

NASA Technology Taxonomyの2020と2015の熱制御技術に関する比較 (1/3)

- TX12.1.5 CoatingsがTA10.1.3より移動(TA10 Nano technology, TA10.1 Engineered Materials and Structures)
- TX12.1.6 がTA12.1.5 Special Materialsより小項目に格上げ
- TX12.2.8 が新規に追加

2020			2015		
TX12		Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing	TA12		
	TX12.1	Materials		TA12.1	Materials
		12.1.1 Lightweight Structural Materials			12.1.1 Lightweight Structural Materials
		12.1.2 Computational Materials			12.1.2 Computationally-Designed Materials
		12.1.3 Flexible Material Systems			12.1.3 Flexible Material Systems
		12.1.4 Materials for Extreme Enviroments			12.1.4 Materials for Extreme Environments
		12.1.5 Coatings			12.1.5 Special Materials
		12.1.6 Materials for Electrical Power Generation, Energy Storage, Power Distribution and Electrical Machines			
		12.2.7 Special Materials			
		12.2.8 Smart Materials			

NASA Technology Taxonomyの2020と2015の熱制御技術に関する比較 (2/3)

- TA12.2.6 に関しては、耐環境系技術としてTX12.5として中項目に格上げ(後述)
- TX12.3.6 が新規技術項目として小項目に追加
- TX12.3.8 がTA12.3.1の技術項目から小項目に格上げ。

2020			2015		
TX12		Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing	TA12		
	TX12.2	Structures		TA12.2	Structures
		12.2.1 Lightweight Concepts			12.2.1 Lightweight Concepts
		12.2.2 Design and Certification Methods			12.2.2 Design and Certification Methods
		12.2.3 Reliability and Sustainment			12.2.3 Reliability and Sustainment
		12.2.4 Tests, Tools and Methods			12.2.4 Tests, Tools and Methods
		12.2.5 Innovative Multifunctional Concepts			12.2.5 Innovative Multifunctional Concepts
					12.2.6 Load and Environments
	TX12.3	Mechanical Systems		TA12.3	Mechanical Systems
		12.3.1 Deployables, Docking, and Interfaces			12.3.1 Deployables, Docking, and Interfaces
		12.3.2 Electro-Mechanical, Mechanical, and Micromechanisms			12.3.2 Mechanism Life Extension Systems
		12.3.3 Design and Analysis tools and Methods			12.3.3 Electro-Mechanical, Mechanical, and Micromechanisms
		12.3.4 Reliability, Life Assessment, and Health Monitoring			12.3.4 Design and Analysis tools and Methods
		12.3.5 Certification Methods			12.3.5 Reliability, Life Assessment, and Health Monitoring
		12.3.6 Mechanical Drive Systems			12.3.6 Certification Methods
		12.3.7 Mechanism Life Extension Systems			
		12.3.8 Docking and Berthing Mechanisms and Fixtures			

NASA Technology Taxonomyの2020と2015の熱制御技術に関する比較 (3/3)

- TA12.2.6 に関しては、耐環境系技術としてTX12.5として中項目に格上げ。耐環境性に関する解析技術/試験技術を重視する傾向が見受けられる。
- TA12.4.2 内に含まれていたCyber Physical Systemは削除
- TX12.4.6 が小項目として新規追加。

2020			2015		
TX12		Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing	TA12		
	TX12.4	Manufacturing		TA12.4	Manufacturing
		12.4.1 Manufacturing Processes			12.4.1 Manufacturing Processes
		12.4.2 Intelligent Integrated Manufacturing			12.4.2 Intelligent integrated Manufacturing and Cyber Physical Systems
		12.4.3 Electronics and Optics Manufacturing Process			12.4.3 Electronics and Optics Manufacturing Process
		12.4.4 Sustainable Manufacturing			12.4.4 Sustainable Manufacturing
		12.4.5 Nondestructive Evaluation and Sensors			12.4.5 Nondestructive Evaluation and Sensors
		12.4.6 Repurpose Processes			
	TX12.5	Structural Dynamics			
		12.5.1 Loads and Vibration			
		12.5.2 Vibroacoustics			
		12.5.3 Shock and Impact			
		12.5.4 TEST, Tools, and Methods			

2020 NASA Technology Taxonomy TX12.1(Materials :材料)の技術項目例(1/3)

- 単に材料そのものだけではなく、TX12.1.2のように材料に関するシミュレーション技術、設計技術、検証技術も分類に含まれている。

TX12		Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing	技術例
	TX12.1	Materials	
		12.1.1 Lightweight Structural Materials	<ul style="list-style-type: none"> • Nanofibers, fibers, resins and adhesives that enable the tailoring of large monolithic structures • Materials that perform multiple functions, materials that include mechanisms for fast, in-situ repairs • Topology optimized structures; architected foams • Novel low density metal • Composite alloys
		12.1.2 Computational Materials	<ul style="list-style-type: none"> • Multiscale modeling, linking atomistic to continuum scale for life prediction modelling and tailoring of structural, thermal, functional materials • Characterization techniques to validate the models • Integrated computational materials engineering (ICME), a product design technique • Materials Genome Initiative (MGI) which includes the infrastructure (e.g. materials databases) to discover, manufacture, and deploy advanced materials
		12.1.3 Flexible Material Systems	<ul style="list-style-type: none"> • Applications to habitats and deployable structures, balloons, parachutes, space suits, metalized films and solar sails, tethers, multifunctional materials that include materials that enable the morphing or deployment of aerospace structures, compliant mechanisms based on elastic deformation of thin sections, flexible metal cloth created through additive manufacturing, biobarrier fabrics for planetary protection

2020 NASA Technology Taxonomy TX12.1(Materials :材料)の技術項目例(2/3)

- 小項目に格上げされたTX12.1.6には電極材料等が含まれている。電池等の性能向上必須となる材料技術が重要視されていることが見受けられる。

TX12		Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing	技術例
	TX12.1	Materials	
		12.1.4 Materials for Extreme Enviroments	<ul style="list-style-type: none"> • Materials used for radiation environments, heat shields, cryo-insulators, high-temperature materials including nanomaterials, metallic, ceramic matrix composites, ultrahigh temperature ceramics, advanced alloys, insulators, materials that resist abrasive wear, materials with high wear resistance in vacuum, controllable Composite Technology for Exploration (CTE) materials, and materials for ultra-low temperatures including amorphous metals
		12.1.5 Coatings	<ul style="list-style-type: none"> • Includes films, optical blacks, nanofibers, nanocomposites, thermal barrier coatings, environmental coatings
		12.1.6 Materials for Electrical Power Generation, Energy Storate, Power Distribution and Electrical Machines	<ul style="list-style-type: none"> • Solid oxide, advanced anodes, advanced cathodes, polymer electrolyte membranes, graphene sheets, piezoelectric and thermoelectric materials, phase change materials, magnetostrictive materials, high strength magnetic materials, superconducting materials, amorphous and nanocrystalline coatings, diamond-like coatings, thermally sprayed materials, cold sprayed materials, hydrophobic and hydrophilic surfaces, nano-patterned surfaces, coatings that provide sensing

2020 NASA Technology Taxonomy TX12.1(Materials :材料)の技術項目例(3/3)

➤ 新規追加となったTX12.2.8には、形状記憶合金、やピエゾ圧電材料等の材料が含まれる。

TX12			Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing	技術例
	TX12.1		Materials	
		12.2.7	Special Materials	<ul style="list-style-type: none"> • Adhesive materials concepts, nanofiltering and fluid barrier materials, porous/non-porous materials, optically transparent window materials, materials with negative refractive index, aerogels, metamaterials, topological materials, functionally graded materials, metallic glasses, nanocrystalline metals, materials with controllable CTE, multifunctional laminates, shape memory alloys, high entropy alloys, multi-functional materials
		12.2.8	Smart Materials	<ul style="list-style-type: none"> • Shape memory alloys • Piezoelectrics

TX12.1 (材料)にて現在開発中のPJは33件。

ID	分類	実行中PJ数						
		現在のTRL	1	2	3	4	5	6計
TX12.1	Materials		2	24	6	1		33
TX12.1.1	Lightweight Structural Materials			4				4
TX12.1.2	Computational Materials		1	7	1			9
TX12.1.3	Flexible Material Systems			1				1
TX12.1.4	Materials for Extreme Enviroments			4				4
TX12.1.5	Coatings		2	2	1			5
TX12.1.6	Materials for Electrical Power Generation, Energy Storate, Power Distribution and Electrical Machines			1				1
TX12.1.7	Special Materials			4	2			6
TX12.1.8	Smart Materials							0

※ 同一PJが複数のTX12.1.Xにリンクされたり、TX12.1より下の小項目にはリンクされないPJも存在するため、TX12.1.Xの小項目の合計がTX12.1の合計数と一致しない場合もある。

2020 NASA Technology Taxonomy TX12.2(Structure :構造)の技術項目例(1/2)

➤ 単に構造そのものだけではなく、TX12.2.2のように構造設計に関するツール、解析技術等も含まれている。

TX12		Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing	技術例
	TX12.2	Structure	
		12.2.1 Lightweight Concepts	<ul style="list-style-type: none"> • Components for space vehicles and surface habitats, in-space depots and landers, solar or antenna arrays, complex precision deployables, propulsion systems, and terrestrial airframes and engines which function either as primary load bearing or as secondary structures • Technologies used for these components may include either rigid construction (e.g., shell or truss structures) or expandable configurations (e.g., inflatable structures) having efficient structural geometries (e.g., hat-stiffened shells) constructed from advanced materials (e.g., polymer matrix composites) using advanced fabrication methods (e.g., additive manufacturing)
		12.2.2 Design and Certification Methods	<ul style="list-style-type: none"> • High-fidelity, integrated, verified tools and processes for analysis, design, manufacturing, certification and sustainment of structures under all loading and environmental conditions • Improved methods for allowable predictions and models for predictive failure (especially composites)
		12.2.3 Reliability and Sustainment	<ul style="list-style-type: none"> • Predictive damage/life extension prediction methods • Structural/thermal health monitoring • Virtual digital fleet leader/digital twin sustainment

2020 NASA Technology Taxonomy TX12.2(Structure :構造)の技術項目例(2/2)

➤ TX12.2.4に含まれるデジタルでの仮想空間上での認証等、先進的な技術分類が見受けられる。

TX12			Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing	技術例
	TX12.2		Structure	
		12.2.4	Tests, Tools and Methods	<ul style="list-style-type: none"> • Integrated flight test data identification model • Full field data acquisition system and model verification and validation • Virtual digital certification method and system • Virtual digital fleet leader testing
		12.2.5	Innovative Multifunctional Concepts	<ul style="list-style-type: none"> • Multifunctional pressurized/non-pressurized structures including multi-use structures • Actively controlled and adaptive structures • Integrated windows • Four dimensional (4D) printed parts • Advanced heat exchangers with load-bearing capacity • Excavating tools with integrated sensing • Radiation and debris shielding with integrated sensing

TX12.2 (構造)にて現在開発中のPJは11件。

ID	分類	実行中PJ数						
		現在のTRL	1	2	3	4	5	6計
TX12.2※	Structures			6	1	2	1	11
TX12.2.1	Lightweight Concepts			1		1		2
TX12.2.2	Design and Certification Methods			1			1	2
TX12.2.3	Reliability and Sustainment							0
TX12.2.4	Tests, Tools and Methods							0
TX12.2.5	Innovative Multifunctional Concepts			3		1		4
TX12.5	Structural Dynamics							0

※ 同一PJが複数のTX12.2.Xにリンクされたり、TX12.2より下の小項目にはリンクされないPJも存在するため、TX12.2.Xの小項目の合計がTX12.2の合計数と一致しない場合もある。

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

3.3 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

3.4.1 熱制御系技術

3.4.2 構造系技術

3.4.2.1 構造系技術調査

3.4.2.2 強み・弱み分析

3.4.2.3 戦略・研究開発計画の検討

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

2-2 構造系技術に関する比較分析（AM活用拡大に向けたSWOT分析）

- 国内外問わず宇宙利用の需要が拡大しロケットや衛星の製造台数は増加見込み。
- ロケット分野ではエンジンや推進機構の軽量化/短納期化が期待されAM適用の機会が増える。
- 衛星分野でも大容量/広域通信の需要からRF機器の高密度化が進み熱制御機能を持つAM品が必要となる。
- 国内では**材料や工作機械を製造する企業が多数存在**しており、サプライチェーンを構築できるポテンシャルを持つ。
- **国内需要だけでは造形機会が少なく**品質確保のための費用対効果が薄い。


 如何に低コストで品質を担保していくかが課題。**品質要求の定量的なグレード分け（品質ガイドライン整備への投資）を方策として取り込む**ことで、過剰品質を回避しAM活用を拡大する。

	長所	短所
国内環境	【強み】 <ul style="list-style-type: none"> ■ 衛星(気象観測/災害監視/広域通信)利用促進 通信機器の小型化需要 ■ ロケット利用 太平洋に面した打ち上げ環境（地の利） ■ 産業構造 ロケット/衛星メーカー実績 材料(超合金、複合材)/工作機械の開発企業 	【弱み】 <ul style="list-style-type: none"> ■ AM品質 品質予測/安定化技術 品質保証活動との費用対効果 品質への過剰要求 ■ 設備投資 造形機、検査機への投資 ■ 造形機会
国外環境	【機会】 <ul style="list-style-type: none"> ■ 国際情勢 衛星通信網、広域通信に対する需要拡大 ■ 資源調査 惑星探査/基地計画 	【脅威】 <ul style="list-style-type: none"> ■ コスト 低コスト造形機の市場独占 ■ 品質規格 国際標準規格

AM技術

世界の
動向

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

日本の
現状

強み

- ✓ AMに関する材料・工作機械のベンダーが国内に多数存在し、サプライチェーンを国内にて構築できるポテンシャルを持つ。
- ✓ JAXA 刷新PJ DX研究会 テーマC等での取組が存在

弱み

- ✓ 宇宙環境に適応しつつ、低コストでの品質保証の仕組みがない
 - ・品質予測/安定化技術 (人工衛星向けの造形機会が少ない)
 - ・品質保証活動との費用対効果 (品質への過剰要求抑制)

開発
計画案

- ①品質ガイドラインの整備
JAXA 刷新PJ DX研究会 テーマC等での取組にて知見を集約し、過剰品質を回避するため、品質要求の定量的なグレード分けを行った品質ガイドラインの整備への取り組みが必要。その際、国内のAM 材料・工作機械メーカーとの連携・推進を考慮すべきである。

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

3.3 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

3.5.1 多数機開発・試験・運用手法

3.5.1.1 技術調査

3.5.1.2 強み・弱み分析

3.5.1.3 戦略研究開発計画の検討

3.5.2 セキュリティ

3.5.2.1 技術調査

3.5.2.2 強み・弱み分析

3.5.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

目次

3.5.1 多数機開発・試験・運用手法

3.5.1.1 技術調査

3.5.1.1.0 調査方針

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析

① SpaceX (米)

② OneWeb (英)

③ Planet Labs (米)

④ Capella Space(米)

3.5.1.1.2 製造に関する整理

3.5.1.1.3 統合運用について調査・分析・整理

3.5.1.1.3.0 統合運用に関する調査の流れ

3.5.1.1.3.1 コンステレーション・サービスの調査・分析

3.5.1.1.3.2 運用計画立案システム・統合運用系の実例

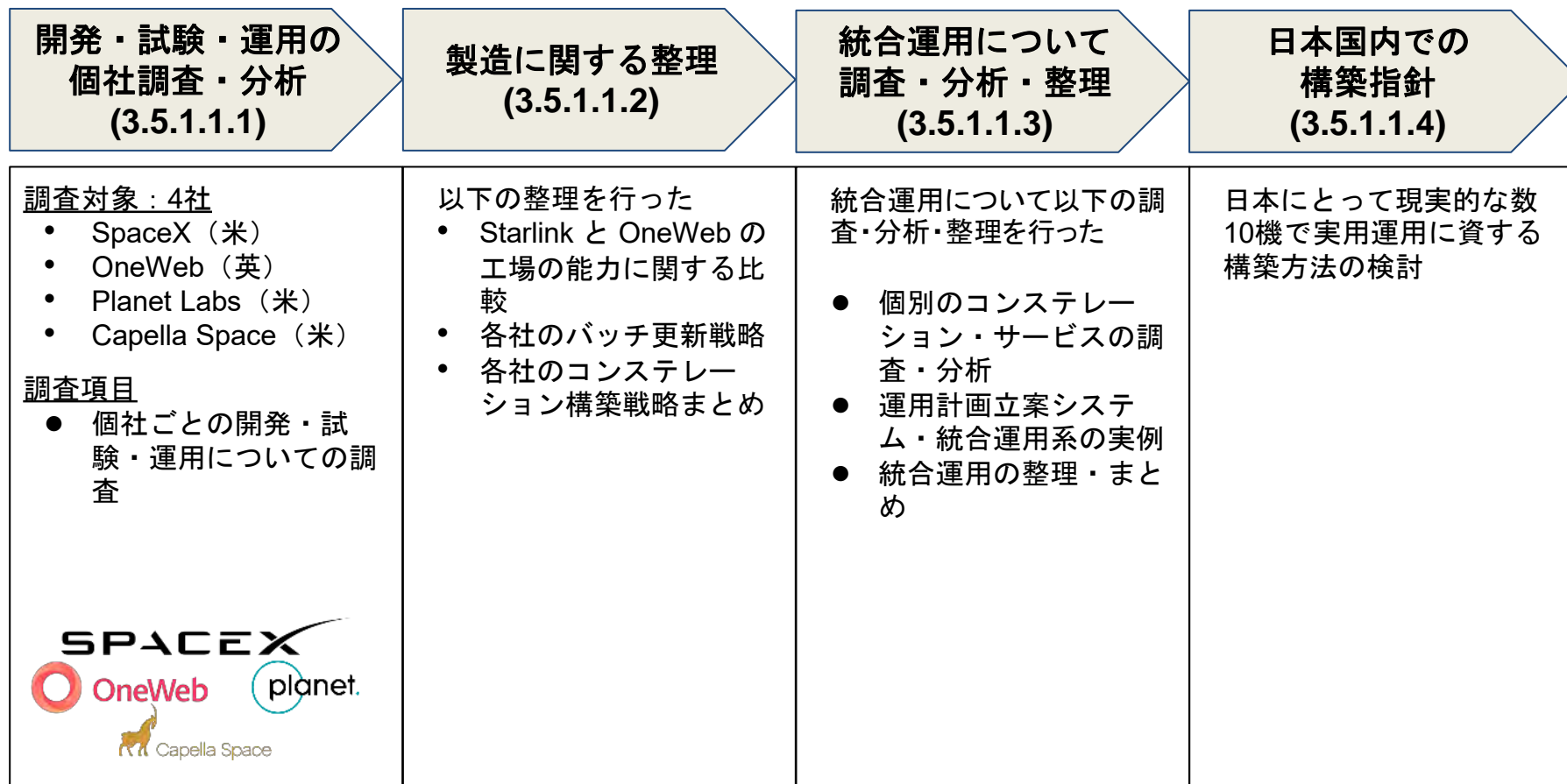
3.5.1.1.3.3 統合運用の整理・まとめ

3.5.1.2 強み・弱み分析

3.5.1.3 戦略・研究開発計画の検討

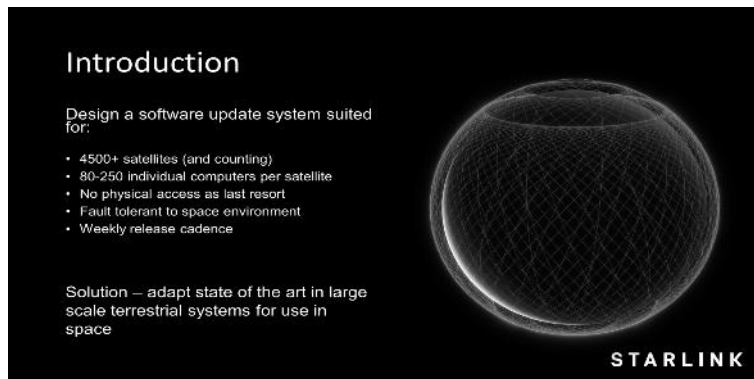
3.5.1.1.0 調査方針

開発・製造・運用に関して数社に対して個別の調査・分析を行い整理した。統合運用についても同様に実施した。そのうえで、日本国内での構築に向けた指針の整理と分析を行った。



3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

個社調査 #1 Starlink



2023年の夏時点で、4500機以上からなるコンステレーションを構築している。



Starlink ホームページにおいては、宇宙利用およびそれに関する技術は末尾に出てくるのみである。あくまで実用のサービスとしてアピールしている。

引用元: <https://www.starlink.com/>

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

Starlink のバッチ間差異の調査と分析：

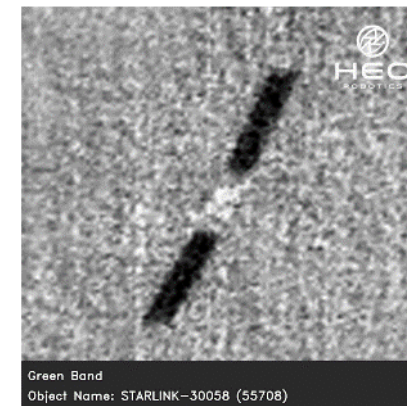
Starlink は1つのバージョンでの製造数が非常に多く、また、バージョン間の差異も大きい。



*1: Credit: From eoPortal, originally from SpaceX



*2: Credit: SpaceX



*3: Credit: From SPACEFLIGHT NOW, Originally from HEO Robotics/Satellogic

	Prototype	V0.9	V1.0	V1.5	V2.0 mini
打上時期 *4	2018/2	2019/5	2019/11 ~ 2021/5	2021/9 ~ 2023/7	2023/2 ~
打上数 *5	2	60	1665	2288	1656
重量		227 kg *4	260 kg *4	260 kg *4	800 kg *6
推進剤 *4, *6		クリプトン	クリプトン	クリプトン	アルゴン
備考				2021/6 にプロトタイプ3機の打ち上げあり	

引用元: *1: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/starlink#reactions>
 *2: <https://spaceflightnow.com/2023/03/20/spacex-pausing-launches-of-new-generation-starlink-satellites/>
 *3: https://space.skyrocket.de/*5-https://planet4589.org/space/con/star/stats.html
 *4: https://space.skyrocket.de/*5-https://planet4589.org/space/con/star/stats.html
 *5: https://space.skyrocket.de/*5-https://planet4589.org/space/con/star/stats.html
 *6: <https://spaceflightnow.com/2023/02/26/spacex-unveils-first-batch-of-larger-upgraded-starlink-satellites/>

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

23-002-R-013

Starlink 構築についての調査と分析：

V1 から V1.5、V1.5 から V2-mini にバージョンを変更する際に、約 3 か月ほどの期間、打ち上げ頻度が低下している。この期間に、製造設備を更新している可能性がある。

v1.5 の初回打ち上げ: 2021/09/13

- 2021/05/26 - 2021/09/13 まで、約3 か月通常の打ち上げが無い。

ID	打上日	機数	Batch
40	2022/03/03	47	V1.5
39	2022/02/25	50	V1.5
38	2022/02/21	46	V1.5
37	2022/02/03	49	V1.5
36	2022/01/18	49	V1.5
35	2022/01/06	49	V1.5
34	2021/12/18	52	V1.5
33	2021/12/02	48	V1.5
32	2021/11/13	53	V1.5
31	2021/09/13	51	V1.5
30	2021/06/30	3	v1.5 proto
29	2021/05/26	60	v1.0
28	2021/05/15	52	v1.0
27	2021/05/09	60	v1.0
26	2021/05/04	60	v1.0
25	2021/04/28	60	v1.0
24	2021/04/07	60	v1.0
23	2021/03/24	60	v1.0
22	2021/03/14	60	v1.0
21	2021/03/11	60	v1.0
20	2021/03/04	60	v1.0

v2-Mini の初回打ち上げ: 2023/02/27

- 2022/10/27 - 2023/01/19 まで、2.5 カ月の間、打ち上げ頻度が大きく減少している。

ID	打上日	機数	Batch
82	2023/05/04	56	V1.5
81	2023/04/27	46	V1.5
80	2023/04/19	21	V2 Mini
79	2023/03/29	56	V1.5
78	2023/03/24	56	V1.5
77	2023/03/17	52	V1.5
76	2023/03/03	51	V1.5
75	2023/02/27	21	V2 Mini
74	2023/02/17	51	V1.5
73	2023/02/12	55	V1.5
72	2023/02/02	53	V1.5
71	2023/01/31	49	V1.5
70	2023/01/26	56	V1.5
69	2023/01/19	51	V1.5
68	2022/12/28	54	V1.5
67	2022/12/17	54	V1.5
66	2022/10/27	53	V1.5
65	2022/10/20	54	V1.5
64	2022/10/05	52	V1.5
63	2022/09/24	52	V1.5
62	2022/09/18	54	V1.5

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

23-002-R-013

ワシントン州Redmondの工場について：

Starlink の衛星製造拠点は ワシントン州 Redmond に集中している。2021 年頃に大規模な工場拡張（黄色枠右側）を行った。また、2023 年時点でさらに拡張（黄色枠右側）を進めている。

- 当初緑枠左側の1か所の敷地（2階建て相当）であったが、同じ工業団地内の別の建物(緑枠右側)を増床、加えて巨大な工場(黄色枠右側)を2021年以前より建設を開始、遅くとも2022年9月には稼働を開始していることが衛星画像・ストリートマップなどにより確認できている。また工場を更に増設している様子も見られる(黄色枠左側)。
- 新設された工場は3~4階相当、目測10m前後の高さを持つかなり大きな工場である。一方野外に液体窒素などを貯蔵するタンクらしいものは見当たらず、少なくとも衛星1機1機に対して低温試験を行っていないことが推察される。工場の面積は124,900 sq feetと言われている*。

* <https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/spacex-expands-its-satellite-operation-in-redmond/>



左：2023年4月に撮影された新設された工場のGoogleストリートビューの画像
右：2022年9月に撮影された新設された工場の写真



2023年12月15日 Bing Mapより取得
<https://www.bing.com/maps/?cp=47.694894%7E-122.032597&lm=17.0&style=h>

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

製造能力に関する推察：

Starlink の製造能力は、300 kg 級で1日あたり 10 機以上、800 kg 級でも一日当たり5機以上の製造がおこなわれていると推察される。

- Starlink v1~1.5は1回の打ち上げ当たり55機前後、v2Miniは同21機前後をいずれも4日に1回程度のペースで打上げている。このペースの律速条件は判明していないが、v1.5の300kgサイズ*₁において1日当たり10機以上、v2Miniの800kgサイズ*₂において1日当たり5機以上の製造能力があることはほぼ*₃確実である。
- 評伝「イーロン・マスク」によれば2022年7月頃のエピソードとして「シアトルで作っているスターリンク衛星の在庫が積みあがりつつあった*₄」というような記述が記載されており、打上げ能力がない中でStarlink V2の製造が行われていた可能性がある。
- その後2022/10/27を最後に2.5か月間Starlinkの打ち上げが休止しているが、この間にV2をV2Miniに改修または新規製造するためのラインの構築が行われていた可能性が高い。
- 1日の製造機数及び工場に液体窒素のタンクがないことから、衛星FMに対して熱真空試験のAT試験によるコストを、何らかの形で大きく軽減していることが推察される。
 - 仮に、熱真空試験が、従来から大幅に短い 1 週間ほどで完了するとし、1機ごとにチャンバーに入れるとして、v1.5 で 10 機 * 7 日の、70 基のチャンバーを常時稼働した状態に維持する必要がある。チャンバーの付随設備も含めて、単純な建物面積からは配置が可能だと思われるが、集約して設置することには、換気の面などで困難が予想される。

*1: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v1-5.htm

*2: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v2-mini.htm

*3: 理論上は改修前の在庫を改修する時間と新規製造の時間のラグがありうるが、打上ペースが安定しておりその可能性は低いと考えている。

*4: 「イーロン・マスク」下巻p237. なおStarlinkの工場があるとされるRedmondはシアトル東部郊外に位置している。

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

23-002-R-013

FCC 資料による Starlink 製造についての調査(1/2) :

SpaceX が FCC に提出した資料を参照して、製造についての情報の収集を試みた。

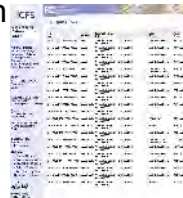
製造設備等の情報は得られなかったが、V2 は V1 の置き換えを目的とすることが確認された。

調査方法

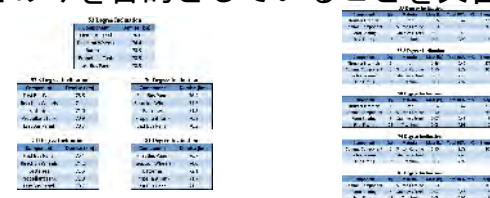
調査結果

FCCのHPからライセンス情報を入手する方法

- FCCのライセンス情報のデータベースにアクセス
- Call signを使用しStarlinkのライセンス資料を入手
 - Call signは次の4つを使用。
 - S2983, S3018, S2992, S3069
- 資料の内容を個別に精査し情報を抽出した。
- 2023/10/31時点で確認された計34のライセンスを参照
- 各フォルダ内に格納された資料をダウンロード
 - Attachment Menu
 - Other filings related to this application
- 708のファイルを手、精査



- [Narrative.pdf][Technical Attachment.pdf]に詳細な記載有り
- 衛星の軌道や運用期間、台数等に関する数値情報を取得
- 製造設備等に関する情報は取得できず
- 大気圏再突入シミュレーションの結果から、衛星のコンポーネント構成と各コンポーネントに使用された材料とその質量等に関する情報を取得
- Gen2は既存の衛星のハードウェアを更新し置き換えることのみを目的としていることを文言から確認



3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

23-002-R-013

FCC 資料による Starlink 製造についての調査(2/2) :

ライセンス情報に伴うファイルに、大気圏再突入シミュレーションの結果から、衛星のコンポーネント構成と各コンポーネントに使用された材料とその質量等に関する情報の記載があった。

FCCライセンス情報の調査結果

- 主に Narrative.pdf や Technical Attachment.pdf に詳細な情報が記載され、衛星の軌道や運用期間、台数等に関する数値情報を得られたが、製造設備等に関する情報は得られなかった。*1
- SAT-LOA-20170726-00110 / Technical Informatio.pdf については、大気圏再突入シミュレーションの結果から、衛星のコンポーネント構成と各コンポーネントに使用された材料とその質量等に関する情報の記載があったが、特筆すべき事項は見られなかった。

53 Degree Inclination

Component	Demise (km)
First Bus Panel	76.6
Reaction Wheels	74.4
Batteries	70.9
Propellant Tank	70.9
Last Bus Panel	70.3

53.8 Degree Inclination

Component	Demise (km)
First Bus Panel	76.6
Reaction Wheels	74.4
Batteries	71.0
Propellant Tank	70.9
Last Bus Panel	70.3

70 Degree Inclination

Component	Demise (km)
First Bus Panel	76.4
Reaction Wheels	74.2
Batteries	71.3
Propellant Tank	70.8
Last Bus Panel	70.3

74 Degree Inclination

Component	Demise (km)
First Bus Panel	76.4
Reaction Wheels	74.2
Batteries	71.6
Propellant Tank	71.0
Last Bus Panel	70.7

81 Degree Inclination

Component	Demise (km)
First Bus Panel	76.7
Reaction Wheels	74.6
Batteries	72.1
Propellant Tank	71.7
Last Bus Panel	71.3

図 1. 軌道傾斜角別 / 主要構造物別の分解に関する表:
*1: p. 39 より

53 Degree Inclination

Component	Qty.	Material	Mass (kg)	Total DCA (m ²)	Energy (J)
Thruster Internals	1	Iron	1.66	0.47	2733
Comms. Component	5	Silicon Carbide	1.50	2.79	961
Rotor Bearing	5	Stainless Steel	0.07	2.45	8
Strut Fitting	12	Titanium	0.03	4.92	6

53.8 Degree Inclination

Component	Qty.	Material	Mass (kg)	Total DCA (m ²)	Energy (J)
Thruster Internals	1	Iron	1.66	0.47	2733
Comms. Component	5	Silicon Carbide	1.50	2.79	961
Rotor Bearing	5	Stainless Steel	0.07	2.45	8
Strut Fitting	12	Titanium	0.03	4.92	6

70 Degree Inclination

Component	Qty.	Material	Mass (kg)	Total DCA (m ²)	Energy (J)
Thruster Internals	1	Iron	1.66	0.47	2733
Comms. Component	5	Silicon Carbide	1.50	2.79	961
Rotor Bearing	5	Stainless Steel	0.07	2.45	8
Strut Fitting	12	Titanium	0.03	4.92	6

74 Degree Inclination

Component	Qty.	Material	Mass (kg)	Total DCA (m ²)	Energy (J)
Comms. Component	5	Silicon Carbide	1.50	2.79	961
Rotor Bearing	5	Stainless Steel	0.07	2.45	8
Strut Fitting	12	Titanium	0.03	4.92	6

81 Degree Inclination

Component	Qty.	Material	Mass (kg)	Total DCA (m ²)	Energy (J)
Comms. Component	5	Silicon Carbide	1.50	2.79	961
Rotor Bearing	5	Stainless Steel	0.07	2.45	8
Strut Fitting	12	Titanium	0.03	4.92	6

図 2. 軌道傾斜角別の軌道再突入残存物に関する表
*1: p. 40 より

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

Starlink のコンステレーション構築コンセプト：

Starlink 衛星の各バッチは互換性を持ち、既存衛星の置き換えができることを意図している。

Starlinkはv1.5, v2mini, 将来的にv2の打ち上げを予定しているが、FCCに申請している書類によれば*、これらの第2世代は現行第1(1.5)世代と後方互換性を有していることが推察される。

また故障時にはアップグレードされたハードウェアに置き換えることを念頭に置いているとされるが、まとめて打ち上げしているため実際には優先的に打上げる軌道面の選択に影響すると思われる。

- SAT-MOD-20230215-00036 Attachment / Narrative.pdf
- Gen2衛星に関する一文として以下の記載が確認された
 - 「Gen2は既存の衛星を即座に軌道から外すつもりではない。むしろ衛星が壊れた場合にこれらの衛星をアップグレードされたハードウェアに置き換えることのみを目的としている」

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

Starlink のソフトウェア管理：

Starlink では、衛星のソフトウェア更新のダウンロードは衛星側が主体となり HTTPS で行っている。

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



画像は 2023 年 8 月に開催された Small Satellite Conference のもの。



3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ①SpaceX

Starlink のソフトウェア管理戦略についての考察：

Starlink のソフトウェア管理において、「データ配信は自律的」「データ利用は中央集権的」

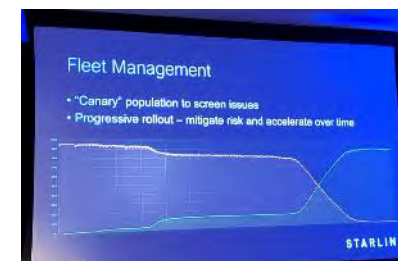
以下の二点より、「データ配信は自律的」「データ利用は中央集権的」というポリシーにて管理を行っていると考えられる。

- 「1 機の Starlink 衛星内には多数（数十～数百ある）のコンピューターノードが含まれる。それぞれのファームウェアバージョンは、“中央”ノードで管理される。」
- 「衛星が主体となった、HTTPS を利用した自律的なバージョンアップ。（衛星「に」ファームウェアをダウンロードする）小規模な「カナリア」グループへのデプロイを含む、漸進的なロールアウト。」

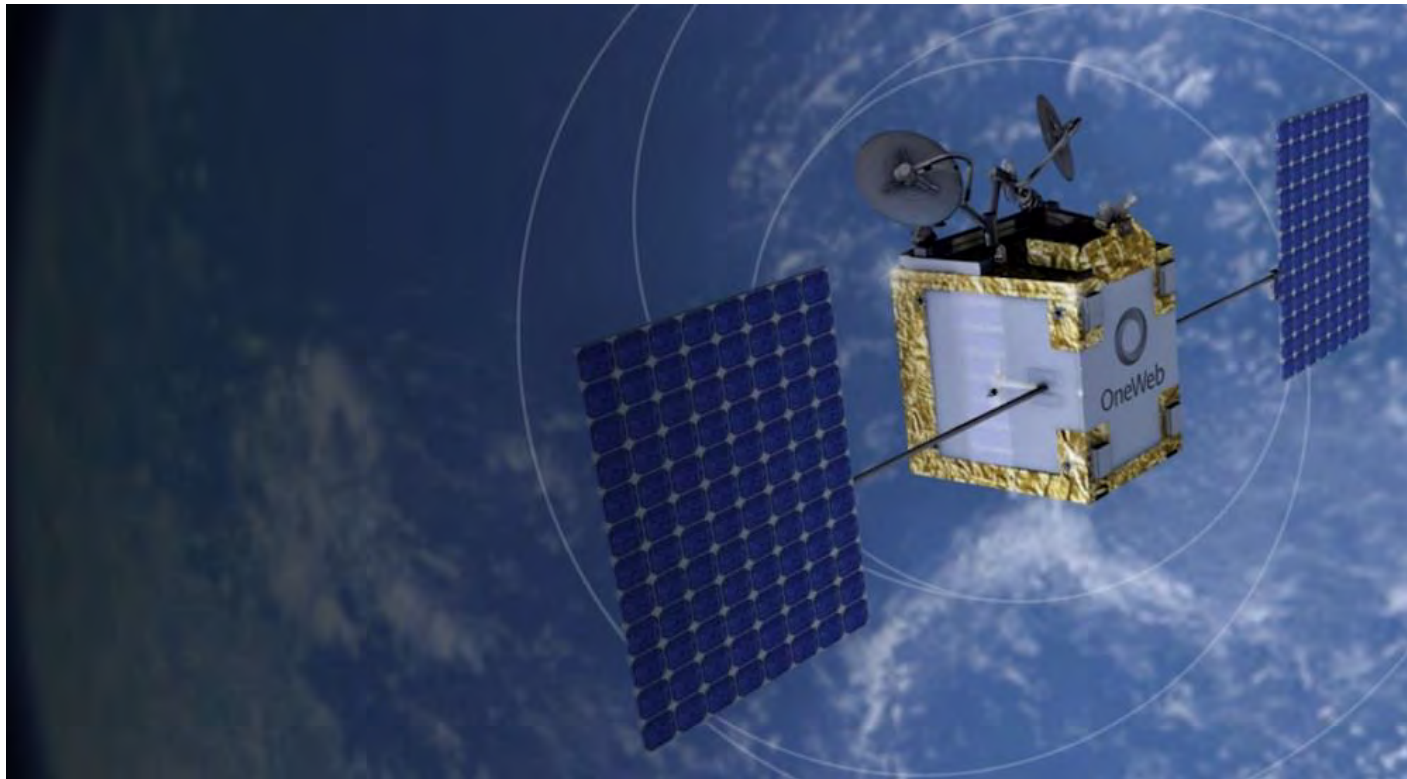
これは、以下の2点の達成を目指したものと考える。

- インターネットでのソフトウェア配信に、P2P ネットワークが利用されるように、ノードが不均質で大規模化する環境において、効率的なデータ配信を実施する
- システム全体で特定の目的を提供するために、必要な要素間の整合性を確保すること

