入の効果を最大化させる主なポイント：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ ユーザー、ツールベンダー一体となったコミュニティの形成：MBSEのようなデジタル開発技術ではツールのサポートが必須。コミュニティとしてツールベンダーを巻き込み、ツールベンダー側の動機付けとなるコミュニティが必要。 ➤ コミュニティ内でのベストプラクティスの共有、それを基にした標準化：MBSEは自由度が高くモデリングができてしまうため、分野毎に何をモデリングすると効果が高いか、ベストプラクティスの共有、及び、それをオートロジー化するなどの標準化が効率化には不可欠。特に顧客-メーカー、メーカー間等、作業I/F部分の標準化が効果的。 ➤ 導入の加速にはトップのコミット(社内、客先要求)が必要 ➤ 継続的なPDCAの改善サイクル 	
日本の 現状	<p>できていること：JAXA刷新PJ DX研究会内にて推進</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ コミュニティの形成 ➤ 日本国内での作業I/F部分の標準化 	<p>できていないこと：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 欧米動向含めた標準化 ➤ トップのコミット・継続的なPDCA改善サイクル
開発 戦略案	<p>JAXA 刷新PJ DX研究会によるコミュニティを維持・発展の上、以下に取り組む。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① コミュニティの進める標準化がガラパゴス化しないよう、欧米の標準化動向の調査、自身の標準との比較、及び、欧米標準化コミュニティの活動への積極的な参加を進める。 ② JAXAプロジェクトでの原則MBSE適用化に向けた活動 <ul style="list-style-type: none"> ・単にパイロットプログラムへの適用のみではなく、そのPJ完了を待たず、フェーズ毎に成果を刈り取り、適用PJを拡大する仕組み ・実用PJへの適用に対する課題の洗い出し、その課題に対する技術や規格の開発 ③ 多数のPJに渡って継続的にMBSE技術開発のPDCAを回せる仕組みの構築 	

<p>開発の 必要性</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 日本国内には年産5~10機程度の少量・多品種の小規模量産を必要としている企業が多い(2.5.1項)。 ➤ このような少量・多品種の生産に関しては、大規模な設備導入等で特定の工程を効率化したとしても、効果は限定的であり、各工程間(設計-生産、生産の工程間等)を効率的につなぐ取り組みが効果的となる。(3.2.1.4項) <p>→ 一元管理されたデータ(設計データ、IoT取得データ等)を部門間で活用する技術が重要。</p>		
<p>論点</p>	<p>各社異なる生産システムを採用している中、我が国全体として本技術の開発・導入をより効率的に行えるようにする方法は何か？</p>		
<p>調査 結果</p>	<p>調査から見てきた導入の効果を最大化させる主なポイント：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 設計者・製造者に負担をかけないデータ取得・分析の仕組みの構築 (既存設備等に追加できる技術・システムも多く開発されてきている.) ➤ 1社内に留まらず、サプライチェーン含めた情報共有システムの構築 		
<p>日本の 現状</p>	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="238 714 1077 1009"> <p>できていること：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 単一工程の生産性改善等は日本各社の改善活動等で進んでいる。 ➤ 製造アライアンスへの取組等、特定の企業間での連携の取組は進められている。 </td> <td data-bbox="1077 714 1989 1009"> <p>できていないこと：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 人工衛星分野でのEMS(製造受託)ベンダーの確立は途上。 ➤ システムメーカー、EMSベンダー間でのより効果的な情報共有。 ➤ EMSを前提としたシステム開発フローの再構築 </td> </tr> </table>	<p>できていること：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 単一工程の生産性改善等は日本各社の改善活動等で進んでいる。 ➤ 製造アライアンスへの取組等、特定の企業間での連携の取組は進められている。 	<p>できていないこと：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 人工衛星分野でのEMS(製造受託)ベンダーの確立は途上。 ➤ システムメーカー、EMSベンダー間でのより効果的な情報共有。 ➤ EMSを前提としたシステム開発フローの再構築
<p>できていること：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 単一工程の生産性改善等は日本各社の改善活動等で進んでいる。 ➤ 製造アライアンスへの取組等、特定の企業間での連携の取組は進められている。 	<p>できていないこと：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 人工衛星分野でのEMS(製造受託)ベンダーの確立は途上。 ➤ システムメーカー、EMSベンダー間でのより効果的な情報共有。 ➤ EMSを前提としたシステム開発フローの再構築 		

<p>開発 戦略案</p>	<ol style="list-style-type: none"> ① 宇宙産業向けEMSを指向するベンダーへの支援 生産システムは各社異なるため、支援効果を最大化させるためには、衛星各社から製造を請け負うEMSベンダーの育成を行うことが望ましいのではないかと。 ② システムメーカー、EMSベンダー間での情報共有、活用技術の開発 各社の得意領域に集中する現在の分業の流れの効果を最大化させるためにも、企業間の情報共有の効率化が重要。EMSベンダーを核として情報共有の仕組みを開発することで、効果が最大化できるのではないかと。 ③ 現状のシステムインテグレーションフローは製造・試験が入り組んでおり、EMSを効果的な実施が難しいと想像される。EMSを前提とした開発フローや、EMS側での製造・検査取得データの共有方法等開発が必要。
-------------------	---

3.2.3 開発戦略の検討 (設計自動化技術開発案)

<p>開発の 必要性</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ MBD-AC/生成AIを活用した設計技術等、新規設計技術は設計生産性向上への寄与は大きく、活用せずに欧米等の企業を競い合うことは困難 ➤ 一方で、これら新規技術を活用する際に、どのようにすれば設計品質を確保できるのかは大きな課題。 	
<p>論点</p>	<p>MBD-AC/生成AI等の新規設計自動化技術の導入時の適切な設計品質確保方法とは？</p>	
<p>調査 結果</p>	<p>調査から見てきた導入の効果を最大化させる主なポイント：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 1社の取組では試行数が少なく、技術を枯れさせ、十分な設計品質を得るまでにコストと時間がかかりすぎる。複数社でのコミュニティ形成により、知見の共有し、可能な範囲での標準化、ガイドライン化が効果的。 ➤ 新規設計技術の設計品質保証はツールベンダーに依存するところも多い。コミュニティ形成や標準化により、ツールベンダーのモチベーション向上、取組容易化も重要。(例：ESAではMBD-ACのガイドラインを作成。その中でツールベンダーのMathWorksとの協力関係が見受けられる。) 	
<p>日本の 現状</p>	<p>できていること：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ MBD-AC等の技術採用は各社進んでおり、SWに関しては開発標準への取込みも行われている。 ➤ 各社の取組の中で品質保証はしている。 	<p>できていないこと：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 新規設計技術適用可否を判断する際の根拠となりうるガイドライン等がない。 ➤ 各社間での知見の共有、その体系化がない。
<p>開発 戦略案</p>	<ol style="list-style-type: none"> ① 新規設計技術採用に関わるガイドラインの整備 生成AIの活用等、新規の設計技術が次々と生まれる中、新規技術採用の効率化とインフラ化しつつある宇宙産業での品質確保のバランスをとるためには、適用に関するガイドラインが必要ではないか。適用する衛星のクラスだけでなく、該当技術を適用する機能・部分のクリティカリティに応じて、適用までに実施すべき、当該設計技術に対する検証項目等が参照できることが望ましい。 ② 特定の新規設計技術の設計・検証フローの標準・ガイドライン化 生成AIによるSWコード生成や、生成AIを用いたAM構造最適化等、有望な技術に関しては、ツールベンダー含めたユーザーコミュニティを形成し、ベストプラクティスの共有、及び、それらを活用した標準化、もしくは、ガイドライン化を進めていく事が重要。その際、①と同様、衛星クラス、採用部分のクリティカリティに応じたテーラリングが行えることが望ましい。 	

- 3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析
- 3.2 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
- 3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析
 - 3.3.1 オンボード基盤技術
 - 3.3.1.1 オンボード処理に関わるサービス/アプリケーション/技術の動向調査
 - 3.3.1.2 オンボード処理に関わるプレイヤー調査
 - 3.3.1.3 デバイス調査
 - 3.3.1.3.1 デジタル処理デバイス調査
 - 3.3.1.3.2 メモリ調査
 - 3.3.1.4 強み弱み分析
 - 3.3.1.5 戦略・研究開発計画の検討
 - 3.3.2 誘導制御系技術
 - 3.3.3 電源系技術
- 3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析
- 3.5 コンステレーション構築等に必要な技術
- 3.6 定常・動向分析
- 3.7 適時調査・事実確認

3.3.1 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。

3.3.1.1 オンボード処理に関わるサービス/アプリケーション/技術の動向調査

- ① まとめ
- ② 通信分野でのオンボード処理
- ③ 観測分野でのオンボード処理
- ④ 宇宙データサーバの動向
- ⑤ セキュリティ関連のオンボード処理

① まとめ

- 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機能が、実証段階から実用段階へ移行。それに伴いSWの効率的な開発に焦点が移ってきている。並行して観測運用のオンボードでの自律化も実証段階であるが開発が進んでいる。	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
暗号化	従来、地上-衛星間の暗号化は計算量の小さい共通鍵暗号方式が一般的であったが、衛星間通信のネットワーク化等の進展により、共通鍵暗号方式では限界が来る可能性があるため、公開鍵暗号方式への取り組み例も見受けられる。	
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。	



※1:SW無線の観点では、通信分野が先行しているため、以降オンボード基盤技術としての詳細調査は省略する。

※2:画像処理の観点では観測分野が先行しているため、以降オンボード基盤技術としての詳細調査は省略する。

誘導制御技術調査の観点から、下期に詳細調査を実施予定。

② 通信分野でのオンボード処理

- 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。近年、よりビームの柔軟性を重視する傾向あり。
- LEOでは、Mobileダイレクトアクセスに関して地上局含めて開発が進む。

	技術トレンド	備考
GEO/MEO 通信	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 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を確保した広帯域衛星の普及が進む(2022年度の調達静止衛星の大半が本機能を保有、SES-17、O3b mPOWER等軌道上運用開始) ➤ 総通信帯域を優先しているため、データの変復調等を行わないTransparent型の通信衛星が多い。 ➤ 大容量の通信帯域(~数100GBps)を効率的に処理するため、各社専用のオンボード計算機を開発している。 ➤ 近年ESAはTransparentの中でも、帯域は~100Gbps程度までに抑えて、よりビームの柔軟性を重視する傾向あり。 	
LEO通信	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 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を確保した通信衛星が一般的。 ➤ 衛星間光メッシュネットワーク等に接続する衛星においては、変復調が必要。 ➤ ASTmobile, Starlink等、Mobileへのダイレクトアクセスに関する技術実証が急速に進捗中。携帯基地局の機能の、衛星-地上局間での分担が肝になると推察。 	

② 通信分野でのオンボード処理

	各ミッションでのSDS特徴	昨年までの調査結果と整理	今年度における変化(見立て)
「静止通信」 において	<ul style="list-style-type: none"> a. SDS = データ復調を伴わない全データデジタル処理、≠SDR。 b. 最大数100Gbpsやビーム配置をデジタルデバイス技術で軌道上可変、需要に対応。2022年度は調達静止衛星の大半がSDS 	<ul style="list-style-type: none"> a. 「可変性」は近年のGEO HTS事業のコア。標準品ではなく、大手各社が開発 b. 処理速度・可変・部品・アルゴリズムキー c. 復調はせず欧州ではTransparent payload等と称する d. 軌道上運用開始 (SES17[DBFは弱い]、mPower[強い])、評価は今後 	<ul style="list-style-type: none"> a. 商用通信はデータ内容のエッジ処理よりも通信ビーム柔軟性のニーズが高く技術的には優先。 b. マルチオービットは声は高いが先行するSES・Viasatの状況は不明 c. Defense衛星ではAEHF等で一部の帯域をClassifyとしてDmuxした後再生中継のように見える(高速CMD同等)が全帯域に進むかは不透明、デバイスと優先度次第。 d. O3b mPowerの軌道上電源系不具合やOnesatの開発遅延等、最新の欧米のSDS衛星開発に躓きが見受けられる。
「LEO通信」 において	<ul style="list-style-type: none"> a. 1機のスループットが低い(10数Gbps) b. 通信データの変復調までソフトウェアで行い、SDS≒SDR。 	<ul style="list-style-type: none"> a. 衛星間メッシュネットワークでは復調(送達先制御用MPL等)が必要でありSDRが必要 b. 同時にセキュリティや干渉回避のための変復調方式や広帯域の周波数への対応をソフトウェアで実施し付加価値(PWSA, イリジウム等)。 c. SpireコンステではNB通信ミッション(AIS/IoT/Msg.通信)を同じ衛星で軌道や期間に応じてSDRとFPGA MPSoCのSWで可変にし通信サービスとのこと。NBなのでできる。 	<ul style="list-style-type: none"> a. Starlink Ver2の仕様からMobileダイレクトアクセスの性能拡大、20kW級のKa/Eバンド大型衛星がコンステ計画。 b. GEOの優位性へ更に一石 c. gNodeBの搭載レベルの見極めが開示されていないため不透明(G/Wビーム大幅拡充計画からRUのみ搭載の可能性有)

② 通信分野でのオンボード処理

	各ミッションでのSDS特徴	昨年までの調査結果と整理	今年度における変化(見立て)
「静止通信」において	<ul style="list-style-type: none"> a. SDS=データ復調を伴わない全データデジタル処理、≠SDR。 b. 最大数100Gbpsやビーム配置をデジタルデバイス技術で軌道上可変、需要に対応。2022年度は調達静止衛星の大半がSDS 	<ul style="list-style-type: none"> a. 「可変性」は近年のGEO HTS事業のコア。標準品ではなく、大手各社がオリジナルで開発し自社バスとして実装。 b. 処理速度・可変・部品・アルゴリズムキー c. 復調はせず欧州ではTransparent payload等と称する d. 軌道上運用開始 (SES17[SFPBと思われるDBF機能はないかあっても励振素子数は最小と推察]、mPower[強い])、評価は今後 	<ul style="list-style-type: none"> a. 商用通信はデータ内容のエッジ処理よりも通信ビーム柔軟性のニーズが高く技術的には優先。各社苦勞しつつ開発中、数年遅れておりMEOで軌道上不具合もあった。 b. また欧州系SDSは各オペレータへの納入に軒並み数年単位の遅延有 c. 一方大手企業は製造+サービス+デバイス+SWが一体で次なる運用コスト削減・最適化・マルチオービットを見据えて通信のエッジ処理のための開発を進めている。運用管制・干渉周波数分析・再変調等が推測されるも、明確な目的は非開示。 d. マルチオービットは今年になってSESがGEO/MEOの本格事業とLEO提携、IntelsatのMEO計画公表、EutelsatのOneweb収益化計画声等、静止オペレータの積極的な事業展開が開始され今後シームレスとレジリエンスの必要要件となる印象。 e. IntelsatブルーノCTO「MEOはGEOやLEOと比較して顧客満足度と財務的見返りの両方から最適な投資、LEOのみのビジネスモデルの持続可能性には疑問を持っている」 f. Defense衛星ではAEHF等で一部の帯域をClassifyとしてDmuxした後再生中継するように見える(高速CMD同等)が全帯域に進むかは不透明、デバイスと優先度次第。 g. 上記と並行して小規模マルチビームではあるが、GapFiller的な小型Kaバンド衛星(Astranis)や新興のSwissto12のHummingBirdも安価なProceで複数受注
「LEO通信」において	<ul style="list-style-type: none"> a. 1機のスループットが低い(10数Gbps) b. 通信データの変復調までソフトウェアで行い、SDS≒SDR。 	<ul style="list-style-type: none"> a. 衛星間メッシュネットワークでは復調(送達先制御用MPL等)が必要でありSDRが必要 b. 同時にセキュリティや干渉回避のための変復調方式や広帯域の周波数への対応をソフトウェアで実施し付加価値(PWSA,イリジウム等)。 c. SpireコンステではNB通信ミッション(AIS/IoT/Msg.通信)を同じ衛星で軌道や期間に応じてSDRとFPGA MPSoCのSWで可変にし通信サービスとのこと。NBなのでできる。 d. なおLEO通信衛星でもOnewebのようにデジタル処理だが非再生(Transparent)で行うケースも多い。 	<ul style="list-style-type: none"> a. Starlink Ver2の仕様から通信性能としてEIRPとG/W電力・ビーム数が大幅に拡大、20kW級・2ton級のKa/Eバンド大型衛星となるとの数値が推測されている。但しVer2はStarShip打上げ前提であり今はVer2mini。 b. GEOオペレータもLEOを事業の一部に取り込む動きが急。営業提携や買収等。 c. gNodeBの搭載レベルの実現度見極めが開示されていないため進展は不透明。Starlinkも仕様からは衛星間に依存するだけではなく、最終的にはG/Wに常時大容量をDLする必要性から、G/W回線を大幅に拡充。RUのみ搭載の可能性が高い。⇒その後Ver2ではLTEのeNodeB機能の搭載の情報あり。 d. データレートではAST社が10Mbpsの実証を行ったとのことダイレクトスマートフォンの動きも早い。ここでもRIU/DU/CUの搭載化レーヤは不明なるも、RUまでの搭載ではないかと推察される(未確認)。 e. 高スループット光ネットワーク(HyDRON)のようなミッションでは、レーザー通信端末をRFリンクと多重化されたチャンネルを接続し、それぞれのプロトコルが異なるため復調⇒変調のための再生中継が必要と言われている。但し日本の光中継静止衛星ではオノキーイングをKaのPSKIに変換している1:1接続であり再生中継ではない。

② 通信分野でのオンボード処理

(1)最近の通信オペレータ見解 (海外)

(1-1) Satellite2023

<https://spacenews.com/leo-constellations-are-starting-to-disrupt-geo-capacity-contracts/>



大型通信衛星のSDSに関する最近の話題 (2023.3月)

