

文部科学省 令和4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」

委託業務成果報告書

(公開版)

令和5年 3月

一般財団法人衛星システム技術推進機構

Advanced Satellite Systems Technology Center (ASTECC)

1. はじめに
2. 技術調査概要と目的
3. 3.1項 SDS/SDR/SDP (*software defined satellite/radio/payload*)
 - 3.2項 オンボード処理
 - 3.3項 運用の効率化
 - 3.4項 SWアーキテクチャ
 - 3.5項 衛星推進システム
4. 定常調査業務
 - 4.1 定常調査・動向調査
 - 4.2 適宜調査・事実確認

本委託業務成果報告書は、文部科学省殿から委託された下記委託業務に関する成果全般を報告することを目的としている。

令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業
「将来衛星システムにかかる技術調査」

2.技術調査概要と目的

22-003-R-016

2.1 概要と目的

- 宇宙開発利用は、産業の発展や安心・安全で豊かな社会の実現等に貢献する重要な分野であり、**文部科学省殿においては国家戦略の1つとして推進**している。
- **欧米を中心に世界で取り組まれている通信・観測・測位等の実利用を支える衛星システム技術や最新の事業動向**を踏まえ、日本の今後の衛星システム技術に関する**研究開発計画検討に資する調査**を行うことを目的としている。

(1) SDS : 観測センサ機能書き換え

- 更に踏み込んだSDS設計として、**観測センサの機能そのものをソフトウェアで実現し**変更するような例はないか？

[ASTEC]

- a. **観測センサの機能レベルの書き換えの例は把握できていない。**

現在は取得データをエッジ処理するアプリケーションの書き換えの軌道上実証がUnibap社から報告されている。

- b. 一方通信の低データレート用途ではIoT機能やメッセージ通信、簡易的Sigint機能を使い分ける例はSpire社等で既にあるが、これは**広帯域のSDR送受信機+SDSデジタル機能を実装しているから可能。観測センサ機能に関しても状況注視必要。**

(2) 開発手法の議論

- 衛星開発における**アジャイル「的」開発手法とスパイラル開発手法の適用先の特徴**、米クラウドの安全保障利用に関する整理。

[ASTEC]

- a. 衛星では「Agile的」を標榜しているPlanet社の例があるがSWのように厳密な方法論ではなかった。「**Spiral開発**」も**SWのように正式な定義ではないが成功しつつある例としてSDA庁を例に両者を比較**。なお安全保障向けCloudに関しては情報未入手。

(3) 先端機能の実証機会

- 海外に比較して日本は**実証機会が絶対的に不足**。

欧米でどのように確保しているのか？ 特にソフトウェアやアプリケーションは地上実証が可能ならず

[ASTEC]

- a. 米国NDSA(現PWSA)では、①米ブラックジャックのリスクミチゲーションプログラムMandrake、②Seakr(Raytheon傘下)によるミッション計算機、③衛星間光通信実証(2022)、④Lockheedが自社でTransport Layer実証機としてSDSの実証(Ponyexpress、2019)等、「**実用**」を踏まえた**先端実証はきちんと行っている**と感じている。
- b. 日本では**革新実証・技術刷新衛星・ETSシリーズ**など数は少ないがその実証成果はFPGA・GPU・デジタル通信・全電化衛星などで期待できる。
- c. 実証例をどう増やして行くかは、枠組み(予算)とアイデア出し(地上や部分実証)の**スピード感と企業の開発体力が必要**

(4) 運用の効率化

- Start Upでは衛星製造と運用は衛星事業者ノウハウが残るため調査が難しいところがあると思うがAirbusのようにコンステレーション用のバスを提供しているメーカーが、バス運用に関する自動化・自律化のパッケージを衛星事業者に提供するようなことを謳っている企業の例はあるか？

[ASTECC]

- 具体的な情報は取れていない。イタリアのAI企業であるAIKO社の例では、**関心地域への軌道最適化やデブリ回避・復帰運用が煩雑な多数機軌道制御計画の自動化アルゴリズムを専用**に開発している例もある。
- 一方観測データ処理やサービスに関しては**競争の源泉でもあり、観測事業者(衛星保有・非保有を問わず)の占有事項**が続くと思う。但しこの部分もAI等情報処理産業の一面がありAWSのように開発環境やサービスのインフラ環境を提供する専門の利用は増えていくと考える。

(5) 新しい推進系

- 衛星推進システムに関しては**電気推進だけではなく国産のグリーンエンジンユニット**(ライドシェアでの射場・打上時安全性、作業短期化)、軌道上での作動容易性、**高圧系が不要な電動ポンプ系、化学電気共用デュアルモード等も見据えること**

[ASTECC]

- グリーンユニットを報告書へ反映、小型向け**国産1.5kW級電気推進追加、また軌道上作業で注視されているデュアルモード(同じ推進供給系で化学スラスタ+電気スラスタ実装)**を追加。着陸用大推力、電動加圧系を記載。

2.3 事前有識者検討会(2/14)での議論

22-003-R-016

3.1 SDS、3.2 オンボード

『①**デバイス**に関する進展（宇宙用⇒産業用⇒ハイブリッド⇒更に次期宇宙用）、②大手・新興の**SDS・オンボード戦略**、③カスタマーがローデータ入手とオンボード迅速性を**選択ができるメリット**、④ある衛星事業者がオンボードエッジ処理や観測SDSを標準化し、**カスタマが利便性に賛同した場合デファクトとなり**、対応が重要になるという分析に関して**見解は一致している**』との評。

『**民生の観測利用分野はニーズドリブン**というより**シーズドリブン**であり、従って上記の機能実装の準備は着々としなければいけない。**一方安全保障**は当初の目的が民生観測より明確なので**ニーズドリブン**であり、上記民生分野の機能定義の難しさと異なるプログラム管理（**性能と工期実現の確実さ第一**）となる。』