画像は 2023 年 8 月に開催された Small Satellite Conference のもの。



個社調査 #2 OneWeb





出典: OneWeb

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ②OneWeb

23-002-R-013

FCC 資料による OneWeb 製造についての調査：

OneWeb についても、FCC のライセンス情報から得られた製造に関する情報は少なかった。一方、Starlink と比較し、Web から多くの情報が得られた。

調査方法	調査結果
<p><u>FCCのHPからライセンス情報を入手する方法</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● FCCのライセンス情報のデータベースにアクセス ● Call signを使用し OneWeb のライセンス資料を入手 <ul style="list-style-type: none"> ○ Call signはS2963を使用 ● 資料の内容を個別に精査し情報を抽出した。 ● 2023/10/31時点で確認された計34のライセンスを参照 ● 各フォルダ内に格納された資料をダウンロード <ul style="list-style-type: none"> ○ Attachment Menu ○ Other filings related to this application ● 202のファイルを入手、精査 <p><u>Web情報から製造設備に関する情報を入手する方法</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● OneWeb Satellites, Airbus OneWeb Satellitesの製造に関する情報をWeb記事から入手し製造に関する情報を抽出 	<ul style="list-style-type: none"> ● [~~ Narrative.pdf]に詳細情報の記載有り ● 衛星の軌道や運用期間、台数等に関する数値情報を取得 ● 製造設備等に関する情報はごく一部に確認 ● フロリダ州エクスペレーションパークにある衛星製造施設での操業が開始され、当年は製造施設は1日あたり最大2機の衛星を生産したことを文言により確認 ● トウールズ施設の従業員数や製造基数を確認 ● フロリダ工場の面積、従業員数、生産ライン数、生産ペース、品質管理における認証取得状況などを確認 <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ②OneWeb

23-002-R-013

FCC 資料による OneWeb 製造についての調査：
FCCのライセンス情報のデータベースから、OneWeb についての一定程度の情報を得ることができる。

FCCのHPからライセンス情報を入手する方法

- FCCのライセンス情報のデータベースからCall signを使用し OneWeb のライセンス関連の資料を入手。資料の内容を個別に精査し情報を抽出した。
- Call signはS2963を使用した。
- 2023/10/31時点で確認された計9のライセンスを参照し、それぞれに格納されたそれぞれに格納された主に以下二つのフォルダ内の資料をダウンロード。202のファイルを入手、精査した。
 - Attachment Menu,
 - Other filings related to this application (Petitions, comments, etc)
- Licensee Name として、当初の法人名である“WorldVu Satellites Limited” で表示される。

File Number	Call Sign / FRN	Licensee Name/ FRN	Last Action	Action Date
SAT-MPL-20230630-00167	S2963	WorldVu Satellites Limited 0025468919		
SAT-MPL-20230120-00007	S2963	WorldVu Satellites Limited 0025468919	Grant of Authority	02/05/2023
SAT-MPL-20220921-00116	S2963	WorldVu Satellites Limited 0025468919	Grant of Authority	09/03/2023
SAT-MPL-20210610-00077	S2963	WorldVu Satellites Limited 0025468919	Grant of Authority	08/11/2021
SAT-APL-20210112-00007	S2963	WorldVu Satellites Limited 0025468919	Granted in Part/ Deleted in Part	04/28/2023
SAT-MPL-20200818-00099	S2963	WorldVu Satellites Limited, Debt 0029378635	Grant of Authority	10/27/2020
SAT-MPL-20200526-00062	S2963	WorldVu Satellites Limited 0025468919	Granted in Part/ Deferred in Part	04/28/2023
SAT-MPL-20200406-00031	S2963	WorldVu Satellites Limited, Debt 0029378635	Grant of Authority	04/10/2020
SAT-MOD-20180319-00022	S2963	WorldVu Satellites Limited, Debt 0029378635	Withdrawn	05/25/2020
SAT-LOI-20180428-00041	S2003	WorldVu Satellites Limited 0025468919	Grant of Authority	08/23/2017

<https://licensing.fcc.gov/myibfs/>にて Call Sign S2963 を検索

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ②OneWeb

FCC 資料による OneWeb 製造についての調査：
FCCのライセンス情報のデータベースからは、フロリダの衛星製造設備についての記述が得られた。

FCCライセンス情報の調査結果

- 主に[Narrative.pdf]に詳細な情報が記載され、衛星の軌道や運用期間、台数等に関する数値情報を得られた。製造設備等に関する情報はごく一部に記載があった。
- SAT-MPL-20200526-00062_Legal_Narrative.pdf (*1)
- フロリダ州エクスペレーションパークにある衛星製造施設での操業を開始した。今年は製造施設は1日あたり最大2機の衛星を生産した。

I. INTRODUCTION AND SUMMARY

Since initiating the Ku-/Ka-band processing round for NGSO systems in 2016, OneWeb has been at the forefront of the transformative growth in NGSO-based connectivity.² In 2019 alone, OneWeb launched its initial batch of six satellites, brought into use its global spectrum rights, continued building out its extensive global ground station network, and commenced operations at its satellite manufacturing facility in Exploration Park, Florida.³ This year, the manufacturing facility produced up to two satellites per day and Arianespace successfully completed two additional Soyuz vehicle launches each with 34 OneWeb satellites, resulting in 74 functioning and on-orbit spacecraft – a 100% success rate to date.³

Notwithstanding these considerable achievements, in March 2020 OneWeb voluntarily filed for relief under Chapter 11 of the Bankruptcy Code as a result of the significant disruptions to capital markets arising from the ongoing COVID-19 pandemic.⁵ OneWeb has already secured debtor-in-possession financing and expects to soon exit the Chapter 11 process in a manner that maximizes the value of OneWeb's strategic assets and also ensures a viable path forward for its stakeholders and customers.

(*1) SAT-MPL-20200526-00062_Legal_Narrative.pdf p. 2 より

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ②OneWeb

23-002-R-013

OneWeb 製造拠点の概要：

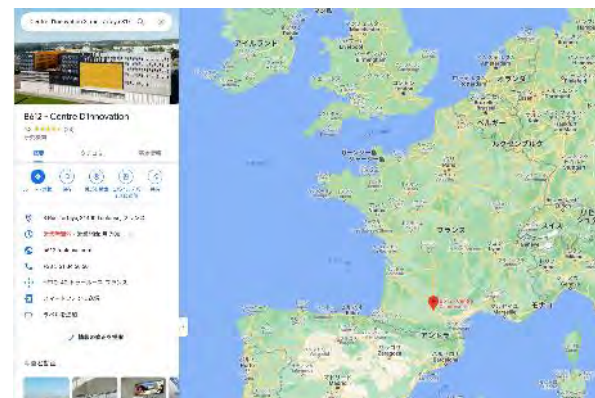
トゥールーズでは、OneWeb の第一世代の衛星の設計と開発を担当した。

また、大量生産のための連続製造プロセスの確立と、そのための6機の衛星の製造を行った。

- 調査手法：OneWeb Satellites, Airbus OneWeb Satellitesの製造に関する情報をWeb記事から入手し製造に関する情報を抽出した。

<https://airbusoneweb satellites.com/advanced-manufacturing/>

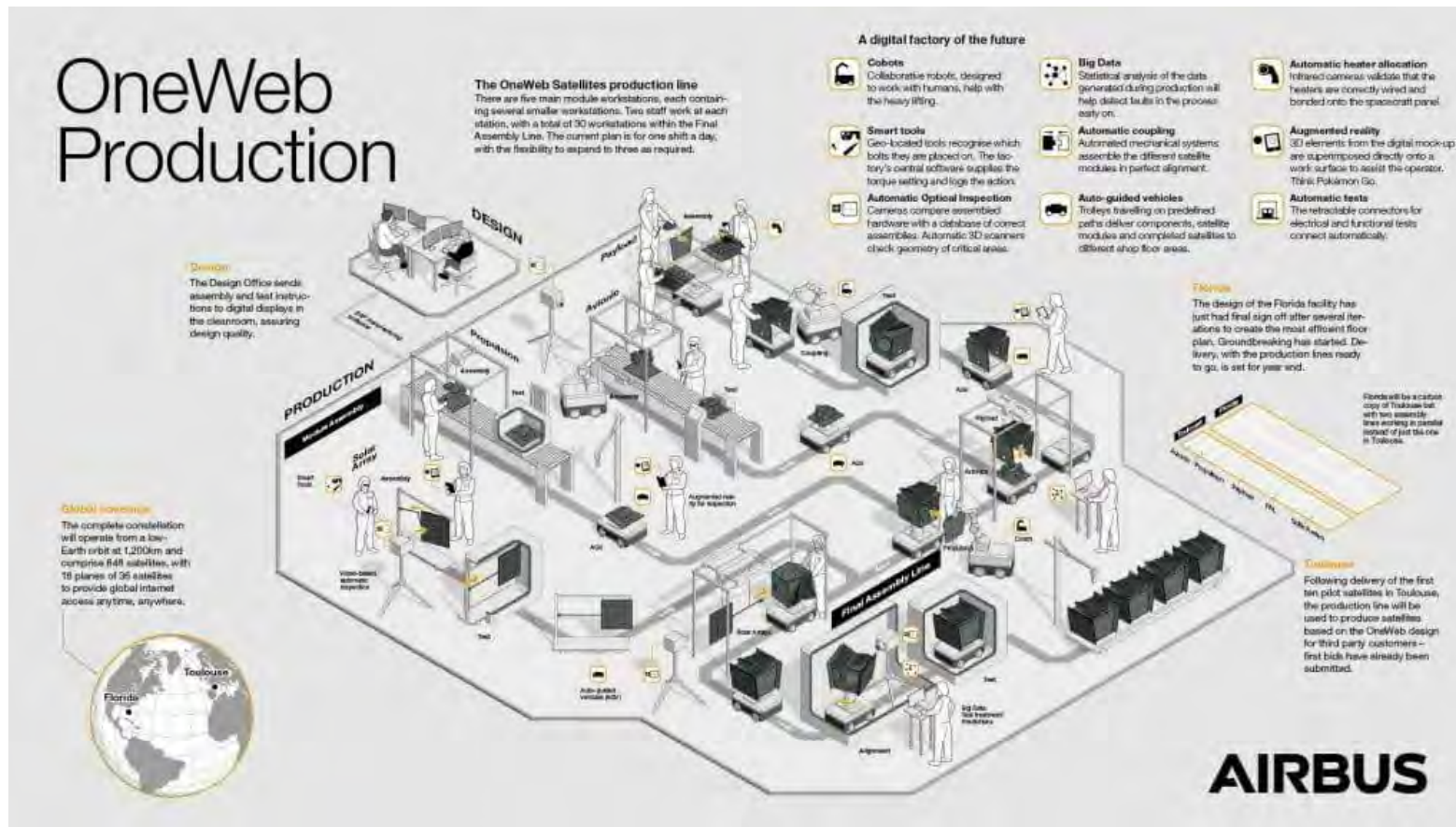
- トゥールーズ施設（Toulouse Facility）
 - 当施設では、エアバスのOneWebの最初の世代の衛星のオリジナル設計と開発を担当。
 - 従業員数：約100名
 - 衛星大量生産のための連続製造プロセスを確立し、最初の6基の衛星の製造を行った。
 - トゥールーズのチームは、フロリダ工場のチームにもエンジニアリングの指導とスキルを提供している。



Google Map で "Centre d'Innovation 3, rue Tarfaya 31400 Toulouse, France" を検索

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ②OneWeb

ツールズにおける製造工場イメージ



<https://www.satellitetoday.com/technology/2017/06/27/oneweb-satellites-inaugurates-production-line-first-satellites/>

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ②OneWeb

23-002-R-013

OneWeb 製造・試験の設備・手法について：

OneWeb のフロリダ工場は 2 つの生産ラインを持ち最大で一日2機の衛星を製造できる。

- ・ フロリダ工場 (Florida Factory)
 - ・ 設立: 2019年7月
 - ・ 位置: アメリカ合衆国フロリダ州メリットアイランド、エクスプローションパーク。宇宙港内唯一の生産設備として、組立ラインから出てから数時間以内に打ち上げが可能で、輸送コストの削減を実現。
 - ・ 広さ: 142,000平方フィート
 - ・ (公式HP記載、情報ソースによって異なる)
 - ・ 従業員数: 約100名
 - ・ 生産能力: 最大で1日2基の衛星を生産、週に15機の製造キャパシティを保有。従来の製造設備より生産コストを1/50に削減。
 - ・ 生産ライン: 2つの生産ライン、4つのモジュールから構成。8時間シフトごとに各ラインで組み立てが行われる。生産ライン上で衛星の故障が発覚した場合は、別の衛星が生産ラインに入るフローが組まれている。
 - ・ 品質管理: 自動検査制御が製造プロセスに組み込まれ、AS/EN/JISQ9100およびISO 9001認証の初期ステップを完了。
 - ・ その他工場: 完全ペーパーレス化、自動搬送車の利用など、先端技術を活用し自動化、省力化に取り組む



<https://airbusonewebsatellites.com/advanced-manufacturing/>

<https://spacenews.com/oneweb-satellites-inaugurates-florida-factory/>

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ②OneWeb

OneWeb のサプライチェーンおよび次世代機について：

内製ではなく様々なレイヤーのサプライヤーから機器の納入を行っていることが示唆される。一方で第二世代の投資時期が未定であり、サプライチェーンが維持され続けるかという点について、不透明感がある。

・ サプライチェーン

- ・ 規模：約40のグローバルサプライヤーから構成され、4大陸、18カ国に存在
- ・ 価値：サプライチェーンは衛星の価値の75%を占めており、24,000以上の衛星機器を納品
- ・ 効率：週に8セット供給し、納期の遵守率は約95%、品質の遵守率は99%以上
- ・ 構成：500以上のパートナー、38の主要なTier-1ハードウェアサプライヤー、200のTier-2およびTier-3ハードウェアサプライヤー、300の地上支援装置、FAL、サポートおよびGP契約サプライヤー
- ・ 関係者：1000人以上がOneWebプロジェクトに従事

・ 次世代機

- ・ OneWebの第二世代について、2028年にサービスを開始する予定と報道されており、通信キャパシティの増強などを行うとしているが、具体的な投資額や製造開始時期などは公表されていない。

<https://www.satellitetoday.com/finance/2022/10/12/eutelsat-and-oneweb-target-2028-service-date-for-gen-2-oneweb-constellation/>

<https://airbusonewebsatellites.com/global-supply-chain/>

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ②OneWeb

OneWeb の運用：

OneWeb 用の地球局には TT&C 局、ゲートウェイ局、ユーザー端末の3種がある。TT&C サイトは高緯度のみ位置する。衛星運用センターは少なくとも米国と英国に所在する。

FCCライセンス情報の調査結果

- [SAT-APL-20210112-00007][Phase 2 Tech Narr.pdf]
- OneWebの地球局には大きく3つのカテゴリが存在（TT&C局、ゲートウェイステーション、ユーザー端末）。高緯度のみ位置するTT&Cサイトでは複数のアクティブ追跡アンテナと関連する電子機器で構成され、通常はそれぞれ3.5個である。
- [SAT-LOI-20160428-00041][Technical Narrative.pdf]
- 少なくとも米国では、ゲートウェイ地球局を含む 4 つのゲートウェイ地球局サイトが配備される予定である。ハワイとアラスカにステーションがあり、米国の一部の領土にも追加のサイトが追加される可能性がある。正確なゲートウェイ地球局の位置はまだ決定されていない。
- OneWeb は、少なくとも 2 つの衛星制御センターを運営し、それぞれが他方をバックアップする。設置場所は米国バージニア州、英国となる可能性が高い。
- ネットワーク運用は、主に英国およびフロリダ州メルボルンの施設から管理される。これらのコントロールセンターとTT&Cおよびゲートウェイ地球局との間の接続には、地上専用回線とVPNを使用する。

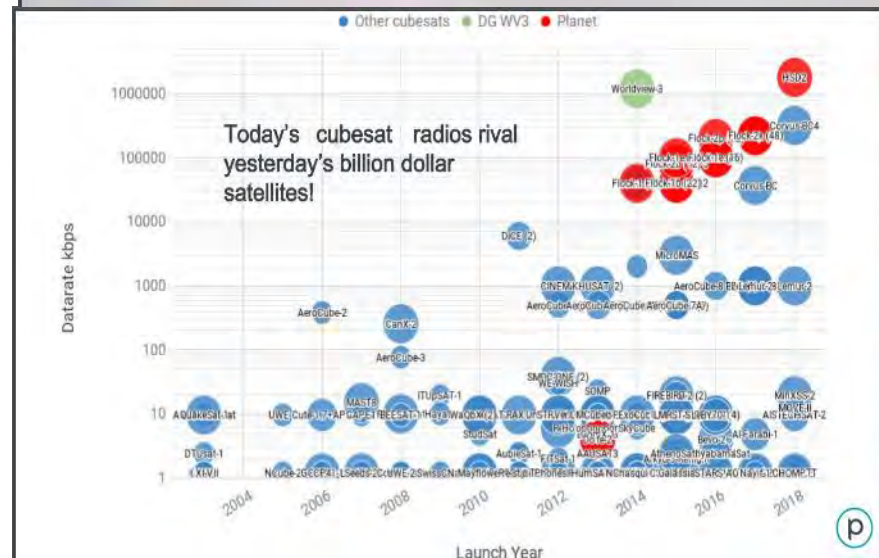
Planetscope (Dove)

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ③Planet Labs

PlanetScope (Dove) :
Planet は、ハードウェアを細かくアップデートしている。 6年で14回

“The 3U Doves have undergone 14 design iterations in 6 years following the agile aerospace philosophy”

[DigitalCommons@USU - Small Satellite Conference: Planet High Speed Radio: Crossing Gbps from a 3U CubeSat -> PlanetHighSpeedRadio-KiruthikaDevaraj.pdf](#)



3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ③Planet Labs

Dove/Flockの世代について：

Planetは世代によりCONOPSが明確に変化してきている。

衛星の世代による違い

- Planetは世代によりCONOPSが明確に変化してきている点が見て取れる。これは技術的に順に進歩していったというわけではなく、顧客からのフィードバックを受け、方針を変更してきたものと思われる。
- この理由として、センサ変更が行われるまでの世代の衛星では伝統的なりモートセンシング事業者が取り扱ってきたデータと比較して大きく異なる品質であり、十分に既存マーケットに入り込めなかったこと（加えて十分に新規顧客開拓ができなかったこと）が挙げられ、変更点は既存事業者の声に合わせる形で変更されている様子があるためである。

	最初期	軌道修正	センサ変更	現行世代
時期	~2016/6	2017/2~2018/1	2018/11~2019/11	2019/11~
投入軌道	ISS放出	SSO	SSO	SSO
センサ世代	ベイヤパターン (PS2)	ベイヤパターン (PS2)	専用フィルタ (PS2.SD)	Sentinel仕様 (PSB.SD)
CONOPS・想定されるFB	安価・短期間でのアップデートを目指してとにかく数を上げる	撮影時刻の不安定性を除去。一方バンド間のクロストークは残る	バンド間のクロストークを専用フィルタを使用することにより除去	Sentinel2と合わせる形で8バンドに拡充。以後スタンダードに。

3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ③Planet Labs

23-002-R-013

FCC 資料による Planet の製造についての調査：

2018 年までは Annual Report が FCC サイトで共有されており、Dove および SkySatの数値情報を得ることができた。

FCCライセンス情報の調査結果

- 2018 年までは、[Annual Report.pdf] (*1) に詳細な情報が記載され、衛星の軌道や運用期間、運用状態、台数、今後の追加計画等に関する数値情報を得られた。製造設備等に関する情報はわずかであった。

III. CONSTRUCTION PROGRESS AND ANTICIPATED LAUNCH DATES

Table 3 summarizes the status of Planet Labs' satellites in construction and their anticipated launch dates. These satellites are not designated as "replacement" satellites but listed here for completeness.

Table 3 - Summary of Flock and Skysat construction and launch, as of May 31, 2018.

Satellite Name	# of Sats	Status	Anticipated Launch Date	Launch Vehicle	Anticipated Orbit
Flock 3r	16	Construction complete	Sept 2018	PSLV	505 km, SSO
Flock 3s	3	In construction	NET Oct 2018	Falcon 9 SSO-A	575 km, SSO
Flock 3bd	12	In construction	NET Dec 2018	Electron	500 km, SSO
Flock 3k	12	In construction	NET Dec 2018	Soyuz-2	495 km, SSO
Skysat-14 to Skysat-15	2	In construction	NET Oct 2018	Falcon 9 SSO-A	500 km, SSO*
Skysat-16 to Skysat-21	6	In construction	mid-2019	TBD	500 km, SSO

NET - No earlier than

* Skysats-14,15 will be launched to 575 km and use onboard propulsion to lower their orbit to 500 km, SSO.

2018 年 5 月時点での、Flock (Dove) と SkySat の拡張計画についての表

Table 1 - Summary of S2912 (Flock) satellite status, as of May 31, 2018.

Satellite Name	Launch Date	Orbit Apogee	# Launch	# Launched above 500 km	# In-Orbit	# In Operation
Flock 1	1/9/2014	ISS	28	n/a	0	0
Flock 1b	7/13/2014	ISS	28	n/a	0	0
Flock 1c	6/19/2014	620 km SSO	11	n/a	11	0
Flock 1d	10/24/2014	ISS	26	n/a	failed launch	0
Flock 1d'	1/10/2015	ISS	2	n/a	0	0
Flock 1e	4/13/2015	ISS	14	n/a	0	0
Flock 1f	6/28/2015	ISS	8	n/a	failed launch	0
Flock 2b	8/19/2015	ISS	14	n/a	0	0
Flock 2e	12/6/2015	ISS	12	n/a	2	1
Flock 2e'	3/23/2016	ISS	20	n/a	8	1
*Flock 2p	6/22/2016	505 km SSO	12	12	12	9
*Flock 3p	2/15/2017	505 km SSO	88	88	88	63
*Flock 2k	7/14/2017	475 km SSO	48	0	47	38
*Flock 2l	1/20/2018	500 km SSO	1	0	1	1
*Flock 3m	10/31/2017	534 km SSO	4	4	4	3
*Flock 3p'	1/12/2018	513 km SSO	4	4	4	4
			*Total 156	*Total 108	Total 177	Total 120

*Subject to Authorization SAT-MOD-2015-802-00053 granted Sept. 15, 2016.

Up to 600 authorized, up to 200 in operations, up to 120 total above 500 km orbit apogee altitude.
In Operation - conducting imaging, downlinking, or otherwise actively controlled by Planet Labs

Table 2 - Summary of S2862 (Skysat) satellite status, as of May 31, 2018.

Satellite Name (NORAD ID)	Launch Date	Orbit	Status
Skysat-1	11/21/2014	600 km SSO	1 satellite Operational
Skysat-2	7/08/2014	630 km Polar	1 satellite Operational
Skysat-3 (Skysat-C1)	6/22/2016	510 km SSO	1 satellite Operational
Skysat-4 to Skysat-7 (Skysat-C2 to Skysat-C5)	9/16/2016	500 km SSO	4 satellites Operational
Skysat-8 to Skysat-13 (Skysat-C6 to Skysat-C11)	10/30/2017	500 km SSO	6 satellites Operational
			13 Satellites Total Operational

2018 年 5 月時点での、Flock (Dove) と SkySat の運用状況についての表
Planet Labs Annual Report 2018.pdf から引用

Capella Space



3.5.1.1.1 開発・試験・運用の個社調査・分析 ④Capella Space 23-002-R-013

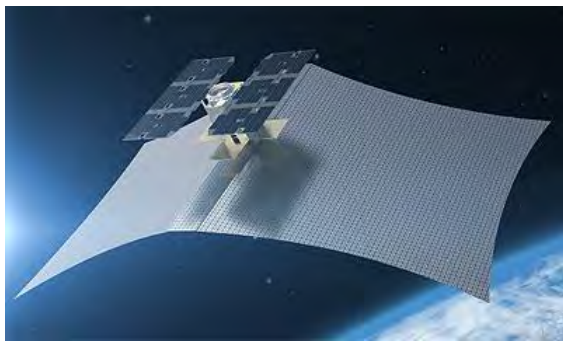
Capella Spaceについて：

Capella Space の衛星は、第一世代である Capella-1 とそれ以降では大きく異なる。第1世代はプロトタイプであり、第2世代から第3世代にかけては、量産および性能向上版と考えられる。

衛星の世代による違い

- Capella Spaceは衛星の世代により、アンテナの展開方式やサイズが大きく変わっていることが特徴である
- Capella-1は1機のみ製造され、2世代目からの性能アップデートとして3世代目が作られたと思われる。

	打上開始時期	衛星重量	分解能
Capella-1	2018年3月	<40kg	0.5m
Capella-2~10	2020年8月	~112kg	0.5m x 0.5m
Capella-11~	2023年8月	~165kg	0.5m x 0.3m



Capella-1: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/capella-1.htm



*2 Capella-2: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/capella-2.htm



*3 Capella-3: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/capella-11.htm

3.5.1.1.2 製造に関する整理

StarlinkとOneWebの工場能力の比較：

StarlinkとOneWebでは製造実績に大きな差はあるものの、1日当たりの生産台数と工場面積の違いはそれほど大きなものではなく同じような作り方であると推察される。

- StarlinkとOneWebの工場の比較をすると、面積・従業員数は約3倍以上の規模の差があると見られるが、製造機数の差を考えると極端な差ではなくライン数の数などで説明もできそうな数値差と考えられる。
- この差が何によって生まれるかは定かではないが、品質認証の取得有無についてOneWebとStarlinkで差があり、この点が影響している可能性がある。

	工場面積	衛星重量	推定生産台数	従業員数	品質認証
Starlink Redmond新工場	124,900平方フィート (~400,000平方フィート)* ₁	~800kg ~300kg	5機/日(v2Mini) 10機/日(v1.5)	~300名	AS9100未取得
OneWeb Florida	142,000平方フィート* ₂	~150kg	2機/日	100名	AS9100取得

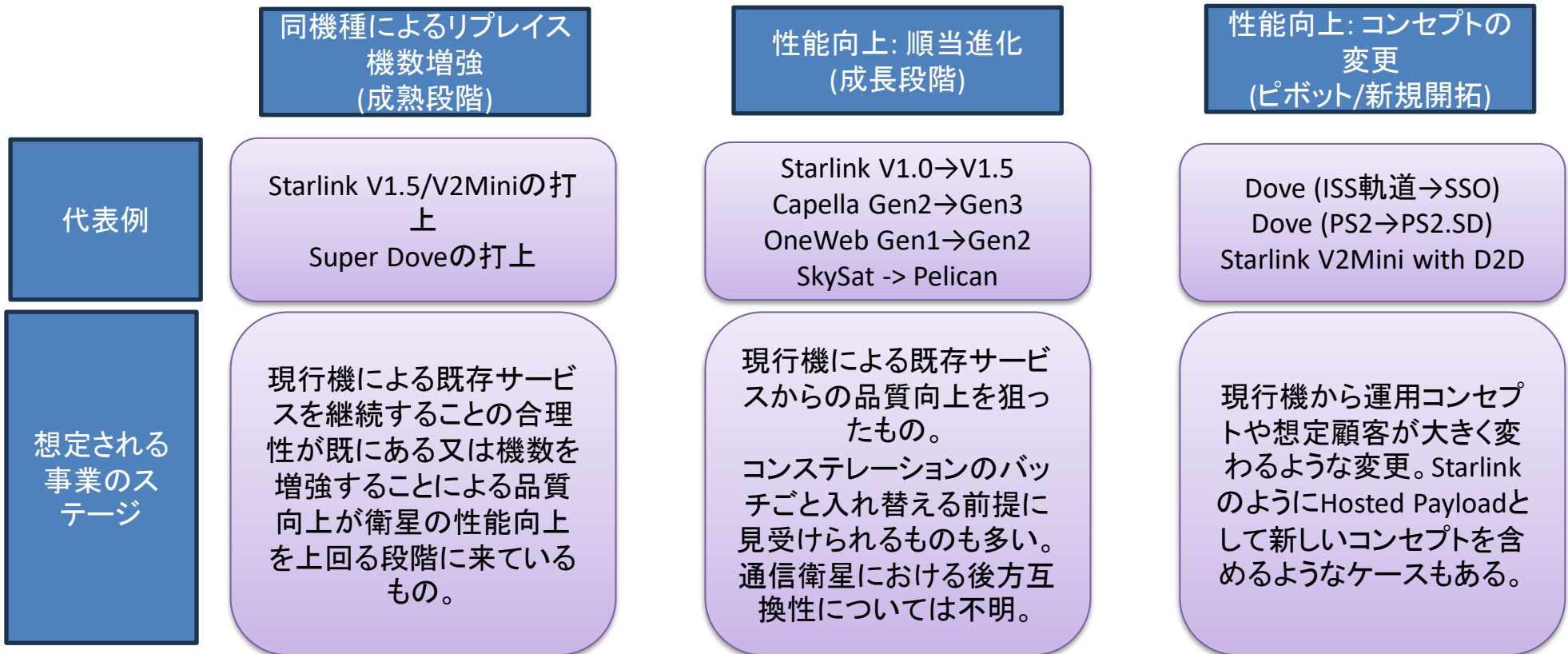
*1 124,900平方ftは記事中の数字であるが、Google Mapから推察される規模を考えると敷地面積と思われる。2階建て以上であることが推察され、実際は25万平方ft以上であることが想定される。またこの数字は新設工場のみであり、旧工場を含めると40万平方ft程度の面積があることが推定される。

*2 同じくGoogle Mapから推察される面積の約3倍程度であり、こちらは3階建て前提の延床面積であることが想定される。

3.5.1.1.2 製造に関する整理

各社のバッチ更新戦略まとめ：

バッチの更新に関し、同機種によるリプレイス・性能向上・コンセプト変更の変更といった大きく3種類に分けられ、各社の事業展開上のステージの違いが反映されている。



3.5.1.1.2 製造に関する整理

各社のコンステレーション構築戦略まとめ

SpaceX/Starlink

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

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

OneWeb

ツールズでの量産試作と製造ラインの検証、フロリダでの本格量産を行うなど、Step by Stepの量産プロセスを進めてきている。Starlinkとの比較という観点では、大きな性能変更なく600機以上を製造している一方で、2023年の打上げ一旦コンステレーションとしては完成とし、Starlinkのような継続的な行っていない。加えて第二世代については2028年頃のサービス開始、と言われているように、後方互換性を持たせた次世代機を順次打上げるような構成にはなっていない。

Planet

(Dove によるコンステレーションについて)

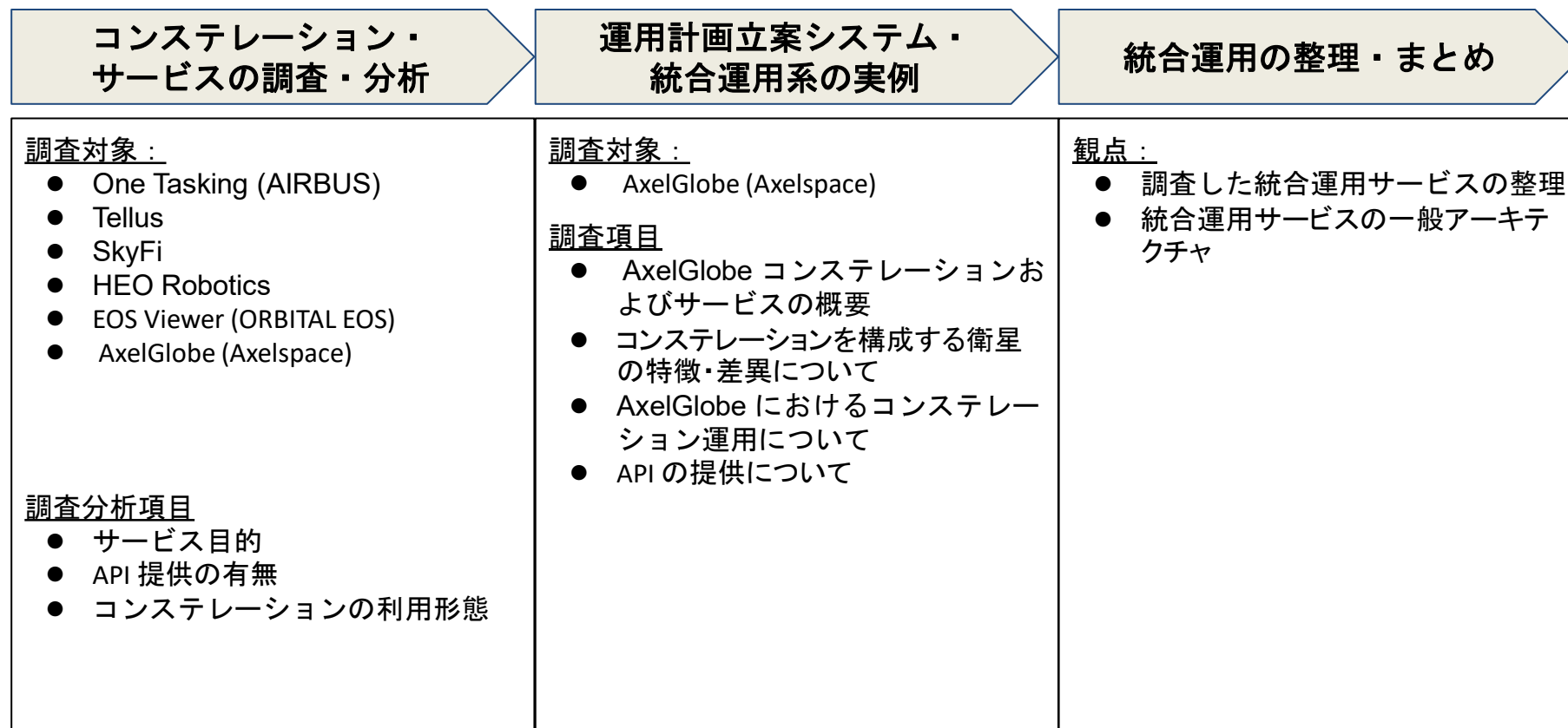
3Uのキューブサットをとにかくばらまき、ニーズを広げていくという戦略から、営業の状況を踏まえながら徐々に衛星の世代や投入軌道を変化させていったと考えられる。一方でここ数年はSuper DoveをSSOに投入する形で軌道上の機数を維持しており、コンステレーションは成熟段階にあると考えている。加えて技術の進展の早いキューブサットであり、ミッション部の世代に限らず、バス部や地上システムを含めた改良頻度が高く、ハードウェアではなくサービスの向上に注力していると思われる。

Capella

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

3.5.1.1.3.0 統合運用に関する調査の流れ

統合運用全般についてインターネット調査を実施した。運用計画立案・省人化のためのシステム詳細について、国内コンステ事業者にヒアリングを実施した。これらから統合運用を分析・整理した。

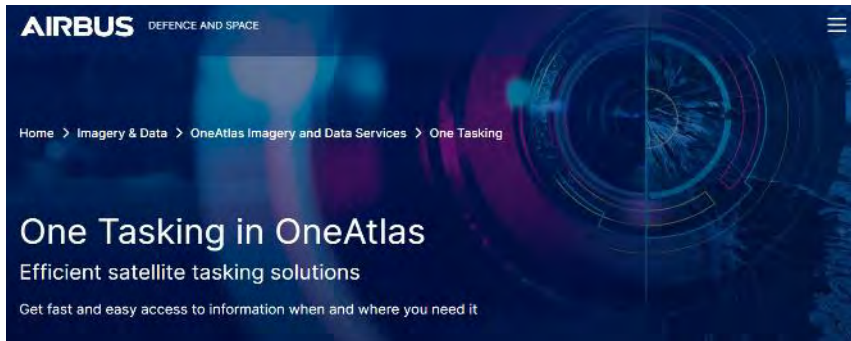


3.5.1.1.3.1 コンステレーション・サービスの調査・分析

One Tasking in OneAtlas by AIRBUS :

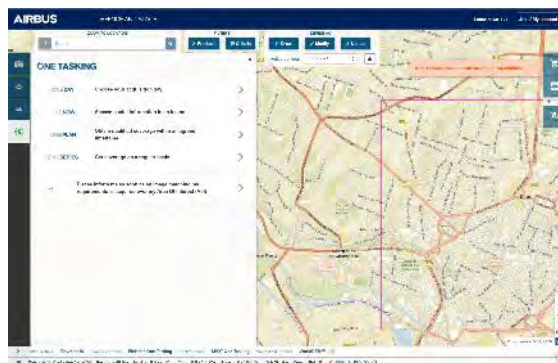
One Tasking は AIRBUS 社のタスキングサービス。Web UI および API 経由でタスキングが可能。API については、光学と SAR で別の API が提供されている。

One Tasking 概要ページ



<https://intelligence.airbus.com/imagery/how-to-order-imagery-and-data/one-tasking/>

タスキング画面



<https://www.intelligence-airbusds.com/en/4871-ordering>

光学タスキング用 API のサービス別仕様表

	ONE DAY	LINE NOW	ONE PLAN	ONE SERIES
Timeframe	1 day	Smallest period needed to secure 3 acquisitions	Customer selected	Customer selected, including frequency
Cloud Cover	<100 %	<10%	<10% or 5%. Possibility to select 3 small cloud-free AOIs 1x1km for Pleiades and 3x3km for SPOT.	
Min AOI km ²	Pleiades : 100 km ² SPOT: 500 km ²	Pleiades : 100 km ² SPOT: 500 km ²	Pleiades : 100 km ² SPOT: 500 km ²	Pleiades : 100-50 km ² if 5 revisits or more SPOT: 500-250 km ² if 5 revisits or more
Max AOI	Pleiades: 20 km EW x 40 km NS SPOT: 60 km EW x 120 km NS Bigger areas are subject to feasibility study		Subject to feasibility study	
Acquisition mode	Mono (Stereo and Tristere subject to feasibility study)	Mono, Stereo or Tristere	Mono (Stereo and Tristere submitted to feasibility study)	
Incidence angle	0-52° (<30° on customer selection)	0-52° (<30° on customer selection)	OnePlan and OneSeries Routine: 0-30° or customer selected • OneSeries Critical: 0-52° or <30° on customer selection	

<https://api.oneatlas.airbus.com/guides/oneatlas-data/g-tasking/>

SAR 用 API のタスキング用リクエストの定義

1.1 Find your future acquisition (for tasking)

When searching for possible acquisitions for tasking you must provide the following parameters:

ao	Contains the AOI the feasibility is requested for
time	Time range for feasibility search
feasibilityLevel	"completa" (recommanded) or "simple"
sensorMode	The imaging/instrument/sensor mode to use for the acquisition
productType	Product type for the processing of the acquisition (Available: SSC, MGD, GEC, EEC)
orbitType	Recommended for future acquisitions is rapid Please see API Specification for further filter parameters.