- 衛星ブロードバンドの顧客は、LEOの容量が日進月歩で拡大する状況でGEOオペレータに対しても将来の期待できる**LEOの価格を念頭に短期契約を要求する傾向が強い** (Regionalオペレータ)。
- Starlink (当社見立てではCAPEXを回収する価格設定ではない) とOneWeb (きわめて高価) は依然としてLEO拡大に投資と開発を継続しているがGEOオペレータは、すでにビジネスへの大きな影響を自覚。
- アラブ首長国拠点のABS談 「以前5年契約であったところから**1年更新へ契約**を求られている。」
- Arabsat談「顧客はLEOの状況は**圧倒的に供給過剰**と考えている。」
- 英国Avanti談「新規衛星調達はLEOへの資金還流で**GEOファンドははるかに厳しい。**」

一方以下の事情も言及しており、したがってGEO/MEO通信衛星のビジネスチャンスは技術とコストが成立すれば成長余力は大きいとのこと。

- LEOは80%をただ飛行しているだけであり空海のBB需要があるとはいえ、**GEOと異なりCap. = 需要ではない。**
- コンステレーション維持のため5~7年ごとにほぼ**全機を入れ替えることになり莫大なランニングコスト**が必要。
- GEOは**中長期契約から短期契約への移行圧力が大きい**が、単価は高く、多くの収益につながる可能性。

② 通信分野でのオンボード処理

(1)最近の通信オペレータ見解 (海外)

(1-2) LEOに対するGEOの機能性能向上に関する考察 (negative terms)

通信GEOが大型化するLEOコンステレーションと対抗して、今後も事業継続される条件として、以下の条件と考えている。

(赤は現在未実現)

- ✓ SDSがベース（スルーリピータであるが帯域、ビーム、接続の可変性をデジタル化、すなわちビジネスや場合によっては静止位置も周波数によっては変更可能）
- ✓ 衛星 1 機当たりの総容量（数10Gbps～現在最大1Tbps[Viasat-3]）はMore and more（Global）
- ✓ 覆域の広域性(DBFにより最低半球、最終的にはGlobal、ただしまだ少数)、DualUseになるに従い広域化
- ✓ ビーム精細化（最低0.5°～0.数°）：VIASAT-3は既に0.1deg以下で通常の1/5以下
- ✓ ビット単価(1～2M\$/Gbps：数年前と変わらず、まだGEOではハードルが高い)
- ✓ **軌道上での搬送波周波数変更（Ku⇔Kaなど）**
- ✓ **全帯域の再生中継**

⇒LEOとの競争力の観点でnegative要素※1とpositive要素※2を以下に示す。

※1 GEOでのフル再生中継negative要素。（当社見立て）

- 数100Gbpsの通信処理とDBF機能を現状Softwareだけで行うことはまだ難しく、観測衛星やNB通信におけるSDSのトレンドとは異なりHW依存は当分続くと想定する。
- 通信衛星が「SDS」を近年称しているのは、「SDS」が当然の観測衛星のデータ処理や高次処理、乃至はNBで衛星間が必須のIridiumとは異なり、漸く数百Gbpsのリアルタイム処理が宇宙でもできるようになったことから、SDRから派生してそう総称している、と理解している。

② 通信分野でのオンボード処理

(1)最近の通信オペレータ見解 (海外)

(1-3) LEOに対するGEOの機能性能向上に関する考察 (positive terms)

※2 同上positive要素。(当社見立て)

- 一方、上記背景(BB全体の再生中継やその先のエッジ処理の困難さ)から、今までHTSは衛星が得意な5Gのバックホールとして貢献してきたが、LEOがモバイルダイレクトアクセスと更なるBB化を進めるトレンドの中で、GEOの優位性は、LEOに比較して非常に小さいCAPEX、地域需要に最適化可能、周波数権益に限定されるのか？
- Positiveなトレンドとして以下を考えている (当社見立て)
- 例えば5GのgNodeBのRU (無線ユニット) だけでなくDU (分配ユニット) やCU (中央演算ユニット) のオンボード化によるgNodeB全体の搭載のEUの動き (LEO対象だけでなくGEOの動きもある) は既に開発RMに上っている (2022年度調査結果と同じ) 。
- **SDSの運用は地上におけるDPRM (通信コンフィギュレーション最適化装置) の設計やその運用が複雑であり、一部をオンボード化によるオペレータの通信制御負荷分散の動きがある (メカヒア@WSBW)**
- **またそれ以外にHTSの受信データによるGeo Location等のエッジ処理は復調とデータ処理が必要であること (同上)**
- 特定ユーザ (特定帯域) のセキュリティ強化のための部分的再生中継・再暗号化・再変調の動き (AEHF)
- **これらは静止レガシー大手の中で出てきていると聞いており、実際ASICベースの既存DTP内ではこれら付加価値向上のための追加機能は難しく、外付けのエッジコンピューティングを新たに既存通信GEO SDSに搭載するコラボレーション (WinWinの付加価値向上) のトレンドも出てきている (同上) 。**

② 通信分野でのオンボード処理

(1) 最近の通信オペレータ見解 (国内)

[1] 事業模索中

①NTN事業を立ち上げ中の事業者もあり、一方GEOの既得権益、費用対効果に自信を持ちつつも、新しい通信・観測事業を模索中という印象。

- フルデジタルペイロードは、まだ放送衛星のように技術的に完成されていない点と、どのような顧客ニーズがあるか模索中。但し従来通信放送ではアンカーテナンシーがなかなかつかない状況であり、事業の方向であることは一様に評価。
- レガシーオペレータは②GEOの軌道権益が最大の財産、GEOコンステレーションという構想もあるし、③本格的なスマホへのBBのダイレクトアクセスの考えもある。ユーザへ同じ方向から到来する電波源として既存のGEOは優先され、今後LEO衛星がますます増えても変わらない。
- また④LEOコンステレーションはCapexだけではなく機数を維持するためのOpexは非常に高コスト。
- GEOはコンステレーションを組んでも相対的にはるかに安い。LEOのように⑤GEOコンステは均一サービスを行う必要はなく、フットプリントごとの地域性を出せる(最適化できる)。
- スマホBBダイレクトは、今後必ず必須となる。その際⑥EIRP対策として巨大アンテナが必要であるが、それでもGEOのコストメリットは大きいはず。

[2] スカパーJSATの公開SWOT⇒客観的分析と考える。

なお、[1]と[2]は関連はない。



<ul style="list-style-type: none"> • 日本の民間宇宙ビジネスを30年以上牽引してきた実績 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星調達・運用の技術・ノウハウ ✓ 新しい技術をビジネスにつなげ社会に実装する事業化力 ✓ 安定した日本国内の顧客基盤 • アジア・太平洋地域における競争力 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 通信需要に応える衛星フリート(16機) ✓ 最新型衛星の採用(HTS 2機運用中、フルデジタル衛星1機調達中) ✓ リージョナル・グローバル衛星オペレータとのパートナーシップ 	<h1>S</h1> <p>(強み)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • グローバル衛星オペレータとの規模差 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 衛星保有機数 ✓ カバーエリア • <u>静止軌道衛星以外のインフラ展開の差</u> <ul style="list-style-type: none"> ✓ LEO、MEO等の衛星の自社保有実績無し ※ LEOについては管制・運用受託の実績有り 	<h1>W</h1> <p>(弱み)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 衛星通信回線需要の増加 <ul style="list-style-type: none"> ✓ アジア・太平洋、北米エリア ✓ 船舶・航空機等モバイル(移動体) ✓ 携帯電話基地局向けバックホール ✓ 安全保障、防災分野 • 世界的な宇宙産業・宇宙利用の活性化 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 地球観測・映像解析等データビジネス ✓ <u>Beyond5G/6Gにおける宇宙を活用した新たな通信基盤形成の動き</u> ✓ <u>宇宙ごみ等、宇宙環境への関心の高まり</u> 	<h1>O</h1> <p>(機会)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 衛星通信回線の海外市場における価格競争激化 • <u>中長期的な外資系企業の日本市場への参入</u> • <u>地上通信網拡張にともなう衛星通信の活用機会減少</u> • カントリーリスクの顕在化 • <u>サイバーセキュリティリスクの増大</u> 	<h1>T</h1> <p>(脅威)</p>

https://www.skyperfectjsat.space/ir/library/jsat_report/2022/space/

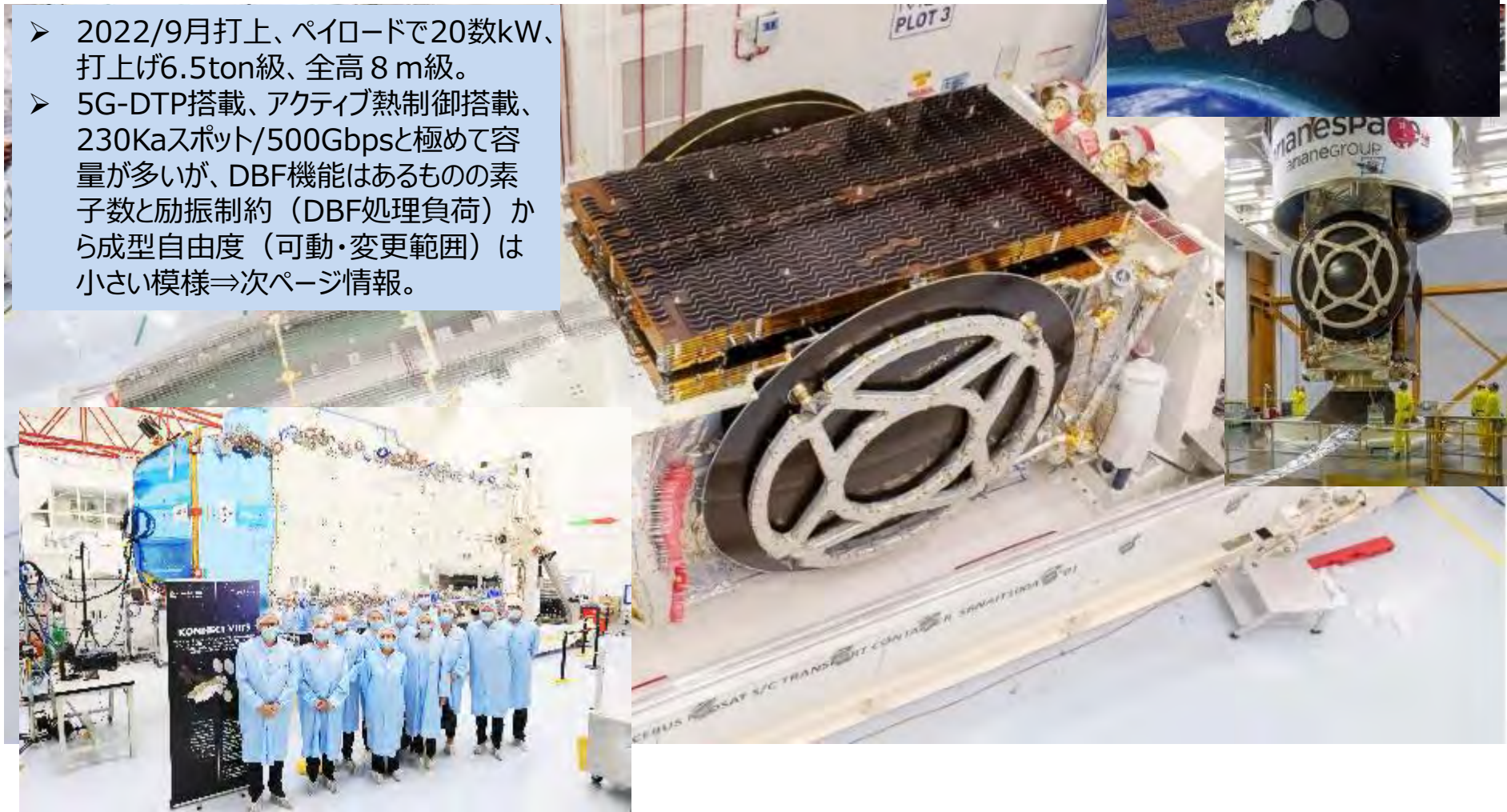
② 通信分野でのオンボード処理

(2) 500Gbps TAS KONNECT VHTSの分析（軌道上SDS）

Eutelsat Konnect VHTS : TAS最大の衛星、Spacebus NEO

TASやEutelsatはDTPによる通信のフルデジタル処理という意味で“SDS”と称している。

- 2022/9月打上、ペイロードで20数kW、打上げ6.5ton級、全高8 m級。
- 5G-DTP搭載、アクティブ熱制御搭載、230Kaスポット/500Gbpsと極めて容量が多いが、DBF機能はあるものの素子数と励振制約（DBF処理負荷）から成型自由度（可動・変更範囲）は小さい模様⇒次ページ情報。

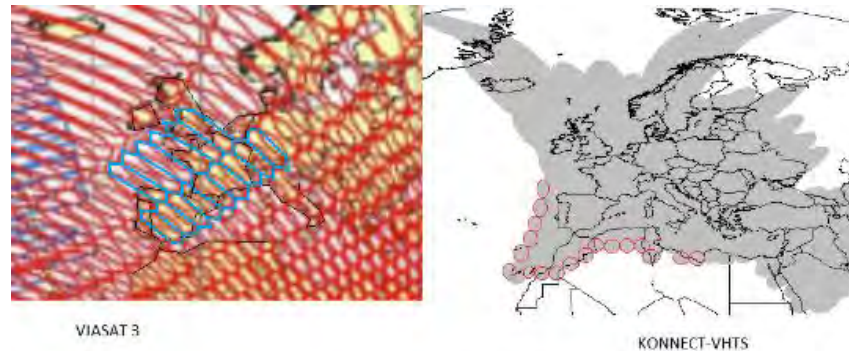


② 通信分野でのオンボード処理

(2) 500Gbps TAS KONNECT VHTSの分析

[1] Konnect VHTS(2022/9/7打上,Ariane)

Globalではなく、ヨーロッパとMENAの230スポットだが、総量500Gbpsと容量は非常に多い。



[2] 下記SNSは専門的だが評者の個人的見解とのこと。TASのSpacebus NEOに対して高評価ではなくViasat-3をより評価している。 <https://lafibre.info/satellite/un-nouveau-satellite-lance/48/>

- Konnect VHTS(TASのSpaceBus NEO最新/最大規模)のビームレイアウトは設計中に最適に固定。**DTPとMFPB (マルチフィードパービーム)**により、**多少の柔軟性が得られるが、柔軟な変更はできないと考えられる。**
- Konnect VHTSはTASの**最新のDTP-5Gで500Gbps@400GHz帯域**とのこと。1ポート2.5GHzの最大帯域幅とすることで、2.5GHz×2偏波×送受×2Bit×230 スポット÷4.6Tbps程度の処理能力はあるのでは。ユーザへは2.5GHzのうち一般的に約1.0GHzと思われるので、単純計算で460Gbps + αであり、公称**500GbpsはReasonableと考えられる。**
- アンテナは、ビームフォーミング (アナログかデジタルかは不明) であることは確実だが、**Viasat-3ペイロードの方がKonnect-VHTSよりもはるかに最新で柔軟との評。**やはりBoeing設計製造の方がDBFでは進んでいると思われる。
- またADS(OneSat)のFlexibleな機能はオペレータにとって魅力的なようで、競合するInspireは受注を伸ばしているが、比較ではOnesatとのこと。DAFR (TAS)とIPA (ADS)の性能的な差異と思われるがOperatorの公式情報から両社とも開発は遅れている。**技術的な観点も大きいがここ数年のSupply Chainの問題も大きいとのこと** (UnderWriter情報)。

② 通信分野でのオンボード処理

(2) 500Gbps TAS KONNECT VHTSの分析

https://www.eutelsat.com/files/PDF/investors/2021-22/H1%202021-22_Presentation_vfinal.pdf#page=28

下記のようなVHTS・HTSを商用・政府向けに多く保有・計画しているEutelsatも昨年度調査のように放送収入が減り通信への移行も盤石とは言い難く、Onewebによるマルチオービットによる事業をいかに進めて行けるかが注目される。

	INCREMENTAL CAPACITY	KEY MARKETS	ENTRY INTO SERVICE*	FIRM COMMITMENTS
EUTELSAT KONNECT	65 Ka spots 75 Gbps	Broadband Europe/Africa	In service since Q4 2020	orange TIM hispasat*
EUTELSAT QUANTUM	8 "QUANTUM" beams	Government Flexible	In service since Q4 2021	First agreements secured
HOTBIRD 13G	EGNOS Payload	Government	H1 2023	EGNOS
EUTELSAT 10B	~100 Ku spots c. 35 Gbps	Mobility EMEA/Atlantic & Indian Ocean	H1 2023	Panasonic gogo overon
KONNECT VHTS	~230 Ka spots 500 Gbps	Connectivity Europe	H2 2023	orange TIM ThalesAlenia Space
EUTELSAT 36D	UHF Payload	Government	H2 2024	AIRBUS

Overon スペイン:アーカイブ・OTT・Secure性をファイバー・Wifi・衛星で提供、NW+コンテンツ重視

TIM Telecom Italy: イタリアで第一位の携帯キャリア

② 通信分野でのオンボード処理

(2) 500Gbps TAS KONNECT VHTSの分析

Konnectの料金体系の例

例としてMax100という契約体系では月単位で日中100GB、夜中300GBなので、単純計算では13GB/1日で100\$月程度であり、光固定よりは高いが、携帯とは同等レベルの料金ではないかと推測する。

konnect Simply							konnect Unlimited	
	Easy 5	Easy 10	Zen 25	Zen 50	Max 100	Max 250	Unlimited 512	Unlimited 2/1
Data Volume (During the day)	5GB	10GB	25GB	50 GB	100GB	250GB	Unlimited data	
Data Volume (during the night)	150GB <u>per month</u> from 10pm to 6am			300GB <u>per month</u> from 10pm to 6am				
With a early renewal	+1GB	+2GB	+5GB	+10GB	+20GB	+30GB		
Speed & Validity	Speed 5/3 1 month	Speed 10/3 1 month	Speed 10/3 1 month	Speed 20/3 1 month	Speed 25/3 1 month	Speed 25/3 1 month	Speed 512/512 1 month	Speed 2/1 1 month
End-user Prices (VAT included)	15\$	25\$	45\$	75\$	100\$	220\$	50\$	90\$