3.3 運用

『多数機の軌道制御自動化に関しては、オンボードのアプリケーションレベルで実現すると思うが、標準的なAPIを開発する事業者がもし出現し、それらを供給することでビジネスになる可能性もあるのではと考える。すなわち**運用ツールやアルゴリズムも標準API化してCOTS化が進むことで運用効率化とコスト削減が進む**と期待。』

3.4 ソフトウェアアーキテクチャ

『海外でも標準化は進んでいない、それぞれのプレーヤーがそれぞれにやっている印象。取り組みとしては、作ったものを使ってもらってアップグレードしていくのが重要で、産業としてオープン・クローズ戦略が重要。**ビジネスとして誰かがBenefitを得る仕組み、即ちSWのエコシステムが必要**。』

3.5 推進系

『網羅的に調査されてはいるが、電気推進・新規推薬対応だけでなくデュアルモード・重力天体離着陸用・小型向け等の昨今の**①軌道道上作業ニーズを反映したH/Wの取り組み、更に②ユーザパイロードの軌道投入・移動を事業として進めている例**も考慮すること』 ⇒ASTEC ②は今回調査できなかった。

1. はじめに
2. 調査概要
 - 2.1項 目的
 - 2.2項 中間報告(11/8)での議論
3. 調査分析
 - 3.1項 SDS/SDR/SDP (*software defined satellite/radio/payload*)
 - 3.2項 オンボード処理
 - 3.3項 運用の効率化
 - 3.4項 SWアーキテクチャ
 - 3.5項 衛星推進システム
4. 質疑

(調査要求)

- (1) 通信・観測の各分野で定義されている Software Defined Satellite (以下、SDS)、Software Defined Payload (以下、SDP) の機能性能について、国内外における現在及び将来の動向を調査し、まとめること。
- (2) 国外の最新技術と比較しながら、日本の宇宙開発もしくは宇宙産業に必要なSDSやSDPを調査すること。また同様に、必要となるキー技術について調査すること。
- (3) 世界における衛星の大量生産、アジャイル開発の手法および生産方法について、3社以上を調査しまとめること。特に部品調達や生産途中におけるユーザニーズの取り入れ方等について調査し、考察すること。
- (4) 本調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

22-003-R-016

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」 Executive Summary

1. 通信衛星SDS・SDR

- ①通信衛星特にGEOではSDSの通信事業上の利便性に着目。
- ②**多くのグローバルオペレータがSDSによる性能面・価格面の飛躍を要請し、開発・製造側も段階的に対応した。**
- ③この5～6年で大手3社が100Gbps超で一度に3機打上可能なSDSを開発し欧州勢は欧米日豪から受注。
- ④各社デジタルパイロードとコンパクトな全電化バスの一体開発。
- ③なお通信でのSDSはA/D変換とFFTによる分波と帯域・ルート変更・合波・DBFビーム制御・D/A変換を意味し、SDRではない。**100Gbps超の高速変復調は今現在ではデバイスのハードル高くまだ困難。**

2. 観測衛星SDS・SDR

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

3. 今後の大規模通信SDR

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

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

(通信と観測のSDS詳細説明)

- 各衛星オペレータでSDSやSDRの取り組みや開発、軌道上運用が行われている。
- 「**静止通信**」においては、**SDS = データ復調を伴わない全データデジタル処理**であり、SDRとequalではない。最大数100Gbps・数百ビームの帯域や周波数、ビーム形状をデジタル技術（AD/DA、FFT/逆FFT、ビームルーティング、DBF等）で軌道上可変とし需要変化に対応するものである。現在調達される**静止衛星の2/3がSDSである**。
- 極めて広い通信帯域をデジタル処理する昨今のHTSペイロードのコアであり、標準品ではなく、大手各社は内作を行っている。部品やアルゴリズム、DBFとの最適化がキーとなる。復調はしない。Transparent payloadと呼ばれる。
- 「**LEO通信**」においては、1機のスループットが低いこともあり、**通信データの変復調までソフトウェアで行い、衛星間メッシュネットワークの送達先制御を行ったり、セキュリティや干渉回避のための変復調方式や広帯域の周波数への対応をソフトウェアで実施する**。すなわち**SDS≒SDR**である。小型衛星で数Gbps、UHF～Kuまで対応可能な**SDR送受信機が数多く標準機器として市場に出ている状況**。但しセキュリティや衛星間通信への対応は標準ではなく開発品となる。
- 「**観測衛星**」においては、取得した観測データ伝送やテレコマのためのSDR機能とともに**オンボード処理に関して、再プログラミング以上のアプリケーションレベルの変更可能な衛星をSDSと定義する傾向**がある。
- **今後データ提供のレイテンシ削減のための観測データ高次処理や更にML・AIが多くの事業者で行われてくることが予想され**、これらは観測衛星特有のSDS定義と考えられ、3.2項のオンボード機能を技術的背景とし、今後ますます競争力確保のために重要となると考える。

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.1 ユースケースごとのSDS整理 (ASTEC分析)

22-003-R-016

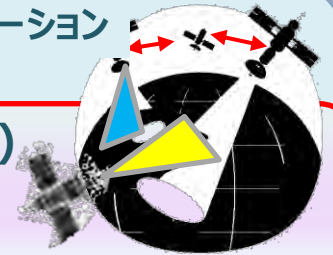
3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