The endpoint to search for future (tasking) acquisitions:

API Endpoint	https://sar.api.oneatlas.airbus.com/v1/sar/feasibility
HTTP verb	POST
Authentication	JWT Token, API Key, Access Token
API Reference	SAR API

<https://api.oneatlas.airbus.com/api-catalog-v2/radar/tutorials/>



3.5.1.1.3.1 コンステレーション・サービスの調査・分析

Tellus :

日本発の衛星データプラットフォーム。多様な衛星および地上データと、複数の開発・解析環境を提供している。現時点では、タスキングや統合運用は提供していないが多種衛星のタスキングに関する研究開発に参加しており、近い将来における提供の可能性が推察される。

Tellus トップページ



<https://www.tellusxdp.com/ja/>

Tellus サービス紹介



<https://www.tellusxdp.com/ja/>

Tellus の関係するタスキングに関する研究開発についての情報

令和4年度補正「多種衛星のオンデマンドタスキング及びデータ生産・配信技術の研究開発」に係る委託先の採択結果について

<https://www.meti.go.jp/information/publicoffer/saitaku/2023/s230515001.html>

宇宙政策委員会 衛星開発・実証小委員会 第25回会合

<https://www8.cao.go.jp/space/committee/02-ijssyou/jisssyou-dai25/gjissidai.html>

スターダストプログラム継続事業 R5年度進捗報告 担当省庁説明資料

<https://www8.cao.go.jp/space/committee/02-ijssyou/jisssyou-dai25/siryou1.pdf>

3.5.1.1.3.1 コンステレーション・サービスの調査・分析

SkyFi :

複数の地球観測コンステレーションへのタスキングを一つのシステムから実施できる。コンステレーションを指定するのではなく、要求するデータのタイプ、期間を指定する。

SkyFi

- 既存データのアーカイブ、および、タスキングが可能。
- 光学、動画、多波長、SAR、光学ステレオ視が選択できる。
- 100 以上の衛星等へのアクセス
- タスキングはデータタイプ、AOI と期間を指定して実施SkyFi

検討事項

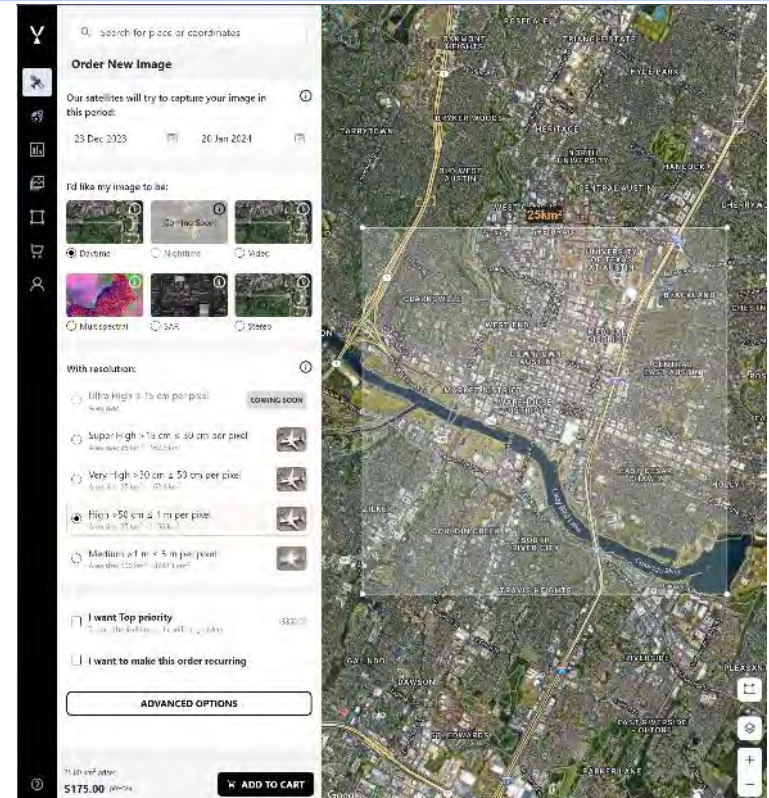
- 以下の事項から、SkyFi とパートナーの間でも AOI および期間の形での撮影リクエストとなっており、最終的な撮影実施の意思決定はパートナー側で行っていると推察する。
 - 雲量率に対応した refund policy が存在すること。*1
 - 個々の撮影機会は明示されず、期間での指定となること。*2
 - API (/order-tasking) の実行ステータスのコードに、個々の撮影予約等のステータスが無いこと。*2

*1: <https://www.skyfi.com/faqs> の “How will clouds affect my image?”

*2: https://app.skyfi.com/platform-api/redoc#tag/Ordering/operation/tasking_order_tasking_post

Access to...			
100+	5	10m-10cm	<24
SATELLITES & BALLOONS IN ORBIT	SENSOR TYPES	RESOLUTION	HOUR DELIVERY TIMES

<https://www.skyfi.com/>



<https://www.skyfi.com/> -> “Order Now”

<https://app.skyfi.com/explore> -> “ORDER NEW IMAGE”

と、することでタスキングの確認画面に移る。

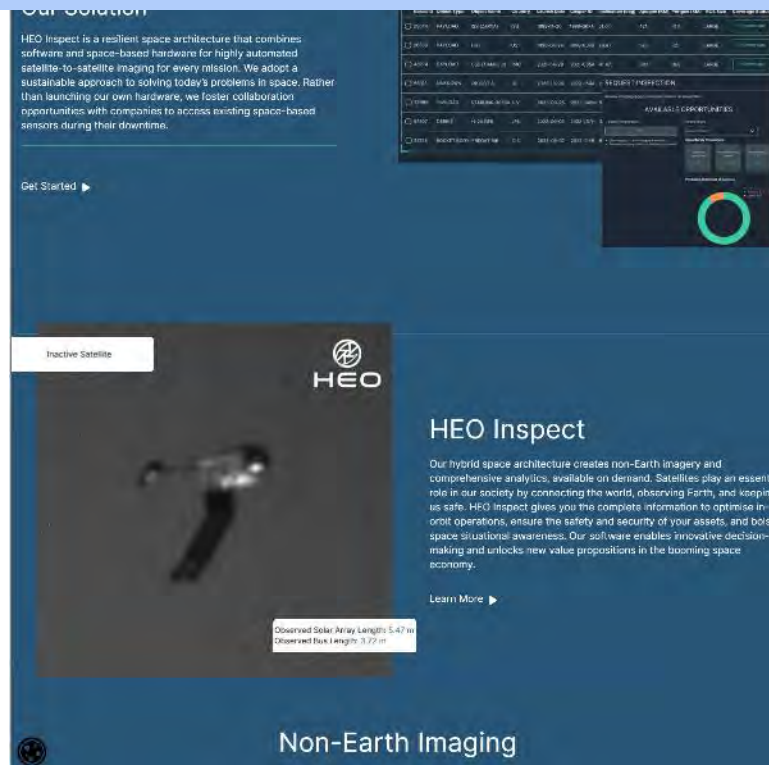
3.5.1.1.3.1 コンステレーション・サービスの調査・分析

HEO Robotics :

軌道上の衛星を、別の衛星から撮像して分析するサービス。自社では衛星を保有していない。すくなくとも、二つの地球観測コンステレーションを撮像に利用している。

- 少なくとも Satellogic, Axelspace の衛星を統合して運用している。Satellogic, Axelspace いずれも、元は光学の地球観測コンステレーション。
- 自社でセンサー 2 種を開発し、相乗り先を探している。
- 2023-06-28 時点で 35 機の衛星を利用しているとのこと。*1

*1: <https://www.heospace.com/blog-posts/heo-robotics-and-axelspace-partner-to-integrate-5-space-based-sensors-into-the-heo-inspect-software-copy>



<https://www.heospace.com/>

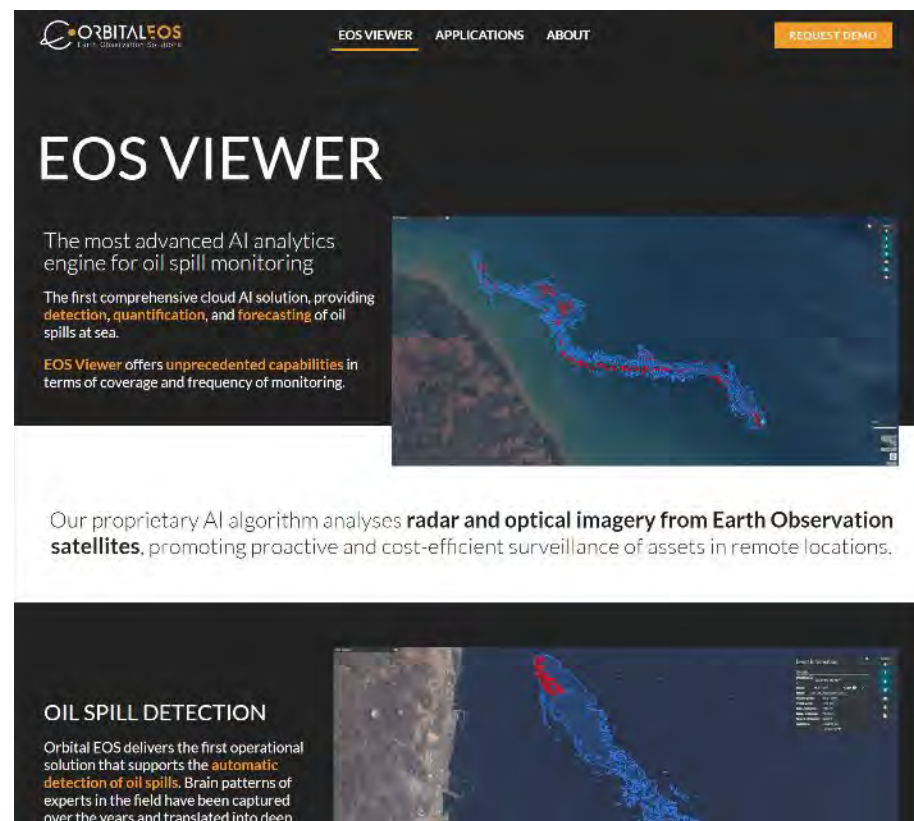
EOS VIEWER by ORBITAL EOS :

海洋における、原油流出のモニタリングサービス。エリアを指定し、一定の頻度で定期観測を行う。SAR と光学双方の、多様な解像度のデータを利用している。

FAQ ページからの抜粋

- **DO YOU USE RADAR OR OPTICAL SATELLITES?**
 - We use both, radar and optical satellites leveraging the synergy between sensors and the improved monitoring capacity.
- **WHAT IS THE RESOLUTION OF THE SATELLITE IMAGES?**
 - from 50 cm to 20 m

<https://www.orbitaleos.com/frequent-questions/>



The screenshot shows the top navigation bar of the EOS VIEWER website with links for 'EOS VIEWER', 'APPLICATIONS', and 'ABOUT', and a 'REQUEST DEMO' button. The main heading is 'EOS VIEWER'. Below it, the text reads: 'The most advanced AI analytics engine for oil spill monitoring'. A sub-section states: 'The first comprehensive cloud AI solution, providing detection, quantification, and forecasting of oil spills at sea.' Another sub-section notes: 'EOS Viewer offers unprecedented capabilities in terms of coverage and frequency of monitoring.' To the right is a satellite image of a coastline with a red and blue highlighted area representing an oil spill. Below this, the text says: 'Our proprietary AI algorithm analyses radar and optical imagery from Earth Observation satellites, promoting proactive and cost-efficient surveillance of assets in remote locations.' At the bottom, there is a section titled 'OIL SPILL DETECTION' with the text: 'Orbital EOS delivers the first operational solution that supports the automatic detection of oil spills. Brain patterns of experts in the field have been captured over the years and translated into deep'.

統合運用事例

コンステレーション運用の実情について調査するため、実際にコンステレーションの運用を行う Axelspace 社にヒアリングを行った。結果として、単一のコンステレーションであっても実質的には統合運用となり得ることがわかった。

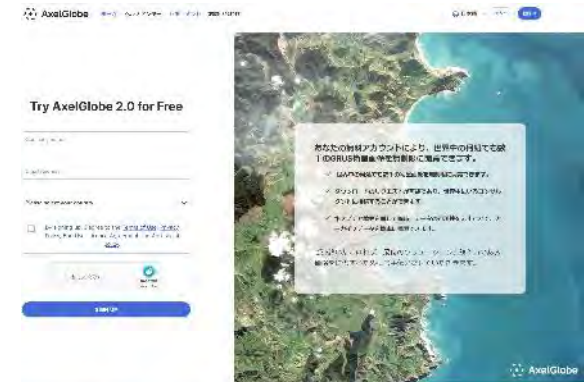
3.5.1.1.3.2 運用計画立案システム・統合運用系の実例

AxelGlobe 概要：

国産の小型地球観測衛星コンステレーション AxelGlobe は、5 機の衛星から成る。プロトタイプ 1 機と量産バージョン4機からなり、特性が異なる5機を単一のサービスに向けて運用している。

コンステレーションの統合運用事例として AxelGlobe を運用する Axelspace にヒアリングを実施した。

- AxelGlobe コンステレーション・サービスの概要
 - GRUS-1A
 - プロトタイプ
 - 2018/12 打ち上げ
 - GRUS-1BCDE
 - 量産機
 - 2021/03 打ち上げ
 - サービス / プロダクト内容 *1
 - モニタリング（指定エリアの頻繁な観測）
 - タスキング（指定エリアの1回の観測）
 - エマージェンシー（優先撮影・優先ダウンリンク）
 - アーカイブ（過去の蓄積データ）
 - モザイク（複数撮影を結合した広範囲の画像）
- GRUS-1A / GRUS-1BCDE の差異について
 - マイナーな衛星自体の改良
 - 打ち上げタイミングの違いによる軌道面の差異
 - 運用年数の差異による特性の変化



Monitoring

単一または複数の対象地域に対し、月単位契約での複数キャプチャオプションを使用可能です。地球上のあらゆる場所を宇宙から衛星に観測することが、短期的にも長期的にも可能になりました。

主な特徴：

- ✓ 簡単に柔軟性のあるリクエスト
- ✓ 衛星予測の取り込み
- ✓ プラットフォームと API へのアクセス

Tasking

振りたい場所を1回だけ撮影することが可能です。どなたでも簡単に、指定した期間内の1箇所または複数箇所の撮影を依頼することができます。

主な特徴：

- ✓ リクエストの容易さと柔軟性
- ✓ 衛星予測の考慮
- ✓ プラットフォームと API にアクセス可能

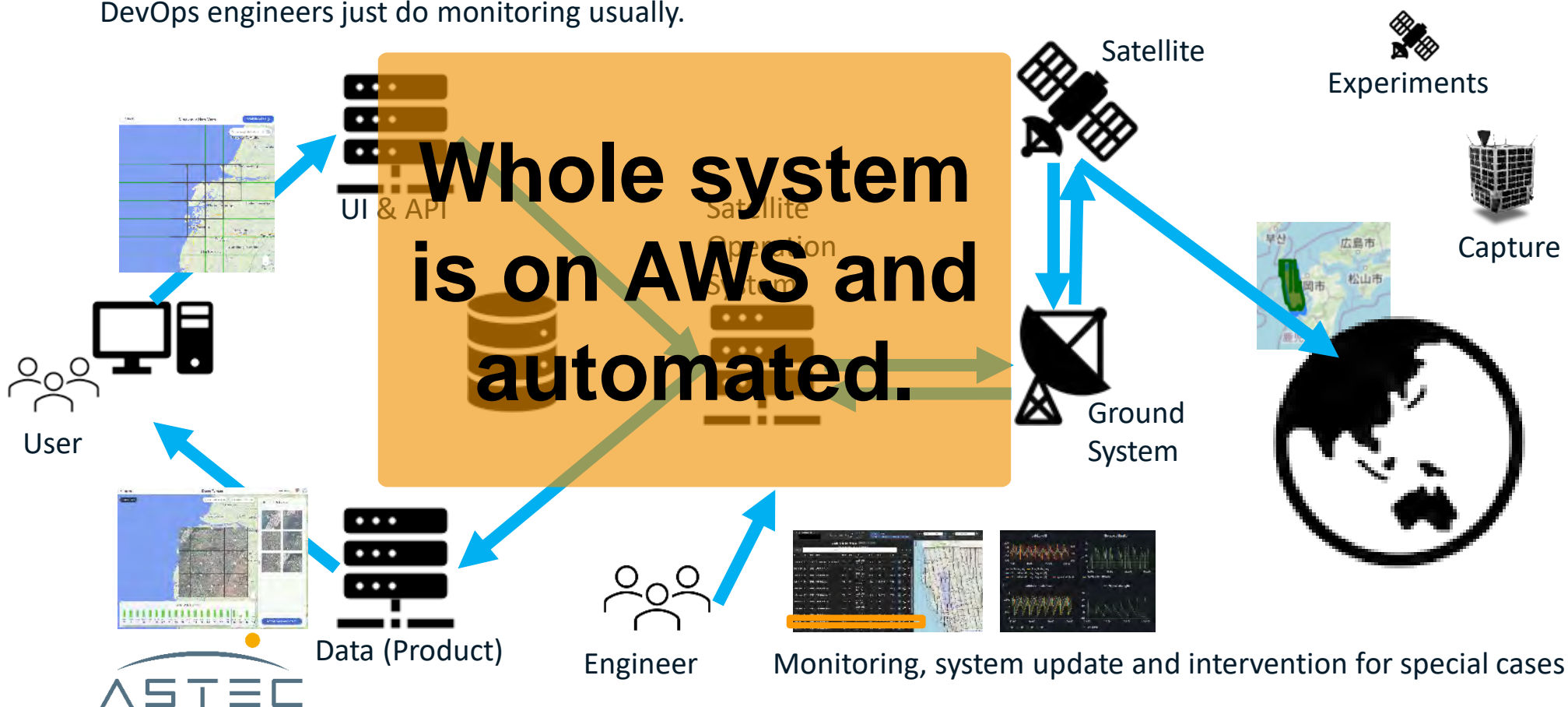
*1: https://www.axelspace.com/assets/pdf/solution/ag_catalog_ja.pdf

<https://www.axelglobe.com/ja>

AxelGlobe 運用: AxelGlobe の衛星運用の概要

An implementation for AxelGlobe

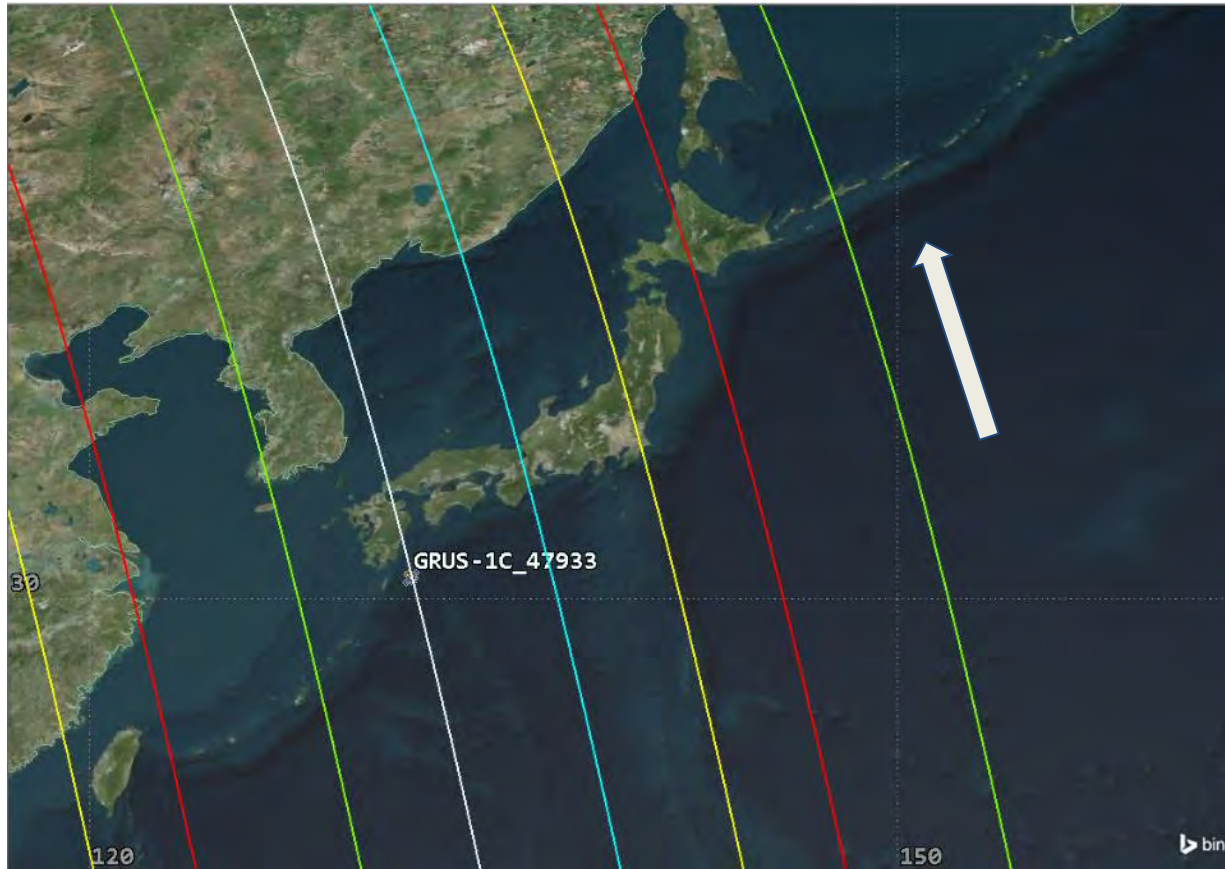
Nominal operation is completely automated. No operator is needed. It is just like a automated IT system operation by DevOps engineers. DevOps engineers just do monitoring usually.



3.5.1.1.3.2 運用計画立案システム・統合運用系の実例

AxelGlobe 運用: AxelGlobe のグラウンドトラック例

Example of a satellite constellation orbit (Ground Track)



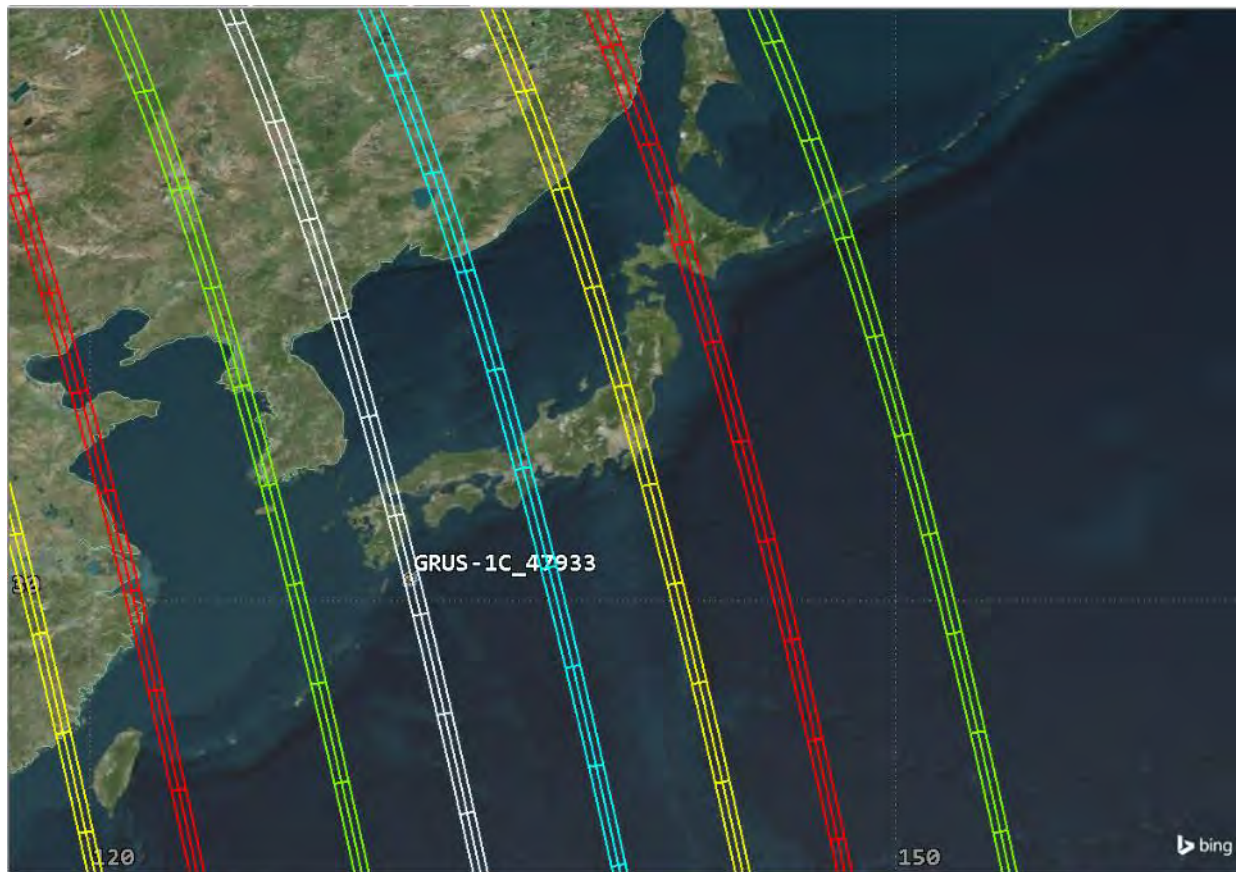
2021-10-26 10:51 JST

- Each color shows an orbit of a satellite
- Green GRUS-1D flew over twice. 9:30 for the 1st time, 11:00 for the 2nd time.



AxelGlobe 運用: AxelGlobe の軌道直下撮影範囲例

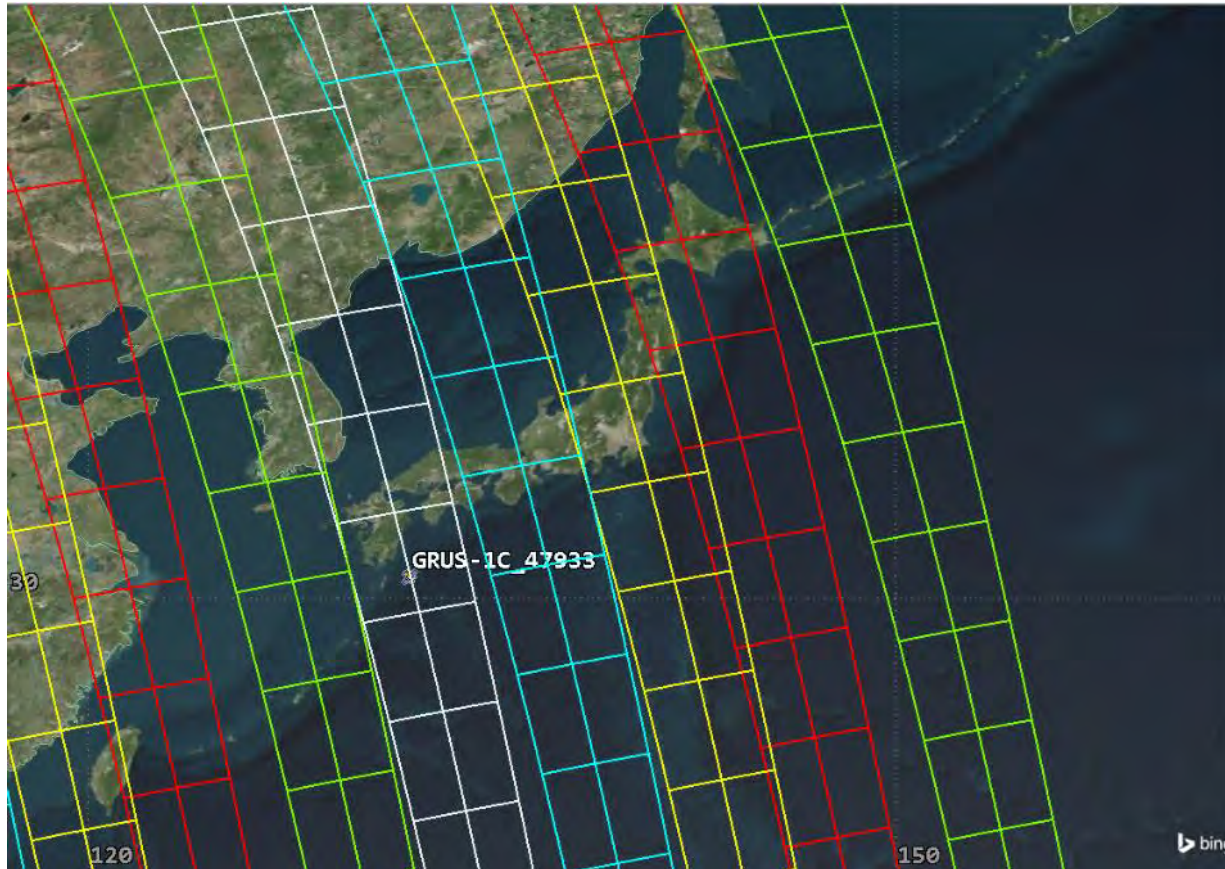
Capture conditions



2021-10-26 10:51 JST
Nadir of each satellite
Swath 55 km.
Red : GRUS-1A
Yellow : GRUS-1B
White : GRUS-1C
Green : GRUS-1D
Blue : GRUS-1E

AxelGlobe 運用: AxelGlobe の撮影可能範囲例

Available capture area

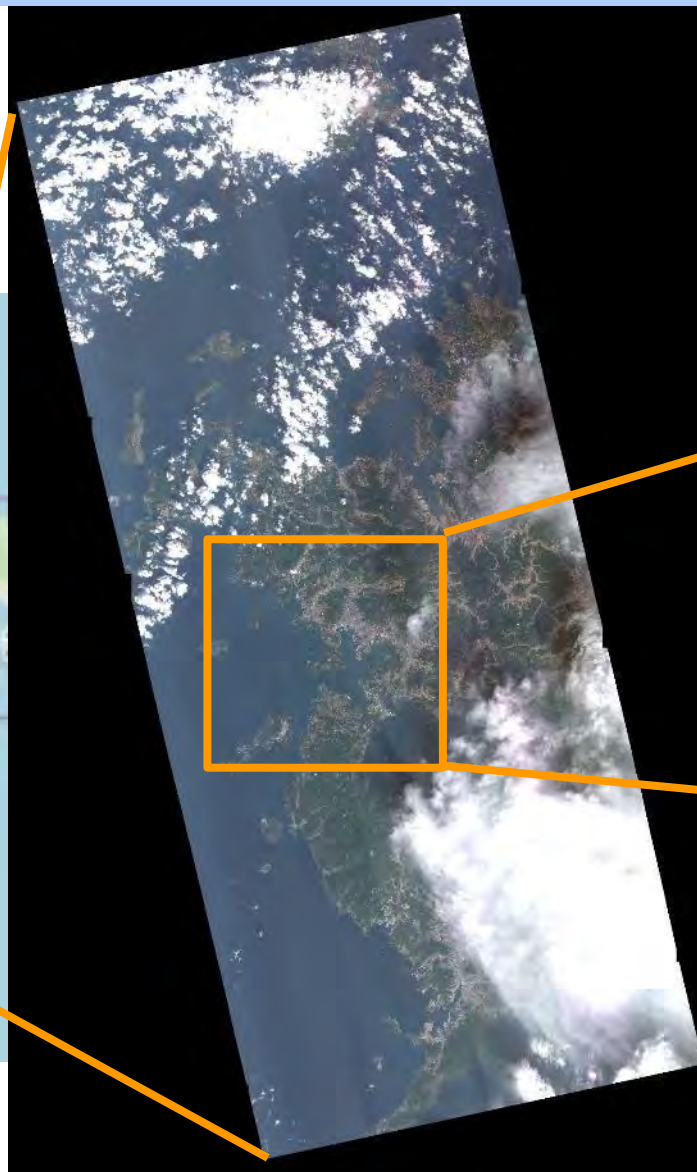
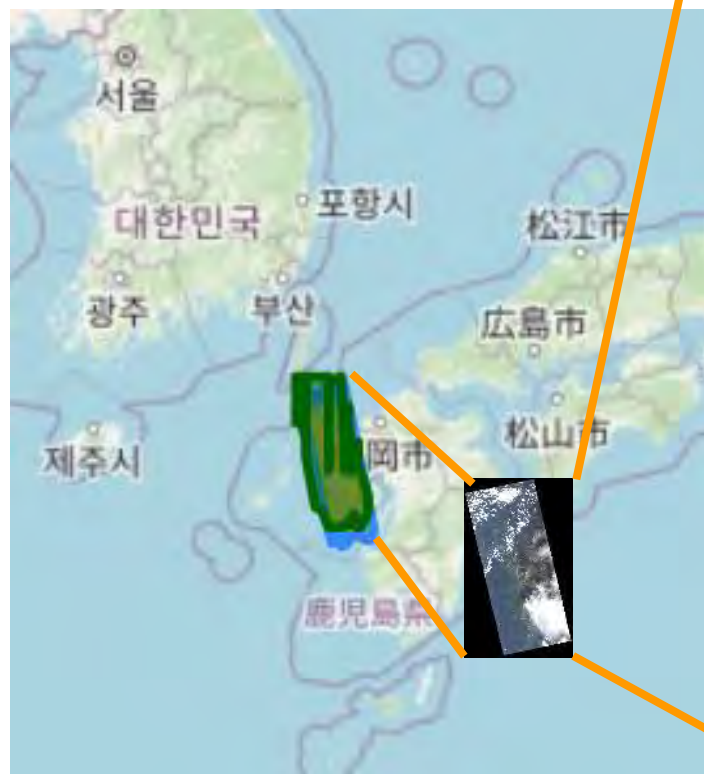


2021-10-26 10:51 JST
If we assume 17 degree of off-nadir angle (=maximum roll angle) GRUS can capture with 55 km width from each color region

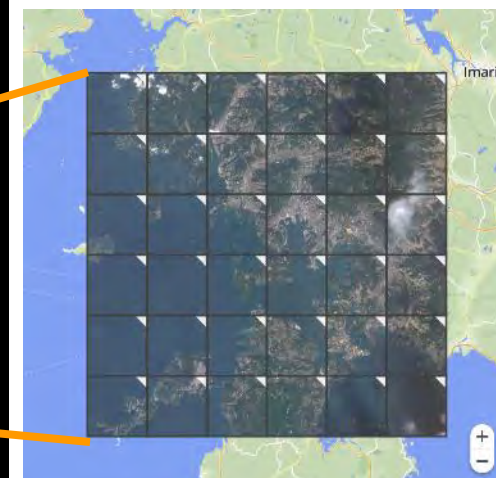
3.5.1.1.3.2 運用計画立案システム・統合運用系の実例

AxelGlobe 運用: AxelGlobe の リクエスト -> 撮影 -> プロダクト化例

Capture result: Kyushu



Service & Product



3.5.1.1.3.2 運用計画立案システム・統合運用系の実例

23-002-R-013

AxelGlobe 運用: 広範囲撮影用 AOI (撮影単位) 定義例

Automatic scheduling

OPS AG Scheduler (prod)

Overview AOIs Runs Last run 2021-10-28 17:17:18 Coordinator run

Conflict report Toggle: Timeline Opportunities Jobs Map

From (UTC) 2021-10-25 18:48 To (UTC) 2021-10-25 18:50

Submit Reset

Capture opportunities Select all Deselect all

Select opportunities to filter jobs and candidates

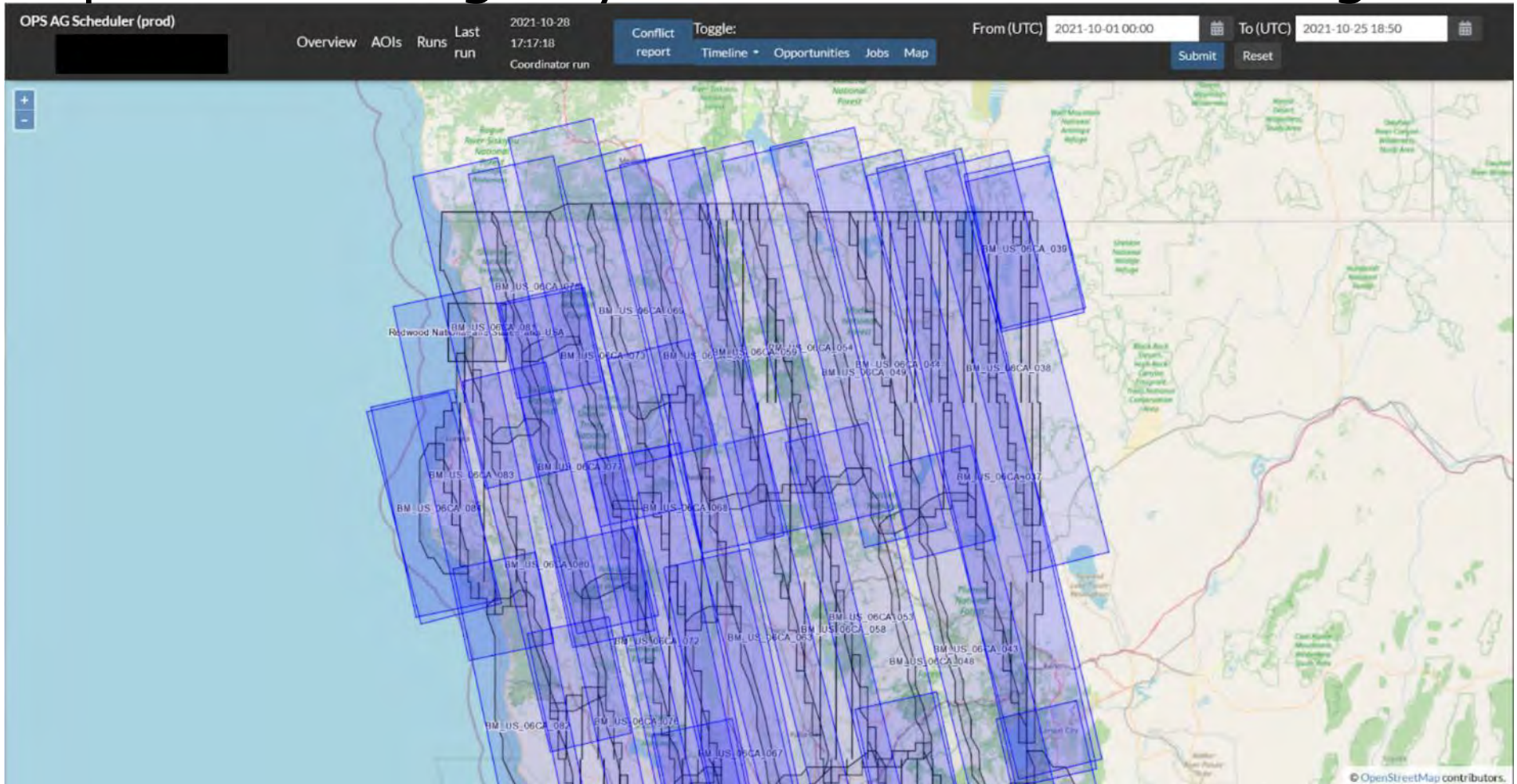
Jump to # Value...