② 通信分野でのオンボード処理

(3) Starlinkの将来像とSDS

<https://www.nextbigfuture.com/2023/03/spacex-starlink-v2-mini-and-the-future-of-tesla-internet.html>

Ver2で170Gbps/1機、Direct to Smartphone Yesとある。現在のNBメッセージから大幅にEIRPを増加させると予測。またこの携帯向け機能にgNodeBとして必要な再生中継を含める方針かが不明。Ver2がGatewayビームを現世代に比較して大幅に拡充していることから(60数ビーム級)、gNodeBは地上に委ね、携帯との中継機能に特化する方針かもしれない(不明)。



② 通信分野でのオンボード処理

(3) Starlinkの将来像とSDS

①Bus F9-2(V2miniと推定)は、SAP2翼で約100m²超、COTSシリコンで少なめに見積もって1kW/10m²としても10kW超はある。衛星サイズも4.1m x 2.7m/800kgと大型である。60Gbps/1機の予想（前頁）

<https://www.teslarati.com/spacex-first-starlink-gen2-satellite-launch-2022/>

	Length (m)	Width (m)	Number	Area (m ²)	DAS Area (m ²)	DAS Mass (kg)
Solar Array F9-1	8.1	2.8	1	22.68		
Bus F9-1	2.8	1.3	1	3.64		
Total Area F9-1				26.32	30	303
Solar Array F9-2	12.8	4.1	2	104.96		
Bus F9-2	4.1	2.7	1	11.07		
Total Area F9-2				116.03	120	800
Solar Array Starship	20.2	6.36	2	256.94		
Bus Starship	6.4	2.7	1	17.28		
Total Area Starship				274.22	294	2000

②Bus StarshipがV2乃至は更に次世代と推定、SAP2翼で約256m²超、COTSシリコンで少なめに見積もって1kW/10m²としても25kW超はある。衛星サイズも6.4m x 2.7m/2000kgともはや大型GEOよりも大電力であるが、170Gbps/1機との予想（前頁）。

- GEO: 400Gbps/20kWに対してLEO(距離1/50)にも関わらず170Gbps/20kW超と極端にbitあたりの電力が大きい背景は不明。
- 当社見立て⇒GEOのように**総スループット重視よりもDirect to Smart PhoneにおけるWifi同等のBBのために一桁以上高いEIRPを重視する設計**かもしれない。
- 実現した場合はGEOにとって更に脅威となる。
- なおOneweb等の小型、LightSpeed等中型(600kg相当)でもかなり遠い性能と思われる。

② 通信分野でのオンボード処理

(3) Starlinkの将来像とSDS

<https://www.nextbigfuture.com/2023/03/spacex-starlink-v2-mini-and-the-future-of-tesla-internet.html>

Ver2 Starshipの製造コストは、衛星単体では1.0M\$/1機(20kW/2000kg)とOneweb (3kW/200-300kg/) と同等とのこと。本当だとするとDestructiveにコスト競争力がある。



Assumptions table

	Telesat Lightspeed	Amazon Kuiper	OneWeb	Starlink v2.0 Starship
Mass kg	800	600	150	2000
Gbps / sat	50	30	7	170
Launch	30 per New Glenn	61 per New Glenn	40 per Falcon 9	50 units per Starship
Tbps / launch	1.5	1.8	0.3	8.5
m\$ / launch	Sats 13 + launch 55 = 68m\$	Sats 27 + launch 35 = 62m\$	Sats 40 + launch 60 = 100m\$	Sats 60 + launch 15 = 75m\$
\$ / Mbps	46	34	347	9
Direct-to-mobile?	No	No	No	Yes

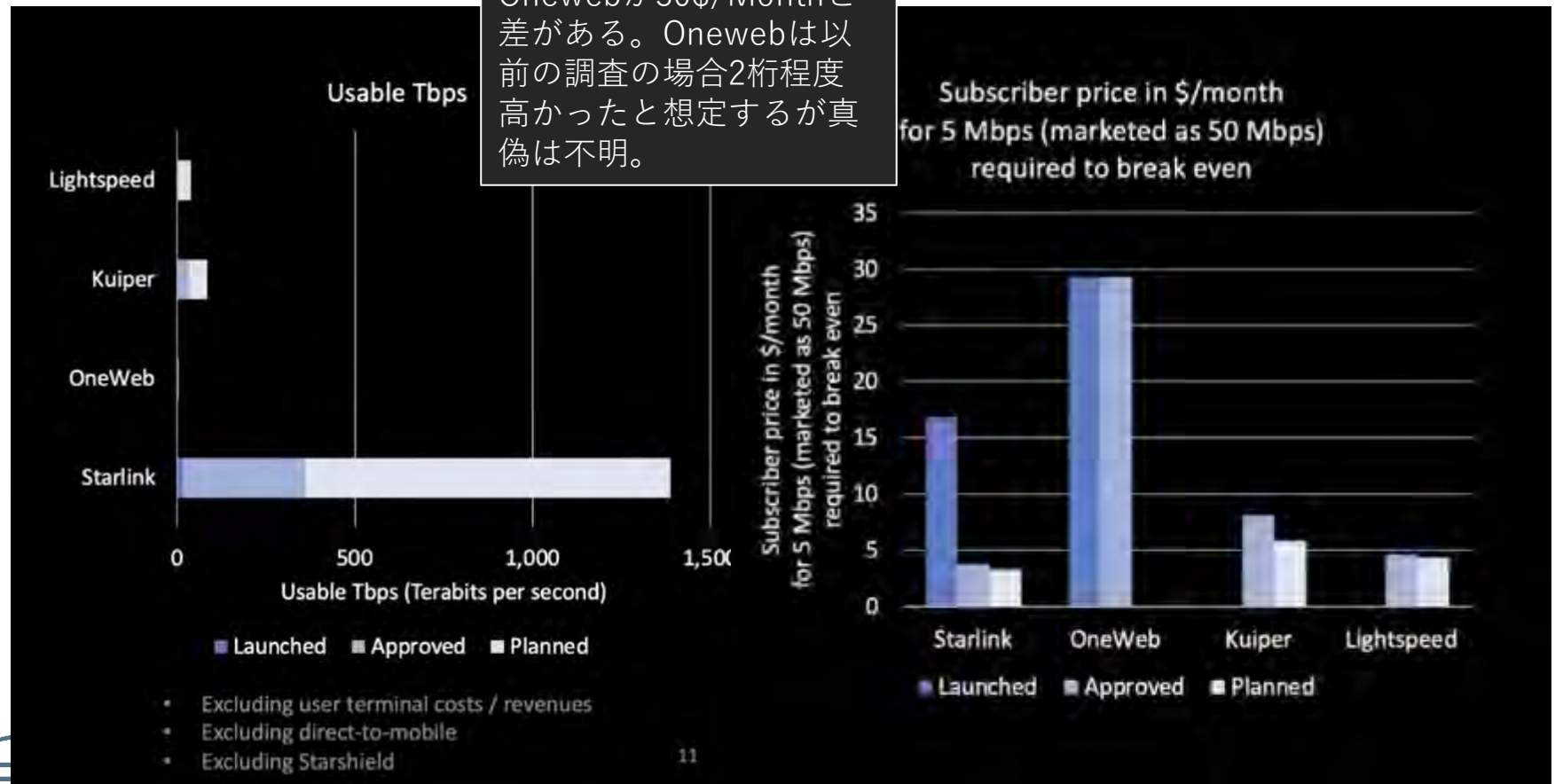
This is not investment advice (just some assumptions)

② 通信分野でのオンボード処理

(3) Starlinkの将来像とSDS

<https://www.nextbigfuture.com/2023/03/spacex-starlink-v2-mini-and-the-future-of-tesla-internet.html>

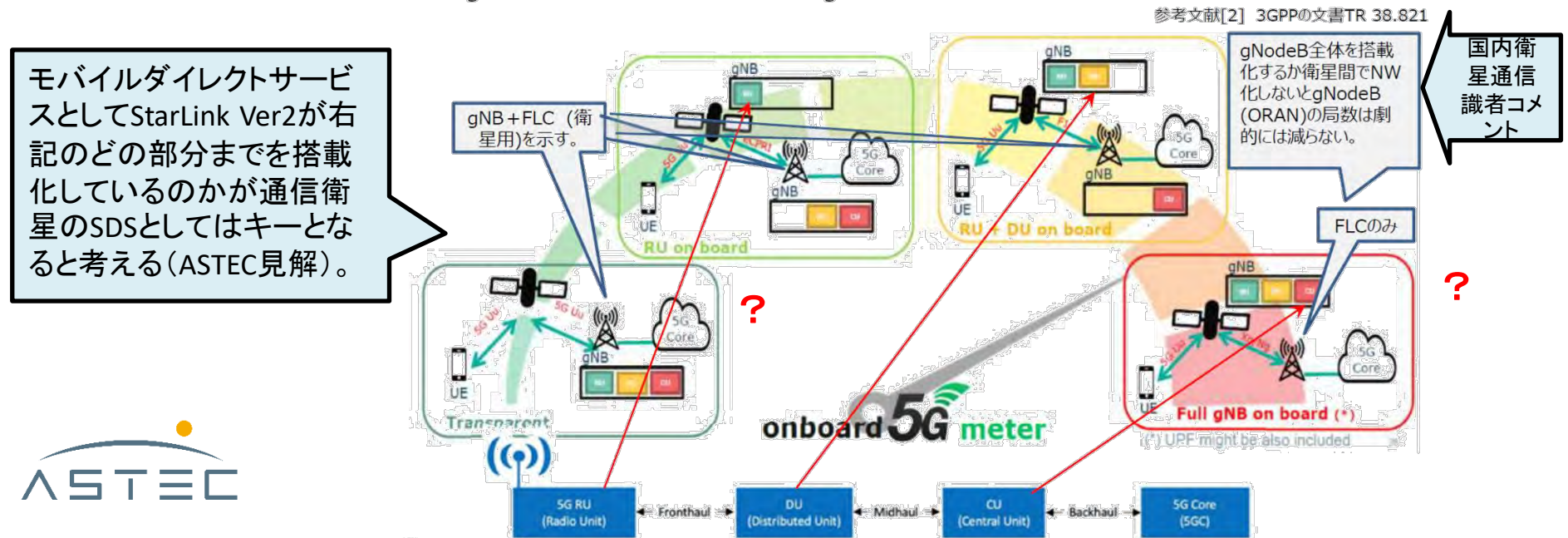
50Mbps換算でStarlinkが15\$/Month⇒4\$/Month、Onewebが30\$/Monthと差がある。Onewebは以前の調査の場合2桁程度高かったと想定するが真偽は不明。



② 通信分野でのオンボード処理

(4) SDSに関する考察

- GEO大型通信ではSDSは搬送波はRFフロントエンドのアンプ・LNA効率やアンテナ制約から変更できないが同じバンドの中で中心周波数や帯域、10Mbps等サブチャンネル単位のビームアサインを前提とし、これらのビームの柔軟性を前提としている。同じDBFでも覆域が狭い方式(Spacebus NEO)とある程度広い方式(InspireやOnesatや)やDRA方式を比較すると、最近では前者はSDSと呼ばない傾向がある。明確な定義があるわけではない。
- 一方Starlink Ver2で推測されるように、LEOで20kW超170Gbpsの容量、ユーザビームでもKaだけではなくEバンドを使用する計画からはDirectMobileのためにいままでより極端にEIRPを大きくし、少なくともFWDリンクは数10Mbpsを直接通信できるものとする(ASTECC想定)。
- この際、欧州で開発が進められているgNodeBを搭載のためのSDS機能(下記)の中で、FrontHaulとMiddleHaulを実現するためのFull gNB on boardか、あるいは左端のRUのみを実現するかで大きく機能性能の差異は生ずると思われ、先駆的なStarlinkの進捗を見定める必要がある。



② 通信分野でのオンボード処理

(5) 大手SDSの最新状況



MAXARの新規SDS

- Tranche1でL3-HarrisのPrimeの元で14機Tracking Layer衛星バスを受注
- MAXAR 300 seriesと思われる。150kg～。
- パロアルトとサンゼの工場プラットフォームを製造、2024年納入予定
- 光/RF衛星間実装
- ミッションテラーの構造・SAP
- 化学または電気推進
- <https://mobilityforesights.com/product/software-definedsatellite-market/> ではSDSとして紹介

Boeing

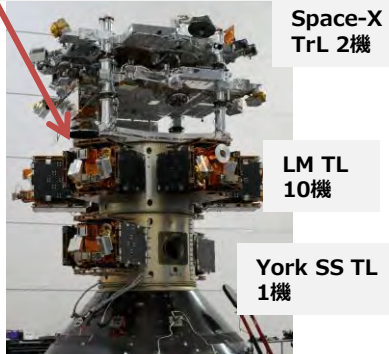
- MEOを除きGEOではこのコンフィギュレーションでのセールスは無いが、同社のWebでは最も経済的なSDSと呼んでいる。
- SDSとしてのビームFlexibilityはmPowerで最も早期に証明されているはずであるが、GEOで商用として受け入れられていない背景は不明。



LMのTranche0 TL10機(9/2打上げ分)

LockheedのPWSA Tranche0 (TL) 10機を含む13機を9/2打上げ Transport Layer (TL)10機+York SSの1機+Tracking Space-X 2機。

- Link16で衛星と戦闘機を接続する。Tranche0のLM分はバスはTybak(その後Terran Orbitalが吸収)とのことだったが、その後量産ではLM?、SDSアキテクチャは当初よりLMとある。
- Tranche1/Tranche2でそれぞれLMが42機/36機受注、いずれもTransPortLayer (T1TL,T2TL)。LMは8月に年間180機体制の小型衛星(SDAのSmartSatを含む)のローベイ製造ライン約1800m²をコロラドデーンバーにOpen。現在の両者のシェアリングは明確ではない。
- PWSAに関してTerranとの協業から離れている可能性もある。



Tranche0 2回目の9/2打上げ分

一方Terranは下記の記載あり。これらのSDS機能はTerran? <https://terrannotal.com/missions/wildfire/>

- 広域・狭域に適した変調方式最適化
- セキュリティ通信機能(周波数ホッピングなど)、独自の最先端波形
- 戦術データリンクのスペース動的ネットワークングとルーティング技術
- 商用暗号システム、
- ブロックチェーン技術
- マルチバンドフェーズドアレイアンテナ
- マルチレベル・セキュリティ(MLS)。

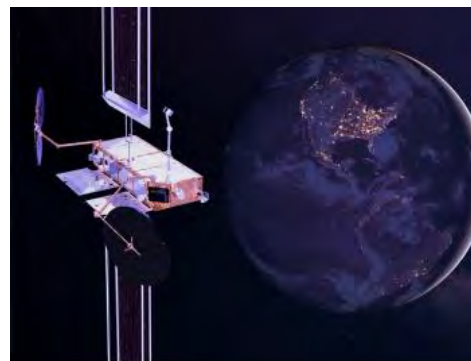


② 通信分野でのオンボード処理

(5)大手SDSの最新状況

- Airbus社製 Onesat, TAS社製 SpaceInspire, Boeing社製 702X等の中規模SDS衛星は各社受注は伸ばしていたが、先行していたAirbus/Boeingは2023年に入り、製品化、もしくは、軌道上での問題顕在化。躓きが発生している。

Bus	OneSat	Space Inspire	702X
Manufacturer	Airbus	Thales Alenia Space	Boeing
Power	Up to 12.5 kW (i.e. half of Eurostar NEO)	Up to 12 kW	Up to 12 kW
Launch mass	3 tons	2-3 tons	Unknown(dry mass at 1.9 tons)
Lifetime	15 years	15 years	15 years
capacity	50-100Gbps に最適化	50-100Gbps に最適化	5,000 beams/sat Max200 Gbps
Size	N/A	1m high	About 1m high
受注数	9機	6機	11機(O3b mPower (MEO))
問題	Onesatの開発遅延により、4億ユーロの費用を2023Q3に計上。 ^[1]	—	2023年に打ち上げた4機に電源不具合が発生。当初は軽微な不具合と識別されたが、その後、衛星の運用寿命、帯域性能に大きく影響する問題と確認された。 ^[2]



[1]: <https://www.spaceintelreport.com/airbus-books-428m-charge-on-cost-overruns-schedule-delays-for-multi-satellite-development-program/>