Executive Summary

1機通信帯域 **大**
GEO/MEO

1機通信帯域 **小～中**
LEOコンステレーション

観測コンステレーション



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

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

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

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

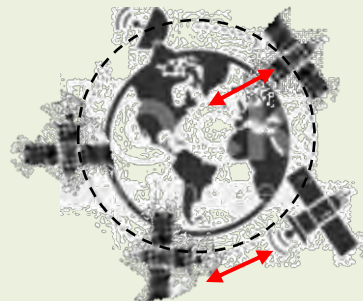
① 静止通信SDS(≒SDR)

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



LEO通信SDS(≒SDR)

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



LEO観測SDS

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

[C] 観測データのエッジ処理

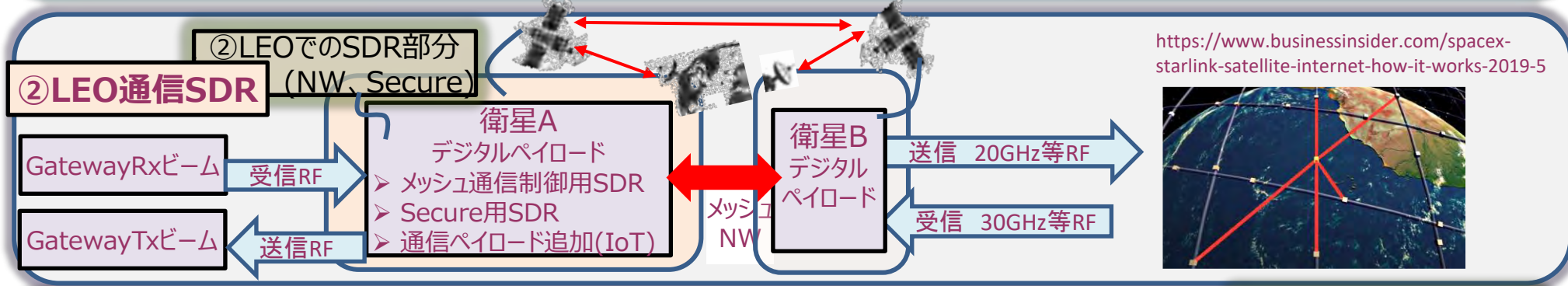
- a. 画像化/差分/ML/AIによる情報化・圧縮・再訪頻度・情報レイテンシ削減ニーズへの対応のオンボード化
 - b. 顧客やアプリケーション変更
 - c. Hosted的衛星利用
- SDS≒ML/AI高次処理⇒SDR機能

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.1 ユースケースごとのSDS整理 (ASTEC分析)

22-003-R-016

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」 Executive Summary



3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.2 SDR標準製品の一例

22-003-R-016

Tethers Unlimited社

SDR MODEM(Tx/Rx)、1.5-18GHzという超広帯域搬送波、1Gbpsなので観測データDTにも使用可能。

SOFTWARE DEFINED RADIOSシリーズ



SWIFT-SLX

L- and S-Band Communications Transceiver



L/S/Xバンドの
SDR送信専用機



SWIFT-XTRX

X-Band Communications Transceiver



1.5-18GHz任意対
応のSDR送受信機

- その他、Aero-Visita社のZynq Z-7100(Xilinx MPSoC)を使ったSDR、
- Rincon Research社のZynq 7045(Xilinx)を使用した多くのSDRが製品化
- 数10GBのフラッシュメモリも実装している。

- 米Tethers Unlimited社
- 1.5GHz~18GHzに同じユニットでUL/DL対応
 - ✓ 軌道上コマンドで任意に変更
 - ✓ オシレータ変更不要、HowはITARとのこと
- データレート 1Gbps(UL/DL)
- UL/DLそれぞれ2ch (2搬送波) 可能
- 小型軽量(low SWaP)、59WなのでおそらくDL用20W級のSSPAを実装との予測。
- おそらく広帯域アンテナ+本SDRで構成可能
- 多くの通信コンフィギュレーション可能
- メーカーの既存アルゴリズムとカスタマ (衛星) のオリジナルの平行動作が可能。
⇒SecurityやWaveform
- BPSK/QPSK/OQPSK/8PSK/16APSK /32APSK/DVB-S2X...
- AES256やNSA要求ZeroTrustArchitecture へ対応
- Mesh NWにも対応とのこと

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.3 通信・製造大手のSDSに対する見解

22-003-R-016

2013年Spire、2015年以降GEOのHTS業界で標準語に

SDSをキーワードとする公開情報 <https://www.satellitetoday.com/content-collection/how-software-defined-satellites-will-shape-communications/>

1	2013年11月： Spire Global がSDSと称したのが最初と言われており、SDSの1号機ArduSat-1およびArduSat-X（1U cubesats）を国際宇宙ステーションから放出し、自動的にSpireサーバーへのデータ送信を開始。SDR的な機能と思われる。	小型観測
2	2015年7月：欧州オペレータの Eutelsat はDBFと通信系計算機によるフレキシブルペイロードを最初に搭載したEutelsat-Quantum開発を発表、2021年7月打上。	静止通信 ≒SDR
3	2019年2月： Iridium は、 TAS 開発の 75個のIridium第二世代 の軌道上整備を完了。このIridium Nextは、SDR用の通信計算機を搭載し、Kuバンド衛星間通信で移動体通信(L)を宇宙メッシュで実現。	イリジウム
4	2019年3月： Lockheed Martin は、SmartPhoneのように機能すると“SDS”と称した小型LEOのSmartsatを発表（バス自体はTybak社製だがLM50の名称の自社バスで、軌道上実証をPonyExpressミッションで自社で実施 PWSAのTransportレーヤのインテグレータ参入を果たした。	小型 コンステ
5	2019年5月： Airbus は2019年5月に次世代の静止Kaバンド衛星である インマルサットGX7、8、9 の3衛星を受注。 3衛星はADSの最新SDSであるOneSat （3機同時打上可能）の初号機。その後 Intelsat、Optus、スカパ からも含め計 7機 受注製造中。但し 1機80Gbpsと中規模HTS。	静止通信 ≒SDR
6	2019年9月： Boeing は、SDSと称する 静止702X を発表。 SESのO3bmPOWER（MEO、2～3スタック打上）の11機受注のプログラム開発を静止へも拡張、WGS-11を製造中、但し従来の702最大サイズで6トン。 mPowerはFalconで2022年12月打ち上げ実施（2機スタック）。	静止通信 ≒SDR