#	Sat	Rev	View	Type	Prio.	UTC	Roll	Status	Strat.	Show
16841438	1B	3243	Redwood National and State P...	PRO	50	2021-10-25 18:48:52	-4.6	REJECTED	IGNORE	
16841458	1B	3243	BM_US_06CA_069	PRO	50	2021-10-25 18:48:51	-13.8	REJECTED	FREQ	
16841450	1B	3243	BM_US_06CA_073	PRO	50	2021-10-25 18:48:48	-10.8	REJECTED	FREQ	
16841449	1B	3243	BM_US_06CA_064	PRO	50	2021-10-25 18:48:46	-16.6	REJECTED	FREQ	
16841445	1B	3243	BM_US_06CA_083	PRO	50	2021-10-25 18:48:40	-2.6	REJECTED	FREQ	
16841446	1B	3243	BM_US_06CA_077	PRO	50	2021-10-25 18:48:39	-8.6	REJECTED	FREQ	
16841444	1B	3243	BM_US_06CA_084	PRO	50	2021-10-25 18:48:38	0	REJECTED	FREQ	
16841448	1B	3243	BM_US_06CA_068	PRO	50	2021-10-25 18:48:33	-14	REJECTED	FREQ	
16841447	1B	3243	BM_US_06CA_080	PRO	50	2021-10-25 18:48:31	-5.6	REJECTED	FREQ	
16841461	1B	3243	BM_US_06CA_072	PRO	50	2021-10-25 18:48:22	-11.2	DOWNLINKED_1 Capture 95461	FREQ	
16841454	1B	3243	BM_US_06CA_063	PRO	50	2021-10-25 18:48:20	-17.2	REJECTED	FREQ	

3.5.1.1.3.2 運用計画立案システム・統合運用系の実例

AxelGlobe 運用:広範囲撮影時スケジュール例 (24 日間)

Capture coverage by a automated scheduling



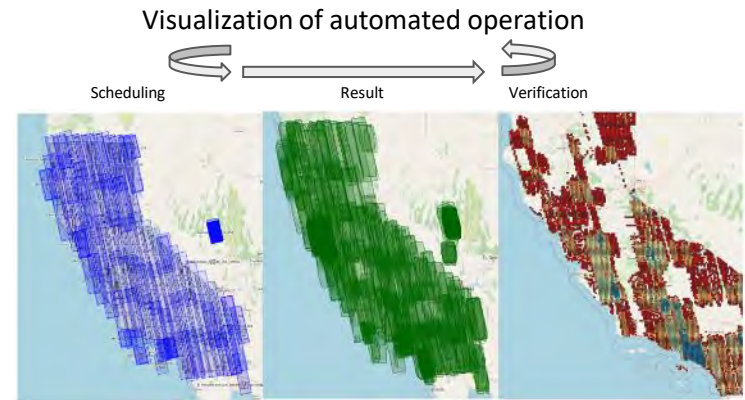
3.5.1.1.3.2 運用計画立案システム・統合運用系の実例

地球観測運用の自動化について：

5機という、比較的小規模のコンステレーションであっても、ミッションの達成を最適化しようとする、個々の衛星の特性や観測機会の差異などにより、実質的な統合運用が必要となる。

地球観測におけるコンステレーション運用についてアクセルスペースにヒアリングを行った。

- 右図に示すように広域の撮影・モニタリングなどを意図する場合、複数回の撮影が必要であり、また、撮影を実施したとしても雲などの影響により、必ずしもデータが得られるとは限らない。
- そのため、コンステレーションによる観測運用を効率的に行うためには、複数の衛星による、重複を含む多数の撮影機会を組み合わせ、さらに、これまでの撮影の結果や、その他の制約条件を考慮する必要がある。これには、大規模な組み合わせ最適化問題を解く必要があり、スケジューリングおよび管制運用における自動化が非常に重要となるとのこと。
 - その他の制約としては、個々の領域ごとのデータ提供期限、衛星の電力・ストレージ等のリソース、近接する撮影間の干渉、ダウンリンク機会の管理等があり、一部の特性は、衛星の個体間で異なる。
- 結果として、おおよそ同じ衛星を利用した小規模なコンステレーションでさえも、**特定の目的に向けた最適化を行う場合**、「個々の、特性が異なる衛星について、特性の違いを考慮に入れ、サービスの全体目的を達成するために運用する」という、実質的な統合運用が必要とされる。
- 既に実質的な統合運用を行っているため、今後の衛星・コンステレーションの利用においては、同じミッション目的を達成するためには、衛星の特性が異なっても、運用システムをほぼそのまま利用できるとのこと。



上記の図は AxelGlobe コンステレーションによるカリフォルニア全域の撮影の履歴を示すものとなる。

青い長方形が1回の撮影計画・緑の長方形が撮影しデータを生成できた領域、右図の茶～青緑の領域が、雲等を除いたデータが得られた範囲を示す。

3.5.1.1.3.2 運用計画立案システム・統合運用系の実例

API によるサービス提供：

AxelGlobe は複数のパートナーにデータ提供を行っている、もしくは計画している。これらは API を経由している。API はデータの利用目的によって実装箇所が異なる。

HEO Robotics および NorthStar へのデータ提供

HEO Robotics および NorthStar は、いずれも軌道上物体の撮影に GRUS 衛星を利用している。

これらの運用は地球観測と特性が異なるため、AxelGlobe の通常の入力とは異なるインターフェイスを API として利用していると推察される。例えば、利用する衛星・時刻・撮影方法を明示的に指定するなど。

<https://www.axelspace.com/ja/news/agpartnershipwithheorobotics/>

<https://www.axelspace.com/ja/news/agpartnershipwithnorthstar/>

SkyFi へのデータ提供

SkyFi は複数の地球観測衛星へのタスキングおよびアーカイブアクセスを統合する。これは、AxelGlobe のサービスモデルと類似している。

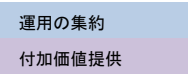
AxelGlobe の通常システムへの入力となることが想定される。

<https://www.axelspace.com/news/agpartnershipwithskyfi/>

3.5.1.1.3.3 統合運用の整理・まとめ

観測コンステレーションの特性と統合運用：

個々の撮影データの提供を主とする事業者はシンプルな集約となっている。複数の撮影データの統合やデータ解析等を提供する企業は、特性が異なる衛星の運用を統合し、価値を向上している。

	One Tasking	Tellus	SkyFi	HEO Robotics	EOS Viewer	AxelGlobe
主たるサービス目的	光学・SAR 衛星へのタスキング。 データ提供プラットフォームの一部。	光学・SAR 衛星のデータ提供およびデータ解析プラットフォームの提供。	複数のデータ種別の複数コンステレーションへのタスキング	複数の光学コンステレーションを利用した軌道上物体観測	光学とSAR衛星を利用した海洋モニタリング	光学コンステレーションによる定期モニタリングおよびタスキング
API 提供	有り	有り	有り	特定機能のみ	言及無し	有り
衛星の所有	自社衛星	他社衛星	他社衛星	他社衛星	他社衛星	自社衛星
複数コンステレーションの利用	複数の自社コンステレーションを利用	複数の他社衛星を利用	複数の他社コンステレーションを利用	複数の他社コンステレーションを利用	複数の他社衛星を利用	自社の複数衛星を利用
運用の性質 <small>セルの色の凡例は以下</small> 	運用の集約:	付加価値提供: 複数種のデータの統合	運用の集約:	付加価値提供: 特定の目的実現	付加価値提供: 特定の目的実現	付加価値提供+運用の集約: 特定の目的実現
類似の性質と考え得るサービスおよび提供企業	QPS研究所 Capella Space UMBRA	Sentinel Hub	UP42		MAXAR(MDA) HawkEye360	Synspective Planet

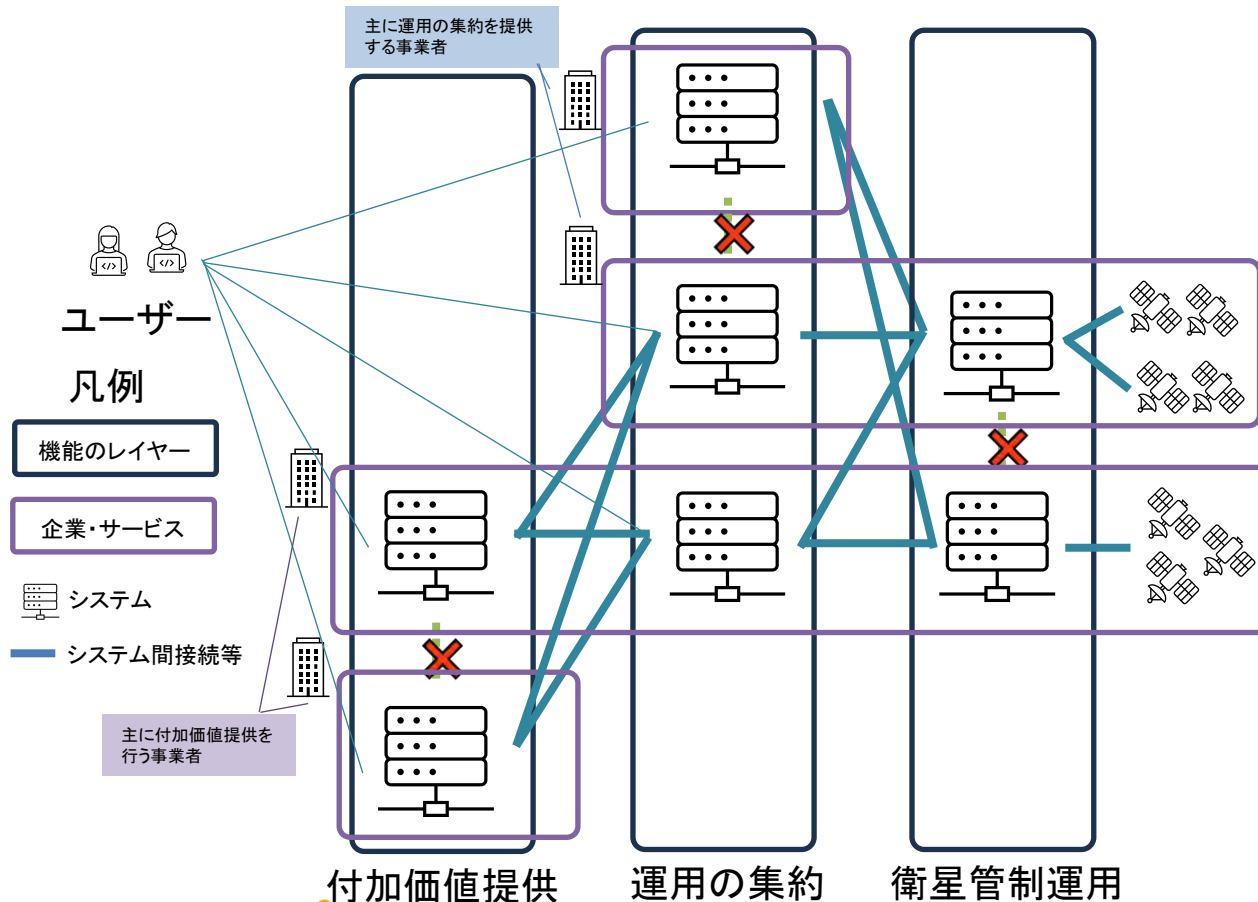
考察：

自社の衛星を運用する場合でも、個々の衛星は特性が異なる。結果として、単純なタスキングの集約ではなく、利用者への価値提供を実施し、一定程度の最適化を行おうとすると、シンプルなコンステレーションの運用であっても、統合運用的な特性を持ちうる。

3.5.1.1.3.3 統合運用の整理・まとめ

統合運用サービスの一般アーキテクチャ：

地球観測衛星の統合運用サービス・システムは、付加価値提供のレイヤー、運用の統合を行うレイヤー、衛星の管制運用レイヤーに分かれる。企業間の協業はレイヤーが異なる場合に発生している。



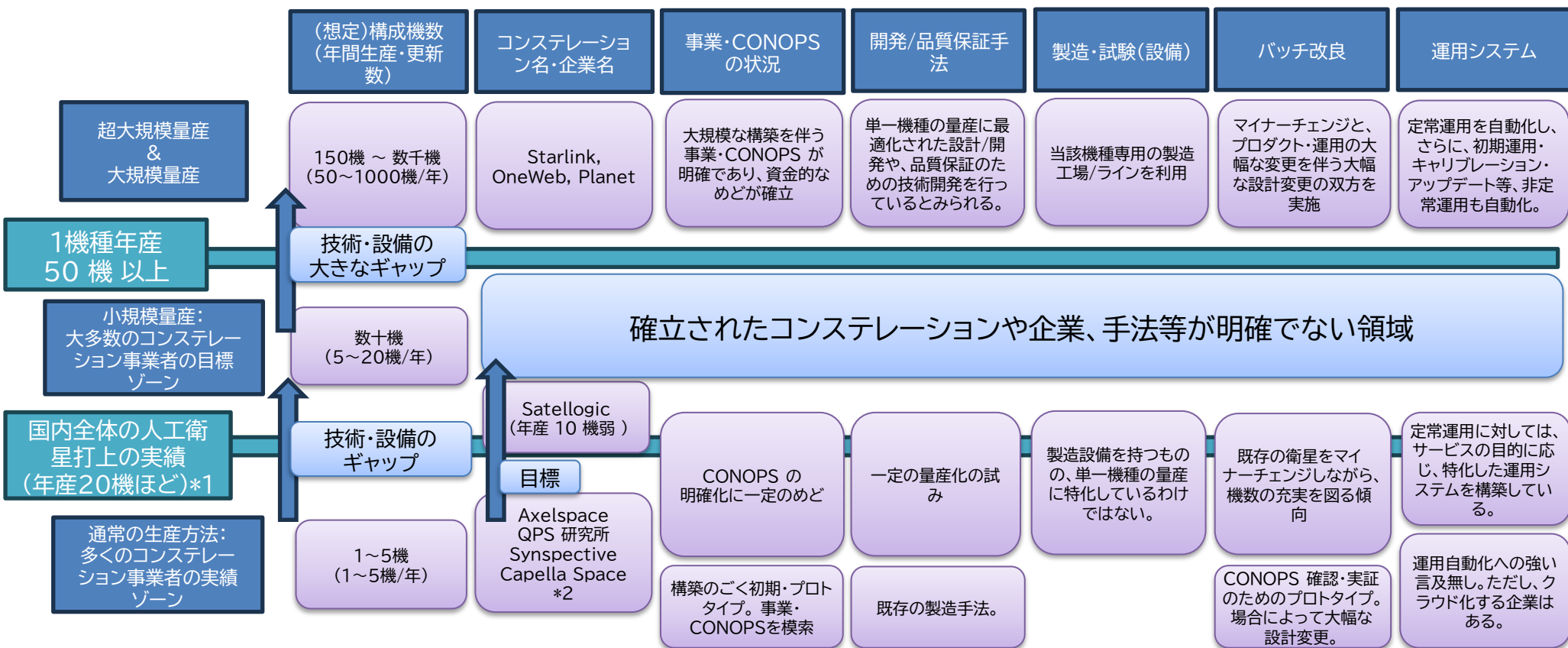
左図は企業・サービス間の接続について、概念を整理した模式図となる。すべての関係性を網羅したものではなく、また、必ずしも特定の具体的な斜めの線を持つ場合、異なるシステム間の接続を示す。通常は、外部接続用のAPIが利用される。

企業やコンステレーションをまたぐ形の運用統合は、現状、主に機能のレイヤーが異なる部分で行われている。

これは、個々の付加価値提供システムやコンステレーション等が、それぞれの目的に向けて構築され、技術的にも当該レイヤーの特定の領域に特化した強みを持つためであると考えられる。

3.5.1.2 強み・弱み分析

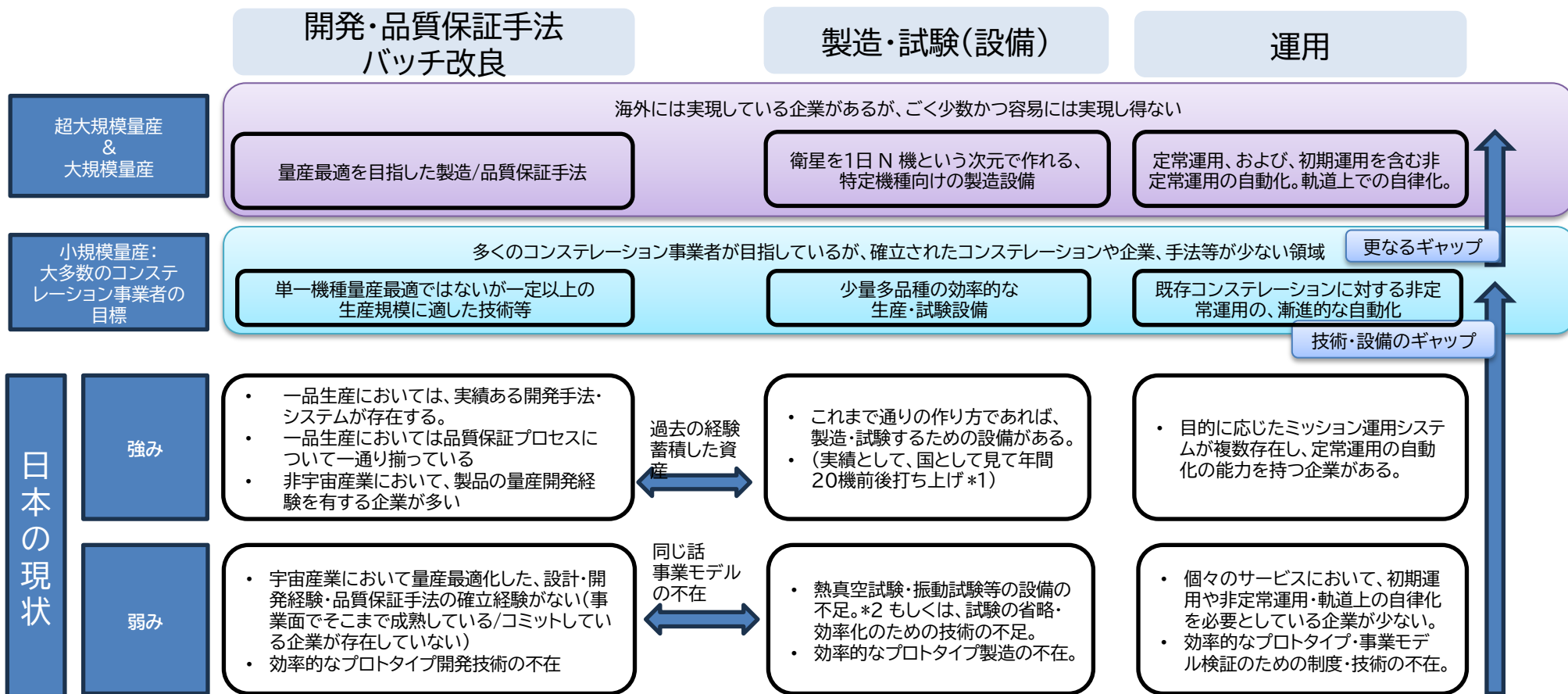
開発・製造・試験・運用システム、およびバッチ改良への（各社の推察される）指針の整理：
 実現する機数によりアプローチ方法が異なると思慮する。
 対象ごとに、アプローチを変えていると思われる基準を整理した。



*1: https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto_kako/20220722hitokoto.html
 *2: 目標規模は各社Web Site 等から。

3.5.1.2 強み・弱み分析

日本の強み弱み分析

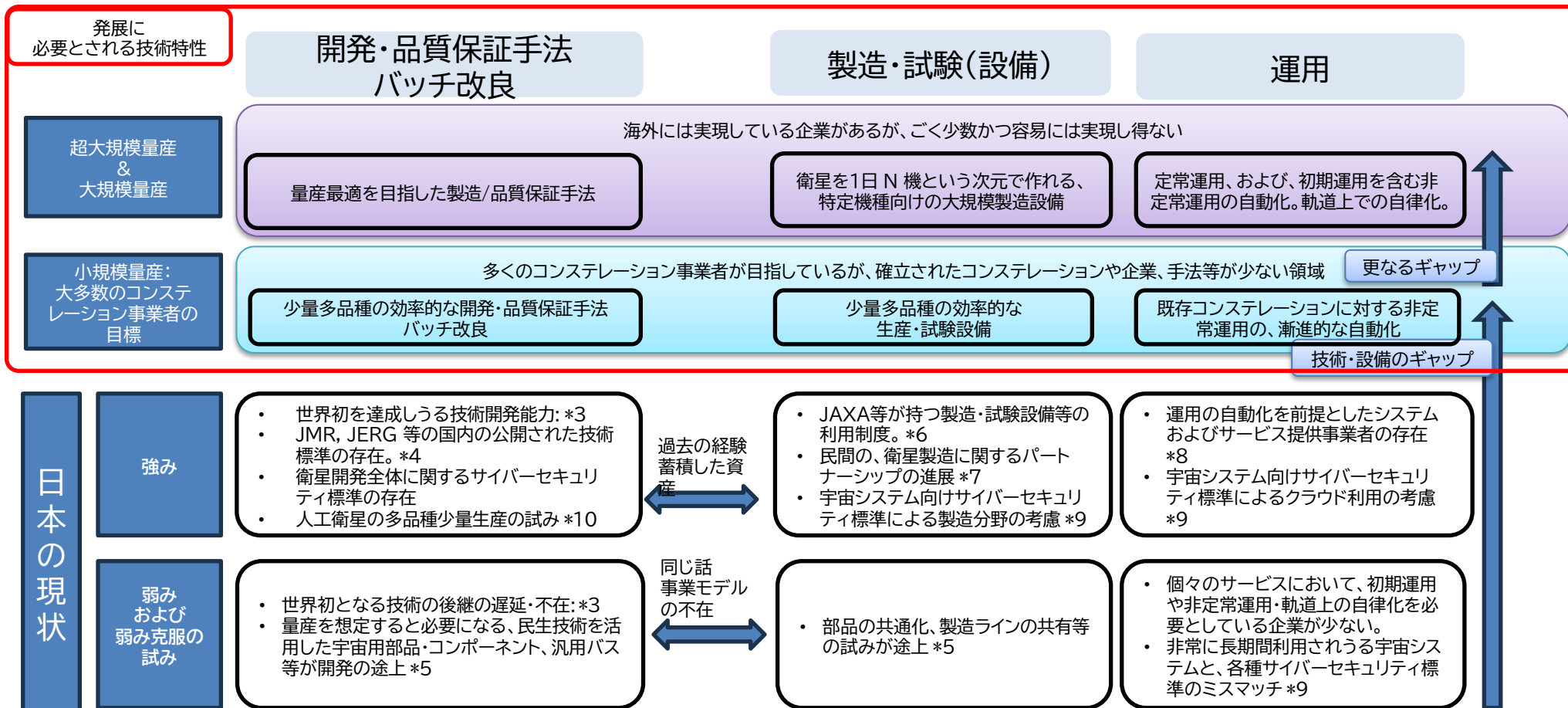


*1: https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto_kako/20220722hitokoto.html

*2: https://www.jaxa.jp/press/2020/06/20200612-2_j.html

3.5.1.2 強み・弱み分析

日本の強み・弱み分析(保有技術の観点からの深堀)



*1: https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto_kako/20220722hitokoto.html
 *2: https://www.jaxa.jp/press/2020/06/20200612-2_j.html
 *3: つばめ、HISUI等: <https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/slats/> <https://www.hisui.go.jp/>
 *4: <https://sma.jaxa.jp/techdoc.html>
 *5: https://www.meti.go.jp/main/yosangaisan/fy2024/pr/ip/sangi_12.pdf

*6: <http://www.aes.co.jp/rikatsu/utilization/index.html>
 *7: <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000035.000052943.html>
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000004.000115843.html>
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000016.000066150.html>

*8: <https://jpn.nec.com/techrep/journal/g21/n01/210123.html>
<https://www.nikkan.co.jp/releases/view/145150>
 *9: 本報告書「セキュリティレベル」部分参照
 *10: <https://news.mynavi.jp/techplus/article/20221024-2490576/>

3.5.1.3 戦略・研究開発計画の検討

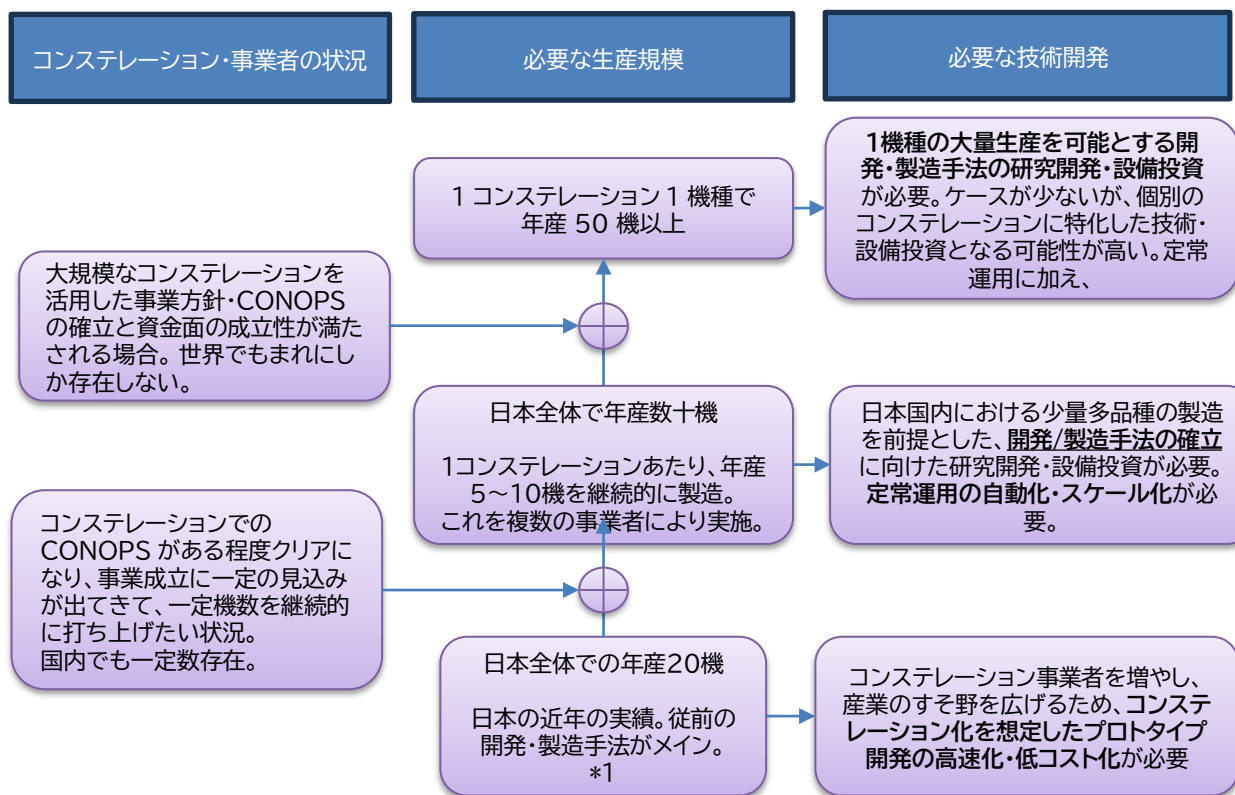
国産実用コンステレーション構築指針：

1 機種あたり年産5～10機の生産を必要とするコンステレーションを、日本国内で複数維持できる少量多品種の開発・製造手法の確立が重要である。同様に、定常運用の自動化・スケール化も重要である。また、プレイヤーを増やすための、プロトタイプ開発の高速化・低コスト化が重要である。

今回調査において、事業方針が明確となって、かつ、資金面の目途が立ったコンステレーションにおいては、大規模な投資を行い、1機種の大量生産を行っていることがわかった。ただし、世界でもごく少数の事例に限られ、国内には現存しない。

実用に近いコンステレーション事業者は、コンステレーションの規模や軌道上寿命から推定すると、年産5～10機程度の小規模の量産を必要としているケースが多い。国内にも複数社存在し、世界的にも多数が存在する。しかし、この規模に対する既存の確立した開発・製造手法・事例等は調査において確認できなかった。小規模量産を実現する、少量多品種の開発・製造手法を確立することで、領域において、日本の宇宙産業の強みを発揮できる可能性がある。なお、この規模においても、事業・ミッションの最適化のため、定常運用の自動化・スケール化は重要だと考える。

また、新規にコンステレーションを構築する場合、最初にプロトタイプを打ち上げ、その後、大きく設計を変えた量産モデルを投入しているケースが多かった。量産製造と、運用の自動化を想定したプロトタイプを、高速かつ低コストに開発できることは、新たなプレイヤーをコンステレーション事業に呼び込み、産業を活性化する観点で重要だと考える。



*1: https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto_kako/20220722hitokoto.html

3.5.1.3 戦略・研究開発計画の検討

戦略・研究開発計画案：

日本の宇宙産業は研究開発能力を持つが、技術的な強みとして生かし切れていないと考える。これは、一旦開発した技術に継続的な投資を可能とする仕組みが不十分なためと推察され、特に、事業化に近い領域であるコンステレーションの構築において顕著だと考える。事業・ミッションと技術や研究開発を結合するよう、プロジェクト面の支援や、結合を効果的に実施するための技術開発が必要だと思われる。

現状から導出したため、技術の強み・弱みについては既知のものが多い。これは、技術や研究が広いすそ野を持つ積み重ねであって、幅広い研究開発と技術の重要性を示していると考えられる。これらが現状の衛星技術における強みとして生かし切れていないのは、技術の高度化、使いやすさ、実用上の価値向上につながるような、継続的な研究開発が困難であるためと考えられる。これは、原初のシーズを開発できるものの、それがニーズにつなげるのが難しいこと、ひいては、事業・ミッションの立ち上げ・継続が難しく、結果として数が少ないことに帰結すると思われる。

この解決のため、以下 4 項が必要。

- 長期的に継続しうる事業・ミッションの直接支援となるようなプロジェクト
- 事業・ミッションの立ち上げにおいて有用な、プロトタイプ開発・製造の効率化に寄与する研究
- 開発・製造のうち、特に継続的な生産に寄与する研究
- 研究開発成果の事業・ミッションへの適用を支援し、CONOPS の確立に寄与する研究

3.5.1.3 戦略・研究開発計画の検討(まとめ)

課題

日本では一品生産においては、世界初を含む技術開発・衛星の生産・運用技術はあるものの、構成機数が数十機、年間生産数 5-20機/年程度のコンステレーション構築に必要な設計・開発経験・品質保証手法、生産・試験設備、運用方法の確立に至っていない。

論点

日本の現状の弱みを克服するために必要な要素は何か？

調査結果

調査から見えてきた問題点：

- 従来からの日本の技術開発支援は、原初のシーズ開発までがターゲットとなる点が多く、その技術をニーズに結び付けるまで、事業化につながるまでの長期的な支援が少なく、その結果事業リスク等を鑑みた自社投資も抑制され、弱みの克服に繋がらなかった。
- 量産化に必要な技術・設備は各企業固有のものとなることが多く、普遍的な開発支援が難しい。
- 欧米にて数10機の壁を越えつつあるコンステレーション事業者はICEYE, BlackSky等をはじめとして、主に安全保障用途での長期アンカーテナンシー契約が存在する。これら契約により事業リスクが低減され、自社投資等により、日本での弱みを克服しつつあるのではないかと。

開発戦略案

- ① **一品生産から小規模量産への壁を超えるための、長期アンカーテナンシーの仕組みの構築**
ユースケースを明確にした長期アンカーテナンシーの仕組みを構築することにより事業リスクの低減、及び、投資必要性の顕在化を行い、各社の自社投資を喚起し、現状の弱みの克服を行う。