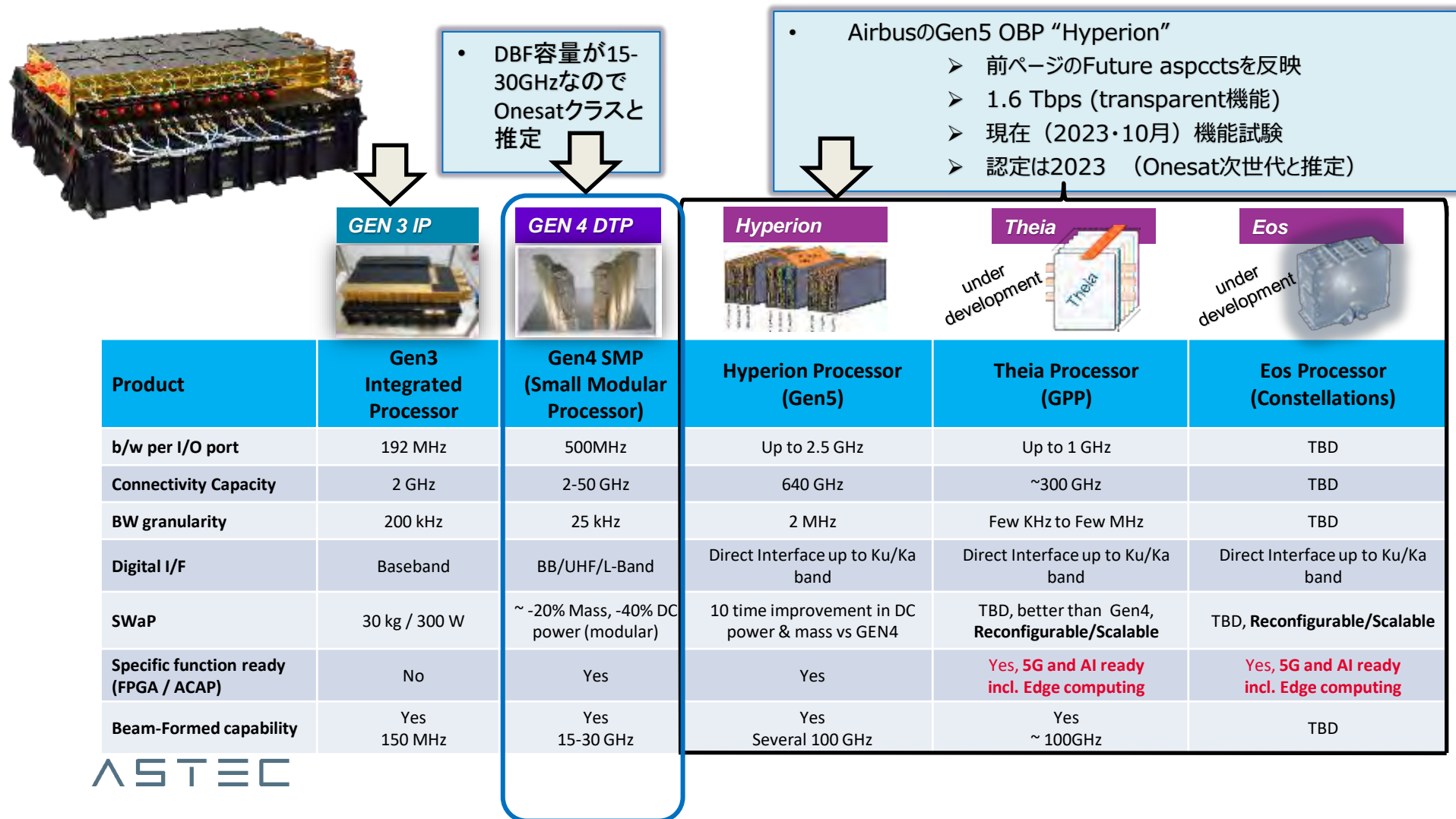
[2]: <https://spacenews.com/ses-says-o3b-mpower-electrical-issues-are-worse-than-thought/>

② 通信分野でのオンボード処理

(5)大手SDSの最新状況

Airbusの通信用オンボードプロセッサ

- Onesatに採用されていると推定されるGen4に続き、Gen5以降の開発を継続中。

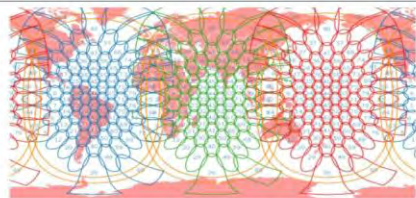


② 通信分野でのオンボード処理

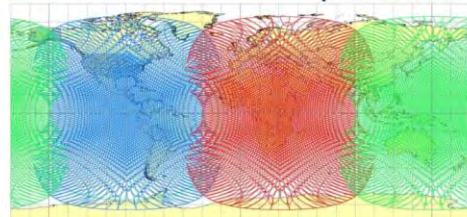
(6) ESAの取り組み状況

- 2017~2018年程度までは、通信の大容量化が望まれ~1Tbpsを目指し、大容量通信衛星を開発してきた。
- このような大容量衛星では、素子レベルのDBF等是非現実的であり、ある程度柔軟性を犠牲にする必要があった。
- 2018年以降、より柔軟性が重視され、通信容量は50-100Gbps程度のMedium Capacityに抑え、素子レベルのDBF等、十分な柔軟性(ただし変復調を伴わないTransparent型)を持つ中規模SDS衛星開発に移行。
→Airbus社 Onesat, TAS社 SpaceInspire

The Challenge until now ... Terabit(ps) GEOs



Inmarsat 5



ViaSat 3
(Announced)
~2500 beams
per satellite

- Trend until approx. 2017-2018 to target VHTS per single GEO satellite (~1Tbps per satellite)
- Targeting maximum capacity is often not able to offer full payload flexibility (e.g. coverage/beamforming flexibility with digital processors)
- Digital beamforming at element level is currently not yet feasible for supporting the full capacity (too high power consumption)



©Airbus

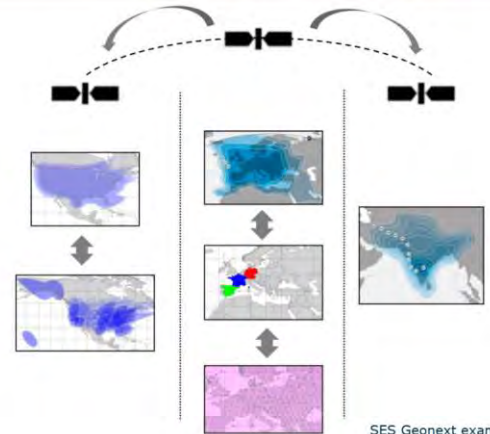
Airbus社 Onesat

Recent GEO Trend – Flexible Medium Capacity



Since 2017/2018, for GEO the attention has also moved toward the capability to achieve flexible, medium capacity, short time-to-market satellite solutions

- Targeting mainly Ku/Ka-band services on continental coverage for both broadband and TV broadcast
- Throughput Range 50-100Gbps, with beams of moderate size (about 0.5 degs).
- Payloads based on digital processors and array-fed reflectors with about ~100-200 radiating elements.
- Payload Power Consumption expected in the range 10-15kW
- Coverage flexibility is a key requirement (shaped beam and spot beam capability-reconfigurability)



SES Geonext example, source www.ses.com



©Thales

TAS社 SpaceInspire

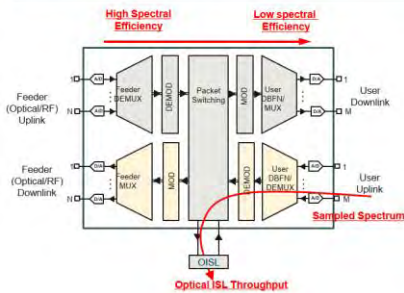
出典: [EDHPC2023](#)

② 通信分野でのオンボード処理

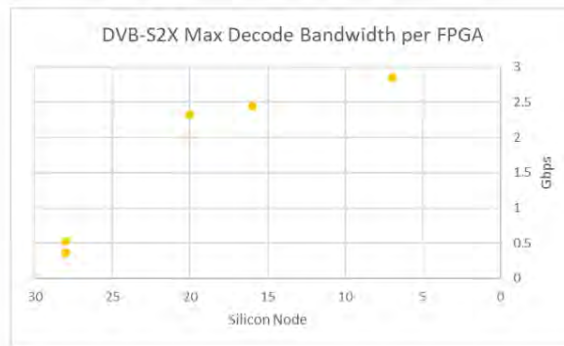
(6) ESAの取り組み状況

- Onesat/SpaceInspire後に関しては、更なる柔軟性の獲得のため、再生中継機能を重要技術開発項目と定めている。
- 再生中継機能により主に以下のメリットが得られる。
 - ・ユーザーリンク/フィーダリンクの依存関係を弱めることができ、プロトコルの柔軟性・帯域利用効率の向上が図れる。
 - ・衛星間通信等にて複数のプロトコル間での通信が可能となる。特に光衛星間通信は変調方式が異なるため必須。
 - ・RFリンク毎の誤り訂正 or 再送制御等により、リンクの回線設計が大幅に向上する。
- 一方で再生中継を実現するには大きなリソースが必要。(28nmのFPGAでは1石で0.5Gbps、100Gbpsには200石必要)

Regenerative OBP



- Regenerative processing requires additional MODEMs on board for signal encoding and decoding. They can facilitate the transformation of signals between different air interfaces too.
- This approach allows for the separation of the uplink and downlink, but it comes with the trade-off of increased complexity and power consumption in the OBP. Because the spectral efficiency of the feeder and user links differ, it's possible to support the same capacity with reduced bandwidth on the feeder link and on the ISL, thereby reducing the requirement for multiple ISLs and gateways.
- MODEMs also play a crucial role in improving the link performance by providing error correction, enhancing SNR, and optimizing the link budget.
- They could help to establish a 5G/6G connectivity on the telecommunication satellite or to support conventional DVB-S2X, DVB-RCS2 standards or custom waveforms.



Regenerative OBP (cont.)



The concept of having a MODEM onboard aligns well with the integration of the spacecraft in a network of satellites from various orbits and terrestrial networks. This approach allows for the processing of data received from ISL&RF links and facilitates rerouting to the next node in the network, thanks to the regenerative payload.

- Gil Shacham, "On Board Processing Payload"
- Executive Summary Report "Towards the All Optical satellite communications system"

- ASICs are commercially available to deliver MODEM operations. A set of these MODEMs (of ~500 MHz each¹⁾) would consume only a few watts to deliver several Gbps of data. State-of-the-art FPGAs, with a good level of radiation tolerance, can also be an alternative when they are equipped with custom software and firmware as MODEM.
- Transceiver chipsets (with filtering, mixing and data conversion functions) and a digital signal processing unit (the quantity of which depends on the bandwidth to be processed) enables the full reconfigurability of the OBP in-orbit making way to a fully flexible satellite payload.
- The RF Transceivers for SDR have relatively lower bandwidth (200 MHz), whereas wideband (but more power hungry) ADC/DACs (3 GHz bandwidth) can replace them depending on the application. Where needed, these ADC/DACs are good for direct sampling of the RF signal too (up to Ka Band) discarding the need for mixing stages.
- Numerous radiation tolerant alternatives of these digital signal processing platforms are in use in addition to radiation hardened ones.



② 通信分野でのオンボード処理

(6) ESAの取り組み状況

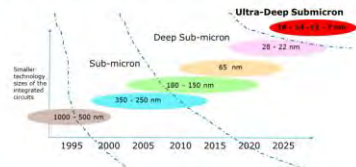
- 再生中継を実現するため、以下に示す通り要素技術から幅広く開発を実施中
 - ・半導体：7nm以下のUDSM（Ultra Deep Submicron）技術でのヨーロッパ製ASIC/FPGAの開発
 - ・パッケージ技術：2.5D/3D パッケージング技術により、RFチップ/光IFチップ/メモリチップと演算チップをワンパッケージ化
 - ・演算アルゴリズムの高度化：FFTやフィルタ計算等の基本的な信号処理アルゴリズムから低リソース化の開発を実施

Processor - Ultra Deep Submicron technology

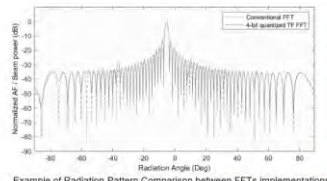


- Highly efficient processors needed for on-board processing and beamforming application, which can only be achieved with Ultra Deep Submicron (UDSM) technology
 - Commercial-of-the-Shelf (COTS) processors viable in LEO application with significant cost advantage, but require dedicated radiation mitigation and error handling
 - Mostly non-European solutions
 - Not suited for safety and security sensitive application
- => Develop a UDSM Radiation-Hard Application Specific Integrated Circuit (ASIC) mixed-signal standard cell library and IP portfolio based on 7 nm (or beyond) CMOS technology for the design of complex ASIC

GOAL:
Increase competitiveness for European industry in the telecom sat market, secure/high performance Navigation applications and state of the art Earth Observation payloads to meet future NAV and EO mission challenges.



Efficient Digital Signal Processing



Example of Radiation Pattern Comparison between FFTs implementations

Resource estimation for 16x16 2D-FFT				
Resynthesis	Power consumption (W)	LUT	FF	DSP
Conventional 2D-FFT	17.531	363680	124172	6144
Fully unrolled 2D-FFT	8.109	130208	112707	640
4-bit TR quantized 2D-FFT	8.056	142592	112643	0

Power and Area Analysis Xilinx US+ reference FPGA, 16 bit resolution @ 125MHz

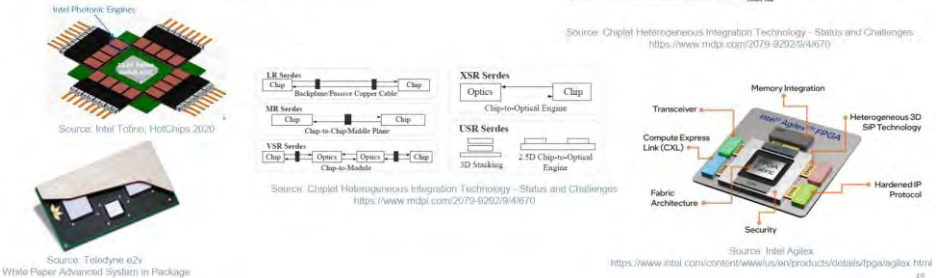
- Development of efficient algorithms and processing techniques are essential to mitigate the complexity and power consumption challenges, associated with the signal processing chains of telecom processors.
- One noteworthy example is the ongoing work undertaken by the University of Luxembourg, TAS-I and SES under an ESA contract.
- The main objective of this activity is to create an efficient digital beamforming technique for satellite scenarios that offers low power consumption and efficient area utilisation through the use of FFT (Fast Fourier Transform).
- The activity involves modelling and testing a fully unrolled FFT implementation for digital beamforming purposes. In this technique, the twiddle factors are designed based on 4-bit quantised values providing a big reduction in the resources needed to deliver FFT operations in comparison to conventional techniques. Further optimizations are made to enhance the maximum operating frequency of the design.
- It's noteworthy that the proposed fully unrolled FFT demonstrates a signal-to-noise ratio (SNR) similar to that of conventional FFT implementations.
- Area (resource utilisation) and power analysis comparison is showing high potential of the proposed technique, with power savings that can go beyond 50% wrt conventional FFT

Processor – Packaging Solutions



High integration needs require packaging solutions that allow heterogeneous integration and corresponding interconnection standards/ protocols

- Substrate-, Silicon Interposer-, Silicon-Bridge- or RDL-based
- Co-packaging of Electro-Optical transceivers
- Move to 2.5D 3D packaging solutions

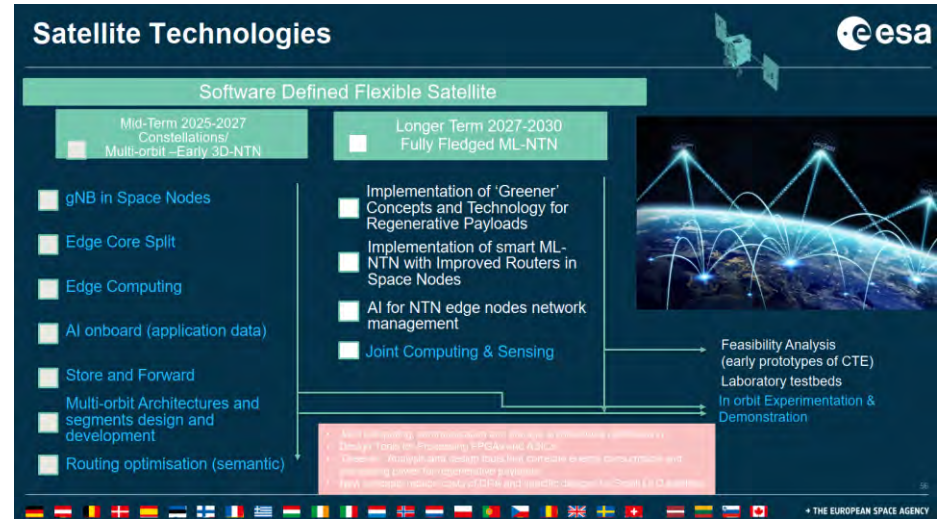
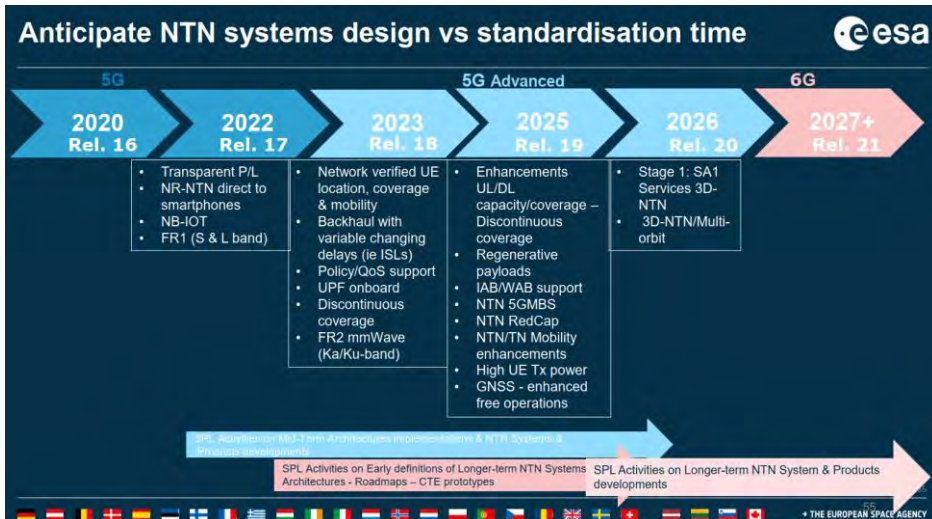