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.4 最新公開情報及びSmallSat.Conference 2022 でのヒアリング2-003-R-016

<https://www.bcsatellite.net/blog/software-designed-satellites/>) やSmallSatでの議論からの整理と考察。

SDS (Software Defined Satellite)

【① 通信衛星 GEO/MEQでのSDS】

- 共通的に「全通信帯域 (up to 数百Gbps) をデジタル化 (A/D変換) して可変に制御できること」。
静止15年における各ビームの配置や形状、各チャンネルの帯域、中心周波数、偏波、ビーム間接続等を軌道上で再構成できる。復調はしない。現在必須ではないこととあまりにハード規模が大きい。

【② 通信衛星 LEOコンステレーションでのSDS】

- LEO通信コンステレーションにおいては、最近Starlinkの記事のように、ジャミングを受けた場合に2週間で衛星と端末に通信SWをLoadし対処とある。 対策と対処の早さが印象的。
- 昨今Hawkeye等で利用が進むSIGINTでは、広帯域の周波数収集とAD変換、スペクトラムや到達時間から対象の方探までSDR+ 計算機で実現している。観測ではデータ伝送系のSDRよりもミッションであるSIGINTがより高度なSDRを必要としている。

【③ より高度な通信オンボード処理に関する意見】

- J. Freedman, CEO Kythera (SESにNW通信OS[KOS]を提供、元NASA、SW、TASと提携)
機械学習環境は地上に残し、ハイパワーでMLトレーニングすることは理にかなっている。一方更なる高性能プロセッサが搭載されていけば、地上で更新した通信トラフィックの学習テーブルをULLし、機上でAI処理したり、移動体のトラフィック遷移過程をエッジのAIで推定し、その時点での通信最適パスを導出も可能。(今は全て地上)
- AI/MLでは、S/Wのスキルだけでなくエンジニアリングの専門知識も必要、解決しようとしている問題を工学的に理解しないと出来ない。画像解析者とS/Wプログラマーの両方が密接に連携すべき。
- 宇宙産業以外から積極採用すべき。自動運転の業界もSW・画像・ML/AI・通信の人材が大量に入っている。

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDPの調査)」

3.1.4 最新公開情報及びSmallSat.Conferenceでのヒアリング 22-003-R-016

SDS (Software Defined Satellite)

【④観測衛星 LEOコンステレーションでのSDS】

- 一方観測衛星でもたびたび言及されており、任意の圧縮やパケット化までの従来機能のみを越えて光学やSARの画像化や対象抽出・差分抽出・MTI(動的抽出)等のエッジ処理を行う場合のソフトウェアによるアルゴリズム変更（パラメータコマンドによる変更を越えて）まで指すことのようにある。
- 小型観測衛星の場合は、SDSを実現するIncentiveを以下と分析している。
- 下記はニーズとシーズがミックスして実装が進んでいると思われる。
 - a. データレコード容量が少なく、画像から情報への高次処理や情報への加工が重要
 - b. 時定数の大きい大型衛星による地球観測というより再訪性の高さからリアルタイム性が求められること。
 - c. 衛星数拡大やデータレート増大に対して地上局は数やコストで課題、情報への加工が求められていること
 - ➡ d. 軌道上でその時々々のニーズや最新技術、カスタマ変更をソフトウェアロードにより実現したい場合。
 - ➡ e. 地上の進化の早いML/AI/IT技術の恩恵をタイムリーに衛星に反映し機能性能を運用中に向上
 - f. 自律化とも関連するが、衛星数が非常に多く、軌道制御や観測対象の優先をソフトウェアで変更したい。