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

3.3 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

3.5.1 多数機開発・試験・運用手法

3.5.1.1 技術調査

3.5.1.2 強み・弱み分析

3.5.1.3 戦略研究開発計画の検討

3.5.2 セキュリティ

3.5.2.1 技術調査

3.5.2.2 実装上のポイント分析

3.5.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

3.5.2 セキュリティ

3.5.2.1 技術調査

3.5.2.1.0 調査方針

3.5.2.1.1 既存ガイドラインの調査・分析

3.5.2.1.2 民間事業者のポリシー調査・分析

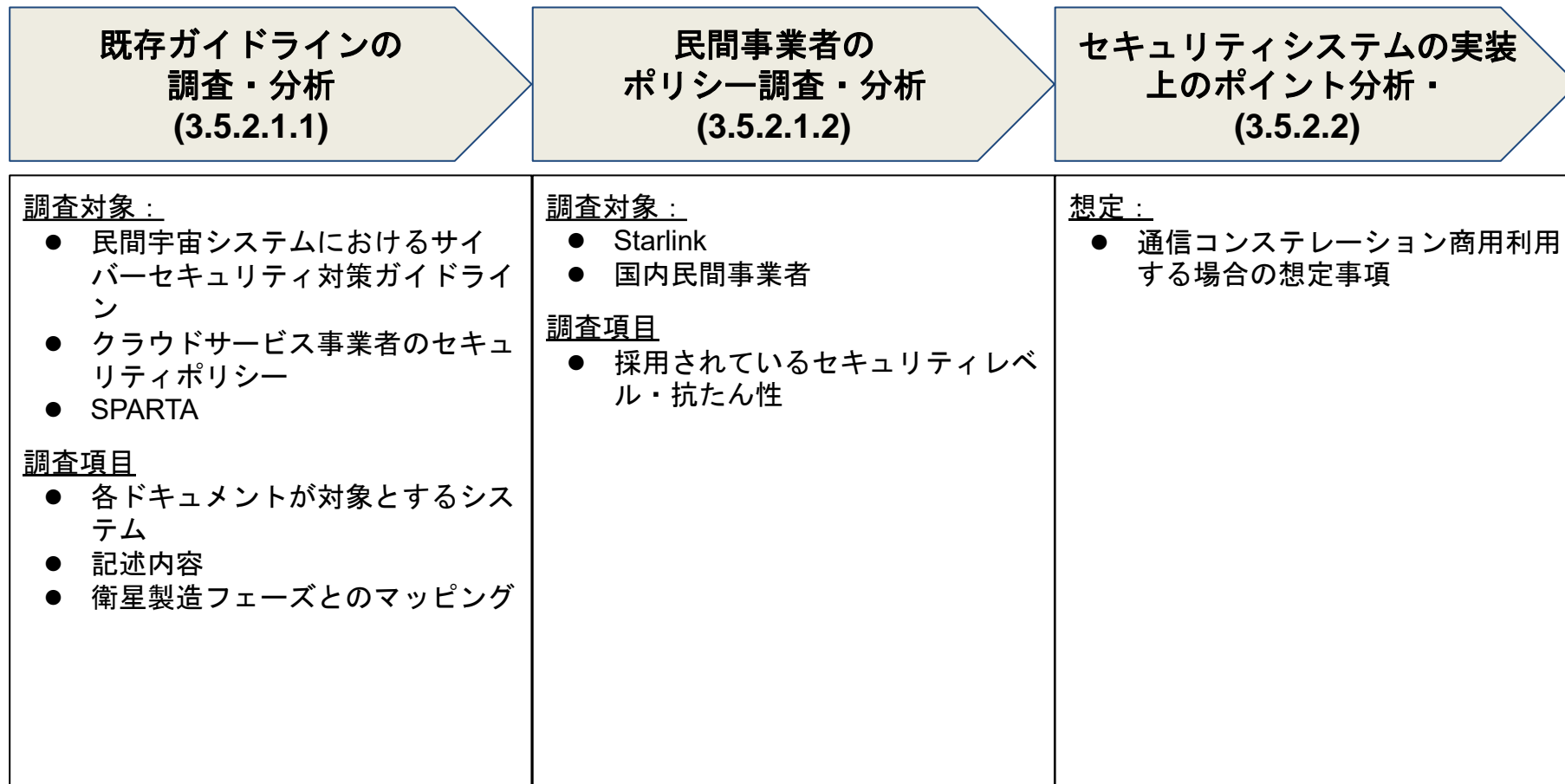
3.5.2.2 実装上のポイント分析

3.5.2.3 戦略・研究開発計画の検討

3.5.2.1.0 調査の流れ

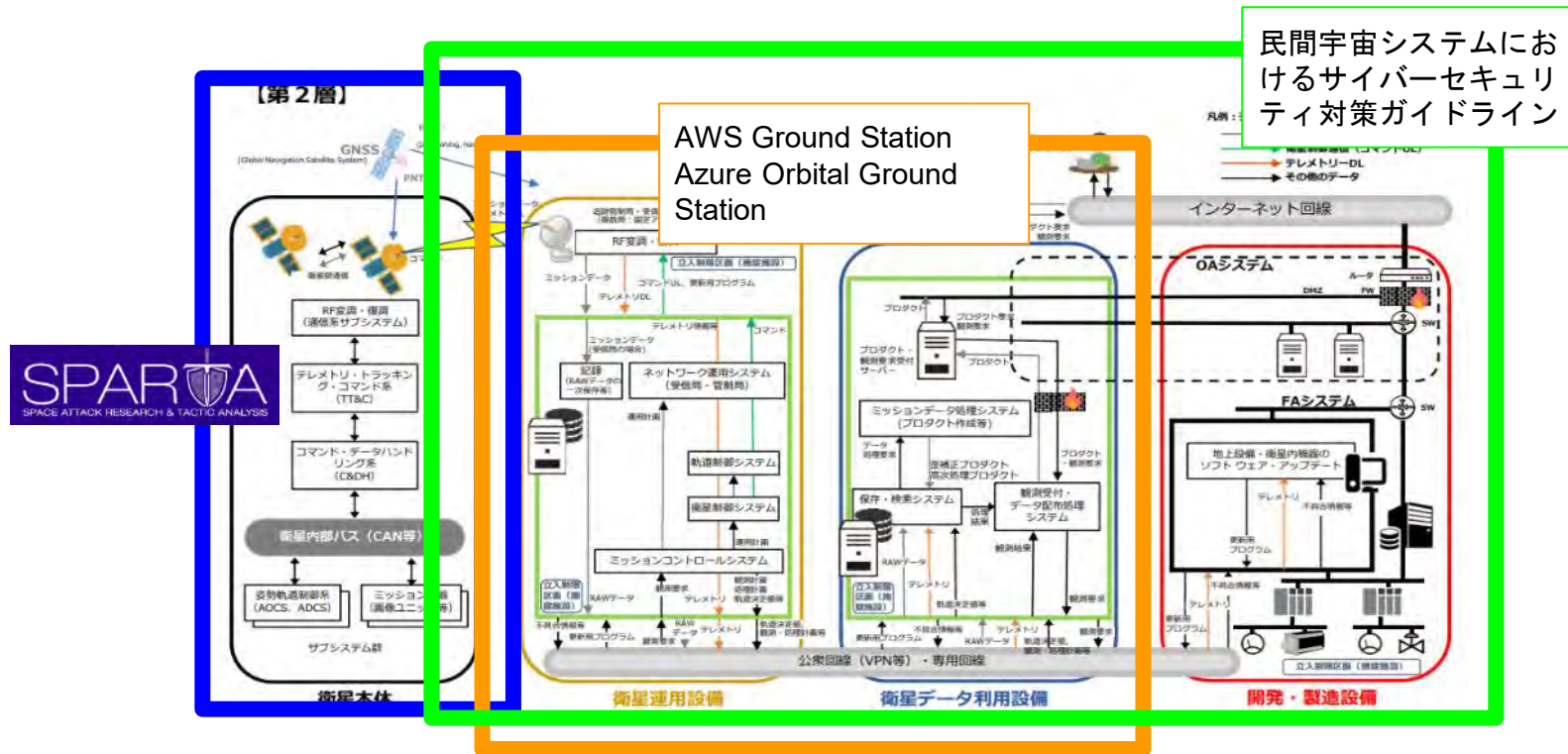
既存のガイドライン類を調査し分析した。適用しているポリシーに関して数社に対して個別の調査・分析を行い整理した。そのうえで、実装上のポイント整理と分析を行った。

セキュリティレベルについての調査全体について、構造を示す。



3.5.2.1.1 既存ガイドラインの調査分析

各ガイドラインが対象とするシステム：
 民間宇宙システムにおけるサイバーセキュリティ対策ガイドラインは主にIT系への対策を記述しており、SPARTAは主に衛星側の対策を記述している。



システム構成図は「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」による。
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/sangyo_cyber/wg_seido/wg_uchu_sangyo/20230331_report.html

3.5.2.1.1 既存ガイドラインの調査分析

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：
IT への対策がベース。高いセキュリティレベルが求められる際は衛星本体へも対策を要求。

調査・分析方法	整理結果
<p><u>ガイドラインの内容調査</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 産業サイバーセキュリティ研究会 ワーキンググループ1（制度・技術・標準化）宇宙産業サブワーキンググループのページにアクセス <p style="text-align: center;">▽</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 以下のドキュメントを取得 <ul style="list-style-type: none"> ○ 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 (*1) ○ 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 Ver 1.1 概要資料 (*1) <p style="text-align: center;">▽</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 民間宇宙システムにおけるセキュリティ対策のポイントに記載されている内容を、節番号ごとに「基本対策事項」と「高いセキュリティレベルが求められる際の対策」の観点で分析した。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 衛星システム（観測衛星）及び地上システム（衛星運用設備、衛星データ利用設備、開発・製造設備）を対象としたガイドライン。 ● 対象となるシステムのリスクアセスメントを前提とした上で、以下のような対策を取る事を推奨している。 <ul style="list-style-type: none"> ○ 基本的に導入することが推奨される対策 <ul style="list-style-type: none"> ■ リスクマネジメント ■ クラウドセキュリティ対策 ■ テレワークセキュリティ対策 ■ 内部犯行対策 ■ 外部へのインシデント報告 ■ 法令対応 ■ 開発・製造設備への対策 ○ 高いセキュリティレベルが求められる際の対策 <ul style="list-style-type: none"> ■ 衛星本体への対策 ■ 衛星運用設備への対策 ■ 衛星データ利用設備への対策

*1: https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info.service/sangyo_cyber/wg_seido/wg_uchu_sangyo/20230331_report.html

3.5.2.1.1 既存ガイドラインの調査分析

SPARTA :

SPARTA の記述は想定する攻撃者のレベルに幅があり、対策のコストが異なる。
リスクを評価して対策を行うことが必要となる。

調査・分析方法	整理結果
<p><u>内容調査</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● https://sparta.aerospace.org/ にアクセス ● Techniquesから重複を排除した170の攻撃手法を抽出 ● 各TechniquesのDescriptionを確認し、「標的にする」「入手する」「悪用（利用）する」等で表現されている部分に特に注目した上で、レベルを以下6段階に分類した <ul style="list-style-type: none"> ○ 1. OSINT・傍受 ○ 2. ジャミング・スプーフィング・ファジング ○ 3. 内部情報（設計、取引先など）の窃取 ○ 4. サプライチェーン、開発時のプログラム埋め込み、軌道投入までの物理的なアクセス ○ 5. 近接オペレーションおよびドッキング（含：その機能を有した宇宙船の取得） ○ 6. 試行錯誤を伴う攻撃、未知の攻撃、暗号危殆化 	<ul style="list-style-type: none"> ● SPARTAは、OSINT(Open-Source Intelligence)の調査といったものから、近接オペレーションや試行錯誤を伴う攻撃といったものまで、実行容易性が異なる。 ● 左記5や6と言った物をすべて個々の衛星で実装するのはコストが大幅に増大すると予測され、また攻撃の過程で監視をすることで検知が可能となるため、現時点でコンステレーションを構成するすべての衛星に対策を講じることはあまり現実的でないと考えられる。

3.5.2.1.1 既存ガイドラインの調査分析

クラウドサービス事業者が適用しているセキュリティポリシーについて：
IT系のセキュリティ対策とコンプライアンス準拠を行っている。ユーザーに対しては推奨アーキテクチャを提供している。

調査・分析方法	整理結果
<p><u>ポリシーおよびアーキテクチャの入手方法</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 以下のウェブサイトアクセス <ul style="list-style-type: none"> ○ AWS Ground Station ○ Azure Orbital Ground Station ● 資料の内容を個別に精査し情報を抽出した。 ● セキュリティに関して記述された内容及びアーキテクチャを参照 ● 第三者的なセキュリティ水準、システムアーキテクチャ、実装しているセキュリティの3点で分析を行った。 	<ul style="list-style-type: none"> ● どちらの事業者も、以下の要素を組み合わせている。 <ul style="list-style-type: none"> ○ コンプライアンス準拠したサービス運営 ○ テンプレートアーキテクチャーを適用することをユーザーに推奨 ○ 標準提供セキュリティ機能の利用の推奨 ● 利用を推奨している標準提供セキュリティ機能はIT系のセキュリティ対策。 <ul style="list-style-type: none"> ○ アクセス時の通信暗号化 ○ DDoS対策 ○ 保存データの暗号化 ○ 暗号鍵管理 ○ ID管理 ○ ログ ● 加えて、AWSは高可用性システムについて、冗長構成による抗たん性確保を推奨。

3.5.1.2.1 既存ガイドラインの調査・分析

Amazon (AWS Ground Station)のセキュリティ対策：
IT系のセキュリティ対策とコンプライアンス準拠を行っている。ユーザーに対しては冗長性を高める推奨アーキテクチャを提供し、抗たん性を確保している。

- セキュリティレベル
 - AWS提供セキュリティ機能+コンプライアンス準拠+推奨アーキテクチャー（冗長性）
 - AWS提供セキュリティ機能
 - アクセス時の通信暗号化
 - DDoS対策
 - 保存データの暗号化
 - 暗号鍵管理
 - ID管理
 - ログ監視
 - コンプライアンス準拠
 - SOC 1/SSAE 16/ISAE 3402, SOC 2, SOC 3
 - ISO 9001 / ISO 27001
 - FedRAMP
 - DoD SRG
 - PCI DSS Level 1

3.5.2.1.1 既存ガイドラインの調査分析

参考：AWSに関する情報元

AWSと同等のセキュリティと、リファレンスアーキテクチャを提示している。要求される抗たん性（Resiliency）に応じた推奨アーキテクチャを示したリファレンスアーキテクチャがある。

- AWS Ground Station でのセキュリティ
 - セキュリティに最も厳しい組織の要求にマッチする、データセンターとNWアーキテクチャでの運用
 - ネットワークセキュリティ、設定管理、アクセス管理、データセキュリティのツール提供
 - IAM
 - 保管データの暗号化
 - 所属する産業のベストプラクティスとエンドツーエンドの暗号化をすることを推奨する。
https://docs.aws.amazon.com/ja_jp/ground-station/latest/ug/security.html
- AWSリファレンスアーキテクチャ
 - Satellite Operator Development and Test Resiliency
 - レジリエンスを強化するために、冗長化する事を示している。高可用性が求められる場合、地上局も冗長化することで抗たん性を向上することを推奨している。
https://d1.awsstatic.com/architecture-diagrams/ArchitectureDiagrams/satellite-operator-development-and-test-resiliency-ra.pdf?did=wp_card&trk=wp_card
 - Video stream from cloud to satellite and internet
 - 衛星と端末間でビデオストリームを行う際のアーキテクチャ。セキュリティ対策として、IAMと鍵管理
https://d1.awsstatic.com/architecture-diagrams/ArchitectureDiagrams/headend-in-the-cloud-ra.pdf?did=wp_card&trk=wp_card
 - ARCHIVED: Settelite Mission Operations Center Reference Architecture
 - 「古いので記載のURLを参照すること」と指示があるが、当該URLがデッドリンクになっている。
https://d1.awsstatic.com/architecture-diagrams/ArchitectureDiagrams/satellite_mission_operations_center_ra.pdf?did=wp_card&trk=wp_card

3.5.2.1.1 既存ガイドラインの調査分析

Microsoft (Azure Orbital Ground Station)のセキュリティ対策：
IT系のセキュリティ対策とコンプライアンス準拠を行っている。ユーザーに対しては推奨アーキテクチャを提供している。

● セキュリティレベル

- Azure提供セキュリティ機能+コンプライアンス準拠+推奨アーキテクチャー
- Azure提供セキュリティ機能
 - マルウェア対策
 - アクセス時の通信暗号化
 - DDoS対策
 - 保存データの暗号化
 - 暗号鍵管理
 - ID管理
 - ログ監視
- コンプライアンス準拠
 - SOC1, SOC2, SOC3
 - ISO 27001, ISO 27018
 - FedRAMP, HITRUST, MTCS, IRAP, ENS

3.5.2.1.1 既存ガイドラインの調査分析

参考： Azureに関する情報元

Azureと同等のセキュリティと、リファレンスアーキテクチャを提示している。

- Azure Orbital Ground Station
 - Azureのセキュリティサービスの特性を引き継ぐものとして紹介されている。
 - <https://azure.microsoft.com/ja-jp/products/orbital/#heading-oc4c7811a>
 - Azure のセキュリティ
 - ID の管理
 - アクセス権の制御
 - ネットワークのセキュリティ保護
 - データの保護
 - キー、シークレット、証明書の管理
 - 一元的な視覚化と攻撃の予防
 - <https://azure.microsoft.com/ja-jp/explore/security>
 - 順守しているコンプライアンスリスト
 - <https://azure.microsoft.com/ja-jp/explore/trusted-cloud/compliance>
 - アーキテクチャー
 - <https://techcommunity.microsoft.com/t5/azure-space-blog/ground-station-virtualization-with-azure-orbital/ba-p/3645738>

3.5.2.1.2 民間事業者のポリシー調査・分析

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（国内）：
国内の民間観測衛星コンステレーション運用者は、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がベース。

調査・分析方法	整理結果
<p><u>採用しているセキュリティレベルのヒアリング</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 国内で民間観測衛星コンステレーションを運用している3社からセキュリティ対策についてヒアリング <ul style="list-style-type: none"> ○ 通信用GEO衛星フリートの運用者は含まない。 ● ヒアリング結果を精査し情報を抽出した。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 各社とも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をベースにしている。 ● 地上装置面で実装されている対策は一般的なITシステムにおけるセキュリティ対策と同等のもの（FW, 通信保護, エンドポイント保護, ID管理, 監視）。 ● 衛星本体の機密性および完全性は通信を暗号化する事によって確保している。 ● 攻撃者の操作する衛星による近接オペレーションは現時点では想定していない。 ● 企業によっては、宇宙システムの脅威分析をする際にSPARTAを参考にしている。

3.5.2.1.2 民間事業者のポリシー調査・分析

Starlink 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・抗たん性について：Starlinkについて、セキュリティ対策は明示されていないが、IT系のセキュリティ全般＋工場に対するセキュリティと推測できる。

調査・分析方法	整理結果
<p><u>情報の入手方法</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 以下のウェブサイトへアクセス <ul style="list-style-type: none"> ○ Starlink Privacy Policy ○ Starlink Job Description ○ Starshield サービスページ ● 資料の内容を個別に精査し情報を抽出した。 ● セキュリティ対策に関して記述された内容を参照し、明記されているセキュリティ対策、Job Descriptionに記載されている業務内容からセキュリティに関する事項を抽出した上で、実装済みのセキュリティ対策を分析した。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 具体的なセキュリティ対策・抗たん性については記述無し。 ● Starlink機器との間で送受信される情報を暗号化している。 ● Starshieldの暗号化機能を政府要件を満たすものに変更したと考えられる。 ● 導入が推測されるセキュリティ対策はIT系のセキュリティ全般＋工場に対するセキュリティと推測できる。 <ul style="list-style-type: none"> ○ 監視 ○ 脅威ベースのペネトレーションテスト ○ セキュアコーディング ○ バージョン管理 ○ 暗号化サービス ○ 工場セキュリティ

3.5.2.1.2 民間事業者のポリシー調査・分析

参考：Starlinkに関する情報元

具体的なセキュリティ対策については記述無し。求人情報から推測すると、IT セキュリティの実施が推察される。

- 具体的なセキュリティ対策については記述無し
 - <https://isp.page/news/starlinks-security-and-privacy-risks-what-you-should-know/>
- Starlink機器との間で送受信される情報を暗号化している
 - Privacy Policy <https://www.starlink.com/legal?regionCode=JP>
 - Starshield <https://www.spacex.com/starshield/>
 - Starshieldの暗号化機能を政府要件を満たすものに変更したと思われる。
- 求人情報から導入が推測されるセキュリティ対策
 - インフラ
 - ID管理
 - ネットワーク セキュリティ
 - Web アプリケーション ファイアウォール
 - クラウド上にデプロイしたサーバーの一元的な構成管理、監視
 - 監視
 - 脅威ベースのペネトレーションテスト
 - セキュアコーディング
 - バージョン管理
 - Starlink システム（ルーター、ディッシュ、ゲートウェイ、衛星など）セキュリティ
 - 暗号化サービスやその他のセキュリティクリティカルなサービス
 - 工場セキュリティ

以下の求人情報を参照した。

https://boards.greenhouse.io/spacex/jobs/6884466002?gh_jid=6884466002

https://boards.greenhouse.io/spacex/jobs/6841549002?gh_jid=6841549002

https://boards.greenhouse.io/spacex/jobs/6728927002?gh_jid=6728927002

https://boards.greenhouse.io/spacex/jobs/6728939002?gh_jid=6728939002

3.5.2.2 セキュリティシステムの実装上のポイント分析

衛星製造フェーズと対応するセキュリティ対策：

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

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

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

3.5.2.2 セキュリティシステムの実装上のポイント分析

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：
保守・運用フェーズの衛星側対策が、今後の実装上のポイントとなり得る。

- 今後、衛星コンステレーションを用いた通信が商用利用された場合、重要インフラもしくはそれに準じる性質を持つ可能性がある。
- 現状の地上の重要インフラにおけるセキュリティ課題として、以下がある。*1
 - システム稼働後の監視・脆弱性対策（パッチアップデート）を想定していない設計
 - DXなど、時代変化に伴う攻撃ベクターの増加により、監視・脆弱性対策（パッチアップデート）の必要性増加
- 実装上のポイント
 - 衛星技術面
 - 衛星コンステレーションにおいて、システム稼働後は打上げ後に当たる。
 - 現状のガイドラインにおいて、打上げ後の衛星への脆弱性対策の記述がないため、現状の重要インフラのセキュリティ課題と同様の状況になる可能性がある。
 - 地上装置面
 - AWSおよびAzureの記述から、クラウドサービスが一般的な IT セキュリティの標準に従うことが予想される。このためセキュリティレベルの選択においても、一般的な IT セキュリティのレベル選択が援用できる。
 - 運用面地上装置面
 - 地上装置および衛星コンステレーションの健全性を常に監視する仕組みが必要になると考えられる。この健全性には、インシデント発生有無、前述のセキュリティ水準確認、各種ガイドラインの準拠状況、衛星の振る舞いが含まれる。

*1: 出典は後述する「参考:重要インフラにおけるパッチの課題」のページを参照

参考：重要インフラにおけるパッチの課題

重要インフラでは、セキュリティ対策最新化が必要だが、適用が難しい状況である。

- 制御システムにおいて、情報システムでは一般的なセキュリティ対策が採用されていない背景には、制御システムは情報システムにみられるセキュリティリスクとは分離されており安全である、という共通認識が存在している状況がある。一方で制御システムをとりまく環境は変化しており、従来の考え方、取り組み方ではセキュリティを確保できなくなっているという指摘もあがった。
- 制御システムは通常 10～20 年におよび長期間にわたり使用されている。汎用製品やオープンネットワークの採用が進むとはいえ最新のものを使用しているわけではなく、セキュリティ対策も同様に最新のものではないことも十分に考えられる。
- 脆弱性関連情報および対策のためのパッチが公開されるが、稼働中の制御システムへそのまま適用することは、可用性重視の観点からは難しくほとんど行われていない。パッチ適用によるシステムの再起動や不具合などによってサービスが停止する恐れがあることが理由である。

「IPA. (n.d.). 重要インフラの 制御システムセキュリティと ITサービス継続に関する調査. 」をベースに検討。
<https://www.ipa.go.jp/security/controlsystem/ps6vr70000011hf6-att/000025097.pdf>

3.5.2.2 セキュリティシステムの実装上のポイント分析

参考：IoTにおけるパッチ適用の考え方

IoT機器において、パッチ送受信、正当性の確認、性能低下への対応、切り戻しの重要性が指摘されている。

- アップデート版の取得は、必ず IoT 機器メーカー等の信頼できる Web サイトからダウンロードする等、信頼できる経路で、電子署名等を利用して改ざんされていないことを検証したものを取得することに留意する。
- 暗号を用いた機器認証、ユーザ認証やファームウェア検証等が有効である。
- アップデート中の性能低下やネットワーク帯域の不足により機能や安全性への影響が予測される場合にはアップデート日時設定や帯域制御を可能とする方法を検討する。アップデート後に動作しなくなった場合の自動バージョンダウン（特に自動アップデートの場合）を可能とする方法を検討する。
- アップデート機能が乗っ取られ悪用されないよう、アップデート機能のセキュリティ対策を講じることも重要である。
- アップデート対象となる IoT 機器のなりすましを防止するために、IoT 機器の認証やアップデートファイルの暗号化を行うことも検討する。また、必要に応じ、暗号の危殆化に対応した鍵管理システムの導入を検討する

研究開発計画として、セキュアなバージョンアップデートを検討する事が考えられる。

- 保守・運用フェーズにおける衛星側の脆弱性対策の検討が必要と考えられるが現状では記述がされていない。
- 保守・運用フェーズにおける衛星側の脆弱性対策は、パッチ適用によって実施される可能性が高い。
- 研究開発計画案：セキュアなバージョンアップデート
 - バージョンアップデートフローの各段階における設計
 - パッチ送信（送信チャネル含む）
 - パッチの正当性の確認（Secure boot 等）
 - パッチ適用（ダウンタイム有無とその際の処理）
 - パッチ適用によって不具合が発生した場合の切り戻し
 - バージョンアップデート有無に差がある衛星間の通信制御
 - パッチ適用未済の衛星との通信

上記方針は、IoT 機器へのパッチ適用を参考とした。後述する「参考：IoTにおけるパッチ適用の考え方」のページを参照。

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な技術
- 3.6 定常・動向分析
- 3.7 適時調査・事実確認

3.6 定常・動向分析

23-002-R-013

定常・動向分析として、下記カンファレンスに出席した/予定

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

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」
MATLAB EXPO2023 JAPAN
参加報告書

一般財団法人 衛星システム技術推進機構
Advanced Satellite Systems Technology Center (ASTECC)

2023年 6月 14日

1. 概要

2. サマリ

① MBSE

② MBD

③ MBSE-MBD接合

3. 個別セッション概要

1. 概要

2. サマリ

① MBSE

② MBD

③ MBSE-MBD接合

3. 個別セッション概要

MATLAB EXPO 2023 JAPAN概要

1. MATLAB EXPO 2023 JAPANはデジタル開発技術の中で注目されているMBSE^{※1}/MBD^{※2}に関してデファクトスタンダードのツールとなりつつあるMATLAB/Simulinkを提供するMathWorksが主催するMATLAB/Simulinkの日本のユーザー向けのフォーラムである。
2. 2023年度は2023/5/31 に東京で開催された。
3. 来場者は1200名を超え、講演、フロアブースとも大盛況であり、国内でのMATLAB/Simulinkへの注目度の高さが感じられた。

※1 MBSE : Model Base System Engineering ※2 MBD:Model Base Design



(左) 基調講演の様子 (右)フロアブースの様子

出典: MATLAB Japan Twitter (2023/5/31)

MATLAB EXPO 2023 JAPAN 参加セッション

1. MATLAB EXPO 2023 JAPANのセッション全体のうち、参加したセッションを以下網掛けで示す。
2. 以下各セッションの概要とそこから得られた衛星開発に関連する示唆・本分野のトレンドについて記載する。
3. 各セッション講演資料等は知財の関係上直接報告書には載せられないが、以下のリンクより関連情報の取得が可能である。

[講演概要：MATLAB EXPO 2023年5月31日 | 東京](#)

[講演資料 \(matlabexpo.com\)](http://matlabexpo.com)

時間							
10:00-10:30	基調講演1「ムーンショット：いかにしてエンジニアと科学者たちは不可能を可能にするか」			MathWorks Arun Mulpur			
10:30-11:00	基調講演2「航空機開発におけるMBSE/Model-Based Designの適用は進んでいるのか」			MHI 増子洋一郎			
12:30-13:15	AR-1	AI-1	W-1A	W-1B	M-1	R-1	E-1
	空の移動革命への挑戦～日本発空飛ぶ車と物流ドローンの挑戦～意見交換会なし	広域データ収集とビッグデータ解析で廃棄物処分場のカオスに挑む	Beyond 5G/6Gに向けたテラヘルツ帯・ミリ波帯を用いた無線通信システムに関する研究	宇宙産業の展望と民間企業によるロケット開発	市場の実操作を考慮したドライバビリティ評価プロセスの開発	平均年齢55歳！ベテランから始めたデジタル実践教育の紹介	電動車用バッテリーの内部抵抗も出るパラメータ同定におけるMATLAB適用事例
	SkyDrive 岸信夫	国立環境研究所 石森洋行	KDDI総合研究所 大関武雄	インターステラテクノロジズ 稲川 貴大	トヨタ自動車 近藤俊朗	豊田自動織機 井上雅昭	本田技研工業 安田 聖文
13:50-14:35	AR-2	AI-2A	AI-2B	W-2	M-2	R-2	E-2
	パーソナルモビリティの安全機能開発のためのAIを用いたToFカメラの深度画像の高精度化	画像認識AIとLiDARを用いた農業機械周辺における人検出	モビリティを基軸にしたCPS実現への取り組み	JRCのローカル5Gの取り組みとBeyond 5Gに向けて	【パネルディスカッション】航空機業界コンソーシアム：MBAC ワーキンググループ活動紹介	モデルベース開発(MBD)人材育成～学校教育から社会人教育に至るまで～	オフロード機械向け電動パワートレイン開発におけるMBSEの適用
	スズキ 近藤 信二	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 梅野 覚	デンソーテン 横山夏軌	日本無線 館森 正樹	SUBARU 梅沢 翔	広島大学/デジケーション 脇谷 伸	ヤンマーホールディングス 朝井 豪
15:10-15:55	AR-3	AI-3A	AI-3B	W-3	M-3A	M-3B	E-3
	自動運転開発向け連成シミュレーション環境の合流判断技術への適用	航空機部品が壊れる前に交換する、ANAの予知保全への挑戦	MATLAB Production Server を用いた脳波クラウドBCIによる感性の可視化	宇宙開発利用の進歩に貢献するモデルベース開発技術	アクティブノイズコントロールシステム開発におけるModel-Based Design適用事例 (意見交換会の開催はありません)	有機膜形成装置の温度制御におけるModel-Based Design適用事例	空調用電動コンプレッサのモータ制御システム開発におけるAIモデルの活用事例
	マツダ 山内 優・石崎 大智	全日本空輸 重富 貞成・峽戸 直也	広島大学/Xiberlinc 町澤 まろ	日本電気 古川 琢也 / NECスペーステクノロジー 佐野 淳平	本田技術研究所 坂本 浩介	芝浦メカトロニクス 杉内 佑輔	サンデン 木暮 雅之
16:30-17:15	AR-4	AI-4A	AI-4B	W-4	M-4A	M-4B	E-4
	適度な力制御を実現する空気圧ロボットの開発とシミュレーション活用	1D解析におけるAIサロゲートモデルの適用	故障メカニズムと自然言語処理による類似ワランティ分析	次世代モバイル通信に向けた衛星と航空機を用いた通信システムの研究開発	Model-Based DesignツールによるAUTOSAR Adaptive Platform向けアプリケーション開発事例	Model-Based Systems Engineeringに基づくモータ設計環境構築による"コア&カスタマイズ戦略"の推進	SoC/PGA評価基板を活用したパワエレ制御開発向けHILS環境の構築
	東レエンジニアリング 杉原 洋樹	SUBARU 小杉 寛明	クボタ 松本 裕作	情報通信研究機構 辻 宏之	名古屋大学 高田 光隆 / パーソナルクロステクノロジー 高橋 良輔	デンソー 大石 陵平	東芝インフラシステムズ 齋藤 亮介

聴講セッションの一覧

今回聴講したセッションの概要は以下の通り。

今回の聴講セッションのサマリ (1/3)

業界	企業名	講演ID	区分	講演タイトル
ツール	MathWorks	基調講演1	MBSE/MBD /解析	いかにしてエンジニアと科学者たちは不可能に可能にするか
航空機	三菱重工業	基調講演2	MBSE/MBD	航空機開発におけるMBSE/ Model-Based Designの適用は進んでいるのか
空飛ぶクルマ	SkyDrive	AR-1	MBSE/MBD	空の移動革命への挑戦 ～日本発 空飛ぶクルマと物流ドローンの挑戦～
廃棄物処分	国立環境研究所	AI-1	その他(データ解 析・ビジュアル 化)	広域データ収集とビッグデータ解析で 廃棄物処分場のカオスに挑む
通信	KDDI	W-1A	その他(通信ネット ワークシミュレーショ ン)	Beyond 5G/6Gに向けたテラヘルツ帯・ミリ波帯を用いた 無線通信システムに関する研究
宇宙	インターステラ テクノロジーズ	W-1B	MBD/解析/3D プリント	宇宙産業の展望と民間企業によるロケット開発

聴講セッションの一覧

今回聴講したセッションの概要は以下の通り。

今回の聴講セッションのサマリ (2/3)

業界	企業名	講演ID	区分	講演タイトル
自動車	デンソーテン	AI-2B	その他 (デジタルツイン)	モビリティを基軸にしたCPS実現への取り組み
通信	日本無線	W-2	その他(電波シミュレーション)	JRCのローカル5Gの取り組みとBeyond 5Gに向けて
航空機	パネルディスカッション	M-2	MBSE/MBD	航空機業界コンソーシアムMBAC ワーキンググループ活動の紹介
特殊車両	ヤマハ	E-2	MBSE/MBD	オフロード機械向け電動パワートレイン開発におけるMBSEの適用
自動車	マツダ	AR-3	MBD	自動運転開発向け連成シミュレーション環境の合流判断技術への適用
航空機	ANA	W-1B	その他 (データ分析)	航空機部品が故障する前に交換するANAの予知保全への挑戦

聴講セッションの一覧

今回聴講したセッションの概要は以下の通り。

今回の聴講セッションのサマリ (3/3)

業界	企業名	講演ID	区分	講演タイトル
宇宙	NEC/NECスペーステクノロジー	W-3	MBD	宇宙開発利用の進歩に貢献するモデルベース開発技術
自動車	サンデン	E-3	その他(解析：サロゲートモデル)	空調用電動コンプレッサのモータ制御システム開発におけるAIモデルの活用事例
宇宙	NICT	W-4	その他(動向紹介)	次世代モバイル通信に向けた衛星と航空機を用いた通信システムの研究開発
自動車	名大・パーソル	M-4A	MBD	Model-Based DesignツールによるAUTOSAR Adaptive Platform向けアプリケーション開発事例
自動車	デンソー	M-4B	MBSE/MBD	Model-Based Systems Engineeringに基づくモータ設計環境構築による“コア&カスタマイズ戦略”の推進
自動車	東芝インフラシステムズ	W-1B	MBD	SoC/FPGA評価基板を活用したパワエレ制御開発向けHILS環境の構築