出典: EDHPC2023

② 通信分野でのオンボード処理

(6) ESAの取り組み状況

- 再生中継と併せてBeyond 5G/6GのNTNに向けた技術開発をSPL (Strategic Programme Line)として実施中。
- SPLの中も2025-2027年をターゲットとしたMid-Term、2027-2030ターゲットとしてLong Term等、長中期にて計画。
- ARTESと協調して、実開発PJにつなげつつ、計画を進行中。



出典: [EDHPC2023](#)

② 通信分野でのオンボード処理 GEO/LEOのオンボード高次処理のPos/Neg分析 23-002-R-013

GEO オンボード処理

本分析ではデジタル通信のNon Transparent処理をGEO衛星における今後のオンボード処理と見做して分析した。

- 現状主流のデジタル衛星は帯域・覆域可変だがデータ内容の分析やセキュアな再変調はできない。オンボード処理は再生中継機能によりg NodeB、衛星間、セキュア処理、再変調・再暗号化、受信波分析等**高次解析が可能**
- デジタルペイロードの中で帯域分離されるため全部ではなくても**一部帯域の復調とデータ高度利用可能であり、用途がデバイス進化に合わせ徐々に拡張は可能**
- 特に3 GPPに準拠した無線局代替の際は必要となる
- 15年の長期にわたるサービスの中で、**SWのUL・書き換えにより上記通信方式やサービスの変更が可能**
- GEOでも衛星ミッション運用は複雑で秒単位のデータULになるため、**運用コストの削減が可能**
- 今後マルチオービットをオンボードで分担する際に地上からの**複数衛星通信制御の機上へのシェア移管が可能**
- 電波干渉の際にBOCや高次拡散等、**通常固定機能の変更が可能（測位衛星）**。安全保障PTWもその1例。
- 静止気象衛星等の観測衛星はLEOの観測衛星での考察に準ずる（右記）。

- 通信帯域が広くなり数100Gbps以上の衛星の全帯域再生中継の実装は、**適用デバイスの点でも熱電力面でも開発や実装のハードルがまだ非常に高い。**
- Transparentな中継器は帯域だけでサブチャンネルを分離するため、信号の変調や中身に関与できないため、**逆に地上系の通信方式進化の影響を受けない、一方Non Transparentは通信方式を地上と同期させる必要がある。**
- デバイスの進化に依存**するため、その宇宙用適用時期の見極めが難しい。
- 開発コスト・リカリングコスト・電力・熱などのリソースが大きいため、サービス可変性からくる**利便性とのトレードオフ**が必要となる。

LEO オンボード処理

本分析では観測のML/AI、高次画像処理、通信のSDR、通信コンステレーションのメッシュNWをオンボード処理と見做し分析

- SAR画像化等で**画像伝送データの削減が可能**
- 海域からの**関心対象抽出**等と同じくデータ伝送削減が可能
- 将来の宇宙クラウド**を可能とし、RHメモリとの組み合わせで、ある期間の**データ蓄積、過去画像差分解析**等の可能性がある
- 参考（オンボード処理は**処理デバイスと記録メモリ、SERDESデバイスやEMCの進展により可能**になるため必要性だけからは判断できない面がある）
- 難易度の高いスペースメッシュ通信機能に関して、初期衛星ロットでは一部分でも、**世代ごとに、アプリケーションアップデートにより通信機能を高度化・実用化**できる可能性がある。
- 衛星機数が増加し、情報入手に関する**低レイテンシー要求**がユーザーから厳しくなると、オンボードエッジ処理により**プロダクト作成・配信時間の削減**に貢献可能。
- ジャミング妨害に対してSDR機能**である受信周波数ホッピング等により運用の安定化が図れる
- 周回ごと、衛星バッチごとに**異なるミッションをSWでアップ可能（Spireの例）**

- LEO大型観測衛星では**分解能とSwathからデータ量や伝送量も多いため、コストプラスのオンボード処理に対する**利便性(対価)が高価な1機のコストの中で見合う割合**になるが、**小型コンステレーションの場合、**相対的にデータ量とコストが小さく、高機能機器搭載の**コスト的余裕が相対的に小さい。**
- 不具合検証**はオンボード機能が少ない衛星より**相対的に困難になる。**但し再プロの自由度は高い。
- 総じて上記a,bが主要なNegative面であるが、デバイス性能進歩と衛星機数増加により、今後ソフトウェア機能が産業レベルに近づくことが予想されること、レカリングコストもCOTSデバイスコストが今後更に削減されることも鑑みて、**Negative要素は少ないと判断している。今後のキー技術と分析。**

Positive面

Negative面

③ 観測分野でのオンボード処理

- 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。

現在

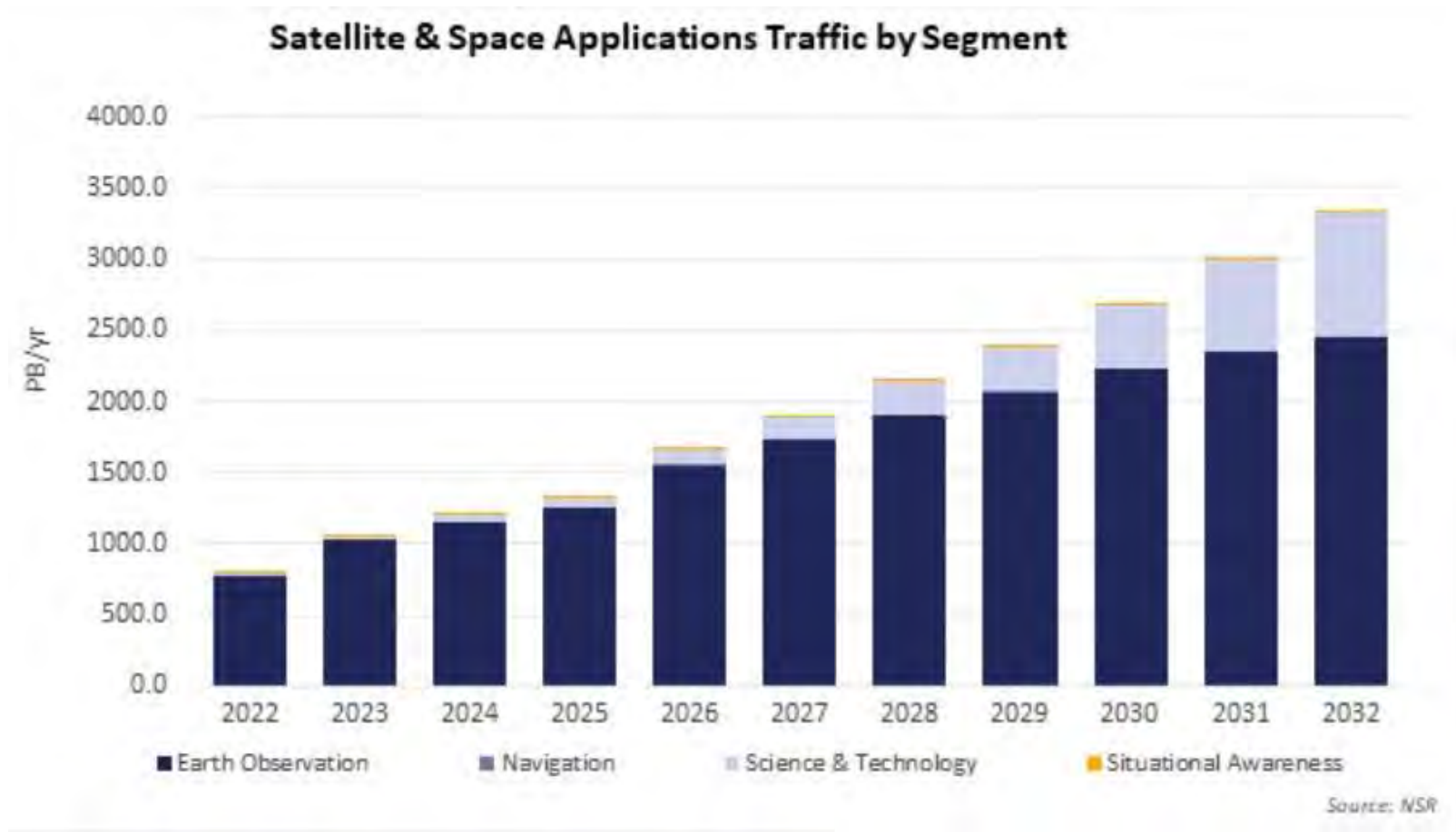
- ✓ 観測衛星の高精細化、ハイパースペクトル化、コンステレーション化による観測衛星による生成データ量の急増
↓
- ✓ 衛星-地上間の通信がボトルネックとなり、観測地点数の制約、観測からデータ配布までのレイテンシ増大、従量課金制のアンテナ使用料の増大等の問題が発生。
↓
- ✓ オンボードにて、画像生成(SAR画像再生、HSデータキューブ化等)、圧縮、ML/AI等を用いたターゲット抽出を行いダウンリンクするデータ量を削減する技術開発が急速に進む。
- ✓ Capella等の観測コンステレーションや、HyTI等のハイパースペクトルミッションより実証から実用フェーズに移行中。
- ✓ 並行して観測計画コマンドのアップ時間短縮や撮像機会の最大化等のため、オンボードでの観測運用の自律化の試みも進んでいる。こちらは試行段階のものが多いが、今後の動向に注視が必要。

今後の見通し

- ✓ しばらくはオンボード処理化拡大の動きは継続すると考えられるが、将来、衛星間光通信網が標準的に、低価格で使用できるようになった場合、衛星-地上間のボトルネック前提が変わってくるため、オンボード処理の対応範囲にも影響を与えると考えられる。
- ✓ レイテンシクリティカルなアプリケーションでは引き続き、オンボード処理が採用されると想定されるが、それ以外はデータ通信料とオンボード処理計算機とのトレードオフになると想定。
- ✓ また、多数のセンサデータを組み合わせる新しい付加価値を生むデータフュージョン解析等の成長や、現在地上にあるデータを使ったML/AIアルゴリズムの開発状況を考えると、オンボードでの過度な圧縮やターゲット以外のデータの削除等はこれらアプリケーションの成長への悪影響となるため、避けられる可能性がある。
- ✓ 併せて、今後、宇宙データセンタ等が普及した場合は、各衛星でオンボード処理を行うのか、宇宙データセンタ側で行うのかというトレードオフも今後発生してくると想定される。

③ 観測分野でのオンボード処理

- 観測分野での生成データ量はNSR社の予測では年11%の成長率で成長し、2032年には年間で2エクサバイトを超える見積もられている。



出典：[NSR](#)

③ 観測分野でのオンボード処理 観測コンステレーションでの動向

- 観測コンステレーションにて、オンボード処理の実証・採用が進む
- 垂直統合型だけでなく、水平分業型のオンボード計算機ベンダーの計算機採用も進む。

	Capella Space(アメリカ)	Planet Labs(アメリカ)	Spire Global(アメリカ)
	観測コンステレーション	観測コンステレーション	観測コンステレーション
事業概要	<ul style="list-style-type: none"> • 2016年にNASAエンジニアにより設立 • 小型SAR衛星コンステ構築と、衛星画像を注文&入手できるプラットフォーム「Capella Console」の構築実施(※1) • 特徴は衛星画像のオンデマンド&near-real-time(時間記載無)配信(※2) • データダウンリンクのために静止衛星、AWS ground stationを利用(※3) • データ分析会社3社と提携し、SAR画像を利用したソリューション拡大を計画(※4,5) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2010年にNASAの科学者3人により設立 • 衛星コンステ構築と、取得データのソリューション事業を進める • 地球観測データのプラットフォームを開発するSinergiseを買収し、地球観測データを利用した他領域(森林変化、気候、農業等)へのサービス提供を拡大中(※7) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2012年に設立し、小型衛星コンステ構築と取得データのソリューション事業を進める(※10) • 船舶の位置情報や、気象分野の衛星開発に積極的(NOAA,DARPAからの受注有)(※11,12) • NorthStar Earth & Spaceと共同で、SSAとデブリ監視のためのコンステサービスを提供(※13,14,15)
オンボード処理	<p>小型SARコンステにおける、オンボードGPU(NVIDIA)と専用のオンボード処理アルゴリズムの組み合わせにより、SAR画像の焦点合わせ、目標検出、及び最小限のDL時間を実現(P.6 例1参照)(2022/7)(※6)</p>	<p>2023年打上予定の32機のコンステ「Pelican」では、オンボードコンピューティング実施。 一日30回(中緯度の場合)同じ地点を撮影。分解能は30cm(2023/1)(※8,9)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • NorthStar Earth & Spaceと共同で展開する、コンステ3機でSpire Globalによるエッジコンピューティング機能備える。2023年打ち上げ予定(2023/6)(※13) • 地理空間情報を提供するBlackSkyと共同で、AIを活用したリアルタイムな海上監視サービス「Maritime Custody Service」の提供を発表。Spire Globalの無線周波数監視衛星のデータから、自動的にチップ&キューで画像収集し、AIで画像解析することで、船舶検出・船舶の種類ごとの分類・時間変化を監視する(2023/5)(※16)

※参考文献は後続ページに記載

③ 観測分野でのオンボード処理 観測コンステレーションでの動向

3.2.1 小型観測・通信衛星(LEO)向けオンボード処理技術の調査

● 調査詳細

Capellaの小型SAR衛星コンステにおけるオンボード処理について示した論文を以下に示す。

例1 : Capella Space VHR SAR Constellation(2022) (※7)

Capella初のSAR衛星コンステ(capella-2)の機能概要をまとめた論文である。

特に**オンボード処理**に関しては、**GPU(Nvidia製)** (※28) を搭載し、地上処理の一部をオンボードで実現(※29)。

- ①SAR画像を直接処理(RDA(Range Doppler Algorithm))
- ②逆写像(back projection algorithms)処理
- ③L0,L1処理によりSLC(Single Look Complex)出力

この結果、CapellaのSAR衛星コンステでは下記を実現している。

- 3種の画像(ストリップマップでアジマス分解能1.2m/スライディングスポットライトでアジマス分解能1.0m/スポットライトでアジマス分解能0.5m)を出力(※30)。
(⇔ALOS-4では、ストリップマップでアジマス分解能3m)(※31)
物体検出アルゴリズム(船舶検出)で、**物体検出範囲**の地理情報を地上に報告。

その他、SAR衛星コンステの機能概要は以下のとおり。

- 観測周波数帯は、**Xバンド**(9.5-9.9GHzで動作) (※7)
- 周波数変調の帯域幅は700MHz(※32,33)
- SDAのNDSA(国防宇宙アーキテクチャ)に互換性のある光衛星間通信端末(OCT)を装備する(※34)
- 軌道上タスキング
- ダウンリンクは1.2Gb/s
- 地上局はAWSとKSATを使用

③ 観測分野でのオンボード処理 観測コンステレーションでの動向

3.2.1 小型観測・通信衛星(LEO)向けオンボード処理技術の調査

● 参考文献

Capella

- ※1 https://vekom.com/wp-content/uploads/2020/12/Capella_Space_SAR_Imagery_Products_Guide.pdf
- ※2 <https://www.capellaspace.com/capella-space-unveils-next-generation-satellite-with-enhanced-imagery-capabilities-and-communication-features/>
- ※3 <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/nmc/18/00062/00004/>
- ※4 <https://sorabatake.jp/16602/>
- ※5 <https://spacenews.com/capella-teams-with-analytics-firms-to-promote-use-of-radar-imagery/>
- ※6 <https://www.geospatialworld.net/article/on-demand-solution-for-the-21st-century-capella-space/>
- ※7 <https://ieeexplore.ieee.org/document/9884458>
- ※28 <https://fcc.report/ELS/Capella-Space-Corporation/0029-EX-CM-2020/246358.pdf>
- ※29 <https://www.eoportal.org/satellite-missions/capella-x-sar#capella-x-sar-synthetic-aperture-radar-constellation>
- ※30 <https://www.jsicorp.jp/product/satellite/capella.html>
- ※31 <https://www.restec.or.jp/satellite/alos-4.html>
- ※32 <https://everydayastronaut.com/stronger-together-electron-2/>
- ※33 <https://spacenews.com/capella-to-use-spacex-for-two-acadia-satellite-launches/>
- ※34 <https://www.capellaspace.com/press-releases/>

Planet

- ※8 <https://www.zoomy.club/space-business/pl-sinergise/>
- ※9 <https://spacenews.com/planet-pelican-details/>
- ※10 <https://sorabatake.jp/30649/>
- ※11 <https://www.planet.com/pulse/what-is-agile-aerospace-learn-planets-approach/>

Spire

- ※12 <https://www.itochu.co.jp/ja/news/press/2019/190925.html>
- ※13 <https://sorabatake.jp/29423/>
- ※14 <https://spacenews.com/blacksky-spire-roll-out-space-based-maritime-tracking-service/>
- ※15 <https://spacenews.com/spire-to-build-space-situational-awareness-satellites-for-northstar/>
- ※16 <https://www.zoomy.club/invest/saas/>
- ※17 <https://northstar-data.com/ja/rocket-lab%E3%81%8Cnorthstar-%E7%8B%AC%E8%87%AA%E3%81%AE%E5%AE%87%E5%AE%99%E7%8A%B6%E6%B3%81%E8%AA%8D%E8%AD%98-ssa-%E3%82%B5%E3%83%BC%E3%83%93%E3%82%B9%E3%82%92%E9%96%8B%E5%A7%8B/>
- ※18 <https://www.zoomy.club/space-business/spir-bksy/>
- ※19 <https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/pdf/20230314thinktank/seikabutsu/shiryoushi-2-25.pdf>