この中でd及びeが多くのコストをかけずに機能性能を運用中に向上できる意味で大きな動機と考える。

以上を踏まえて、GEO (MEO) 通信、LEO通信、LEO観測におけるSDS/SDRの状況を次ページに整理する。

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDPの調査)」

3.1.4 通信衛星GEO/MEO/LEO、観測LEOでのSDS整理

22-003-R-016

	現状最新	現状制約	制約の解決方法	今後の予想
通信 GEOの SDS	<p>SDS=広帯域デジタルパイロード≠SDR≠変復調</p> <p>通信の軌道上可変性、いわゆるフルデジタルパイロードは出現済ですすでに本格的に運用が開始されている。</p>	<p>SDRは復調・変調はしていない。 数10Gbps級の復調はハードルが高く、左記で事業可能であるため。</p>	<p>5GのG/W局であるgNodeBを完全に搭載化するためには通信データの復調（全部または最低限MPLS[マルチプロトコルラベルスイッチング]におけるラベル）が必要。現DPPよりも高速処理のデジタルパイロードが必要</p>	<p>左記（再生中継）は既に計画が公表されている欧州の開発計画や企業の動向を見据える必要がある。</p>
通信 LEOの SDS	<p>SDS≒SDR変復調</p> <p>通信データの復調を行っている可能性がある。抗堪性を変調方式書き換えで対処している場合はそれにあたる(前頁参照)。</p>	<p>データレートがGEOより低い（例17Gbps [Star-link]）、通信中継データも復調SDRの実現性は高い(Starlink?)。また衛星間の実現には何らかの復調機能は必要とみなしている。</p>	<p>同上。 LEOの場合は更にGEOと異なりユーザ・GW・衛星の相対位置が煩瑣に変わるため、GW局を削減するにはGateway局機能と衛星間通信は必須。</p>	<p>1衛星のデータレートが低いLEOの場合はすでにSDR⇒変復調の方向で進んでいるはず。但し確証はないため、最新のLightSpeedや今後のSymphonieをフォロー</p>
観測 LEOの SDS	<p>SDS⇒SDR変復調</p> <p>及び⇒エッジ処理 観測衛星では既に数Gbps級のSDR機器が提供され観測データもTLM多重でSDRでDLされている模様。周波数干渉や抗堪性対策もある。さらにUnibapは各種アプリケーションを軌道上でユーザごとに変更する試みを実証中。</p>	<p>試行段階。観測では雲除去、対象同定、変化点抽出、通信ではDVB-S2XへのSWでの対処、スペクトラム/信号分析、通信障害・ジャミング検知と再構成、PNT(測位)サービス、抗堪性ではDeep Learningを利用した耐ジャミング変調への変更、ロボティクス・画像航法、メッシュUNW、観測ML/AI、サイバー対処等今後極めて多くのアプリケーション</p>	<p>いずれも高性能の計算機やデバイスを必要としており、以下がハードとしてのトレンド。次の3.2項で詳細を記載。 1)産業用先端品のMPSoC（マルチコアプロセッサシステムオンチップ）による地上と同等の処理。例えばXILINX/AMD系FPGAではAMD系CPUやGPU、VPU、セキュリティ等マルチ処理 2)ML(機械学習)に必要な大容量耐放射線メモリ搭載 3)地上のIT技術や開発資産を適用できる製品開発 4)既に多くの試みがされているが、宇宙用と民生をハイブリッド化したシステムの試み ⇒近い将来、機能の更新頻度要求が強いコンステレーションはSDSが基本となると思われる（ASTEC）。</p>	

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査 (SDS/SDPの調査)」

3.1.5 衛星開発のAgile的及びスパイラル手法に関する調査

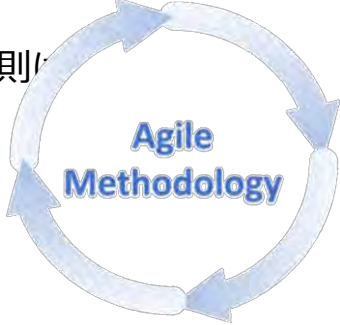
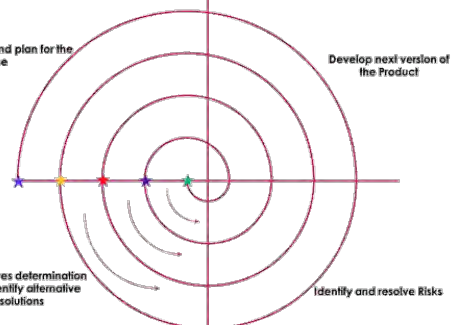
注意：これらの言葉は、主に民・官コンステレーション系で使われているが、ソフトウェア工学における“Agile software development”、ソフトウェア開発工程における“Spiral model”の一般的定義と同一ではない。

これらソフトウェアの開発アプローチを参考にした、概念的な衛星開発概念を指すものであること留意。

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDPの調査)」

3.1.5 アジャイル的及びスパイラル手法

22-003-R-016

SoftwareのAgile開発	SoftwareのSpiral開発
<p>S/Wのアジャイル開発の大原則は、時間と労力を浪費する不要な活動を排除することで、アジリティを実現すること。</p>  <p>https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering-comparison-between-agile-model-and-other-models/ https://digitalvarys.com/agile-vs-waterfall-vs-spiral/</p>	<p>スパイラル開発の主目的は、リスクハンドリングとテイク。</p> 
<p>各タイムラインイベント後に顧客にインクリメントVersionを提供することに重点を置いているため、やり取りがより頻繁でフィードバックが行われる。</p>	<p>主に様々な種類の予期せぬリスクに対しSpiral的にフィードバックをかけるものであるが、顧客とのインタラクションは少ない。</p>
<p>反復・段階的に開発しやすい小さなパーツに分割しやすい大規模なプロジェクトに適している。逆に小規模では効率が良くない。</p>	<p>プロジェクト開始時に想定しにくい様々な種類のリスクが発生しやすいプロジェクトに適する。多くの反復を行うため大規模には向かない傾向はある。</p>
<p>成果は、基本的に文書に依存しない。</p>	<p>Waterfall型ほどではないが適切な文書が必要。</p>
衛星のAgile的开发	衛星のSpiral開発
<p>代表例：Planet社の定義 https://www.planet.com/pulse/what-is-agile-aerospace-learn-planets-approach/</p>	<p>代表例：米SDA PWSA</p>
<ul style="list-style-type: none"> ➤ 新機能の衛星を完璧には程遠くても迅速にサービスへ供する方法。 ➤ 運用しながら機能を変化（実現）させて行く方法。 ➤ 顧客もイタレーションループに参加させる。 ➤ 一方通常の短期開発プロジェクトへの適用は難しい。失敗は許容されないため。大規模コンステレーションアプローチに適する。 	<p>SDAの例を後述。</p>