1. 概要

2. サマリ

① MBSE

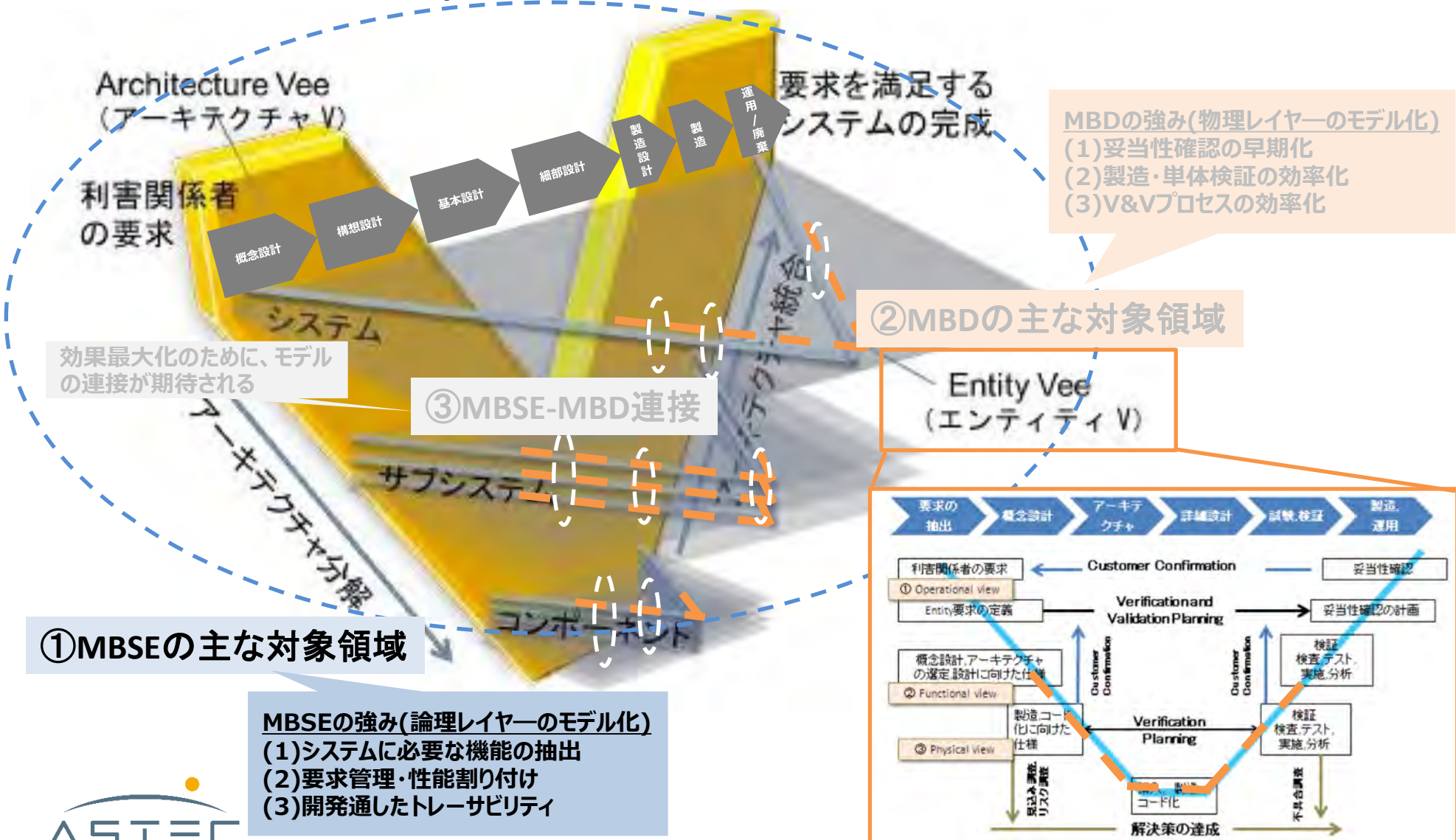
② MBD

③ MBSE-MBD接合

3. 個別セッション概要

サマリ : ①MBSE

◆ 開発プロセスにおけるMBSE/MBDの主な対象範囲



サマリ : ① MBSE

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

MBSE導入に係るモチベーション

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

サマリ : ① MBSE

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

衛星業界の現状と示唆

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

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

1. 概要

2. サマリ

① MBSE

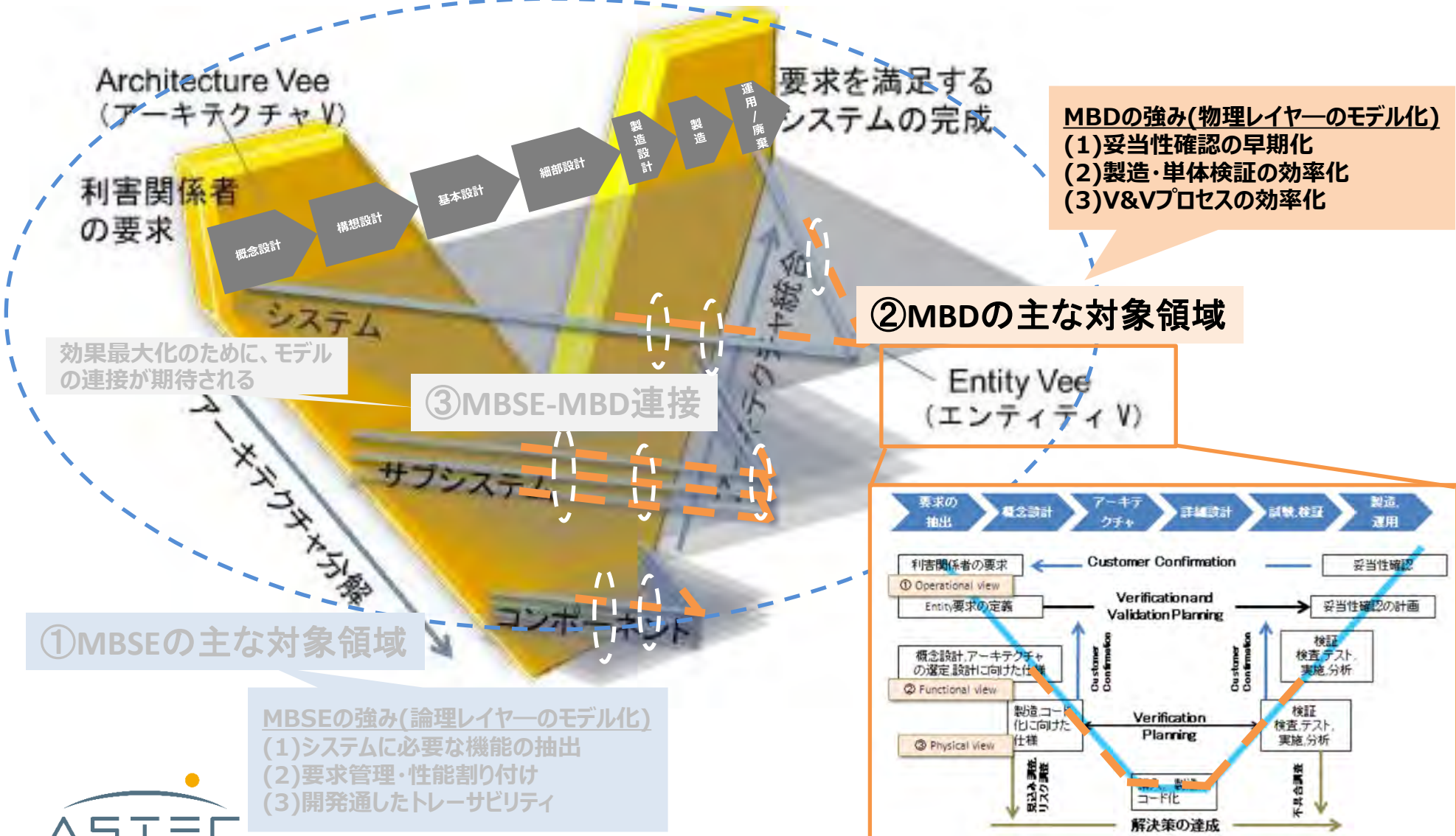
② **MBD**

③ MBSE-MBD接合

3. 個別セッション概要

サマリ : ② MBD

◆ 開発プロセスにおけるMBSE/MBDの主な対象範囲



サマリ : ② MBD

- ◆ 1カンファレンス内ではあるが、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

【注記】

MatlabExpo2023発表をベースとした評価であり、業界の全体の動向/評価ではない

サマリ : ② MBD

- ◆ 「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

1. 概要

2. サマリ

① MBSE

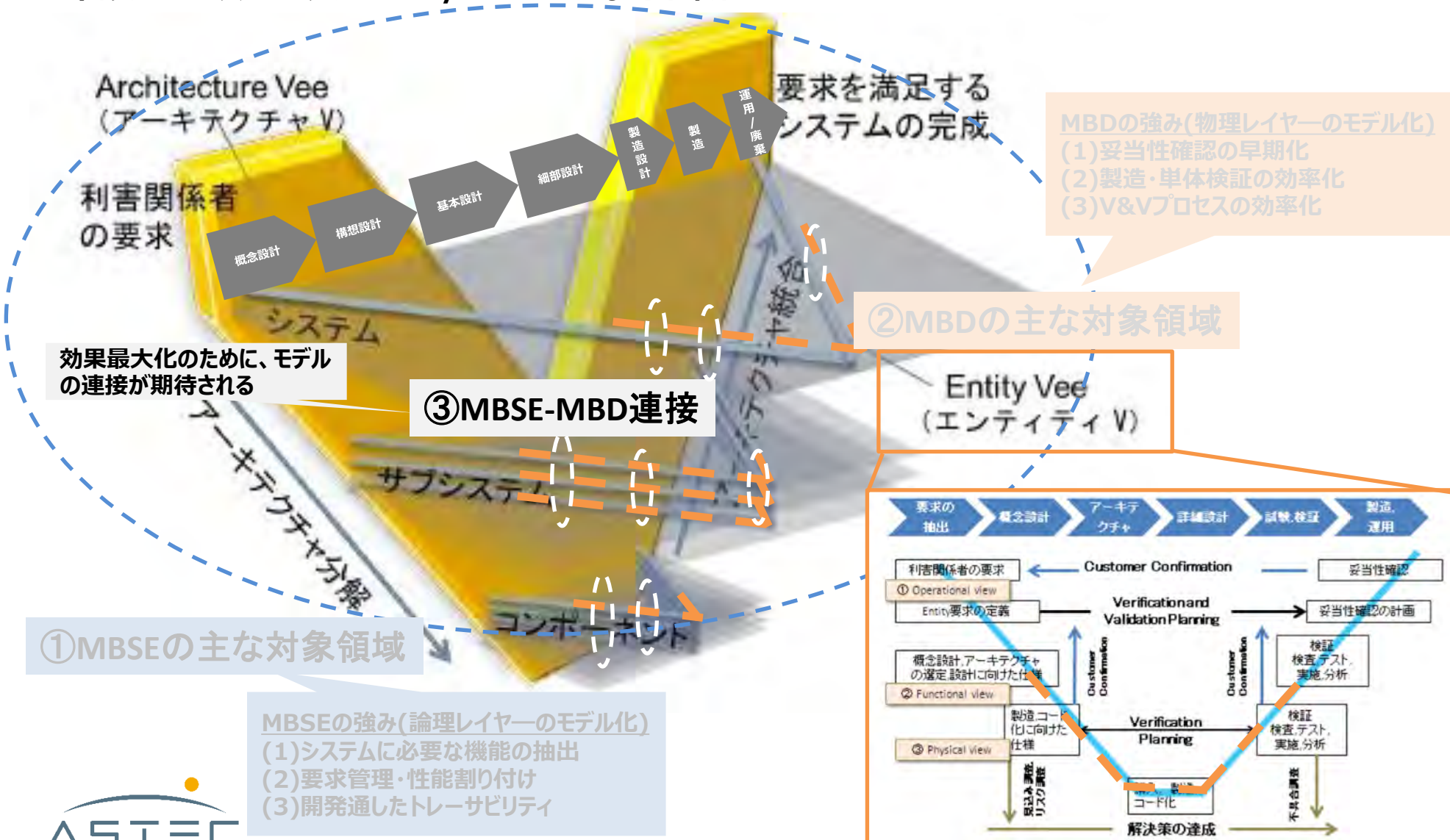
② MBD

③ **MBSE-MBD接続**

3. 個別セッション概要

サマリ : ③MBSE-MBDの接続

◆ 開発プロセスにおけるMBSE/MBDの主な対象範囲



サマリ : ③ MBSEとMBD接続

MBSE/MBDは双方モデルを利用するため、両者接続により効果最大化のメリットが期待される一方で、従来、両者の接続が普及するためには課題があった。

● 接続によるメリット例

接続方向	想定される接続形態	メリット
MBSEからMBDへのモデル接続	要求モデルから設計モデルへの詳細化	要求の確実なフローダウン
MBDからMBSEへのモデル接続	設計モデルの上位システム解析への取込み	システム解析の精度向上

● 接続への主要課題

主要課題	MBSE視点	MBD視点
モデル間 インタフェース	<ul style="list-style-type: none"> MBDからの設計モデルがシステム解析ツールに取り込めない or 取り込むために多数のモデル修正が必要となる。 設計モデルベンダー毎に上記必要な修正内容が異なる。 	<ul style="list-style-type: none"> 上位からの要求モデル仕様がベンダー毎/PJ毎に異なり、その都度、下流設計へ取り込む手法を開発する必要がある。 上位に設計モデルを提供する場合、自身の設計ノウハウ等を秘匿して提供できる必要がある。
シミュレーション 実行速度	<ul style="list-style-type: none"> 設計モデル粒度が詳細化されすぎている場合、上位でのシステム検証のシミュレーション時間が膨大になる。 過度に設計モデル粒度を荒くした場合、システム解析上問題となる過渡現象等が検出できなくなる場合がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 左記 システムシミュレーション時間の対策のため、別途上位に渡すためのモデル粒度を上げたモデルを用意する場合、実装用モデルと併せて2種類のモデルを開発することとなり、作業量が増加。両者の等価性を保ったメンテナンスも困難。

サマリ : MBSEとMBD接続

MBSE/MBD接続の課題に対する対策案、取り組み例が複数報告。両者の接続促進が今後加速していく事が推察される。

課題	対策案	取り組み例
モデル間 インタフェース	<p>【モデル間インタフェース標準化】 MBSE/MBD間のモデル流通の標準化(モデルフォーマット、インタフェース、秘匿化方法等)を行う。標準化を行うことで、完全に同一モデルの取り込みができない場合においても、自動変換ツール等を開発し、対応することも可能となる。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 【MBAC】 OEM/装備品メーカー双方が参画する航空業界のMBSE/MBD促進のコンソーシアム。OEM/装備品メーカー間のモデル(要求/設計) 間インタフェースの標準化を進めている。 • 【名古屋大学】 車載標準SWプラットフォームAUTOSARをモデルベースに取り込み利用することで、モデル間通信を標準化。
シミュレーション 実行速度	<p>【シミュレーション高速化技術】 計算負荷の高い詳細な設計モデルの代わりに、該当モデルの入出力関係を機械学習させた計算負荷の低いサロゲートモデルに置き換える手法が複数報告された。なお、十分な精度と低計算負荷を両立するサロゲートモデルをどのように開発すればよいかは、現在ベストプラクティスを積み上げている状況であり、今後一般化が期待される。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 【サンデン】 車載空調用モータ制御システムをサロゲートモデル化、詳細設計モデルと比較して1/100のシミュレーション時間を達成 • 【SUBARU※1】 油圧制御部をサロゲートモデル化。詳細設計モデルに対して、1/100のシミュレーション時間を達成

サマリ : MBSEとMBD接続

衛星業界においても、更なるMBSE/MBD普及に伴い両者の接続は重要になってくると想定。特に標準化に関しては、サプライチェーンが国内に閉じない業界特性より、国際的な動向を意識することも重要。

衛星業界の現状と示唆

	衛星業界の現状	将来への示唆
MBSE/ MBD 接続	<ul style="list-style-type: none"> ✓ MBDは各社の積極的な取り組みでMBSEと比較して先行して普及している。 ✓ MBSEはDX研究会等の活動を通じてこれから本格的な普及を目指す状況であり、両者の接続は 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ MBSE普及に伴い、その成果を最大化させるためにも、先行するMBDとの接続は他業界同様重要になってくると想定される。
モデル間 インタ フェース 標準化	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 現状はMBSE側の手法・適用方法等の開発を実施している状況である。MBDとの接続方法の標準化に関しては、ある程度MBSE側の方向性が定まってから開始されると想定される。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ DX研究会を標準化のための業界コンソーシアムとして活用することは有用と考えられる。 ✓ 衛星サプライチェーンは国内で閉じないため、標準化は、国際動向を意識することも必要 ✓ DX研究会の開発成果を国際会議等で報告するなど、日本のプレゼンス確保も意識する必要がある。
シミュレ ーション 高速化 技術	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 接続としてのニーズは顕在化していないものの、本技術はMBD単体としても効果があることから、各社のMBD開発の中で、継続して技術開発が進むと想定。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 今後のMBSEの普及・標準化の進捗に応じたMBSE側のニーズを把握して、MBD側にて進める高速化技術対象を選定することにより、成果の最大化が可能になると想定される。

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」
ESA GNC and ICATT Conference
参加報告書

一般財団法人衛星システム技術推進機構
Advanced Satellite Systems Technology Center (ASTEC)

2023年 6月

International Conference on Guidance, Navigation & Control Systems

(12th, 12-16 June 2023) [補足]ICATT*1は上記と同時開催のツールに着目したカンファレンス

*1:International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques(9th)

- **要旨**：衛星、ロケットの航法誘導に係るGNCに関する活動と製品について、意見を交換し、将来の協力を促すためのカンファレンスである。160件程度の発表があり、衛星メーカ、コンポメーカ間のネットワークだけでなく、V&V等の業界共通の課題についても意見交換が見受けられた。
- **参加者**：欧州中心だが米国からも多数の参加が見受けられたが、発表の数は欧州勢が占める。ESA/NASAやAerospace Corp.に加えメーカ、大学関係者が大半で、コンサル系の参加は少なく、技術的な討議が中心。アジアからは、日本、韓国からのみとのこと。(年齢層は均一)
- **展示場**：最大24ブースで1日のみ開催、ポスターセッションも同時開催
- **人数**：255人(9th) → 275人(10th) → 316人(11th) → **280人程度(12th)**
- **開催開催地**：… → ポルトガル(9th) → オーストリア(10th)
→ バーチャル(11th, ポーランド予定) → **ポーランド(12th)**
⇒ **バーチャル開催の11thを除けば右肩上がり、概ね300人前後が参加**

(次回：2026年に開催予定、開催地検討中)

◆ カンファレンスに関する所感(サマリ)

- 衛星メーカーは、Airbus, TASを中心に、ESAプロジェクト等に関する発表が中心だが、商用静止通信衛星バスであるOneSatに関する技術的な発表も見受けられた。
(発表に関するエグゼクティブサマリは次頁参照)
- センサ・アクチュエータについても、Airbus, Sodern, Jena, Leonardo等の欧州を代表するメーカーが一通り揃うが、米国メーカーはあまり見受けられない。
- ランチは円卓、1日2回の休憩(30分間)では、ほぼ全員退席し会話がはじまるなど、ネットワーキングが非常に活発であり、発表者との討議だけでなく、初見の方とも積極的にコミュニケーションがはかられている。
- Airbus, TAS等の競合間での意見交換も見受けられ、GNC業界全体の発展に貢献していると推察されるが、日本からはJAXAのみ(ASTEC除く)であり、産学官の積極的な参加が望まれる。

◆ 類似カンファレンス

1. Rocky Mountain AAS GN&C Conference(Feb 1-7, 2024, 46th, Breckenridge, CO. US)

米国版のGNCに特化したカンファレンスであり、2月にコロラドで開催されている。ClassifiedとUnclassifiedに分かれており、初日はClassifiedのみ。

◆ 衛星全般技術の一部としてAOCS/GNC技術が扱われているカンファレンス

① International Astronautical Congress(Oct 2-6, 2023, 74th, Baku, Azerbaijan)

② AIAA SciTech Forum and Exposition(Jan 8-12, 2024, Orlando, FL. US)

[補足]

上記2カンファレンスともに非常に大きなカンファレンスであるため、情報量が多いが、情報量の多さに依存して、特定領域に特化したトレンドを把握するには労力を要する傾向にある

エグゼクティブサマリ

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

技術分野

姿勢・軌道制御系

Verification &
Validation
(V&V)

センサ/
アクチュエータ

トレンド

✓ 複雑化・低価格化

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

✓ 問題発生 of 早期化

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

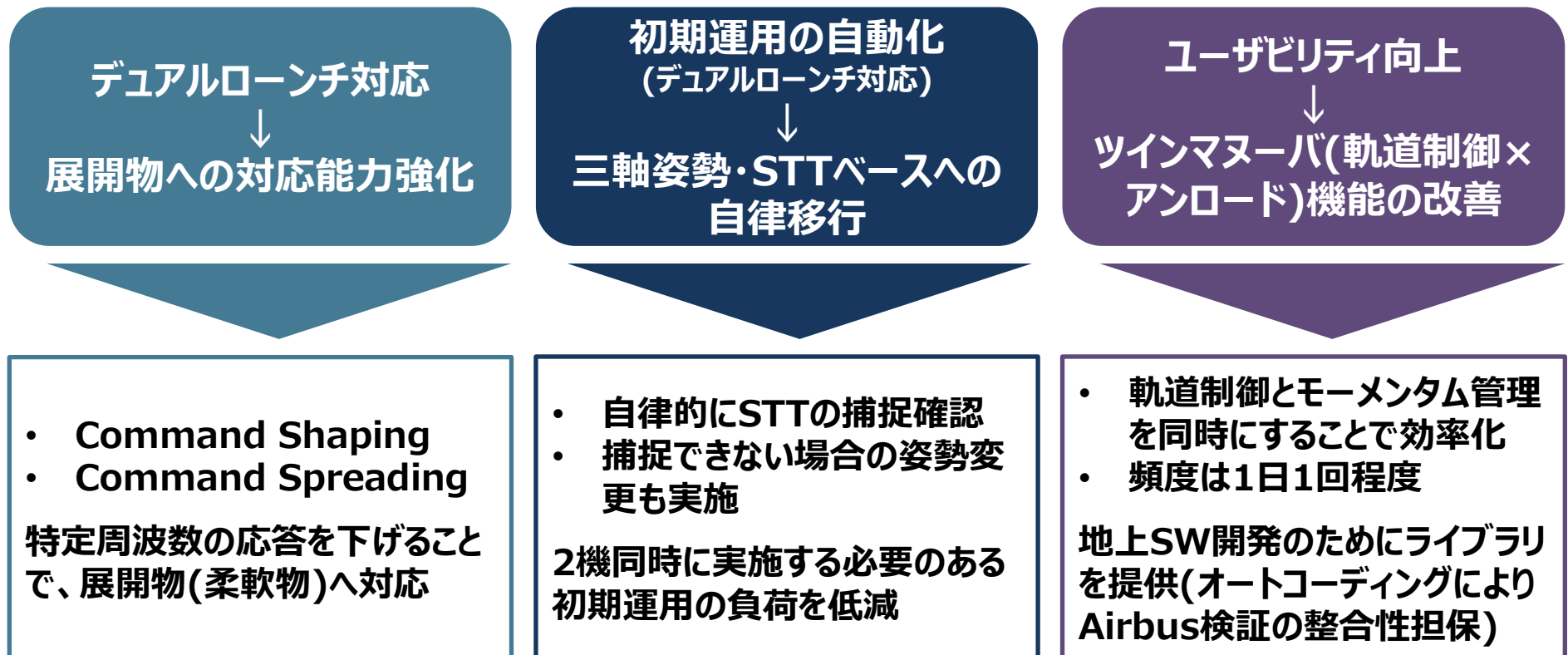
✓ 機能拡張

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

1. エグゼクティブサマリ
2. 姿勢・軌道制御系
3. Verification & Validation(V&V)
4. センサ/アクチュエータ

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

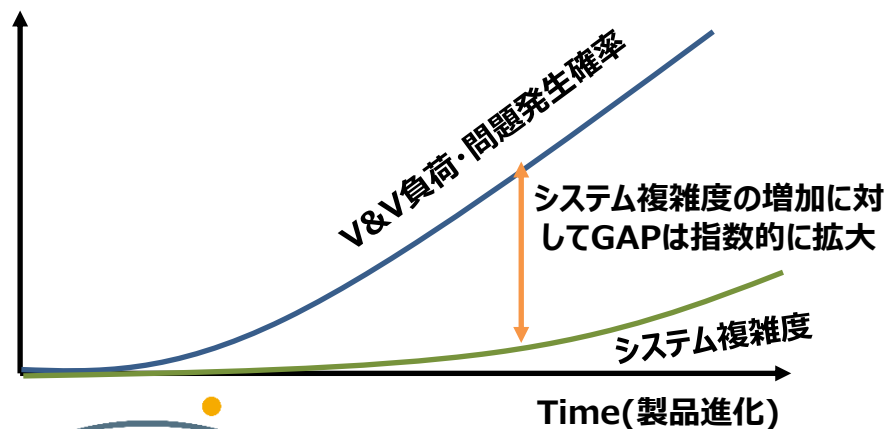
- **AOCSアーキテクチャ：Eurostar NEOをベースにミッション特有ニーズさせるためにOneSatを開発**
[補足]OneSatの製品ラインは、ESA, 仏, 英の支援を受けて開発)



1. エグゼクティブサマリ
2. 姿勢・軌道制御系
3. Verification & Validation(V&V)
4. センサ/アクチュエータ

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

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



**問題発生件数のトレンド
(開発後半に拡大)**

◆ 直近の目標

1. ミッションにおけるAOCS/GNC V&Vの重要性に対する認識と認知度を高める
2. ベンチマークケースを開発、コミュニティで新たなV&V手法の実証に用いることで研究開発を推進する
3. 横断的な思考と知識を強化するための研修、教育プログラムを開発する

- White Paperを作成(2023.7末発行予定)、ステークホルダに広める
- セミナーを継続するとともに、より多くのベンチマークケースを準備する
- コンペティション等を通じて、コミュニティがベンチマークケースを使用することを支援する

• セッション内容(参考)

- 活動紹介に続き、パネルディスカッション、参加者参加型アンケート等のインタラクティブなやり取りを実施

(アンケート例)

- ✓ QCDのQを満たすことを前提にコスト、納期を削減するために集中すべきか

⇒ (コスト)要求工学・予算とアビオニクスで50%, (納期)同左(58%)

- ✓ どのくらいベンチマークケースがコミュニティに役立つか ⇒ とても役に立つ(71%)

- ✓ 政府/産業界がプロセスにツールを適用するために最も重要な要素は何か

⇒ ドキュメント、ユースケース/例(58%)

- ✓ AI/MLがV&Vに役立つと思うか ⇒ Yes(47%), Maybe(46%)

要求とコストのバランスが求められる

期待度は高い

肯定的・懐疑的が半数ずつ

◆ Technology Harmonisation

欧州宇宙分野において、より協調的な研究開発活動を実現し、欧州産業の世界的競争力を支え、将来の宇宙ミッションの成功を確実にする手段として、強力な技術基盤を確立するためのプロセス。これには、ESA等の官、企業等のステークホルダ間の協議、合意のプロセスを通じて、研究開発の現状とニーズを構築し、協調的なEuropean Space Technology Roadmaps/European Space Technology Master Planを作成することが含まれる。

◆ 2023年改定の準備：AOCSにおけるToC*1の主要要素

1. センサ・アクチュエータ(2020年版の再検討)
2. 制御技術
3. 推定・誘導技術
4. 航法・最適化技術
5. オンボード判断・自律化
6. AOCS/GNCアーキテクチャ
7. **AOCS/GNC V&V(モデリング含む)**

欧州が考えている技術/産業進展に必要な主要分野

*1)Theory Of Constraints

20 YEARS OF HARMONISATION

163 HARMONISATION ROADMAPS SINCE 2000

3800 ACTIVE ROADMAPS ACTIVITIES

52 ACTIVE ROADMAPS

≈10 TOPICS/YEAR

62% ROADMAPS ACTIVITIES IMPLEMENTED

60% OF THE APPROVED ROADMAPS BUDGET IS INVESTED INTO HIGH PRIORITY ACTIVITIES

1. エグゼクティブサマリ
2. 姿勢・軌道制御系
3. Verification & Validation(V&V)
4. センサ/アクチュエータ

◆ 3D LiDARの一般的な課題

計測レンジ・精度のバランス

- 計測レンジ
1m程度から数kmまでの計測レンジが求められる
近距離：飽和しないように感度を抑える & 遠距離：微弱なリターンでも検出できるよう感度を上げる

感度を上げたいが近距離の制約あり

近距離レンジの感度が計測精度を制約

- 計測精度
精度を上げるためには高い感度が求められる
(特にドッキング時等の近距離)

「リフレクタ無」の方が幅広い反射率を想定する必要があり「計測レンジ・精度のバランス」は取りづらい

リフレクタ有
(協力体に多い)

- 真の反射光の識別
窓、MLI、OSR等の反射率が高い物体からの反射も含んだ光からリフレクタからの反射光を識別する必要がある

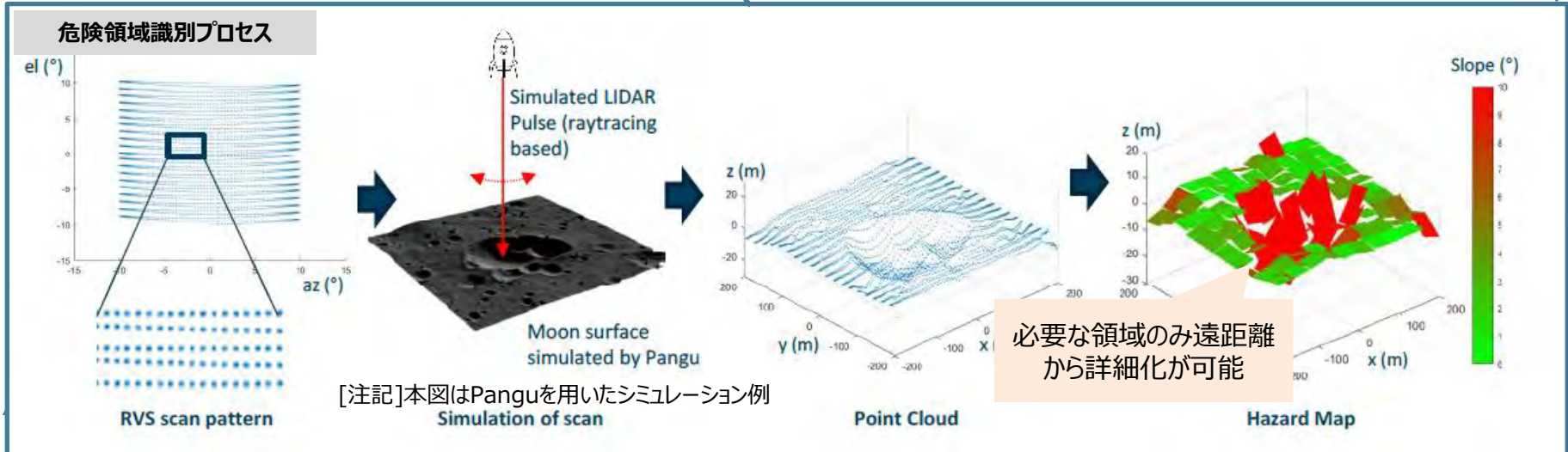
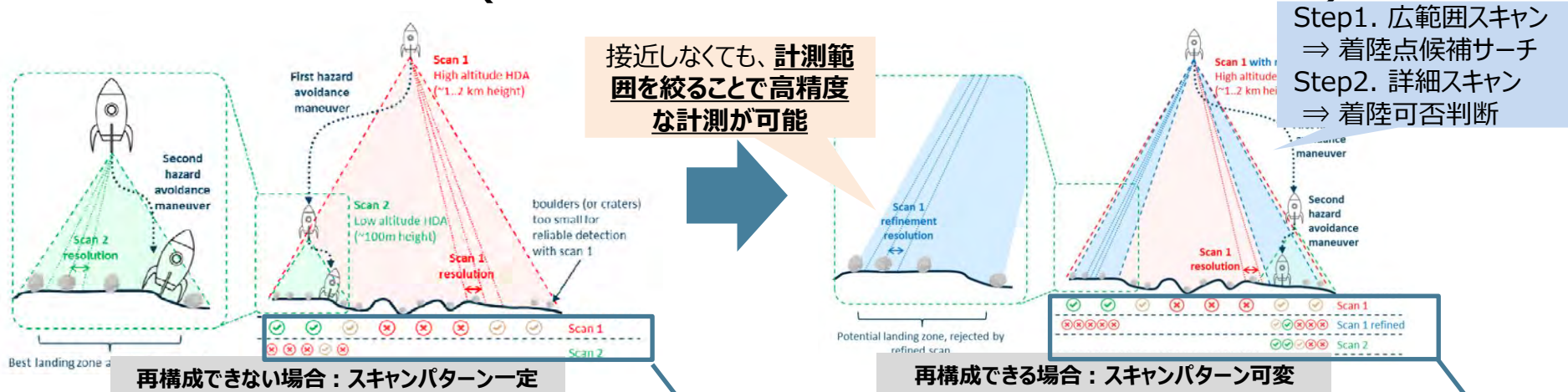
リフレクタ無
(非協力体に多い)

- 幅広い反射率の物体への対応
ブラックカプトンのような黒い物体からOSR^{*1}のような反射率の良い物体までに対応するため、十分な感度を保ちつつ、強いリターンで飽和しないようにする必要がある

*1 : Optical Solar Reflector(放熱面に用いられる熱制御材)

RVS3000-X : 幅広いユースケースを単一ハードウェア構成でサポートできるよう開発を進めている
キー技術 : 自律的に再構成可能なフライトソフトウェア

◆ **RVS3000-Xのユースケース例(HAD:HAZARD DETECTION AND AVOIDANCE)**



◆ RVS3000-Xの代表的な機能

ミッションごとにフライトソフトウェアを再構成、軌道上で自律的^{*1}に動作することで、ランデブー/ドッキングの一連の動作、想定されるターゲットを幅広くサポートする

*1) フレーム毎の結果に基づき、スキャンパラメータや用いるアルゴリズムを選択

Single Retro
Tracking

Retro Pattern
Tracking

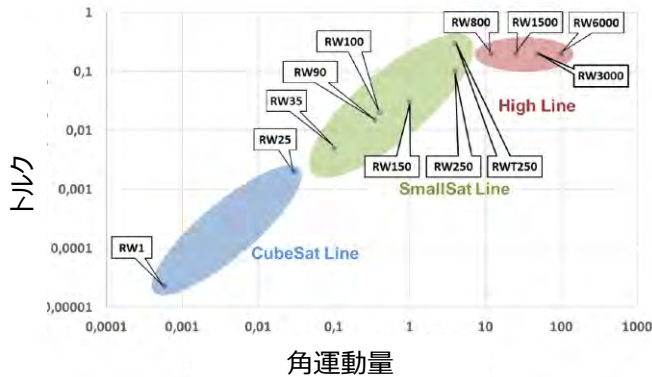
Barycenter
Tracking

Model-based
Pose
Estimation

ユースケース	FOV 内に単一のリフレクタがあるシナリオ用(遠距離の物体含む)	協力体をターゲットとし、FOV 内に既知のリフレクタが3つ以上あるシナリオ用(ISSドッキング等)	Model-based Pose Estimationが利用できる距離までのターゲットをトラッキングするシナリオ用	MEV-1,2のようにの形状が既知のターゲット(リフレクタ無)へのランデブー・ドッキングシナリオ用
内容・特徴	FOVにおけるすべての光源から想定されるターゲットを選択する必要があることから、FOVサイズを自律的に調整することで性能を最大化	最低3つの既知のリフレクタがあれば2つの宇宙機間の6自由度が計測可能であり、FOVサイズとスキャン中心を自律的に調整することでスキャン密度を最適化	重心を計算し、点群を囲むバウンディングボックスにFOVサイズを調整(解像度を向上)しながらターゲットの位置情報を提供する	点群とCADモデルから推定される内部リファレンスとのモデルマッチングにより6自由度を計測(数deg/sの角速度であれば初期姿勢も推定可能)ターゲット全体でなく特定の特徴点にフォーカスすることで高精度化も可能

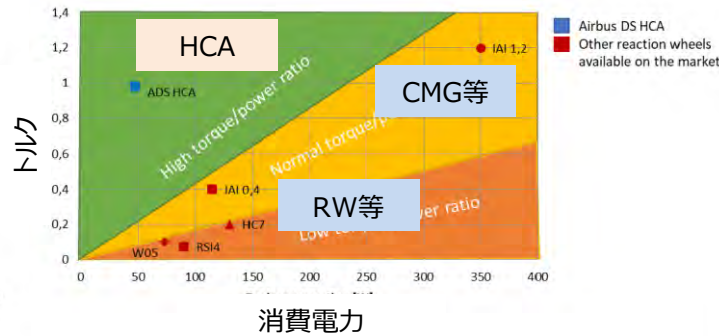
センサ・アクチュエータ関連のトピック

**RW駆動エレキの
部品グレード選択**
Astro-und Feinwerktechnik
Adlershof GmbH



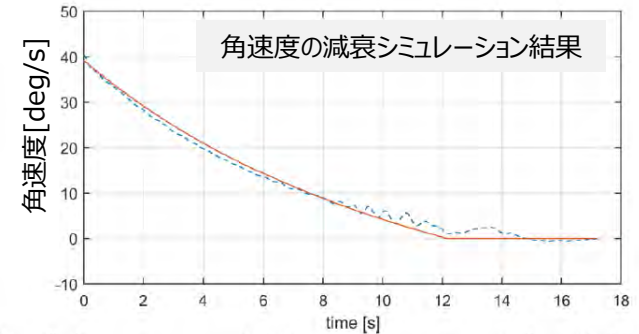
**高トルク/電力効率
アクチュエータ(HCA)**
Airbus Defence and Space
France

*1) High Capability Actuator



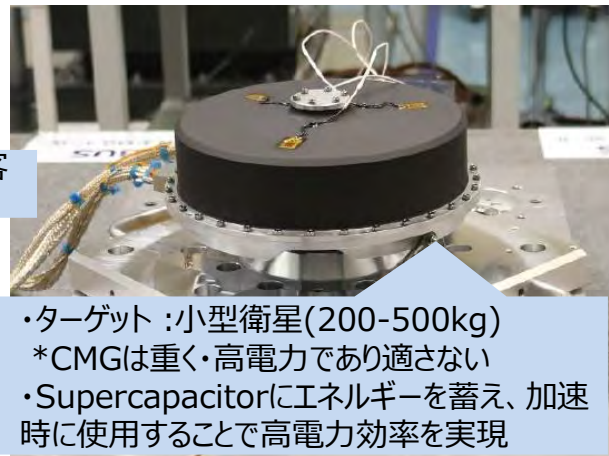
**低コストで衝突リスクを低減+
捕獲されやすい環境の保持**
Airbus Defence and Space
France

制御不能となった衛星の連鎖的衝突の防止
⇒ **受動的な減衰装置**により捕獲しやすくする試み(**低コスト・低リスクで実現可能**)



Products	WDE Type			
	COITS	Mixed	Space	Automotive
RW1	X			
RW35	X			
RW90	X			
RW100	X			X
RW150	X	X		X
RW250		X	X	X
RWT250		X		
RW800		X	X	X
RW1500		X	X	X
RW3000		X	X	X
RW6000		X	X	X

幅広いラインナップに加え、顧客が部品レベルの選択が可能



・ターゲット : 小型衛星(200-500kg)
*CMGは重く・高電力であり適さない
・Supercapacitorにエネルギーを蓄え、加速時に使用することで高電力効率を実現

HCA外観

地球磁場と衛星角速度を利用して受動的に減衰



DETUMBLER外観

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」
Small Satellite Conference 2023
参加報告書

一般財団法人衛星システム技術推進機構
Advanced Satellite Systems Technology Center (ASTECC)

2023年 8月

Small Satellite Conference 2023(37th)



テーマ : Mission at Scale

ここ数年New Spaceを中心に多くの企業・構想の立ち上げが見られてきたが、投資熱の落ち着きとともに継続的な事業・活動としてスケールできるかが1つの課題として注目されている。NewSpaceもこれを転換期を捉え、今年は本テーマに関連する講演が多く見受けられた。関連性は定かではないが、スケールした際のユーザとなる安全保障関係の参加者・講演が例年より多い印象であった。

➤ 要旨

米国ユタ州 Loganのユタ州立大学にて毎年開催される“小型衛星”にフォーカスしたカンファレンス。

3700人程度(44か国, 1000以上の団体・組織)の参加があり、Weekendに開催される大学を中心とした発表にはじまり、Weekdayは、NASAや各国産業界に加えDARPAやAFRL等の安全保障関係機関も含めた発表(テクニカルセッションとサイドミーティングで構成)が催された。

✓ テクニカルセッション

セッションテーマに沿ったプレゼンテーション(1セッション6~8件, 1件あたり15分程度)

*2023年の特徴としては、例年のセッションに加え、軌道上サービスに関連するSSA/STM、フォーメーションフライト/RPOに関するセッションがそれぞれ1セッションあり、当該分野が技術的に注目されている分野であることが伺える

✓ サイドミーティング

企業、組織、団体が催す1h程度のセッションであり、プレゼンテーションやパネルディスカッション、ワークショップ等多様な形態がある

➤ 展示場

266団体の出展があり、日本からもJapan Boothだけでなく、JAXA、AXCELSpace, PALEBULE等、個別の出展も見受けられ、参加者との議論だけでなく、新たな発表等も多数行われた

(参考 : [SpaceNews](#))

Small Satellite Conference 2023(37th)



会場のユタ州立大学の
キャンパス
(米国ユタ州・Logan)



テクニカルセッションの会場



展示会場
(上記とは別の会場もあり)

エグゼクティブサマリ

◆ 環境変化

既に軌道上にある衛星数は飛躍的に増加

⇒ 大規模な生産ができるだけでなく、大規模な運用が求められている

Mission at Scale

◆ 求められるアクション

従来スパイラルの脱却

「エンジニアリングの増加」⇒「多くのテスト・コストの増加」⇒「リスク許容度の低下」⇒「エンジニアリングの増加」…

意思決定負荷の低減

専門家が1つ1つ対処することで生じるレイテンシ(対応の遅れ)

パートナーリングの促進

得意でない分野がスケーリングのボトルネックとなるが、経験を積み重ねるには時間が必要

◆ 支える技術(例)

Edge computing

オンボードでのデータ処理、意思決定によるユーザビリティの向上

- データ圧縮
- データタグ付け
- 意思決定

ハードウェアだけでなく、ユースケースやアプリケーション開発を支援するプラットフォームの進展が見受けられる

Cutting Edge Tech

➤ **Interoperability**
Space-BACN*1を1例として、システムとシステムをつなぐ研究開発が見受けられる

➤ **Electronics**
3DHI*2等のより高性能で複雑な回路を目指した研究開発が見受けられる

Mission at Scale

Side Meeting : Benchmark Space Systems

23-002-R-013

Mission at Scale

● Optimizing for Scalability

– Mobility Architectures to Support the Evolving Space Ecosystem

- 推進系製造企業のBenchmark社は、プロトタイプ開発から量産体制(600set程度生産)へのフェーズ移行における生産フロー改革が必要でかつ、大規模な運用を支援できる仕組みの必要性を認識
- 本SideMeetingでは、Benchmark社のフェーズ移行事例に基づき、スケール化するうえで論点は何で、何が必要となるのか、参加者の置かれている状況踏まえディスカッションが行われた