③ 観測分野でのオンボード処理 SW開発効率の向上

オンボード処理のSW/FPGA化、高機能化が進むに従い、オンボードSW/FPGAの開発効率向上への関心が高まっている。

EDHPC2023でのオンボードSW/FPGAの開発効率向上に関わる主な発表

LN	タイトル	発表機関	概要	参照
1 ※	AI uses cases on EO satellites	Airbus	<ul style="list-style-type: none"> File Baseデータハンドリングアーキテクチャの採用 COTS SW活用のフレームワーク(CALYPSO Sandbox)の構築によるオンボードSW開発効率の向上 	ref1
2	A novel multi-mission platform for the development of applications, services, and new satellite data algorithms directly in orbit and on-demand, the Italian In-Orbit Space Lab	Planetek Italia	<p>同社の提供するAIXフレームワークでは以下のことが可能であり、エコシステムの構築を目指していた。</p> <ul style="list-style-type: none"> モジュラー化された機能がカタログ化されており(火災検出等)、必要な機能をapp-storeから購入するイメージで結合、オンボード上で動作が可能。 ユーザーが開発した機能をapp-store上で販売することも可能。 	ref2
3	A Modular, Reconfigurable and Portable Framework for On-Board Data Processing: Architecture and Applications	CRAFT PROSPECT	モジュラー化された機能をツールボックスから選択して結合することで全体機能を実現できるSW開発フレームワーク。ビルトインテスト機能や性能測定機能等を有することで容易にSW立ち上げが可能。本フレームワークに準じたSWの軌道上実証が2024年に予定されている。	ref3
4	ECSS-E-ST-20-40C-DIR1 Compliance using Model-Based Design	Mathworks	モデルベースFPGA設計にて、オートコードによるRTL自動生成等を行う際に、ECSSの開発規格に沿った開発を行うための手法に関する発表	ref4
5	Efficient In-Orbit Neural Network Updates	UBOTICA	軌道上でAI/MLのパラメータを更新しようとした場合、パラメータのデータ量が膨大で簡単にはアップロードができないことが問題となる。本発表ではAIの性能劣化を最小限にした、更新パラメータのデータ量圧縮手法について報告。	ref5

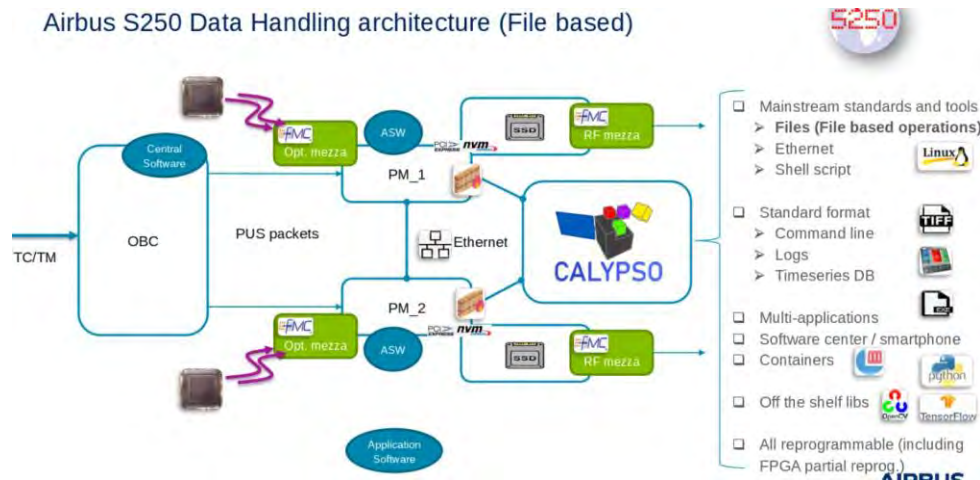
③ 観測分野でのオンボード処理 SW開発効率の向上

Airbusの観測衛星プラットフォーム S250では、オンボード処理SWの開発効率向上のため以下を推進

- File Baseデータハンドリングアーキテクチャの採用
- COTS SW活用のフレームワーク(CALYPSO Sandbox)の構築

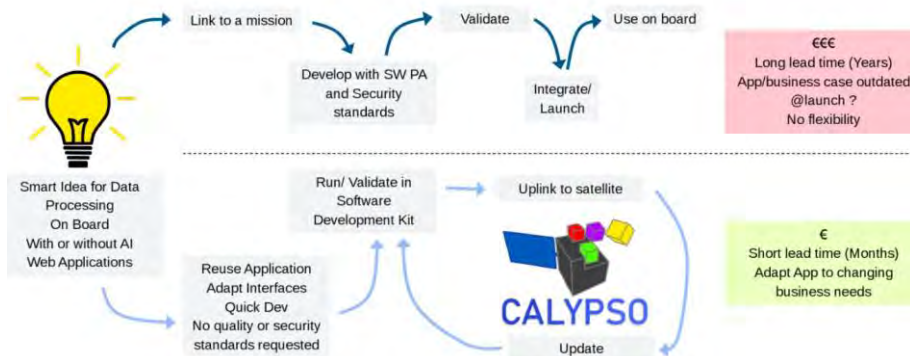
- Linux等を活用するため、File Baseのデータハンドリングアーキテクチャを採用(高信頼ストレージが技術的には鍵となると推定)。
- COTS SWの適用を容易とするSWフレームワーク CALYPSO Sandboxにより、オンボードでの機能追加等も可能。
- FPGAの部分再構成を含め、オンボードでの全ての機能の再プログラミングが可能。
- 本プラットフォーム上にてオンボードでのAI処理の開発を進めている。具体的なAIのユースケースは以下を想定。
 - Geolocation Improvement: 衛星の熱歪み等の影響によるアライメント誤差等を学習。軌道上でのポイントングエラーを10m以下に抑えることが可能。
 - 動的モニタリング
船舶検知、交通量測定、差分検出、森林火災検知、情報抽出、移動体検出、雲検出等

Airbus S250 Data Handling architecture (File based)



DEFENCE AND SPACE
CALYPSO – Sandbox
Software Defined Satellite

CALYPSO
- Custom ApplYcation
Processing Service in Orbit



出典: EDHPC2023

③ 観測分野でのオンボード処理 観測運用の自律化

オンボードでの観測データ処理と並行して、オンボードでの観測運用の自律化についても開発が進む。

これまで地上で実施していた詳細な撮像運用をオンボードで実施することにより、コマンド量の削減や撮像の最適化を行うものから、Tip&Cueによる高度な自律化まで幅広く開発が進んでおり、軌道上実証段階のものもある。

主要な観測運用自律化 開発例

事例 (TRL:高)	概要
(A-1) On-Board Autonomous Planning System (APS)	Orbit Logic社の開発したOn-Board Autonomous Planning System (APS) は衛星搭載系におけるミッション運用計画システムである。他のAPS搭載衛星と連携し、 <u>ユーザが指定した複数の目標に対する最適化された観測計画の立案が可能</u> 。Orbit Logic社は、コロラド大学ボルダー校と協力し、APSを利用した衛星の編隊飛行システムであるOn-board Swarm Control for Autonomy and Responsiveness (OSCAR)を開発。将来的には特に宇宙探査ミッションでの活用を目指している。
(A-2) Constellation Collaborative Mission Autonomy (CMA)	Scientific Systems社が開発したConstellation Collaborative Mission Autonomy (CMA) は衛星搭載系における自律運用システムである。前述のミッション運用計画システムであるAPSと連携し、 <u>衛星のバスやペイロードを制御することが可能</u> 。
(A-3) orbital_OLIVER	orbital_OLIVERはイタリアのAiko Space社が開発した衛星搭載系におけるミッション運用計画システムである。AIを搭載しており、衛星が <u>自律的にデータを処理し、リアルタイムで判断を下したうえで、最も適切なデータを地上に提供することが可能</u> 。
(A-4) CogniSat-6	小型衛星開発メーカーの英国Open Cosmos社と衛星搭載向けオンボードコンピューターメーカーのUbotica社は、AI関連技術を搭載したCogniSAT-6を開発中である。 <u>衛星単機でのTip & Cue機能を搭載していると推定される</u> 。
(A-5) NASA Platform for Autonomous Systems (NPAS)	NASAは、ゲートウェイ計画やアルテミス計画を含む深宇宙ミッションに向け、NASA Platform for Autonomous Systems (NPAS)と呼ばれる <u>宇宙機の自律運用システム</u> を過去10年間を通して開発し、 <u>2024年に軌道上実証を実施予定</u> 。
(A-6) OHB Dual Camera System	OHB社の開発する2衛星を活用したTip&Cueシステムの開発

③ 観測分野でのオンボード処理 観測運用の自律化

Orbit Logic社の開発したOn-Board Autonomous Planning System (APS) は衛星搭載系におけるミッション運用計画システムである。他のAPS搭載衛星と連携し、ユーザが指定した複数の目標に対する最適化された観測計画の立案が可能。

適用目的	観測、通信の自律化	開発者	Orbit Logic	ユーザ（受益者）	SDA/AFRL/DARPA
事例 A-1	On-Board Autonomous Planning System (APS)		TRL (推定)	5~7 (試作・試験)	

<概要>

- Orbit Logic社の開発したOn-Board Autonomous Planning System (APS) は衛星搭載系におけるミッション運用計画システム^[1]。
- Master Autonomous Planning Agent (MASA) と呼ばれる計画立案・リソース管理用のモジュールと、Specialized Autonomous Planning Agent (SAPA) と呼ばれるミッションに合わせてカスタマイズされたモジュール群を連携させることにより、TCPED運用のバイプライム処理が可能^[1]。
- ユーザが指定した複数の目標に対する最適化された観測計画の立案や、トリガー・イベント(他衛星での異常発生等)に対応する動的なアクション・コースの決定など、通常の計画立案と一時的な計画立案の両方に対応することが可能^[2]。
- 分散型のソフトウェアアーキテクチャを採用しており、完全に独立して動作することも、地上局の指令および/または他のAPS搭載衛星と連携して動作することも可能^[1]。

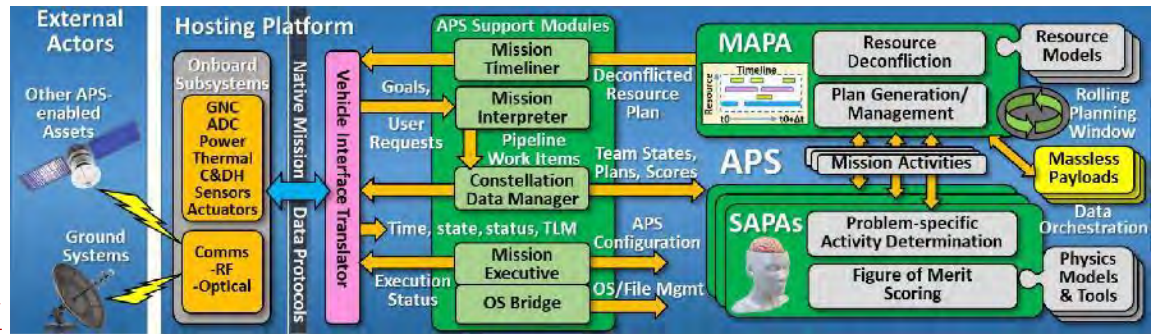


図 On-Board Autonomous Planning System^[3]

<実績・計画等>

- 米国SDAの軌道上実証プログラム (POET) においてYAM-3衛星に搭載され、軌道上実績を有する^[3]。
 - 2022年2月、単一衛星ではあるものの、指定領域の観測、画像収集、自動ターゲット認識による画像処理・抽出、ユーザへの画像送信の一連のタスクを実証した^[4]。
- DARPAのBlackjackプログラム (上記YAM-3衛星と同一)、米空軍研究所 (AFRL) のSpace Situation Awareness Fusion Intelligent Research Environment (SaFIRE) プログラムにも採用されている^[3]。

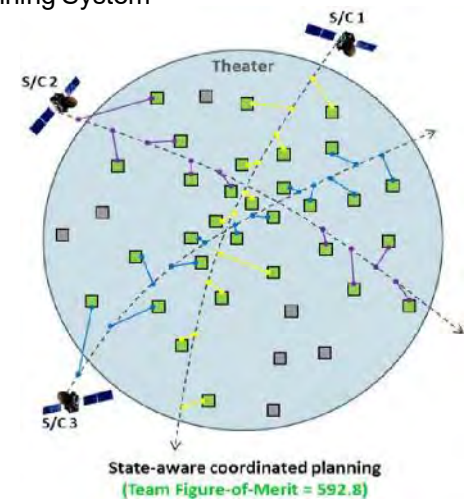


図 観測計画立案のイメージ^[2]



1. Orbit Logic, [On-Board Autonomous Planning System](#)
 2. Orbit Logic, [Autonomous Planning System](#)
 3. Kenneth Center, Hanspeter Schaub, Evan Sneath, João Vaz Carneiro, [ON-BOARD SWARM CONTROL FOR AUTONOMY AND RESPONSIVENESS \(OSCAR\)](#)
 4. SpaceNews, [Space Development Agency experiment demonstrates on-orbit data processing](#)

③ 観測分野でのオンボード処理 観測運用の自律化

Orbit Logic社は、コロラド大学ボルダー校と協力し、APSを利用した衛星の編隊飛行システムであるOn-board Swarm Control for Autonomy and Responsiveness (OSCAR) を開発。将来的には特に宇宙探査ミッションでの活用を目指している。

適用目的	観測、通信の自律化	開発者	Orbit Logic	ユーザ (受益者)	SDA/AFRL/DARPA
事例 A-1	On-Board Autonomous Planning System (APS)			TRL (推定)	5~7 (試作・試験)

<実績・計画等 (続き)>

- Orbit Logic社は、コロラド大学ボルダー校と協力し、APSを利用した衛星の編隊飛行システムであるOn-board Swarm Control for Autonomy and Responsiveness (OSCAR) を開発^[1]。
- オペレータの支援なしに、ミッションニーズに合わせたフォーメーションの決定、個々の衛星の移動の計画・調整を行うことが可能^[1]。
- APSの分散アーキテクチャにより、どの衛星を「編隊リーダー」とするか決定、リーダーによるフォーメーションの決定、各衛星への計画送信が行われる^[1]。
- 現時点 (2023年現在) ではシミュレータ上での実証に成功しており、将来的には特に宇宙探査ミッションでの活用を目指している^[1]。

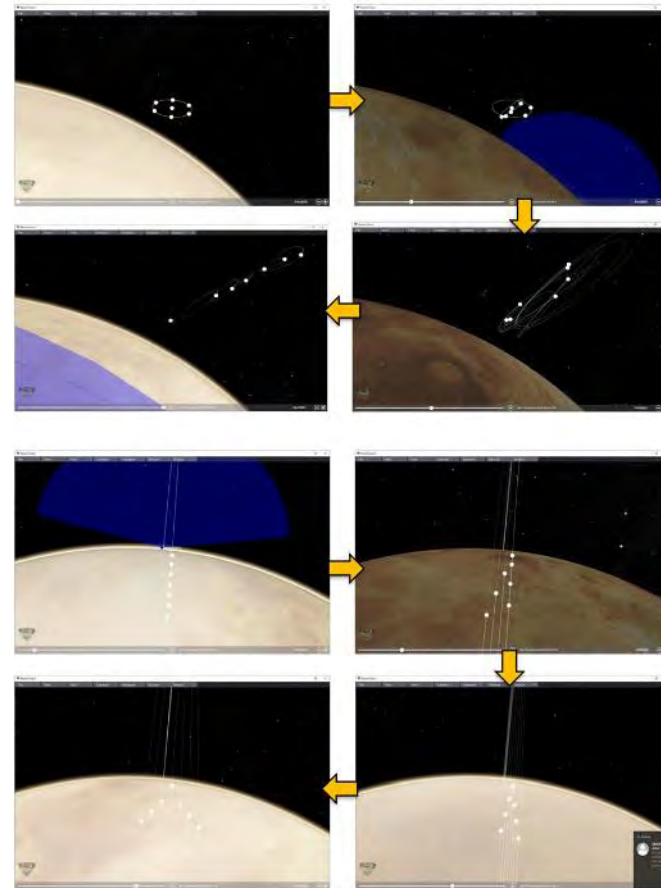


図 シミュレータ上でのフォーメーション変更実証^[1]

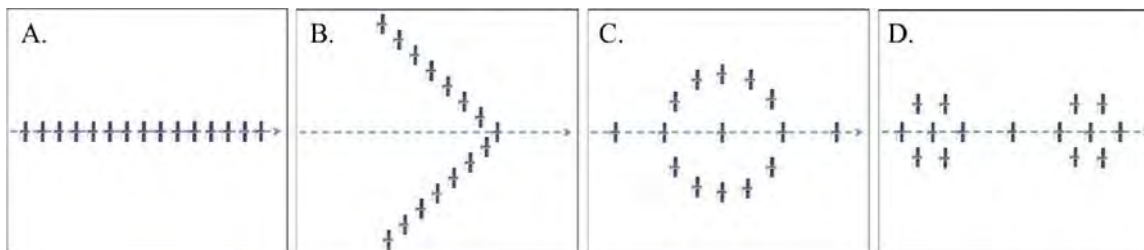


図 編隊飛行のフォーメーション例^[1]

③ 観測分野でのオンボード処理 観測運用の自律化

Scientific Systems社が開発したConstellation Collaborative Mission Autonomy (CMA) は衛星搭載系における自律運用システムである。前述のミッション運用計画システムであるAPSと連携し、衛星のバスやペイロードを制御することが可能。

適用目的	観測、通信の自律化	開発者	Scientific Systems	ユーザ (受益者)	SDA/DARPA
事例 A-2	Constellation Collaborative Mission Autonomy (CMA)		TRL (推定)	5~7 (試作・試験)	