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDPの調査)」

3.1.5 アジャイル的及びスパイラル手法

22-003-R-016

『Agile的衛星開発』

- (ASTEC)一般的にソフトウェア工学における“Agile software development”は、移動体通信やNWシステム、Webのように進化の著しい分野で大規模なソフトウェア開発を小単位で分割し、トライ&エラーを許容しつつ開発期間を効率化する手法。**衛星で言われている『Agile的开发』は、このような厳密な定義はないがその概念を利用。**開発当初に必ずしも明確ではない衛星利用ユーザの目的と仕様をタイムリーに開発製品に反映するため、という**“最新の顧客ニーズの反映”**が動機。
- (Planet社)「衛星を打ち上げる前に、システムの機能・性能及びセンサの正確な物理的・光学的データを顧客にハンドリングして評価して貰う。**打ち上げ前に顧客自身の要求の明確化、及び企業側もその要求を極力衛星にフィードバック**することができる。但し**衛星はそれを極力吸収できる思想。**」
<https://www.planet.com/pulse/agile-aerospace-innovation-leveraging-synthetic-data-in-satellite-data-product-development/>

『Spiral衛星開発』

- (ASTEC)「Spiral開発」は上記と異なり、**衛星利用の目的は明確だがその達成閾値が従来より高いため、性能実現リスクの回避を主眼**とする。特に**開発当初に技術を固定化すると性能面での陳腐化や未達のリスクがある**ため、実証やプロトタイプへのフィードバックをSpiral的に回転させ、徐々に確実に技術のマチュリティを上げたいという**“最新の技術を段階ごとに反映しリスク回避を図る”**動機がある。
- (SDA庁) **PWSA**(Proliferated Warfighter Space Architecture、NDSAからリネーム)はSpiral開発を一番に掲げる。なお、次ページに全体の開発Policyを長官のスピーチ(@Milsat Symposium@2022)より抜粋。
 - a. Spiralサイクルを2年とし、それをTranche0,1,2・・・と定義。
 - b. 本来選定後2年でTranche0打上であったがCOVIDや部品エコシステムの混乱もあり遅延。
 - c. **それでも選定後2.5年の今年28機の小型衛星群(観測・通信)の打上配備**
 - d. **今までのDoDの常識を超えるスピード配備。**

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.6 Spiral手法に関する調査 (米国SDA庁 PWSA)

22-003-R-016

アジャイル的手法ではないが米国宇宙軍(USSF)のSDA庁がNDSAの二本柱と定義する衛星群のSpiral開発手法を整理した。**2022 10月 Milsat Symposium**のプレゼンによる。



宇宙開発庁 (SDA) 長官 Dr.Derek Tournear

- 前職：国防総省の宇宙研究開発担当次官補として、DoDの宇宙プログラムのギャップに対処するためのプログラムの責任者。
- **Harris Space & Intelligence (SIS)** の研究開発ディレクター
- 国家情報長官室 (ODNI) の情報先端研究プロジェクト活動 (IARPA) でシニアプログラムマネージャー
- **DARPAの戦術技術局**でプログラムマネージャー。DARPAでは、センサーと宇宙に重点を置いた大規模なプログラムポートフォリオを立ち上げ、指揮。
- **スタンフォード物理博士号を、パデュー大学理学士号を取得。**
- 2010年にパデュー大学卒。
- 2008年にDARPAからシステム技術に関する貢献でAward。

発言骨子 **Constructive disrupter**

1. 「SDAは建設的破壊者としての評価を確立しつつある。**最初は批判が多かった。⇒多くの内部批判を強いて紹介**」
2. 「SDAは**2年ごとに新しいCapability**を提供する。Spiralに目標に向かう。Trancheがその実現策」
3. 「**Proliferation(分散)とSpiral (開発手法)**がSDAの2大ポリシー」
4. 「標準化に関して。SDAはインダストリーが受け入れられる標準化を進める。**唯一の標準を押し付けることはしない。各企業の現状の設計標準をつなげるInteroperabilityをリードする。衛星間通信仕様がその例、速さが大事**」

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.6 Spiral手法に関する調査 (米国SDA庁 PWSA)

22-003-R-016

Proliferation(分散)とSpiral (開発手法)

SDAが考える“disruptive”アプローチ

「拡散とスパイラル開発は、宇宙軍全体の将来アーキテクチャに浸透している。」

1.分散(proliferation)