◆ フレームワーク

	検討条件(例)	At Prototype	At Scale
設計	<ul style="list-style-type: none"> • オーダーメイド vs 既製品 • カスタム vs (semi)COTS • For 性能 vs For コスト vs For 期間 	カスタム設計 (特注品)	モジュール設計 (設計支援自動化)
調達	<ul style="list-style-type: none"> • QCD • Just in Cost vs Just in Case • 材料に対する要求、計画 	個別管理	資材所要量管理 (MRP*1ツール)
製造	<ul style="list-style-type: none"> • 組み立て方法 • ボトルネック 	手作業 (作業指示書)	現場-エンジニアの 綿密なリンク
組み立て 試験	<ul style="list-style-type: none"> • 試験の自動化 • Self-testアーキテクチャ 	手順書	試験とレポート生成 の自動化
運用	<ul style="list-style-type: none"> • 運用への人の介在 • Highレベル・Lowレベルコマンド 	手作業 (エンジニアが対応)	ハイレベルの自動化 (SmartAIM™)

*1)MRP : Material Requirements Planning System(資材所要量計画)

Side Meeting : Benchmark Space Systems

23-002-R-013

Mission at Scale

➤ 「生産」側の課題：従来のスパイラル

「エンジニアリングの増加」⇒「多くのテスト・コストの増加」⇒「リスク許容度の低下」⇒・・・

➤ 「顧客」の期待：スケーラビリティの観点で専門性を低減

1. 何百、何千機の運用では、**意思決定をなくし、自動化する方法**を求めている
2. 軌道上評価等において、手作業でかつ専門家をまじえた議論の必要性をなくし、**迅速な対応の実現**を求めている
3. **すぐに使えるようなもの**を求めている

➤ 「生産」と「顧客」を整合させるための論点

1年に数百万台生産する自動車ではなく、年間1000機程度が対象

⇒ 車輪の再発明をする必要はなく他から取り入れることは重要だが、意味があるかを考える必要がある

◆ スケーラビリティを考えるための論点

スケールと柔軟性のバランス

製造規模と顧客の多様性に適した手法の選択

モジュール化の範囲

性能・コストだけでなくサプライチェーンも含め共通とする部品・プロセス・設計の検討

Make v.s. Buyの判断

学び・経験を積み重ねるには時間がかかり、得意でない分野のパートナーをみつけることが重要(自社の強みを把握)

- ①設計：複数の異なる顧客をスピーディにサポートするため、セミカスタムデザイン/モジュール設計
- ②調達：モジュール設計を実現するため、**他業界の知見・ツール**を利用したトレーサビリティ管理
- ③製造：限られた製造台数であるため、完全な自動化ではなく設計と現場のリンクを強化
- ④組み立て/試験：試験自動化を実現するため、**既製品のソフトウェア**による試験・データ管理
- ⑤運用：製品価値を高めるため、運用支援ソフトウェア(自律化)を開発

Side Meeting : Benchmark Space Systems

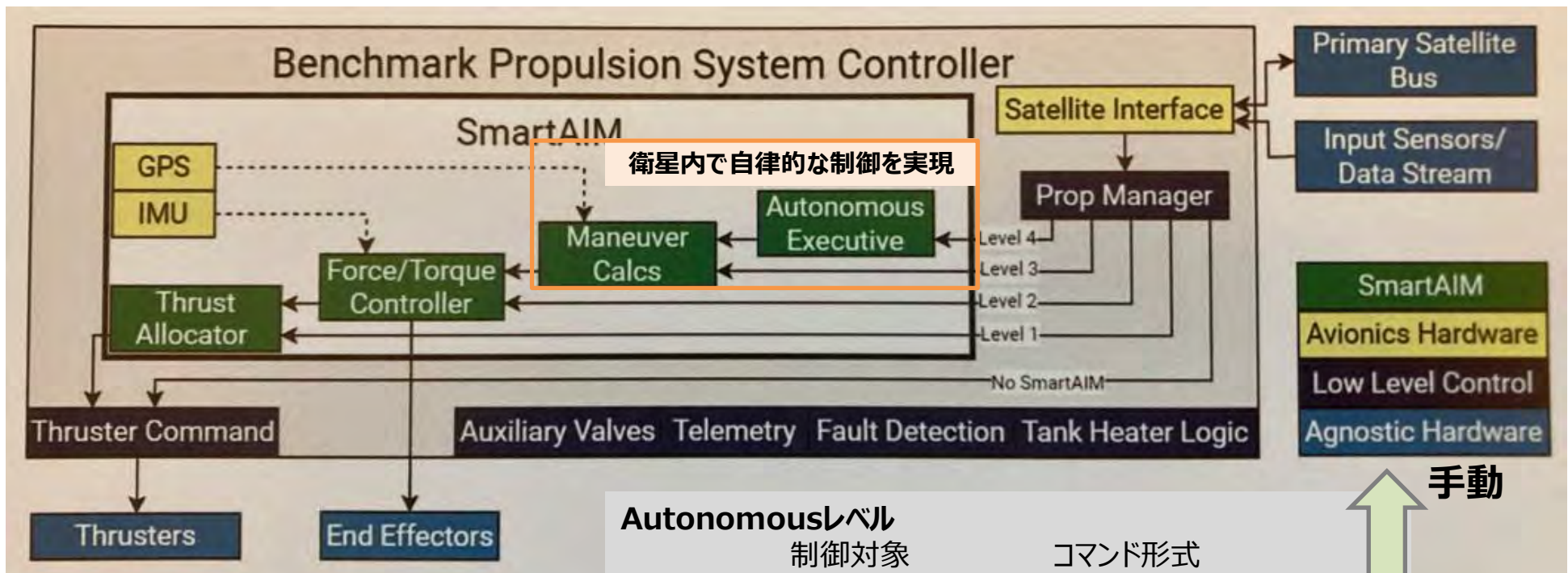
23-002-R-013

◆ SmartAIM™ Make v.s. Buyの判断 : パートナリングの例

Mission at Scale

- 専門知識の不足から自社製品(推進系)の性能を顧客が十分に引き出せていない現状を変えるため、Kayhan Space社と提携して運転支援ソフトウェア(SmartAIM™)を開発
- ユーザビリティの観点で、専門知識の低減に資するだけでなく、GNC*1シミュレーションの迅速化にもつながらる(自動化レベルを選択でき知識レベル・用途に応じた使い方が可能)

*1)GNC : Guidance Navigation Control



Autonomousレベル

Autonomousレベル	制御対象	コマンド形式
Level1.	スラストベクトル	力・トルク
Level2.	姿勢・速度	姿勢・速度変動量
Level3.	マヌーバ	姿勢・達成条件
Level4.	軌道	軌道要素・衝突回避条件

Edge computing

Side Meeting : UNIBAP

23-002-R-013

Edge computing

● Spacecloud Enabled Edge computing and Autonomy

- UNIBAP社の実績報告に続き、Craft Prospect社, NASA Ames研究所, AWS社, Little Place Labs社, ハワイ大学, Troxel社がピッチ形式でオンボードコンピューティングに関して発表
- 昨年度までのハードウェアを中心とした進展報告から変わり、ユースケースが報告の主となっており、実利用に向けた進展が見受けられた

◆ メリットと課題

衛星ミッションの課題

・大容量データ
⇒ ダウンリンクのボトルネック

・大量のデータ
⇒ 価値の難読化

・地上との通信時間
⇒ 意思決定までの時間増大

オンボード処理の利点

✓ データの圧縮
✓ ダウンリンクの優先付け

✓ データのタグ付け
(地上から検索が可能)

✓ オンボードでの意思決定
✓ 自律的な運用

実現/適用の課題

✓ データ損失のリスク

✓ 精度、電力、レイテンシのバランス

✓ 複雑化に伴う多様性の確保
(開発費・期間の増大)

✓ AIの耐障害性
(クリティカルアプリへの影響)

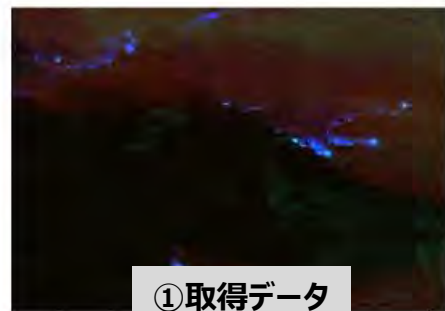


Side Meeting : UNIBAP

Edge computing

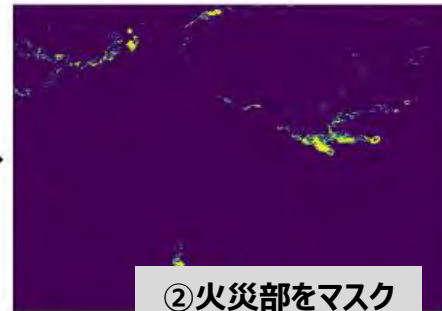
➤ データ圧縮、データのタグ付け
データ圧縮の方法は可逆圧縮(データ損失なし)やマスキング、インサイトのみ抽出等がある

◆ CraftProspect社の事例



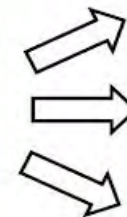
①取得データ

Raw payload data



②火災部をマスク

Fire mask extraction



③プロダクト化
(選択肢あり)

アラート
(サイズ:小)

Alert, < 100 KB

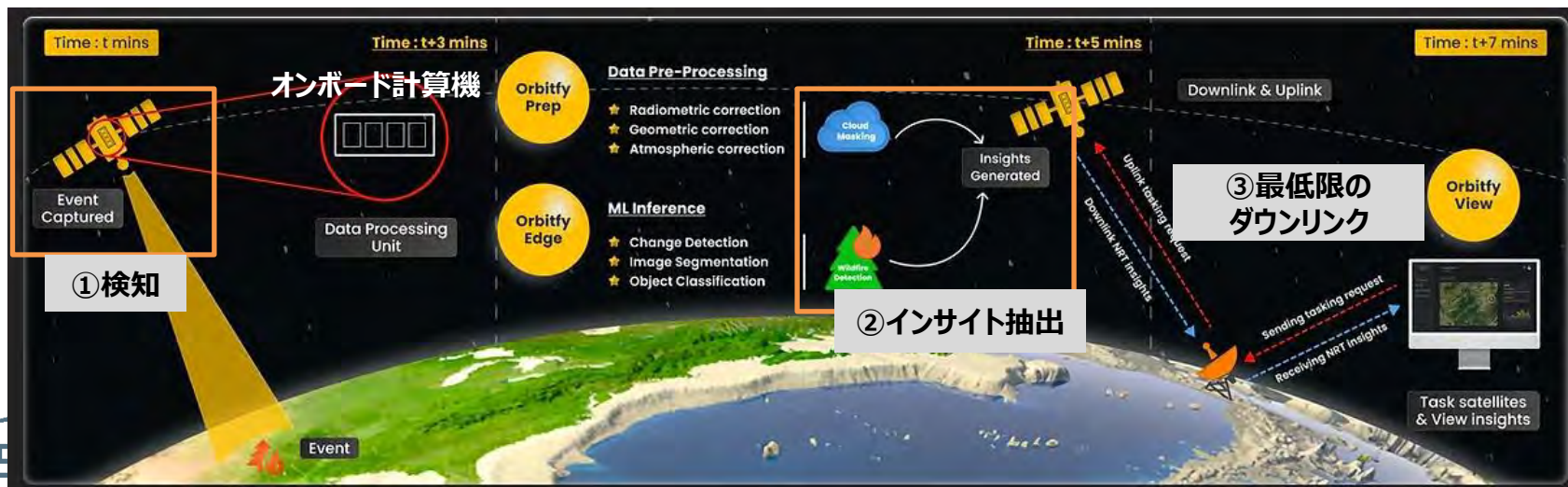
詳細レポート
(サイズ:中)

Detailed report, ~ 100 KB

空間情報
(サイズ:大)

Spatial products
Thumbnails, 0.1 - 100 KB
Fire mask, 6 KB
Multispectral image, 30 MB

◆ Little Place Labs社の事例

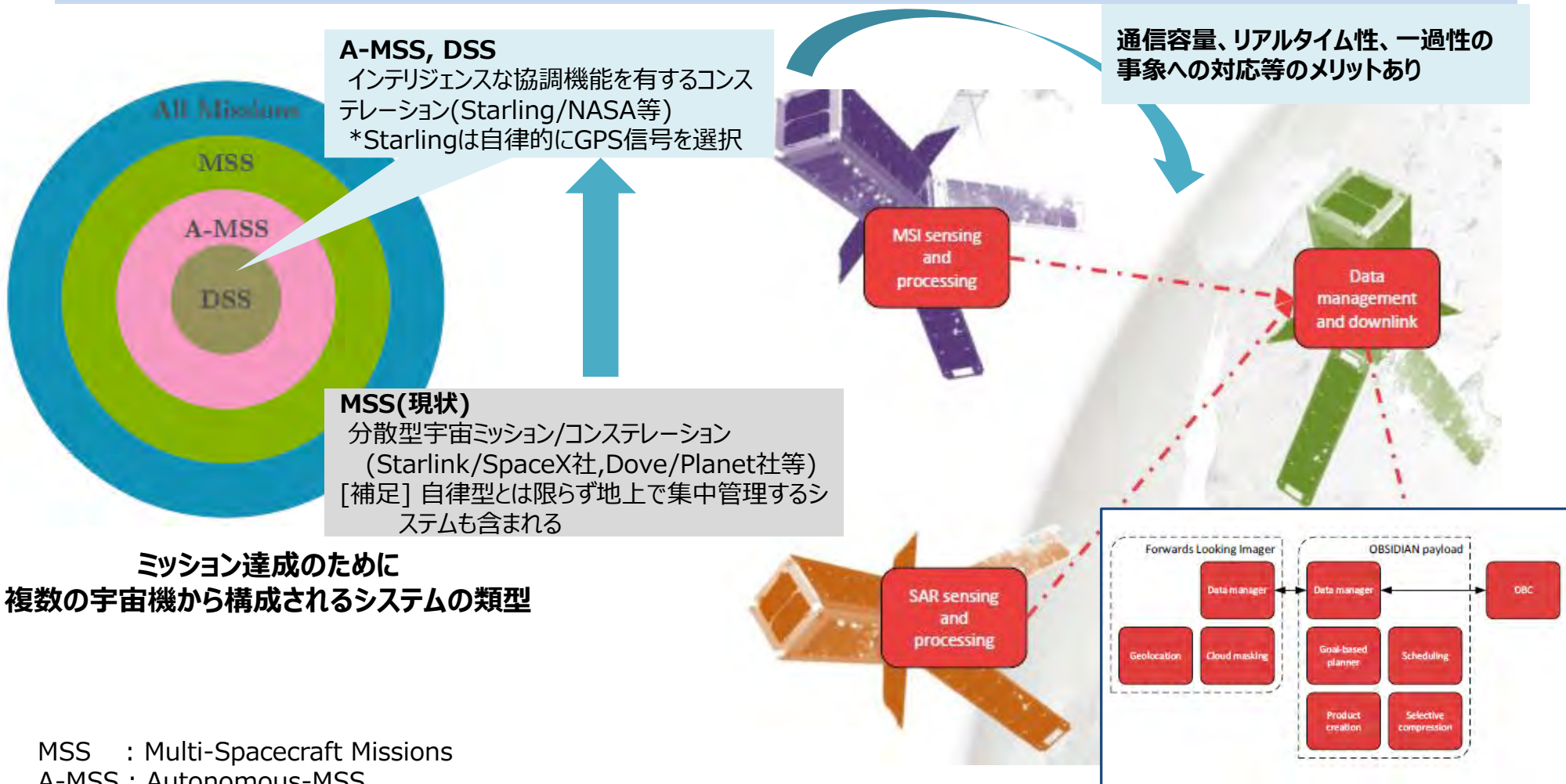


Side Meeting : UNIBAP

➤ オンボードでの意思決定

目的達成のために必要な選択/最適化(Goal-based Planner)やスケジューリング等がある

Edge computing



ミッション達成のために
複数の宇宙機から構成されるシステムの類型

MSS : Multi-Spacecraft Missions
A-MSS : Autonomous-MSS
DSS : Distributed Space System

[補足] A-MSSはシステムの中の1衛星、DSSは複数の衛星が決定権を保有する

分散型アプリケーションのイメージ

Cutting Edge Tech

Keynote Speaker : DARPA/Dr. Stefanie Tompkins

23-002-R-013

Cutting Edge
Tech

- 活動範囲を広げ、新規参入する企業・教育機関とのコネクションを強化、最高のマインド・アイデアを集結することを目的としてDARPA Connect を2022年に立ち上げたこと、及び注目技術を紹介

カンファレンスでの発表概要(一部、ASTEC調査結果を補足)



組織

- **DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency**
安全保障用途の新技术開発および研究を行うアメリカ国防総省の機関
(インターネットの原型となるARPANETやGPSの開発等、社会インフラを支える技術開発を担ってきた)
 - ・ 構成 : 220人程度の政府職員
 - ・ 任期 : **4~6年でハイリスク・画期的なアイデアを短期で試行**するとともに、継続性を確保するために、チームの半分、および契約、セキュリティ、人事は正社員としてしている
 - ・ 総予算(研究開発費除く) : 4 Mドル程度
*大統領と国防長官の直轄組織であり米国軍から直接的な干渉は受けていない

予算

- **研究開発費(年間) : 4.1Bドル程度**
200~300のプログラムを12のポートフォリオに分けて管理(厳密な区分ではない)

特徴

- 任期が4~6年であるため、プログラムのライフサイクルを早くできるよう、プログラムマネージャが早く動けることに重点を置き、任期中にプログラムの立ち上げから結果の確認までを行う。
- Aerospace Corp.と異なり内部に研究所/インフラは有さず、実際の研究開発は企業や大学が担う。
- **プログラムは明確な目標を掲げており、その目標を達成できない場合にはプログラムを中止**する。そのため、毎年50を超える新しプログラムを立ち上げるが、アクティブプログラムは常時200程度となっている。

研究開発項目 (例)

- **Space Environment Exploitation (SEE) program** : 1時間単位で72時間先まで正確な宇宙天気を予測
- **Space-WATCH**
商業/政府の低軌道衛星に搭載された、膨大な量の低コスト搭載センサを活用して低軌道上にある物体をリアルタイムに監視
- **Interoperability** : Space-BACNを1例として、Network of Networkの実現に向けたNetwork Controller技術
- **Electronics** : 高度な3Dパッケージングのための異種材料や異種部材を統合するヘテロジニアスインテグレーション

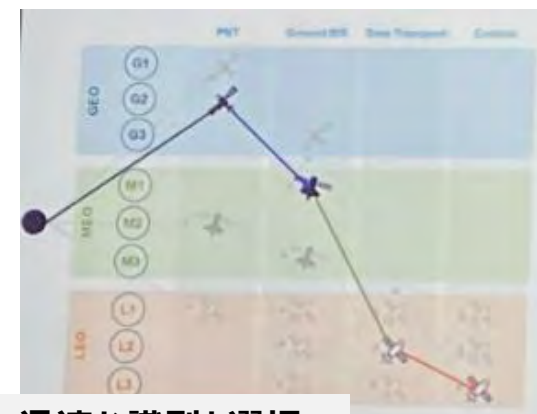
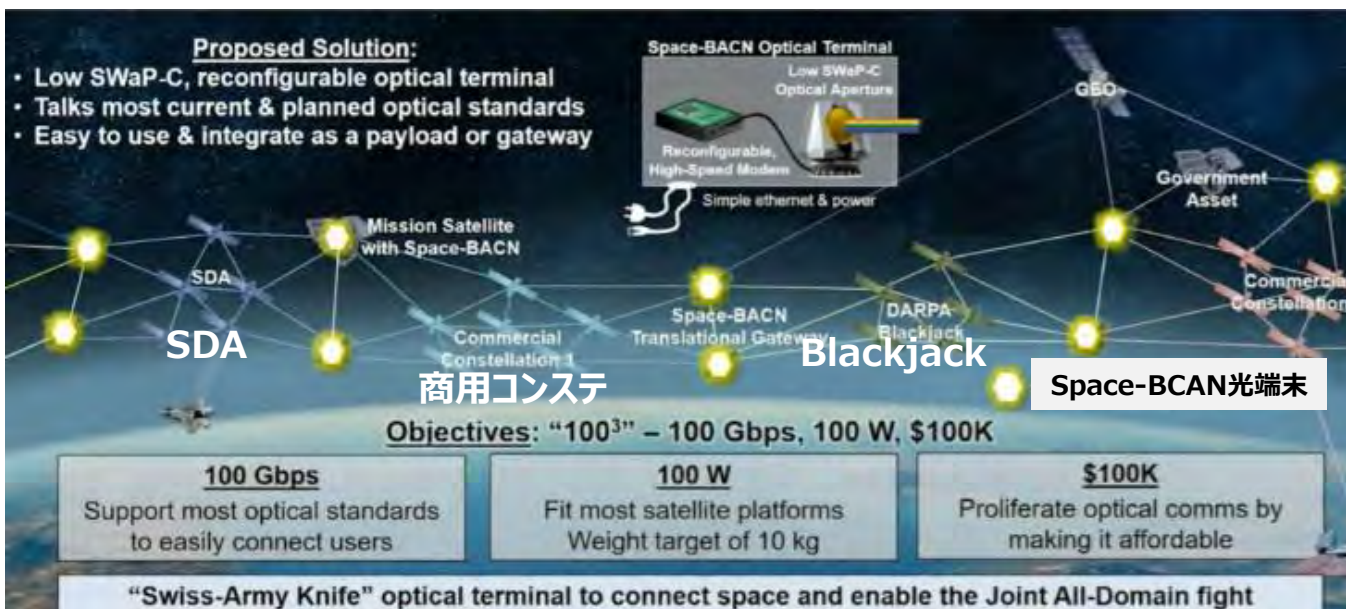
Keynote Speaker : DARPA/Dr. Stefanie Tompkins

23-002-R-013

● Interoperability/SPACE-BACN

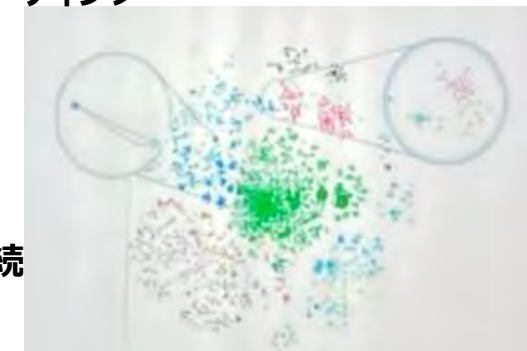
Cutting Edge Tech

- Space-BACNを1例とした、Network of Networkの実現に向けたNetwork Controller技術
⇒ 多様なネットワークパスの構成要素を迅速に識別・選択、異なるグループ間のデータ変換を実現



迅速な識別と選択

ルーティング



接続

translation anything to anything
(データの変換)



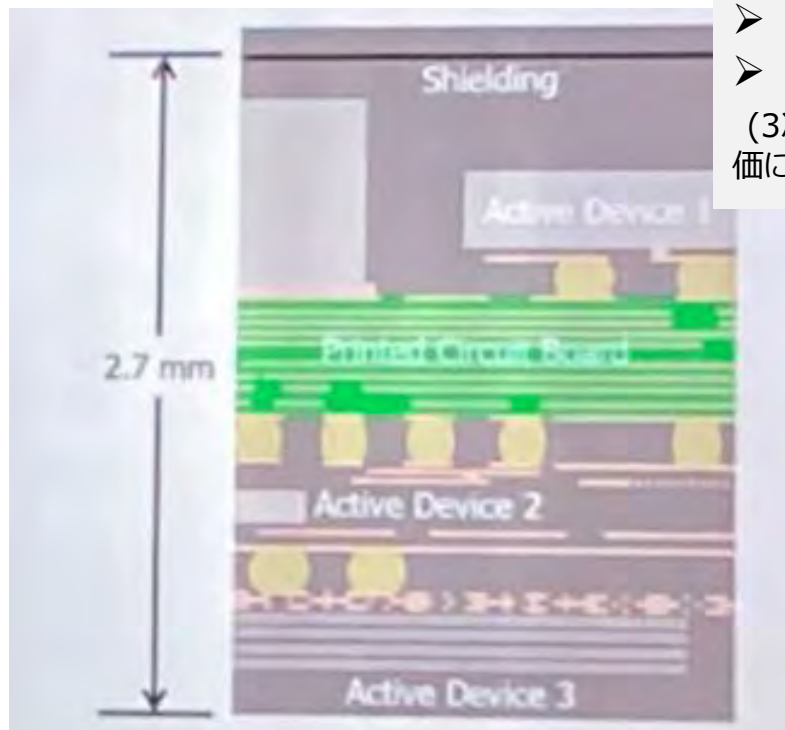
Keynote Speaker : DARPA/Dr. Stefanie Tompkins

23-002-R-013

● Electronics

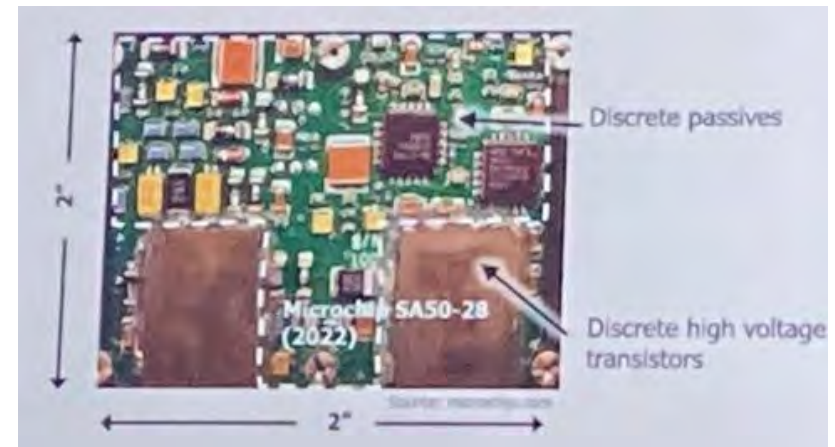
Cutting Edge
Tech

- 高度な3Dパッケージングのための異種材料や異種部材を統合するヘテロジニアスインテグレーション
⇒ 積層構造の上端、下端だけでなく、各層でも放熱を可能とすることでより高度なアプリケーションを実現



宇宙環境に耐える3D異種集積マイクロチップ

- **メリット**：集積度の増加や複雑度の高い回路設計が可能
- **課題**：製造に加え、熱・放射線に関する技術
(3次元的に異なる特性の物質をあわせることで従来の技術流用ではなく、設計・評価に関する新たな技術が必要)



電子機器に効率的かつ効果的な電力供給の実現

EDHPC2023 参加報告

一般財団法人衛星システム技術推進機構
Advanced Satellite Systems Technology Center (ASTECC)

2023年 10月



(財)衛星システム技術推進機構

EDHPC 2023概要

EDHPC (European Data Handling & Data processing Conference for space)

@Juan-Les-Pins, France 2-6 October 2023

- **要旨：**
データハンドリングとオンボードデータ処理に焦点を当てた、ヨーロッパ主体のカンファレンス。従来のSpaceWireという通信規格に焦点を当てて実施していたInternational SpaceWire Conferenceから、データハンドリング、データ処理にスコープを拡大して実施する形となり、今回が第1回となる。次回の開催は2025年の予定。
- **発表数：** 172件(ポスター含む)
日本からの報告はMelco(民生GPU)、NEC/NST(SpaceCubeMk4) の2件。
- **参加者：** 会場への参加者は340名程度。参加者は宇宙機関、企業がほとんどであり、アカデミアからの参加はごくわずか。国/地域別で見ると欧州(特にフランス)が多数を占める。日本からも10名程度の参加(JAXA, ASTEC, Melco, NEC/NST, SpaceCompass/NTT)とUSに並び、欧州外からは多数の参加者となっていた。
- **発表内容の傾向：**
各企業やESAの開発内容を説明する発表が多い。特に、開発成果の報告だけではなく、開発計画、状況の報告も多く、カンファレンスでのフィードバックにより計画を精緻化していく姿勢が見受けられた。



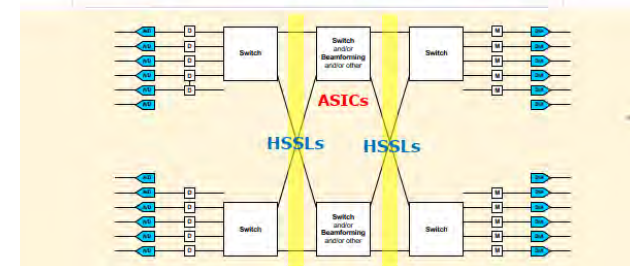
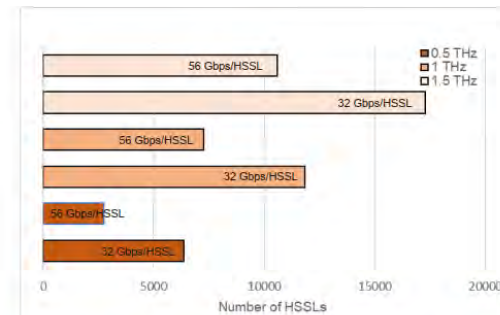
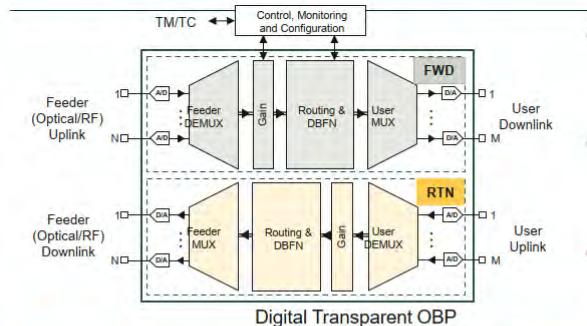
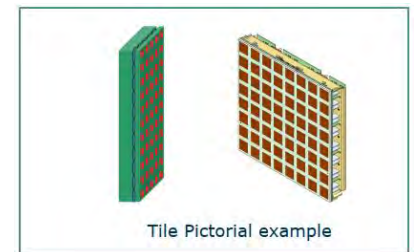
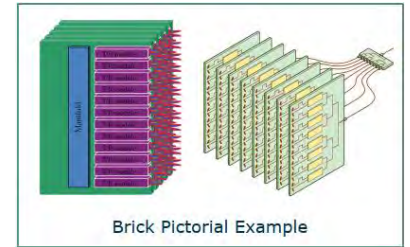
Keynote Speech前の様子

主要トピック

項目	内容
通信	<ul style="list-style-type: none"> ➤ GEO Transparent型の大容量化は数100Gbpsまでは実現でひと段落 ➤ 次の開発の方向性としては再生中継、3GPP地上ネットワークとの接続。更なる半導体の微細化＋熱への対処が必要。
AI	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 観測分野でのユースケースはデータ量削減＋Tip & Cue ➤ VBNへの適用例も多数 ➤ 速度、精度、消費電力等の制約を満たす実装を如何に実現するか ➤ 宇宙特有のAI開発事項 (放射線耐性強化AI、更新パラメータ数の削減、教師データ生成)
標準化	<ul style="list-style-type: none"> ➤ SAVOIR/ADHA等の採用が進む ➤ ESAの標準化委員からは、ヨーロッパは多言語、多民族国家なので標準化を進めることは非常に重要と強調 ➤ AIRBUSの一部技術者からは、ESAからの要求があるからやっているという意見もあり
COTS	<ul style="list-style-type: none"> ➤ むやみなCOTS採用は余計なCOSTがかかる。COTS採用の戦略が重要と強調されていた。 ➤ COTS＋Supervisor等の様々な取り組みが報告

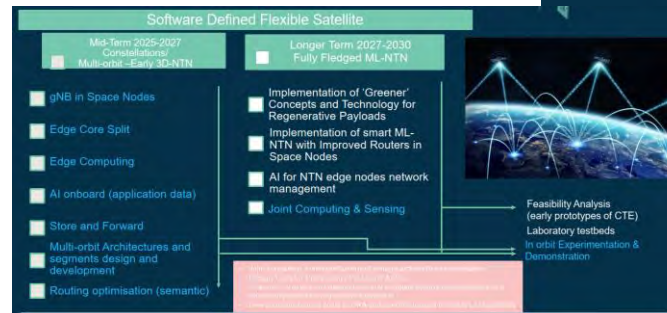
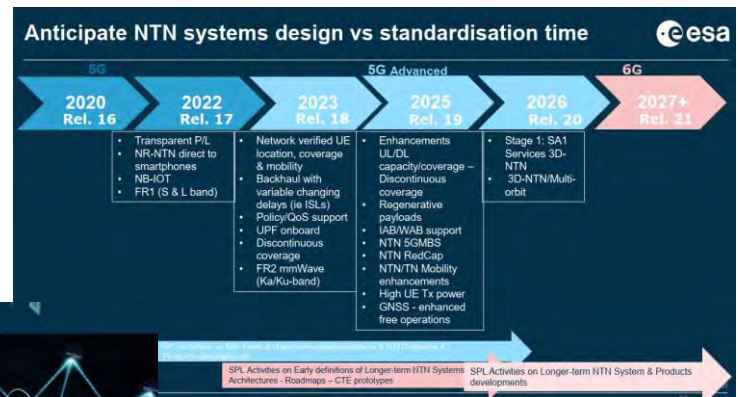
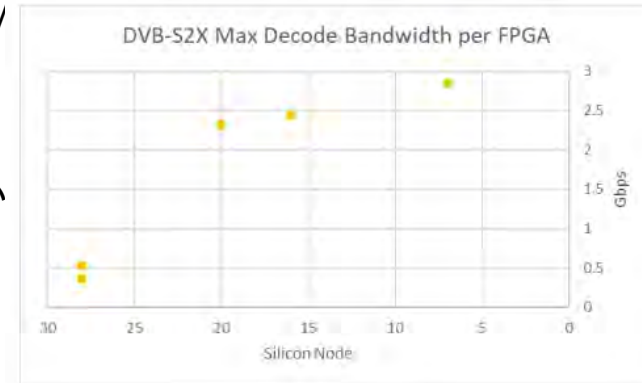
EDHPC Tutorial Satellite Payload Frequency payloads and instruments -Overview and challenges for data and signal processing: Satellite Communication ①

- ESAによる通信衛星のペイロード概要と将来見通しに関するチュートリアル
- Tbps級の大規模GEOは、現状のテクノロジーでは素子レベルのDBFを実現することが困難であり、Flexibilityの観点から最近ではMid-Class(200-300Gbps)程度の通信容量ではあるが、素子レベルのDBF, SDSによる柔軟性を持った衛星に代わりつつある。
Viasat-3, SES-17 → Onosat, Inspire
- アンテナの構造はLEOではサイズと質量を低減しやすいTile方式が進むがGEOでは熱設計が容易なBrick方式が主流。
- トランスペアレント型ペイロードは、ADC/DAC、FPGAの発展と共に性能を向上。最近ではペイロード内の高速インターコネクトが課題。



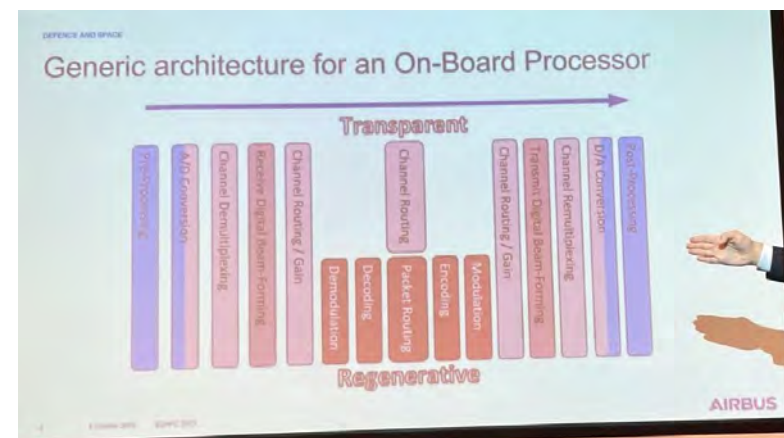
EDHPC Tutorial Satellite Padio Frequency payloads and instruments -Overview and challenges for data and signal processing:Satellite Communication②

- 再生中継は通信の柔軟性、リンクパフォーマンスの向上(パス毎のECC/再送制御等/適応変調等によるBER・通信速度の向上)、OISL等の別変調への載せ替え等今後のKey技術
- ただし、複雑性の増加と併せて、大幅な消費電力の増加が発生。
- 現状の最新のFPGA(~100W)においてもDVB-S2Xの復調は1石使って~3GBps程度しかできないため、300Gbps全てを復調することは現実的ではなく、選択された帯域に対して復調を行う形となる。
- 次世代再生中継ペイロードは以下の性能を目指して要素技術から開発中
 - Supported throughput >1THz
 - Digital beamforming >500GHz
 - Large number of ports >200
 - Up to 5GHz BW per port
 - Compatible with 5G/6G standards
- 開発している要素技術
 - 微細化プロセスのFPGA/ASIC ($\leq 7\text{nm}$)
 - 2.5D/3Dパッケージング
 - 効率的な信号処理アルゴリズム
 - 5G/6G接続
- 5G/6Gに向けてはStrategic Programm Line (SPL)として3GPPに参画しつつ、ARTES等を活用して基地局の搭載化等の開発を推進



On-Board Processing for Communication Satellites – Principles and Challenges

- 通信衛星ペイロードに対するAirbusの取り組みに関する報告
- トランスペアレント型ペイロードはINMARSAT-4から多くの実績がある。
- 再生中継型ペイロードはFeed/User間を一旦切れるので、通信の柔軟性確保の観点で多くのメリットあり。ただし、以下の課題あり
 - スループット: 5nmプロセス以降、112Gbps以上のシリアルリンク、光トランシーバの同一パッケージ化が必要。
 - 熱: 1石あたり、600W近い発熱を逃がす必要がある見込み。現状の機器内LHPでは100W程度が限界。
 - 100Gbps越えの高速シリアル通信
 - 信頼性・放射線耐性
 - ASICで変復調を実現してしまうと変復調方式の変更に対応できない。
- AirbusのOBPロードマップは右図
大容量のトランスペアレント、3GPP向け、コンステ向けと複数開発