<概要>

- Scientific Systems社が開発したConstellation Collaborative Mission Autonomy (CMA) は衛星搭載系における自律運用システム^[1]。
- 前述のミッション運用計画システムであるOn-Board Autonomous Planning System (APS) と連携し、衛星のバスやペイロードを制御する^[2]。
- 以下の例のように、ユーザが「ミッションサービスリクエスト」と呼ばれる戦術情報の高レベルのリクエストを衛星に送信し、大幅に圧縮されたタイムラインで必要な情報を受信できるように設計されている^[1]。
 - ① ユーザが、「コンピューター画面に描いたこのボックス内のすべての船の位置と分類を教えてください」という形式でミッションサービスリクエストを衛星に送信
 - ② リクエストがCMAによって受信・分解されると、エッジ処理システムをトリガー
 - ③ 可能なときに海洋の指定された領域をポインティングするよう命令
 - ④ 電気光学画像ペイロードを制御し、適切なタイミングで画像を収集
 - ⑤ 自動ターゲット認識活用アルゴリズムを使用して画像を処理
 - ⑥ 船舶の位置とその分類からなる処理済みデータをユーザに送信

<実績・計画等>

- 米国SDAの軌道上実証プログラム (POET) においてYAM-3衛星に搭載され、軌道上実績を有する^{[1][3]}。
 - 2022年2月、指定領域の観測、画像収集、自動ターゲット認識による画像処理・抽出、ユーザへの画像送信の一連のタスクを実証した^[4]。
- 同社はSDAとProliferated Warfighter Space Architecture (PWSA) においてもオンボード処理に関して連携しており、PWSAのコンステレーションにおいても本技術が活用されている可能性^[4]がある。

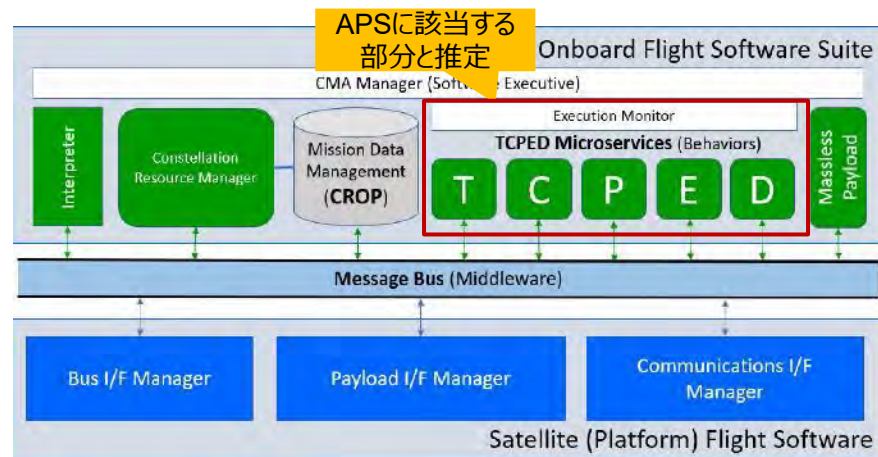


図 Constellation Collaborative Mission Autonomy (CMA) ^[2]

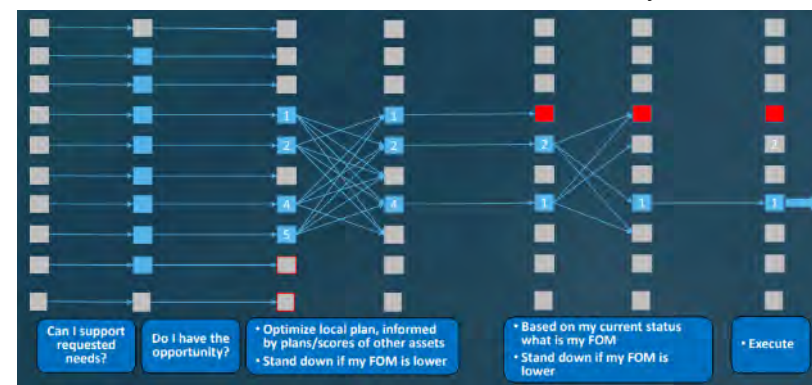


図 自律計画・実行のイメージ^[5]

③ 観測分野でのオンボード処理 観測運用の自律化

orbital_OLIVERはイタリアのAiko Space社が開発した衛星搭載系におけるミッション運用計画システムである。AIを搭載しており、衛星が自律的にデータを処理し、リアルタイムで判断を下したうえで、最も適切なデータを地上に提供することが可能。

適用目的	観測、通信の自律化	開発者	Aiko Space	ユーザ（受益者）	衛星開発・運用事業者
事例 A-3	orbital_OLIVER	TRL（推定）		5~7（試作・試験）	

<概要>

- orbital_OLIVERはイタリアのAiko Space社が開発した衛星搭載系におけるミッション運用計画システム^[1]。
- AIを搭載しており、衛星が自律的にデータを処理し、リアルタイムで判断を下したうえで、必要であればミッションを再計画して、最も適切なデータを地上に提供することが可能。同社は、海上監視を目的とした地球観測キューブサットを例に、以下の運用が可能と謳っている^[1]。
 - ある地域で観測された船舶の数や種類に応じて、衛星搭載系で自律的に行動方針を決定することが可能。
 - 通常、上記運用には、地上のミッション管制に最新のデータを提供し、それに応じて新しいミッションスケジュールを設定する必要があることから、地上と少なくとも1回の通信が必要であり、したがって何時間も必要となる。
 - 本システムが搭載されていれば、数分で行動決定が可能であり、ユーザに実用的なデータをタイムリーに提供する上で大きな優位性を得ることができる。
- 上記に加え、時系列分析のための最先端の深層学習（DL）技術を利用して、テレメトリとハウスキーピング データ ストリームを継続的に監視し、故障検知・分離が可能^[1]。

<実績・計画等>

- ESAの開発支援プログラムであるInCubedにおいて、2021年5月から2023年7月までの間に軌道上実証を実施。主に通信サブシステム上で動作し、オンボードのリソース管理、電力配分と帯域幅割り当てを最適化を実証した^[2]。
- 今後、同社のアーリーアダプタープログラム（EAP）により、3つの異なる衛星へ本製品が搭載される予定^[1]。

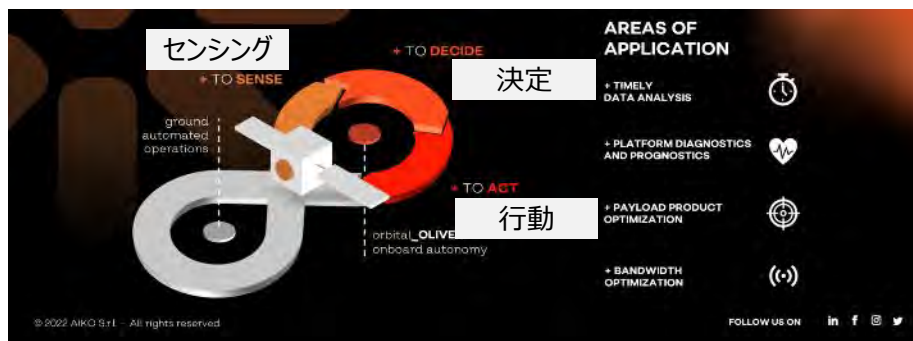


図 orbital_OLIVERのコンセプト^[2]

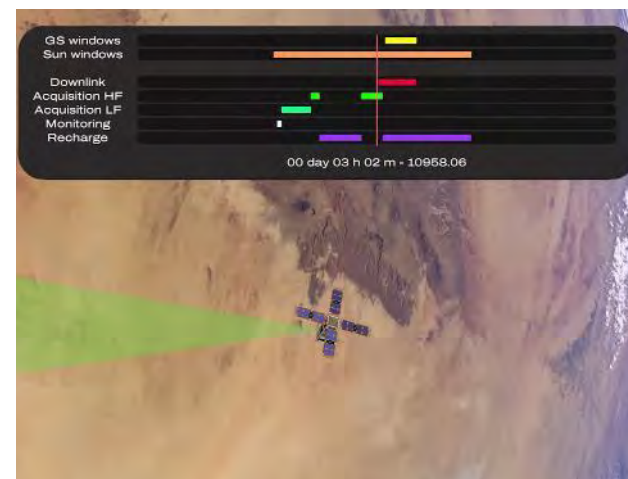


図 運用計画のイメージ^[1]

③ 観測分野でのオンボード処理 観測運用の自律化

小型衛星開発メーカーの英国Open Cosmos社と衛星搭載向けオンボードコンピュータメーカーのUbotica社は、AI関連技術を搭載したCogniSAT-6を開発中である。衛星単機でのTip & Cue機能を搭載していると推定される。

適用目的	観測、通信の自律化	開発者	Open Cosmos/Ubotica	ユーザ（受益者）	同左
事例 A-4	CogniSat-6			TRL（推定）	5～7（試作・試験）

<概要>

- 小型衛星開発メーカーの英国Open Cosmos社と衛星搭載向けオンボードコンピュータメーカーのUbotica社は、AI関連技術を搭載したCogniSAT-6を開発中^[1]。
- CogniSAT-6は、地上局の介入を必要とせずに軌道上で特定した関心領域での画像収集を最適化する「リアクティブ・リターゲティング」を提供する^[1]。
（衛星単機でのTip & Cue機能であると推定。）
- Ubotica社製のオンボードコンピュータであるCogniSAT-XE2が搭載されており、画像処理とAI演算用のチップにより低消費電力で高速な処理が可能^[2]。
- 上記の画像収集機能に加え、観測した画像の雲を検出・データ削除を行う機能であるCogniSAT-CRCも搭載されている。本機能とロスレス画像圧縮により、有用なデータ取得量を6倍に増やすことが可能とされる^[3]。

<実績・計画等>

- CogniSAT-6は2024年中に打ち上げ予定^[4]。



図 CogniSAT-6^[4]



図 CogniSAT-XE2^[2]

③ 観測分野でのオンボード処理 観測運用の自律化

NASAは、ゲートウェイ計画やアルテミス計画を含む深宇宙ミッションに向け、NASA Platform for Autonomous Systems (NPAS)と呼ばれる**宇宙機の自律運用システム**を過去10年間を通して開発し、**2024年に軌道上実証を実施予定**。

適用目的	観測、通信の自律化 ／軌道制御の自律化	開発者	NASA	ユーザ（受益者）	同左
事例 A-5	NASA Platform for Autonomous Systems (NPAS)		TRL（推定）	5～7（試作・試験）	

<概要>

- NASAは、ゲートウェイ計画やアルテミス計画を含む深宇宙ミッションに向け、NASA Platform for Autonomous Systems (NPAS)と呼ばれる**宇宙機の自律運用システム**を過去10年間を通して開発^[1]。
- システムモデリング言語である**SysML**を利用したモデルベースシステムズエンジニアリング（MBSE）によるデジタルツインを構築し、**地上における高精度なシミュレーションを活用して自律運用**を行う^[1]。
- ヘルスアセスメント、異常検出（FMEA）、自律運用計画、スケジューリング、実行等を行うことが可能。

<実績・計画等>

- NPASを搭載した小型衛星のLizzieSat-1を**2024年の第1四半期に打ち上げる**計画。軌道上実証を通じて、観測機能の自律的な動作を評価する予定^[2]。

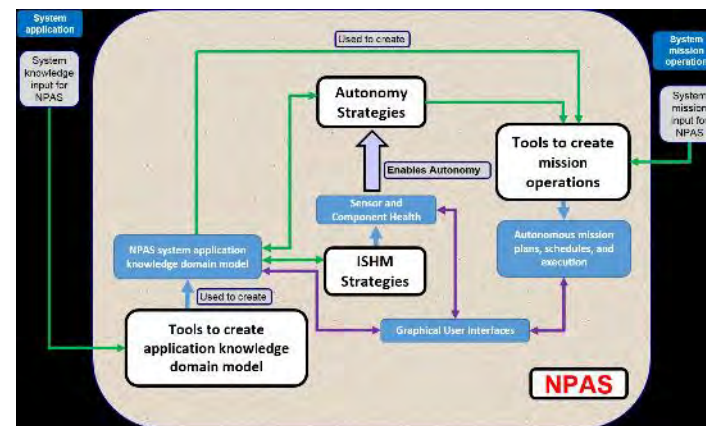


図 NASA Platform for Autonomous Systems^[1]

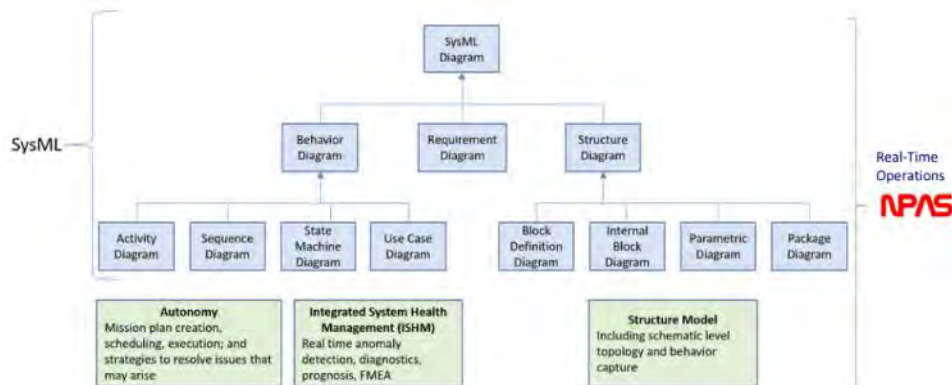
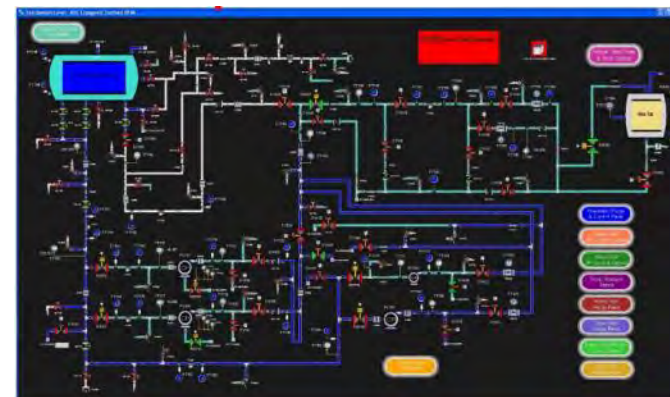


図 SysMLでのモデル開発（デジタルツイン）^[3]



1. NASA, [NASA Platform for Autonomous Systems \(NPAS\)](#)
 2. SPACE DAILY, [AI-enhanced LizzieSat satellite by Sidus Space clears crucial environmental tests](#)
 3. NASA, [Trusted Autonomy and the NASA Platform for Autonomous Systems\(NPAS\)](#)

③ 観測分野でのオンボード処理 OHBの動向

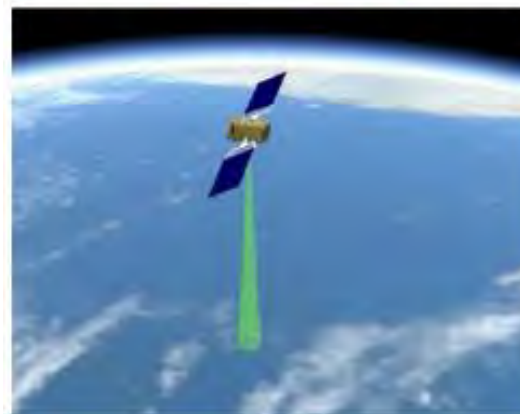
事例A-6) OHBはオンボードでのAI処理の活用による2衛星によるTip & Cue機能の開発を進めている。

- ・1機目の衛星で低分解能、広範囲の撮像を行い、オンボードAI処理により関心対象物を抽出。
- ・2機目の衛星に対象物位置を通信し、関心対象物を高分解能、狭範囲で詳細に撮像

- 関心対象物はAIによる検出を実施。
- 想定する関心対象物は洪水、森林火災、タンカー等からの重油漏れ、海洋ゴミ、火山監視等。
- 1機目の衛星は基本的に常に観測をし続ける形になるため、検出処理はそれを処理し続けられるスループットが必要。
- 移動体等への適用を考慮した場合、2機の撮像間隔は短いことが望ましく、処理のレイテンシに関しても短い必要がある。(OHBのシステム検討では2機の間隔は40度程度を想定しており、その場合、1機目の撮像から2機目の撮像のための姿勢静定までの時間は630秒となり、この時間を処理時間制約としていた)
- EDHPC2023にて、森林火災のアプリケーションに関して、Kria KV260(Zynq™ UltraScale+™ MPSoC)を用いた評価を行い、十分なレイテンシ、スループットが実現できることを報告していた。
実際には、複数アプリケーションを同時に走らせる必要があると想定されるため、機器の並列化や高速化は必要になると思われる。



One camera **large swath** (120Km) and low resolution (30m at 500km orbit) in red



One camera **small swath** (20km) and **High resolution** (5m at 500km orbit) in green

④ 宇宙データサーバの動向

- 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。

主要プレイヤー	国	動向
Space Compass	日	観測衛星等により宇宙で収集される膨大な各種データを静止軌道衛星（GEO: Geostationary Orbit Satellite）経由で地上へ高速伝送する光データリレーサービスを、2024年度に開始予定。高度なコンピューティング機能を搭載した衛星を順次拡充し、宇宙での大容量通信・コンピューティング処理基盤を提供する構想。
Orbits Edge	米	民生サーバを軌道上に配置するための衛星バスを開発。軌道上でのエッジ処理を行うためのマイクロデータセンター構築を構想。
Ramon.Space	イスラエル	宇宙用高性能データサーバを開発中。ネットワークセントリックの分散型データサーバを指向しており、HWをRamon.Space、Platform SWはCSPが開発。ユーザーにはPaaSとして提供する想定。