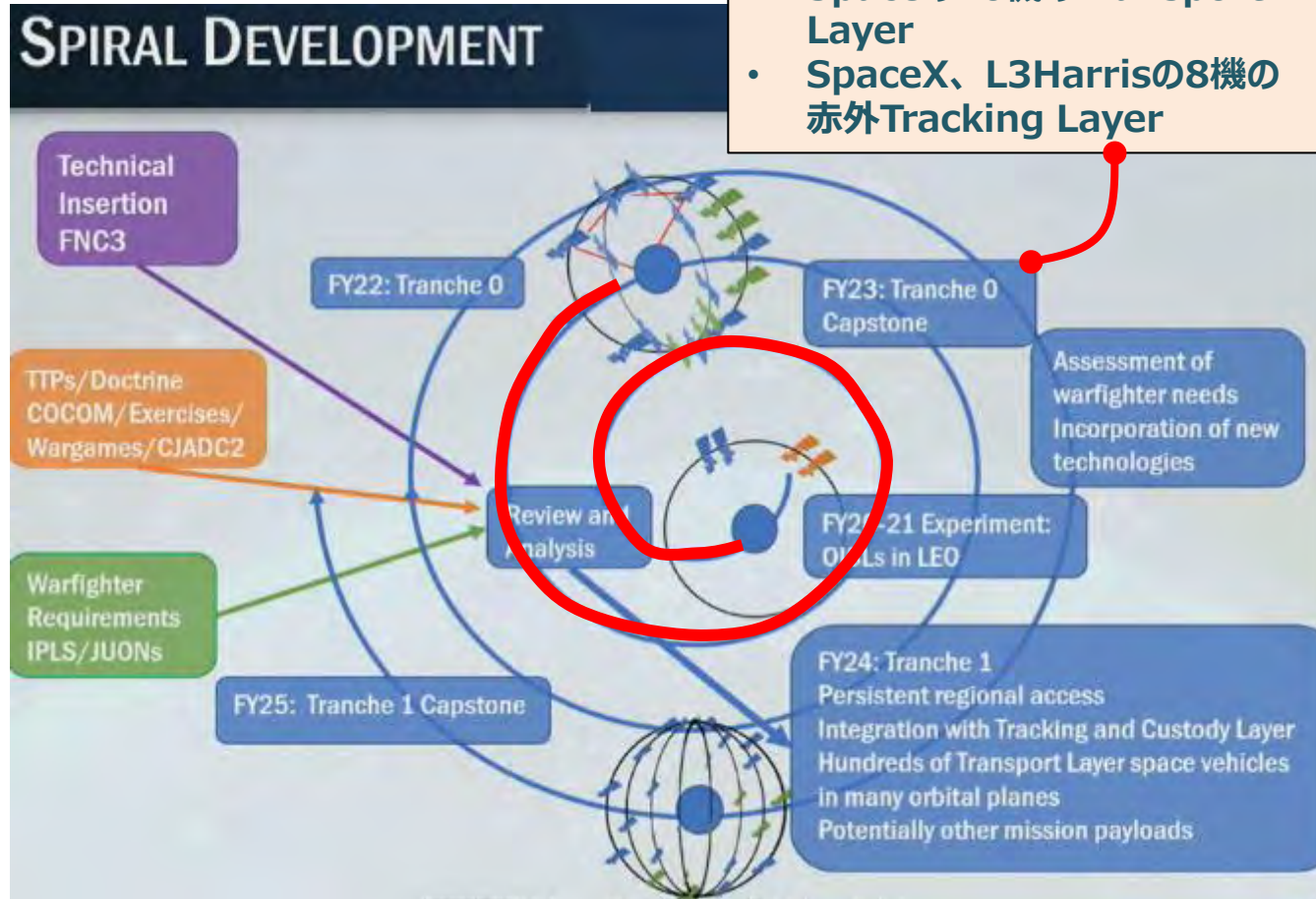
壮大なミッションコンセプトを多数の衛星に分散し全部で満たすことを考える。

数台が機能を失っても**全体で機能保持**ができるという**Resilience性**。

- SpiralではCapstone (成果)を各Tranche※での軌道上運用としている。(※予算単位を含む大きなプログラムフェーズ)
- Tranche0 : 28機(12月)
 - Lockheed Martin、York Spaceの20機のTransport Layer
 - SpaceX、L3Harrisの8機の赤外Tracking Layer

2.Spiral開発 ⇒

- 従来衛星のように、要求仕様を定義し、その衛星を10年かけて開発し運用し、それを繰り返すのではない。
- **約2年という期間でその都度新しい衛星を製造するという手法。**
- 多数機と小型衛星という条件はこの手法に適合しており、結果的に早く望ましいミッションコンセプトを実現できると考える
- **いわゆるSpiral開発**



3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.6 Spiral手法に関する調査 (米国SDA庁 PWSA)

22-003-R-016

NDSAの大きな目的

衛星群を整備するのではなく、①HGV・移動体標的・船舶標的検知・追尾、②火器管制ソリューションをあらゆる可能性から複数絞り込み、③最終的な指示を火器管制へ発令、これらをE2Eすべてを宇宙で行うことが目的。