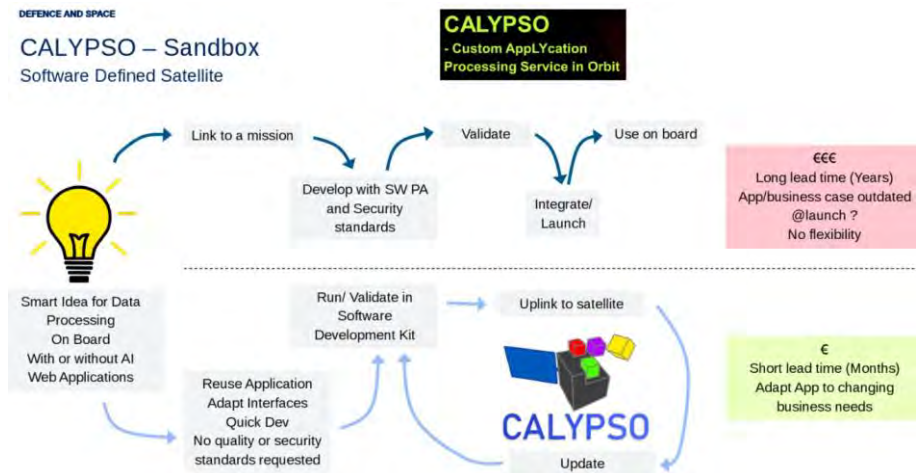
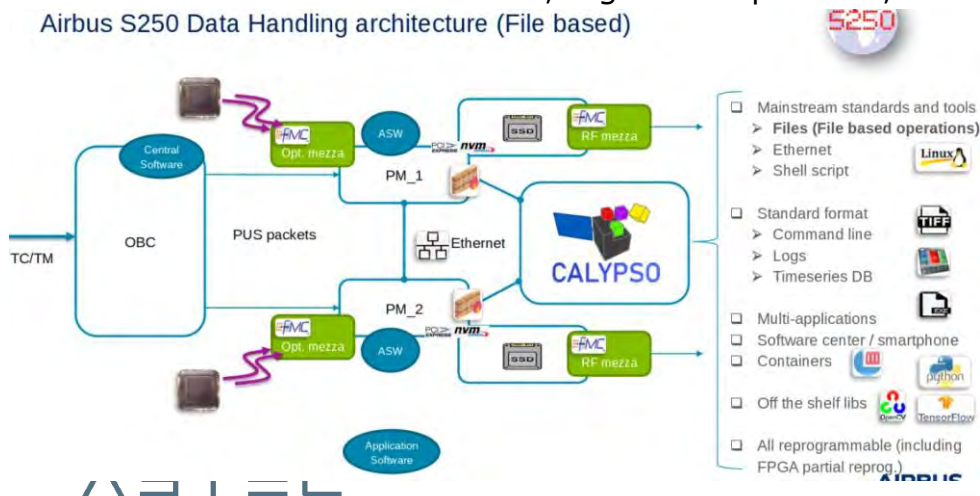
OBP Roadmap in Airbus

Product	GEN 3 IP	GEN 4 DTP	Hyperion	Thelia	Eos
	Gen3 Integrated Processor	Gen4 SMP (Small Modeler Processor)	Hyperion Processor (Gen5)	Thelia Processor (QPP)	Eos Processor (Constellations)
brw per I/O port	192 MHz	500MHz	Up to 2.5 GHz	Up to 1 GHz	TBD
Connectivity Capacity	2 GHz	2-50 GHz	640 GHz	~300 GHz	TBD
BW granularity	200 kHz	25 kHz	2 MHz	Few KHz to Few MHz	TBD
Digital IF	Baseband	BB/UHF/L-Band	Direct interface up to Ku/Ka band	Direct interface up to Ku/Ka band	Direct interface up to Ku/Ka band
SWaP	30 kg / 300 W	~20% Mass, ~40% DC power (modular)	10 time improvement in DC power & mass vs GEN4	TBD, better than Gen4, Reconfigurable/Scalable	TBD, Reconfigurable/Scalable
Specific function ready (FPGA / ACAP)	No	Yes	Yes	Yes, 5G and AI ready incl. Edge computing	Yes, 5G and AI ready incl. Edge computing
Beam-Formed capability	Yes	Yes	Yes	Yes	TBD
	150 MHz	15-30 GHz	Several 100 GHz	~ 100GHz	TBD

AI uses cases on EO satellites

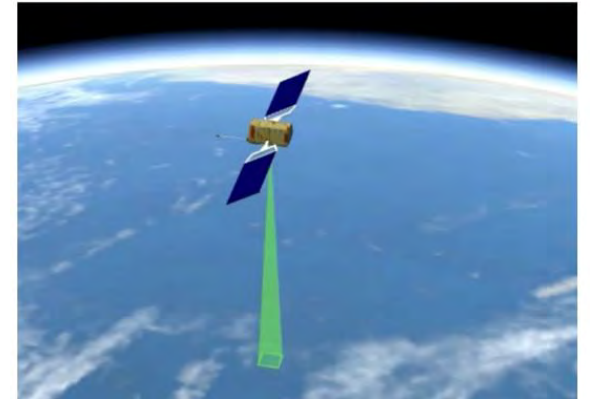
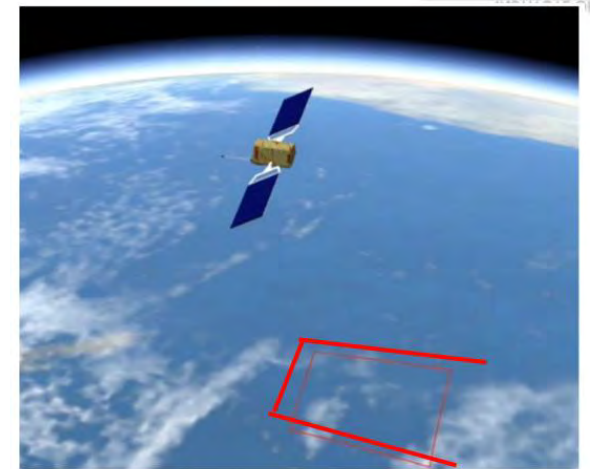
- AirbusでのEOでのAIの取り組み報告
- EOのS250シリーズのデータ処理の特徴
 - **File Based Data Handling Architecture**
(Linux等を有効活用するため。File basedを実現するためには高信頼ストレージが鍵となる。)
 - CALYPSO(Custom AppLYcation Processing Service in Orbit) Sandbox Objectives: COTS SWの使用
- CALYPSOSandboxにより、容易に軌道上の衛星に機能の追加ができる形となっている。
- 主なAIのUsecaseは以下
 - Geolocation Improvement : 熱歪み+ ポインティングエラーデータの学習
-> Pointing Error < 10m
 - Activity Monitoring(Boat Detection, Traffic measurement, Change Detect)
+Forest Fires
+Vehicle Tracking (抽出した車を次の衛星に通知して、継続してモニタも考えている。)
+Details Extraction, Higher Compression, Cloud Detection

Airbus S250 Data Handling architecture (File based)



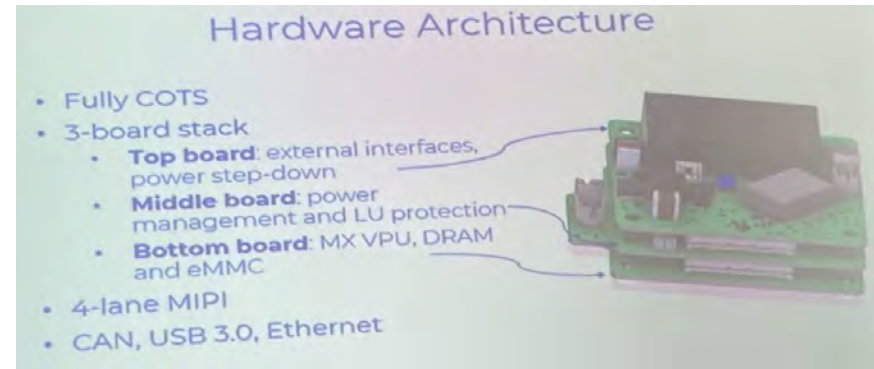
DUAL-CAMERA SATELLITE SYSTEM WITH ON-BOARD AI-BASED DECISION MAKING CAPABILITIES

- OHBのAIを用いたTip & Cue衛星の実現性検討の報告
- 2機の衛星のフォーメーションフライト。基本的な概念は以下。
 - 1機目の衛星は低分解能・広視野の常時観測を行い、AIにて山火事等の関心領域の有無、あった場合の位置を抽出。2機目の衛星に通信
 - 2機目は1機目の抽出した場所を高分解能・狭視野観測を実行
- 現状想定しているアプリケーションとしては、Floods, Oil Spills, Solar PV parks, Active fire, Floating plastic litter, Volcanic eruption等
- 現状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、この時間が処理時間制約となる。
- 今回は山火事に関して、Kria KV260(Zynq™ UltraScale+™ MPSoC)を用いた評価を行い、実現性を確認した。



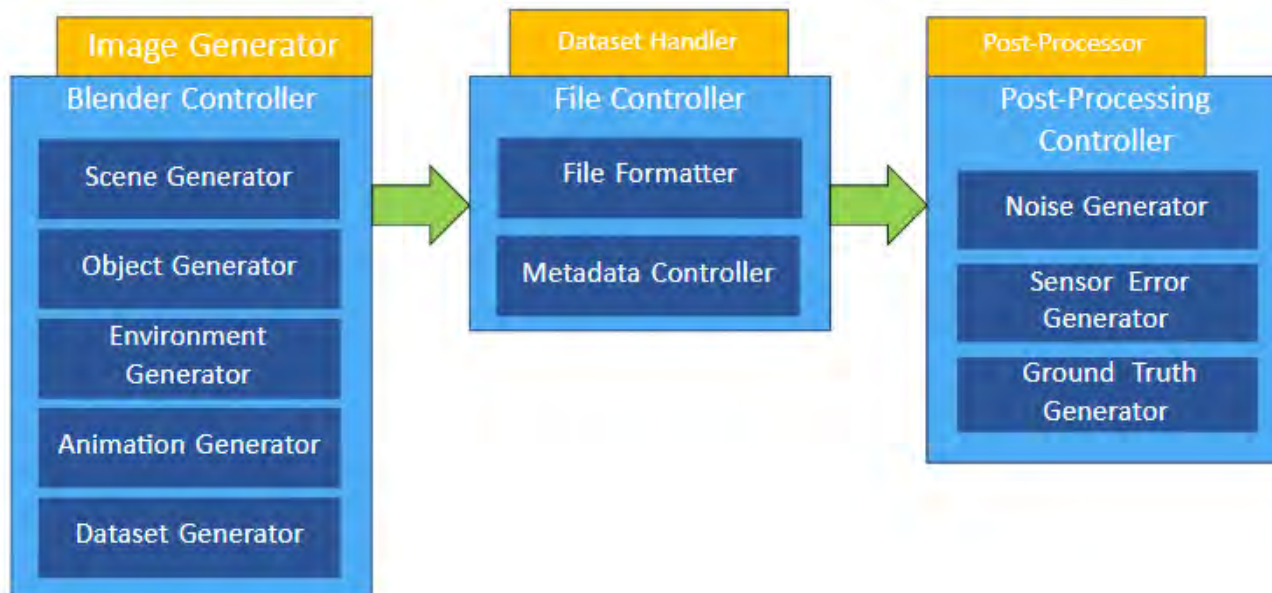
Intelligent Space Camera for On-Orbit AI-Driven Visual Monitoring Applications

- Uboticaのインテリジェントカメラ
- 画像航法等のため採用が増えている航法用の光学カメラ側にAI処理等画像処理実行が可能なチップを載せて、インテリジェント化する製品。
- 既存のAOCSの計算機では、画像航法の処理能力が足りない場合、AOCS側の計算機をより計算能力の高いものに変えてしまうと、今までの実績等を活用できなくなるユーザーを主に対象としている。
- 使用しているチップはIntelのMovidius Myriad Xを使用しており、Uboticaの販売するOBCと同様。本カメラにてUboticaの計算機での開発を始めてもらい、ゆくゆくはUboticaのOBCに切り替えてもらうことも視野に入れている。(個別インタビューにより確認)
- Intel Movidius Myriad Xを使用していることから、インテル® ディストリビューションの OpenVINO™ ツールキットでプログラム可能。また、カスタムビジョン、イメージングおよびディープ・ニューラル・ワークロードをチップに実装するために必要な開発ツール、フレームワーク、APIをすべて備えた Myriad Development Kit (MDK) でもプログラム可能と効率の高い開発が可能。



A Synthetic Image Data Generation Pipeline for Spacecraft Fly-by Scenarios

- 画像航法等へのAI/ML適用が進むにつれて、AI/MLの教師データを如何に効率的に生成するかという点も課題となっている。
- 本発表では、シナリオに沿った画像セットを簡易に生成できるよう、モジュールベースの教師データ生成SWが発表された。
- 実際のデモでは小惑星天体の様々な距離、反射率、太陽入射角度等に応じたアニメーション画像例が簡易に生成できる様子が発表された。



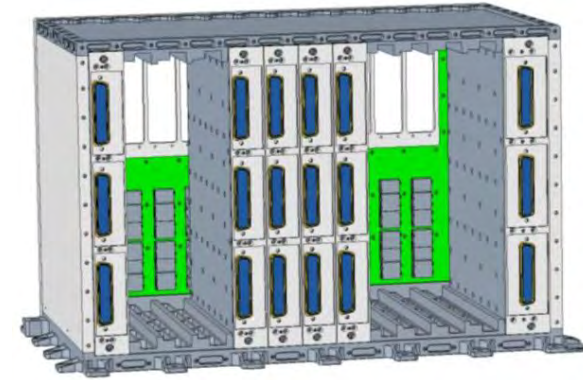
- モジュールベースの教師データ生成SW

生成画像例

標準化

ADHA (Advanced Data Handling Architecture)

- ESAの進めるUnit、バックプレーン、モジュールの標準規格
- Unit/バックプレーン/モジュール/コネクタ/pinアサイン等をボード間の独立性を確保した形で標準化しており、ボード毎の独立開発が可能となる。
- EDHPCではまる半日ADHAに関するセッションとして割り当てられており、注目度の高い項目となっている。
- 長い間仕様策定期間であったが、漸く仕様はFix.開発は進み実用フェーズに入りつつある。
- 各発表の概要は以下の通り。



L/N	タイトル	概要
1	Advanced Data Handling Architecture (ADHA): Status, Current Activities and Industrial Road Map	ADHAのプロジェクトの目的、進捗状況の報告 現状、ADHAの仕様化(Unit/Module)、EM Module/Unitの開発、JEM UnitのAITまで完了し、module/UnitsのQualificationの段階(これまでのESA投資額 14Mユーロ)
2	System architecture and design description	ADHAのUnitのシステムアーキテクチャについての解説 ADHAのシステムアーキテクチャにのっとると 基本的にSAVOIR準拠 となる。
3	Backplane Definition and Design	ADHAのバックプレーンの仕様についての解説 ネットワークポロジ、スロット構成、信号アサイン、電源構成等
4	an Agile Platform Enhancing New Satellite On-Board DataProcessing Systems	ADHAのモジュール機能の概要とそれを用いた典型的なデータプロセッシングの流れについて解説
5	An Avionics Ecosystem for Small- and Micro-Satellites Based on ADHA 3U Modules	小型、超小型衛星向けの3U Unitsに関するADHAの解説
6	Development & Reliability Assessment of HighData Rate cPCI Serial Space Connectors	ADHAに採用されているcPCI Serial Spaceコネクタの解説 高速伝送 ~25Gbps、半田レス (PressFit->S-FECT)
7	GR740 PCM - ADHA Compliant Next Generation Processing Module	ADHA準拠のGR740 シングルボードコンピュータの解説
8	On-board Computer (OBC) Module	ADHAのOn-Board Computerの仕様の解説。

ESAが進めるアビオニクス標準化SAVOIRに関して、各社が開発するUnit/OBC等がそれら標準に準拠しているという発表が多数あり、標準化の進展が確認された。

一方で、オフラインでの各社設計者からのヒアリングの中には、これら標準を使う理由としてはESAからの契約をとるためには、これら標準に従う必要があるためという意見もあり、標準化を進めるためにはある程度、上位要求からの縛りというものの必要性も見受けられた。

LN	講演タイトル	SAVOIR関連の報告内容
1	Standardizaion concept for CubeSat Applications	CubeSATへのSAVOIRの適用について。冗長系等はCubesatでは通常採用されないが、テーラリングを行うことで、適用が可能となる。Cubesatでも適用することによって、システム設計・運用・FDIR等を個別に考える必要がなくなり、開発効率を上げることができる。
2	APSOC: RECONFIGURABLESOC-BASED OBC FOR FUTURETELECOM APPLICATIONS	SITAEL社が開発する再構成可能なOBC(~200kg程度の小型衛星を対象)に関する発表。SAVOIR Generic OBC specificationsに準拠したOBCとしている(冗長構成、機能アサイン等)。
3	OBC-Ultra, the rad-hard NG-Ultra-based On Board Computer for future applications	Airbusが開発するNG-Ultraを使用したOBCに関する発表。本OBCはADHA対応となっているため、SAVOIR準拠となるOBCになる。
4	CHICS - COTS Based Highly Integrated Onboard Computer SystemSpaceWire Based Reconfiguration and Redundancy Management	EVOTEOTECH社が開発するADHA-3Uの小型LEO向けのOBCシステムSAVOIR準拠したCOTSを利用したOBC(冗長構成、機能アサイン)。

EDHPCではCOTSの活用に関しても複数の報告があった。
どの報告においても戦略のないCOTS採用は余計にCOSTがかかるとして、COTS採用の戦略の重要性を強調していた。

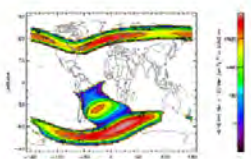
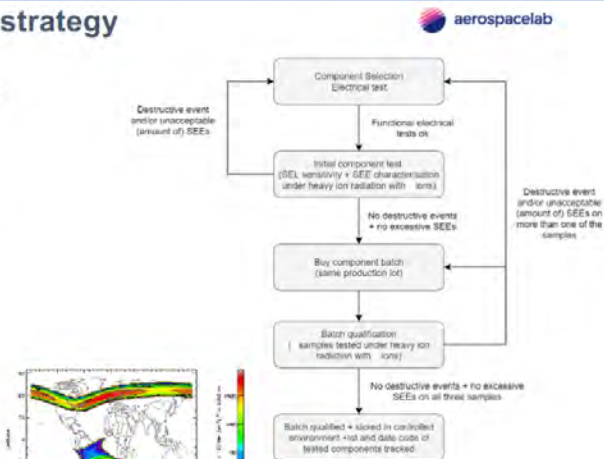
LN	COTS関連主要な講演タイトル	COTSに関する発表概要
1	RHA, COTS and their application to new space products	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aerospacelab社では製品に使用している部品のうち、95%がCOTS(Watchdog, Supervisor等の保護系、電源系はRT/RH) ➤ 使用するCOTSに関しては、基本的にenhanced/automotive から選択し、放射線試験を100%実施。(3か月に1回、これまでに400部品試験を実施してきている。)
2	Overview of on-board processing technologies for future space mission	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ESAのCOTS品採用に関わる衛星のClass、及び、Class毎の部品に対する要求 (次ページ以降詳細説明)
3	Amethyst constellation OBC mass production	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Onewebに搭載されるOBC AMETHYSTへのCOTS部品採用戦略に関する発表。 ➤ コンステレーションは従来と比較して膨大な軌道上時間となるため、事前の設計・評価がより重要になる。 ➤ 採用するCOTS部品は100% 放射線に評価を実施し、その評価結果から影響低減のための設計を実施している。 ➤ 開発早期に使用可能な部品リストを作成して、例外なく設計チームは該当部品から部品を選定。 ➤ フライト部品は個別部品のスクリーニングは実施しないが、LAT(Lot Acceptance TEST)を実施している。
4	ESA Mission Classification:Focus on RHA tailoring & recommendations for COTS projects	<ul style="list-style-type: none"> ➤ COTSの利用拡大を受けて、いくつかのESA標準の改定、新規作成を実施中 ➤ 上記標準では、ミッションクラス(I~V)に応じてRHA(Radiation Hardness Assurance) のMinimum要求をテーラリングしている。(次ページ以降詳細説明) ➤ RHAに関する十分な知識がなく、高リスクなPJが急増している。 <ul style="list-style-type: none"> ・放射線の影響はOld SpaceもNew Spaceも同様に起こる。 ・PJの初期に十分な評価結果を持って、選定が必要。宇宙実績も自分たちのアプリケーションにあう実績でなければ、実績にはならない。

RHA, COTS and their application to new space products: Aerospacelab社のCOTS戦略に関する発表

- 使用部品のうち95%はCOTS、残りの5%はRT/RH部品でFDIR関連や電源関連等。
- COTS品は全て重粒子含めてCharacterizationして使用する。
- 3か月に一回は試験を実施。
- ボードレベルでの信頼度計算を実施、部品採用のトレードオフに活用している。

RT/RH/COTS components strategy

- Blend to meet aggressive price targets of customers
 - 5% RT or RH: supervisors, watchdogs, GaN Mosfet for DC-DC converters
 - 95% COTS: everything else
- COTS components selection
 - Mainly military grade / enhanced product / automotive grade components
- SEE radiation test campaign
 - Characterization of COTS components
 - SEL / destructive events sensitivity
 - SEE cross-section
 - Qualification of batches of COTS components for FM units
 - Identical lot code / date code withing a batch
 - Test conditions
 - Heavy Ion in UCLouvain Cyclotron
 - LET up to 62.5 MeV cm²/mg
 - Different ions used to extract the SEE cross-section
 - Board temperature: 85°C
- TID radiation campaign
 - Done at unit level / component level
- Spensiv used to extract radiation environment of mission
 - Computation of error rate



FIDES flow

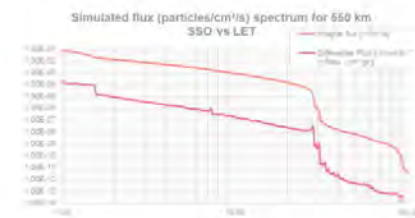
- FIDES used to:
 - Compute MTBF / FIT rate of functionality in a unit => design trade-off
 - Compute MTBF / FIT rate of electronics units => satellite reliability and system trade-off
 - Sensitivity of board temperature and temp cycles
- Smooth FIDES flow developed at ASL
 - Internal tool developed to make the bridge between PCB design software and FIDES
 - FIDES fully configured
 - Components (passive, active, RF, connectors)
 - PCB technology and PCB assembly
 - Process from Aerospacelab and subcontractors
 - Life cycle (launch, temperature, thermal cycling)
 - Allowing quick and easy usage of FIDES
- Check it out: <https://www.fides-reliability.org/>



Radiation testing: outcome

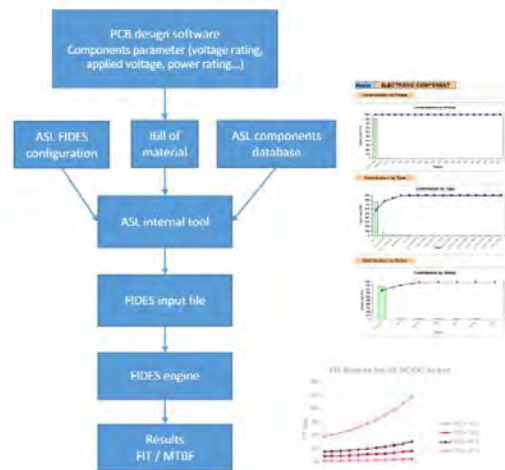
Components tested

- 10 campaigns conducted (~ every 3 months now)
 - 400 components tested in total
 - 150 unique components tested, about 80 suitable for space applications
- 50 batches of components fully qualified for FM units



Mitigations put in placed based on results

- SET characterized:
 - Max / min output voltage on DC-DC converter
 - Software mitigation for sensing (ADC, opamp, Vref)
- SEU
 - Characterized in all memories
 - Mitigated with ECC and/or scrubbing.
 - Characterized in FPGA
 - Mitigated with scrubbing and TMR.
- SEFI
 - Monitoring of peripherals, clocks, etc by micro-controllers and processors.
 - Watchdog for micro-controllers and processors.
- SEL
 - Current limiter and current measurement for components sensitive to SEL.
 - All power supplies (DC-DC converter, LDO) and current limiters: LCL free.



Amethyst constellation OBC mass production : Airbus社のOnewebに乗っているOBC Amethystの報告

- Amethystは開発期間、製造コスト、製造量を信頼性を確保した上で革新する必要があった。
- コストの観点ではCOTS活用が重要であったが、コンステレーションには信頼性確保が必須なため、十分な検証をPJ初期(部品選定前)に実施
- 中大規模製造に慣れているパートナーに宇宙の品質を共有しながら体制を構築。(全ての要素は少なくとも一度はテスト)

Main Challenges & Achievements



Very short development time → **20 months** from T0 to first FM batch delivery



Cost reduction → recurring price up to **50 times lower** than usual HiRel products



Unprecedented mass production → **32 units / month** for Amethyst

With



No compromise on quality → More than **1000 years** successful in orbit operation

1) Short Development Time 2) Cost Reduction 3) Mass Production



- **Step 1 - Select** partners that usually deal with medium or high volume production
- **Step 2 - Share** our requirement constraints, but not impose them (ex TVAC)
- **Step 3 - Align** our quality standards (table of correspondence)
- **Step 4 - Design** since the beginning with DFM and DFT as objectives
- **Step 5 - Produce** by batch
- **Achievements on Amethyst** > 128 boards per months, acceptance tests = 2 units per day

1) Short Development Time 2) Cost Reduction 3) Mass Production



COST → COTS

COTS = very interesting for cost reduction, but can jeopardize unit behavior if used without precautions

- **Step 1 - Research** > selection of the right components & the right manufacturers
- **Step 2 - Testing** > all COTS components of Amethyst intensively **radiation-tested**
- **Step 3 - Design** > define appropriate **hardening mechanisms** to mitigate all known radiation effects
- **Step 4 - Design** > create a **Preferred Part List** to be used by design team without any exception
- **Step 5 - Procurement** > no screening but LAT on most critical parts

All of this to ensure flawless in-orbit operations for typical 10-years lifetime in LEO

1) Short Development Time 2) Cost Reduction 3) Mass Production



Quality guaranteed through

- Mastering manufacturing process and repeatability
- Work per batch, bringing stability and homogeneity
- Each element of the equipment is seen at least once in the test & control process

In case of **default**

- short decision = repair or put the product aside

Overview of on-board processing technologies for future space mission/ ESA mission Classification

➤ ESAのCOTS品採用に関わる衛星のClass、及び、Class毎の部品に対する要求

ESA Mission Classification



Class type	I	II	III	IV	V
Mission Criteria and Marking					
Criticality to Agency strategy (Flagship mission, International cooperation, Impact on ESA strategic goals, and image)	Extremely high Criticality	High Criticality	Medium Criticality	Low Criticality	Educational purposes
Marking					
Mission Objectives (Directorate priority and purpose, e.g in orbit demonstration, educational)	Extremely high Priority	High Priority	Medium Priority	Low Priority	Educational purposes
Marking					
Cost (Cost at Completion, Including Phase E1)	>700 M€	200 - 700M€	50 - 200M€	1- 50M€	< 1M€
Marking					
Mission Lifetime (Nominal mission life duration)	> 10 years	5-10 years	2-5 years	1-2 years	1 year
Marking					
Mission Complexity (Design interfaces unique payloads, New technology development)	High	High to Medium	Medium	Medium to Low	Low
Marking					

CLASSES:

I. Critical strategy/safety (e.g. manned missions)
(High level of requirements and low risk)

II. Performances should be met whatever it takes

III. Finding the best compromise between risk and cost to deliver the mission

IV. Mission is designed according to a hard cost limit (affordability approach)

V. Almost full delegation to industry
(Minimum requirements but increased risk)

クラス分けの基準
従来の I ~ III に IV, V を追加

Criteria: 5 different criteria (criticality to Agency, Mission Objectives, Cost, Lifetime, Complexity)

Weighting factors: Each criteria has a weighting factor used to establish the overall project's mission classification

Overview of on-board processing technologies for future space mission/ ESA mission Classification

- ESAのCOTS品採用に関わる衛星のClass、及び、Class毎の部品に対する要求

Examples of a classification exercise:

	Class I	Class II	Class III	Class IV	Class V
Examples	ERO JUICE MTG Argonaut	Proba III Flex VIGIL ARIEL TRUTHS SENTINEL-2	FORUM CHEOPS Comet-I HARMONY HummingSat	AWS SCOUTS Probe B2 (on Comet-I) GOMX-5 M-ARGO GX-5 ESA Edu. FYS (EIRSAT-1, SOURCE)	YPSat ESA Edu. FYS (AcubeSat/ UCAnFly/ LEDSAT/ 3Cat-4/ ISTsat-1)
Pictures					

Overview of on-board processing technologies for future space mission/ ESA mission Classification

➤ ESAのCOTS品採用に関わる衛星のClass、及び、Class毎の部品に対する要求

New microelectronics development classification table



What do customers and projects want in terms of assurance for your new microcircuit?

(Regarding ECSS-Q-ST-60C from the perspective a microciscuits' supplier, a non exhaustive view ...)

Mission class:	Class I	Class II	Class III
(Eq. ECSS Q 60 class:)	1	2	3
Selection	Maximize use of EPPL and QPLs + Engineering restrictions	No explicit reference , but minimize efforts + Engineering restrictions	No explicit reference , but minimize efforts + Engineering restrictions
Evaluation	Audit , Testing, Construction Analysis	Testing, Construction Analysis	Testing, Construction Analysis
Screening	ESCC / MIL Class V	ESCC / MIL Class Q+PIND	ESCC / MIL TM Class B + PIND
Other procurement inspections	Full LAT / QCI, DPA, inspections (but almost none if qualified)	To be agreed, no DPA	To be agreed, no DPA
ASIC – specific	ECSS-Q-ST-60-02C	ECSS-Q-ST-60-02C	ECSS-Q-ST-60-02C
Specifications	Required	Required	Required

Overview of on-board processing technologies for future space mission/ ESA mission Classification

➤ ESAのCOTS品採用に関わる衛星のClass、及び、Class毎の部品に対する要求

Example – SubWG EEE & RHA – EEE 1/2



Slide on status in Jun- 2022:

Class II ~ V の部品要求の差異

Topics	Class II	Class III	Class IV	Class V
ECSS-Q-ST-60 EEE	Class 2 Components fully applicable	Class 3 Components fully applicable	Mix of applicable, not applicable and tailored.	Key requirements kept, focused on do no harm and know what you fly.
ECSS-Q-ST-60-13 Commercial components	Class 2 Components fully applicable	Class 3 Components fully applicable	Additional families added. Relaxed requirements for evaluation, screening, LAT and DPA. Board/unit level testing may be suggested.	Modified to address only radiation, traceability and storage conditions.
Documentation and organisation	Fully applicable	Fully applicable	Justification documents can be combined and not required for some automotive qualified passives. Relaxed requirements for component control plan.	Modified to address only identification of EEE contact point and simplified Declared Component List.
Pure tin mitigations	Fully applicable	Fully applicable	Relaxed	Not Applicable
Derating	Fully applicable	Fully applicable	Fully applicable	Maximum ratings shall not be exceeded Note: de-rating is highly recommended (especially for operational duration > 3 months or when design is intended to be used in Mission Class < V).
EEE quality level	Class 2 Components fully applicable	Class 3 Components fully applicable	Lower grade options added for semiconductors, oscillators, wires, connectors and resistors.	Not Applicable

Fully Applicable

Partial Applicable, i.e. tailored

Not Applicable, i.e. under industry responsibility

N.B.: for Mission Class I ECSS-Q-ST-60 & ECSS-Q-ST-60-13 Class 1 requirements are fully applicable.

The latest version of both standards is 12 May 2022

Overview of on-board processing technologies for future space mission/ ESA mission Classification

➤ ESAのCOTS品採用に関わる衛星のClass、及び、Class毎の部品に対する要求

Example – SubWG EEE & RHA – EEE 2/2



Class II ~ V の部品要求の差異

Topics	Class II	Class III	Class IV	Class V
TID tests	Fully applicable	TIDL<5Krad testing recommended TIDL>5Krad testing required at part or board level	TIDL<5Krad testing recommended TIDL>5Krad testing required at part or board level	TIDL<5Krad no testing required TIDL>5Krad testing recommended
TID RDM	Fully applicable	1.2 with test at part level & traceability established 2 with test at part level and no traceability 3 with test at board level	1.2 with test at part level & traceability established 2 with test at part level and no traceability 3 with test at board level	RDM=2
TID RVT	Fully applicable	Applicable when RDM<2 Not applicable when testing is performed at board level	Not applicable	Not applicable
TNID tests	Fully applicable	Fully applicable	Test of optoelectronics required	Test of optoelectronics recommended
TNID RDM	Fully applicable	1.2 with test at part level & traceability established 2 with test at part level and no traceability	1.2 with test at part level & traceability established 2 with test at part level and no traceability 3 with test at board level	Not applicable
TNID RVT	Fully applicable	Fully applicable	Not applicable	Not applicable
Heavy ion SEE test	Fully applicable	Fully applicable	Recommended Required for MOSFETs>200V	Not required, except for MOSFETs > 200V
Proton SEE test	Fully applicable	Fully applicable	Required at component or board level	Recommended

Fully Applicable

Partial Applicable, i.e. tailored

Not Applicable, i.e. under industry responsibility

More information on RHA:

EDHPC Tutorial, Viyas Gupta “ESA Mission Classification: focus on RHA tailoring & recommendations for COTS projects”

Overview of on-board processing technologies for future space mission/ ESA mission Classification

➤ ESAのCOTS品採用に関わる衛星のClass、及び、Class毎の部品に対する要求

ESA Mission Classification – RHA classes 1/2



On-going tailoring. Current simplified status:

	Class I/II	Class III	Class IV	Class V
Traceability	High	High but low acceptable	Low OK	Low OK
TID	As ECSS	As ECSS & board possible	If TIDL > 5 krad (DDC) & board ok	No TID assessment required
TNID	As ECSS	As ECSS & board possible but only focused beam	If opto critical (if proton env.) & board ok but only focused beam	No TNID assessment required
RDMmin (TID/TNID)	As ECSS/ESSB	2 if low traceability or board test 1 if high traceability	2 if low traceability or board test 1 if high traceability	No RDM required
RVT	As ECSS/ESSB	TID: As ECSS except. Bipolar ICs TNID: Opto or if RDM < 2*RDMmin	No RVT required	No RVT required
SEE HI	As ECSS & compo only	All & board possible	Critical parts & board ok	Only if power MOSFET (part >200V or embedded) & OC protection parts, board ok
SEE proton	As ECSS & compo only	All & board possible	All & board ok	All critical boards or when no SEE mitigation & board ok
DSEE LETth	As ECSS (60 MeV.cm ² /mg)	< 38 MeV.cm ² /mg	< 38 MeV.cm ² /mg	< 38 MeV.cm ² /mg
SEE Mitigations	As ECSS	As ECSS, NDSEL accepted if demonstrated by test	No proton DSEE, derating, NDSEE mitigation/no prop. & SET assessment	Same as Class IV but SET assessment not required
Rad. Review/Analysis	Yes: As ECSS	Yes: Almost as ECSS	Yes: based on test data & mitigations & criticality analysis & SET analysis & rates	Yes: based on test data & mitigations & criticality analysis
"Summary"	"ECSS Classes"	"Traceability can be relaxed, board level testing possible with LETth=38 MeV.cm ² /mg"	"Low traceability OK, TID > 5 krad, board level testing OK, SEE HI if critical, proton for the rest, no RVT"	"Like Class IV & testing reduced to DSEE or when no mitigation impacting overall mission, <i>mostly risk-avoidance & proton</i> "

Overview of on-board processing technologies for future space mission/ ESA mission Classification

- ESAのCOTS品採用に関わる衛星のClass、及び、Class毎の部品に対する要求



ESA Mission Classification – RHA classes 2/2

As often in RHA, the « devil is in the details », some examples:

- Obviously, tailoring is the set of **minimum requirements** – the more the better ;)
- **Board level testing** - number of boards may required a careful trade-off:
 - Class III: e.g. 3+2 boards are required (TID) & 3 (TNID), 2+1 (for SEE incl. spare)
 - Class IV: e.g. 1+1 boards are required (TID) & 1 (TNID), 2+1 (for SEE incl. spare)
 - Test data shall be provided at CDR → board will be ready? What if part fails on the board?
 - In general in TNID: board level OK but focused on part
- Definition of **critical** for Class IV & V:
 - Critical parts in terms of radiation risk
 - But also in terms of “mission impact”: specific from one project/design to another, defined by the project team!
 - This also includes the protection devices (e.g. overcurrent protection)
 - For NDSEE, even if not critical, demonstration to be done to ensure “no failure propagation”.
- **RVT for Class IV**: No RVT is misleading: meaning is “no RVT based on diffusion lot” (but on “procurement batch”)
- “Low traceability”: (= procurement batch) means that multiple samples of a same part reference is procured from the same manufacturer either directly or via a reliable distributor and at the same time.
- **Class V approach**:
 - Though educational mainly – approach shall not be to « close-eyes »
 - Encourage a good design & adequate selection of parts & adequate mitigation – otherwise testing required!
 - Concept of safety barrier is highlighted (as also mentioned in the ESA COTS Guidelines)
- **Class IV limit of 5 krad**:
 - Only if dose Depth Curve is used, otherwise (Ray Tracing or 3D MC) 2.5 krad shall be used
- All classes required to provide a **radiation analysis** (level of details adapted) but WCA analysis only for Class I to IV



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な技術

3.6 定常・動向分析

3.7 適時調査・事実確認

- 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。



(財)衛星システム技術推進機構