成長条件

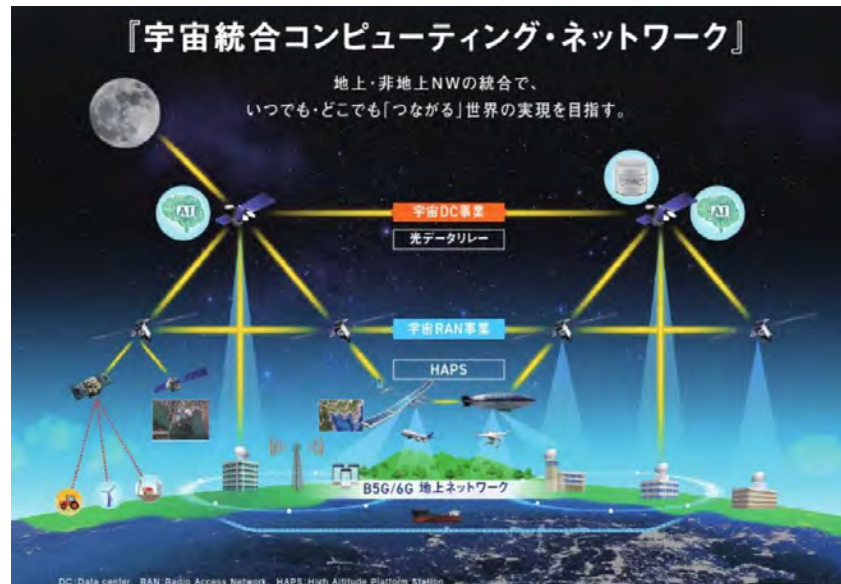
- 個別の観測衛星にオンボード処理計算機を載せるよりも価格メリットを出す必要があるため、衛星間光通信の標準化、低価格化、および、データセンタの演算・通信費用の低価格化は絶対条件
- 大容量・高信頼性ストレージが実現でき、観測データの軌道上保管が可能となれば、軌道上に保存されている経年データからの差分抽出や、複数センサデータからのデータフュージョン解析等、複雑な処理まで軌道上で実施でき、そこから抽出された情報のみを地上にダウンロードできる形となるため、大きな成長につながる可能性がある。

④ 宇宙データサーバの動向

Unnibap : COTS品を利用した高性能計算機 ix5/ix10 、および、SpaceCloud OS/Framework というSWプラットフォームを提供することにより、軌道上でPaaSを提供しようとしている。

名前	Space Compass	国名	日本	設立	2022
----	---------------	----	----	----	------

- Space Compassは日本電信電話株式会社とスカパー J S A T 株式会社が設立した合併会社
- 観測衛星等により宇宙で収集される膨大な各種データを静止軌道衛星（GEO : Geostationary Orbit Satellite）経由で地上へ高速伝送する光データリレーサービスを、2024年度に開始予定。
- 高度なコンピューティング機能を搭載した衛星を順次拡充し、宇宙データセンターとして宇宙での大容量通信・コンピューティング処理基盤を提供する構想



出典 : [Space Compass](#)

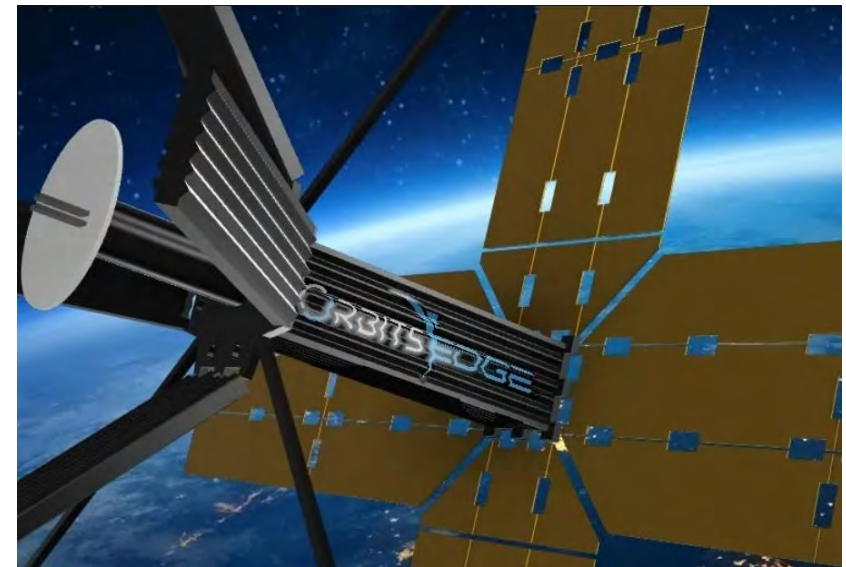
④ 宇宙データサーバの動向

23-002-R-013

Unnibap : COTS品を利用した高性能計算機 ix5/ix10 、および、SpaceCloud OS/Framework というSWプラットフォームを提供することにより、軌道上でPaaSを提供しようとしている。

名前	Orbits Edge	国名	米	設立	2013
----	-------------	----	---	----	------

- 民生サーバを軌道上に配置するための衛星バスを開発。
- 軌道上でのエッジ処理を行うためのマイクロデータセンター構築を構想。

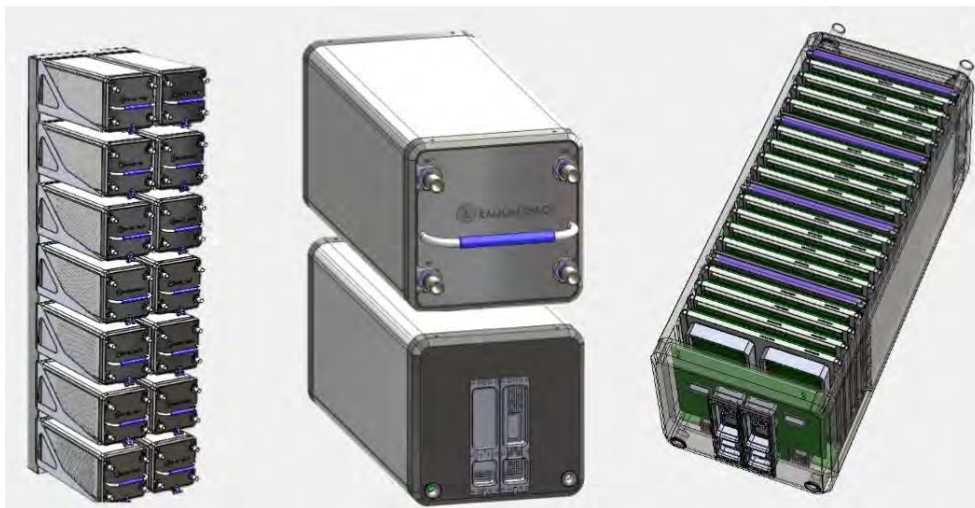


④ 宇宙データサーバの動向

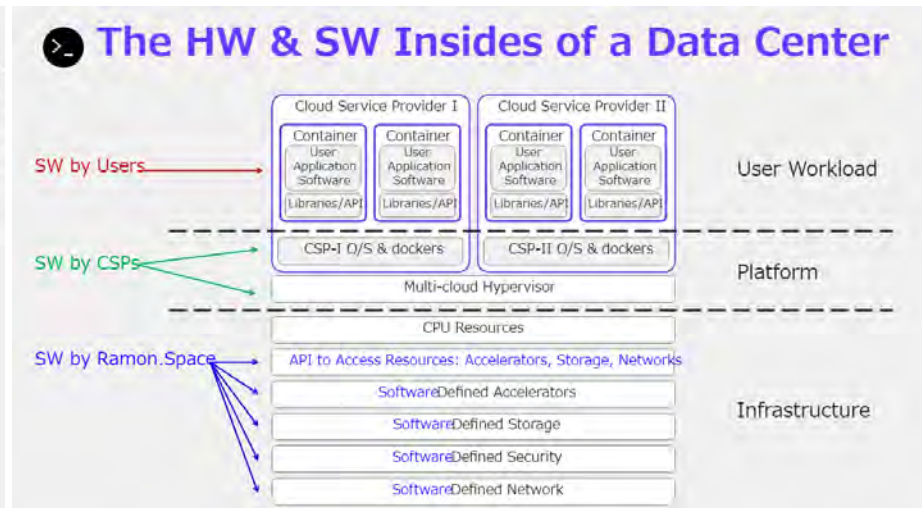
Unnibap : COTS品を利用した高性能計算機 ix5/ix10 、および、SpaceCloud OS/Framework というSWプラットフォームを提供することにより、軌道上でPaaSを提供しようとしている。

名前	Ramon.Space	国名	イスラエル	設立	2004
----	-------------	----	-------	----	------

- ESAと共同開発したRC64等の宇宙用高性能CPUを開発してきたRamon Spaceが開発する宇宙用データサーバ
- ロバスト性を確保するためネットワークセントリックの分散型データサーバを指向。
- HWをRamon.Space、Platform SWはCSPが開発。ユーザーにはPaaSとして提供する想定。



Ramon.Spaceの開発する軌道上データサーバHW



Ramon.Spaceが提供するサービスエリア

⑤ セキュリティ関連のオンボード処理の動向

23-002-R-013

- 現在、衛星-地上間で用いられている暗号化方式は、計算量の小さい共通鍵暗号方式が一般的であり、それについては大きな技術課題は見受けられず、最近では大きな技術開発は見受けられない。
- 衛星間通信によるメッシュネットワーク化の進捗により、共通鍵暗号の欠点が顕在化する可能性があり、それを克服する公開鍵暗号方式(PKI)の宇宙適用への取組も見受けられる。

現状

- 従来の宇宙ミッションではポイント・ツー・ポイントの通信で相手が限定されるため、計算量の小さい共通鍵暗号方式が一般的(マスターキーは打上前に衛星に埋め込む) [参照：[経産省 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 ver1.1](#)]
- CCSDS 350.9-G-1のなかで共通鍵暗号方式の中ではAESが推奨されている。
- 軌道上AES実証としてはESAのARTESの中で2007~2011年実証PJ等があるが、最近では大きな技術開発は見受けられない。[参照：[ESA](#)]

想定される状況の変化

- 光衛星間通信 等による軌道上通信のネットワーク化の進展
 - ・ ポイント・ツー・ポイントで相手が限定される通信に限らない通信が発生
 - ・ ネットワークへの段階的なノード追加(打上前までに通信相手が全て決まるわけではない)

欠点の顕在化の可能性

共通鍵方式の欠点

- マスターキーは打ち上げ前の衛星に埋め込む必要がある。そのため、一度衛星を打ち上げてしまった後は、新たな通信先(地上局・衛星間)を追加することが困難。
- 共通鍵方式は、公開鍵方式に比べて通信対象が増えたときに必要になる鍵の数が多いため、大規模なネットワークでは運用にコストがかかる。

PKI宇宙適用の取組

- CCSDSにてPKIに関する標準化に向けた活動が実施中
 - ・ CCSDS 357.0-B-1 : 認証方法の仕様を指定。
 - ・ CCSDS 350.6-G-1 : 宇宙でのPKIの仕組みや宇宙-地上間の鍵配布モデルについて解説
- ESAではOPS-SAT(軌道上での実証を目的にした多目的実証衛星)によるPKI利用の軌道上実証が行われた。

- 3.1 令和4年度技術項目にかかる最新動向の調査分析
- 3.2 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
- 3.3 衛星電気システム基盤技術の調査分析
 - 3.3.1 オンボード基盤技術
 - 3.3.1.1 オンボード処理に関わるサービス/アプリケーション/技術の動向調査
 - 3.3.1.2 オンボード処理に関わるプレイヤー調査
 - 3.3.1.3 デバイス調査
 - 3.3.1.3.1 デジタル処理デバイス調査
 - 3.3.1.3.2 メモリ調査
 - 3.3.1.4 強み弱み分析
 - 3.3.1.5 戦略・研究開発計画の検討
 - 3.3.2 誘導制御技術
 - 3.3.3 電源系技術
- 3.4 衛星機械システム基盤技術の調査分析
- 3.5 コンステレーション構築等に必要な技術
- 3.6 定常・動向分析
- 3.7 適時調査・事実確認

3.3.1.2 オンボード処理に関わるプレイヤー調査 まとめ

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。

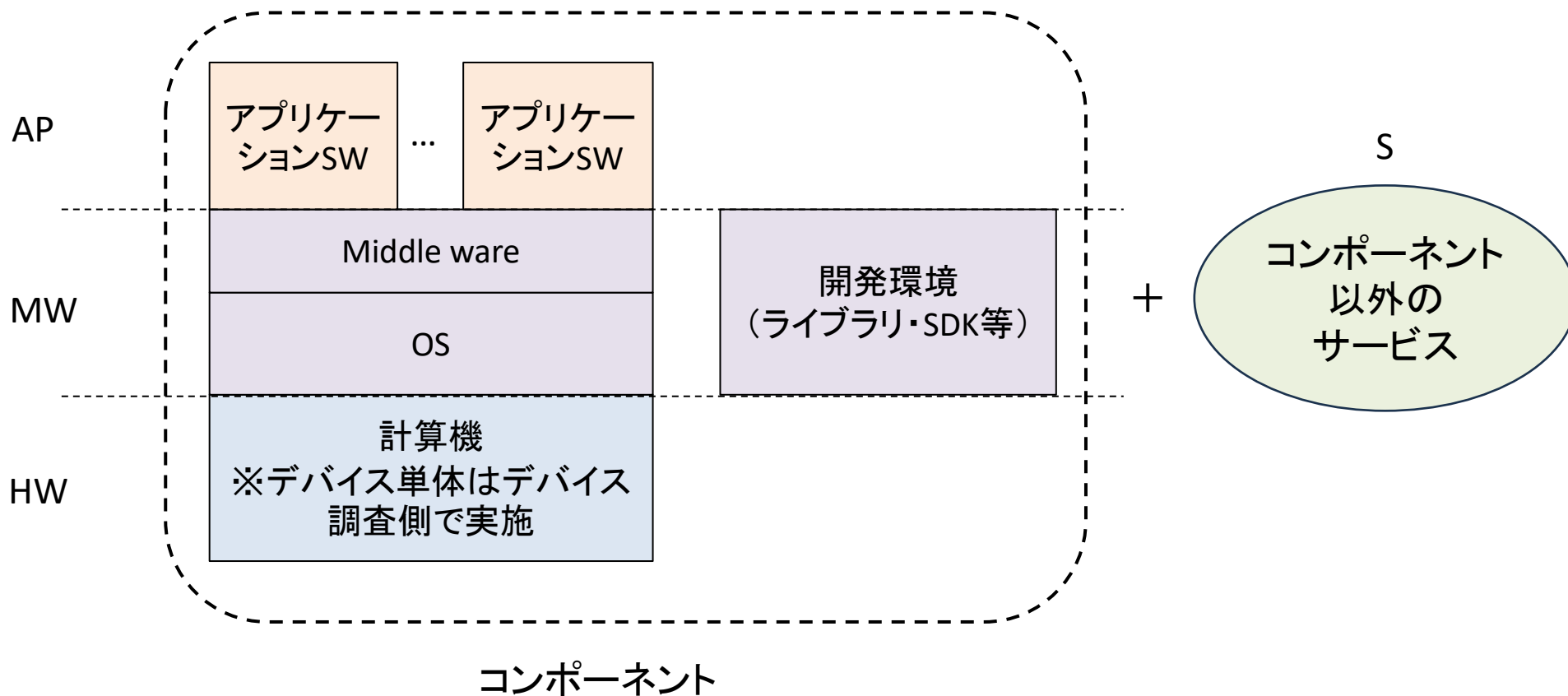
世界 ※1

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

3.3.1.2 オンボード処理に関わるプレイヤー調査

プレイヤー調査にあたり、各プレイヤーがどの領域の開発を実施しているか以下の通り、HW,MW,AP,Sの4通りで分類した。なおAP部分は各アプリケーション固有な内容が多いため、衛星システムにかかる調査としてはHW/MW/S分野を中心に調査を実施した。



3.3.1.2 オンボード処理に関わるプレイヤー調査

3.3.1.1項 オンボード処理の動向を調査するにあたり、欠かせないと判断されたオンボード処理に関わる主要なプレイヤーリストを下表に示す。

LN	プレイヤー名	国	H W	M W	A P	S	概要
1	Unibap	Sweden	○	○			COTS品を利用した高性能計算機 ix5/ix10、および、SpaceCloud OS/Framework というSWプラットフォームを提供することにより、軌道上でPaaSを提供しようとしている。放射線耐性強化に関しては、LN15 Troxel Aerospace Industriesのミドルウェアを使用している。
2	KP Labs	Poland	○	○	△		産業用計算機コアの耐放射線対策徹底により地上と同等の画像処理アルゴリズムを搭載し、性能・コスト・信頼性の両立を目指している。
3	Zephyr Computing Systems	US	○	○			センサデータ処理向けのエッジコンピューティングのためのハードウェアとソフトウェアのソリューションを提供
4	Ramon.space	US/Israel	○	○			自身の開発した耐放射線デジタル処理デバイスRC64を多数結合させた高信頼・高性能計算機や高信頼性ストレージを提供。
5	Exo-Space	US	○	○	△		宇宙でデータ処理インフラを構築するためのAI、マシンビジョンの技術を、宇宙の過酷な環境に耐えられるエッジなソフトウェアとハードウェアのパッケージとして提供。ユーザーの画像処理アプリケーションも載せられるが、自身でも画像処理SWを販売。
6	OrbitsEdge	US				○	民生サーバを軌道上に配置するための衛星バスを提供。軌道上でのエッジ処理を行うためのマイクロデータセンターを軌道上で構築しようとしている。
7	Hewlett-Packard Enterprises	US	○	?			ISSにて高性能宇宙用計算機Spaceborne Computer-1/2(SBC-1/2)の実証を行っている。
8	IBM	US		?	○		SBC-1/2に関するエッジ処理のソリューションを提供
9	Spiral Blue	Australia	○	○	○		NVIDIA製GPU(Xavier NX)を利用した計算機(SE-1)、および、その上で動作するターゲット検出A/I アプリケーションを開発。観測衛星メーカー Satellogicの衛星に搭載されている。
10	Ubotica	Ireland	○	○	△		小型衛星向けの低消費電力・高効率計算プラットフォームを提供。併せて、画像の雲除去・圧縮等のアプリケーションも提供している。