①Transport Layerがシステムの根幹、一番先にTrancheを開始。各レーヤの基盤となる位置づけ。

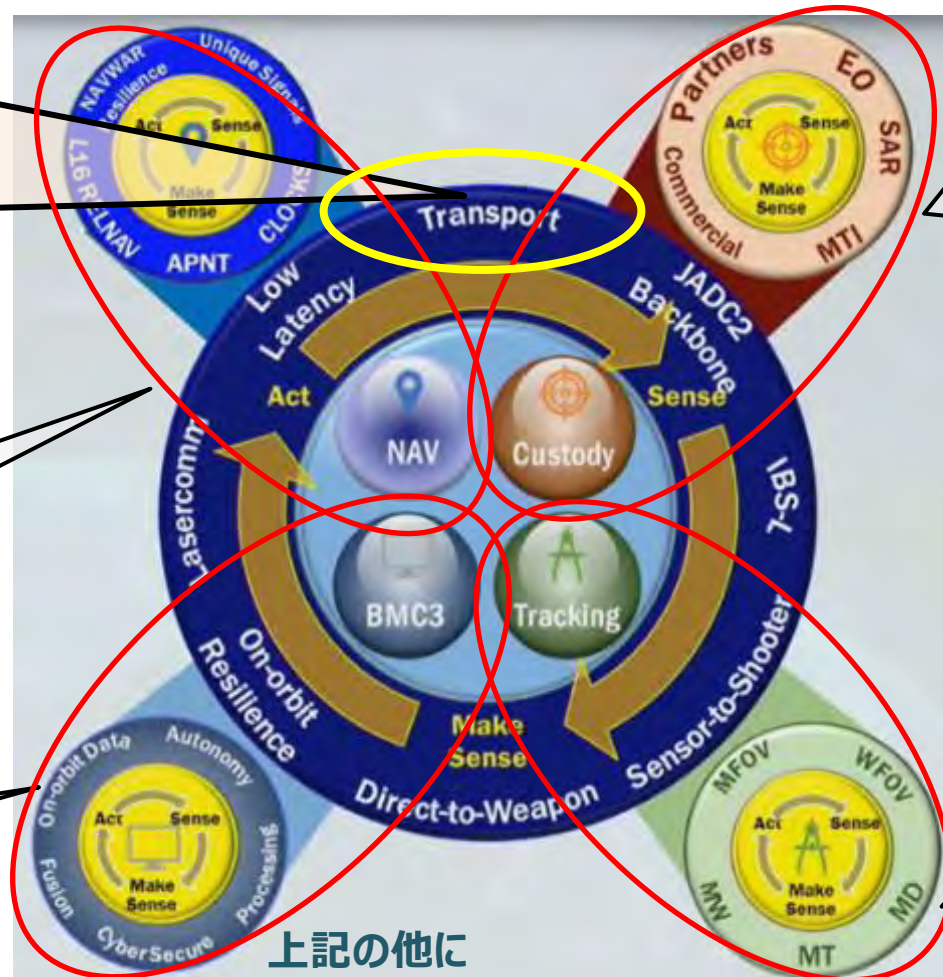
右記の青全体のサークルを指す。

- 地上のLink16及び陸・空の光端末へ接続、CMDは地上からあらゆる火器へ低レイテンシで接続。
- 各データを融合させ、最適な火器ソリューションを生成しコマンドする。

③Navigation Layer

- ユーザはGNSS + PNT複合受信機を使用、GPSが脅威を受けているかを確認可能。
- 受信機が地上スプーフィングされた場合を検出、PNTへ切り替えを行う。

④BMC Layer (Cyber secureされたもの)



②Custody Layer (ターゲットの監視)

- 民間・NDSA以外の安全保障衛星を含むミッションパートナーの光学・RFによるISR(情報・監視・偵察)衛星の取得情報をトランスポート層に接続することが目的。
- 5分の再訪性が目標
- NDSAアセットのTracking Layerとは層を分けている。
- 民間とDoDとの“Interoperability”が重要

⑤Tracking Layer (NDSAアセットのセンサ)

- 24/7/365
- missile warning (MW)
- missile tracking (MT)
- missile defense (MD)
- MFOV(中視野角) 米ミサイル防衛局(MDA)
- WFOV(広視野角)NDSA

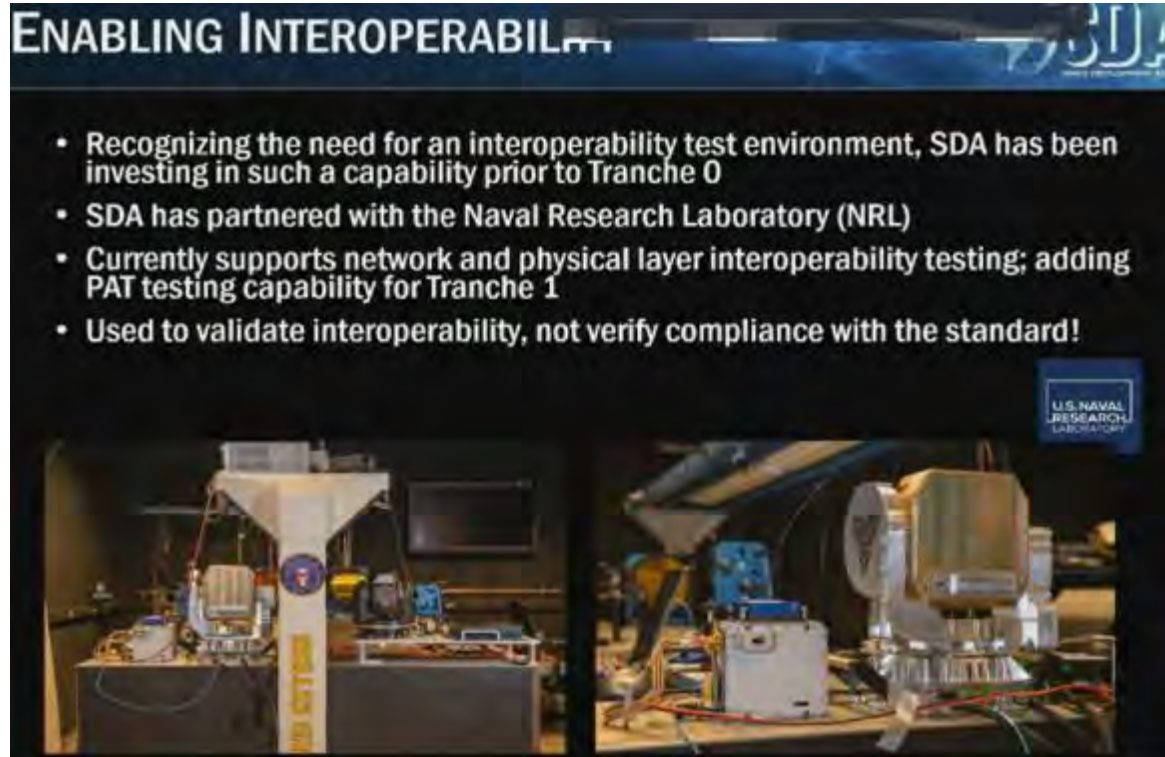
上記の他に

Deterrence Layer (宇宙状況把握)がある。

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.6 Spiral手法に関する調査 (米国SDA庁 PWSA)

22-003-R-016



複数企業を選定し進めている「衛星間通信システム」は、

- Spiral開発
- 各企業の実績と開発スピード
- 企業間Interoperability

を重視。

Tranche0で軌道上検証される予定。

- Across the four Tranche 0 teams (2 Transport, 2 Tracking), a total of four different OCT vendor solutions were carried through PDR:

複数企業の光衛星間端末の通信検証を実施。重要なPATシーケンスを含む。⇒PWSAのエコシステムを重視、最低限販社、可能な限り製造拠点を米国、最も難儀な4社による光衛星間を試験してリスクを削減。

mynaric

HQは独ミュンヘン。
LAとWDCにブランチ

Skyloom

HQは米Oakland

TESAT

HQは独
Backnang、
米国に製造
拠点設立

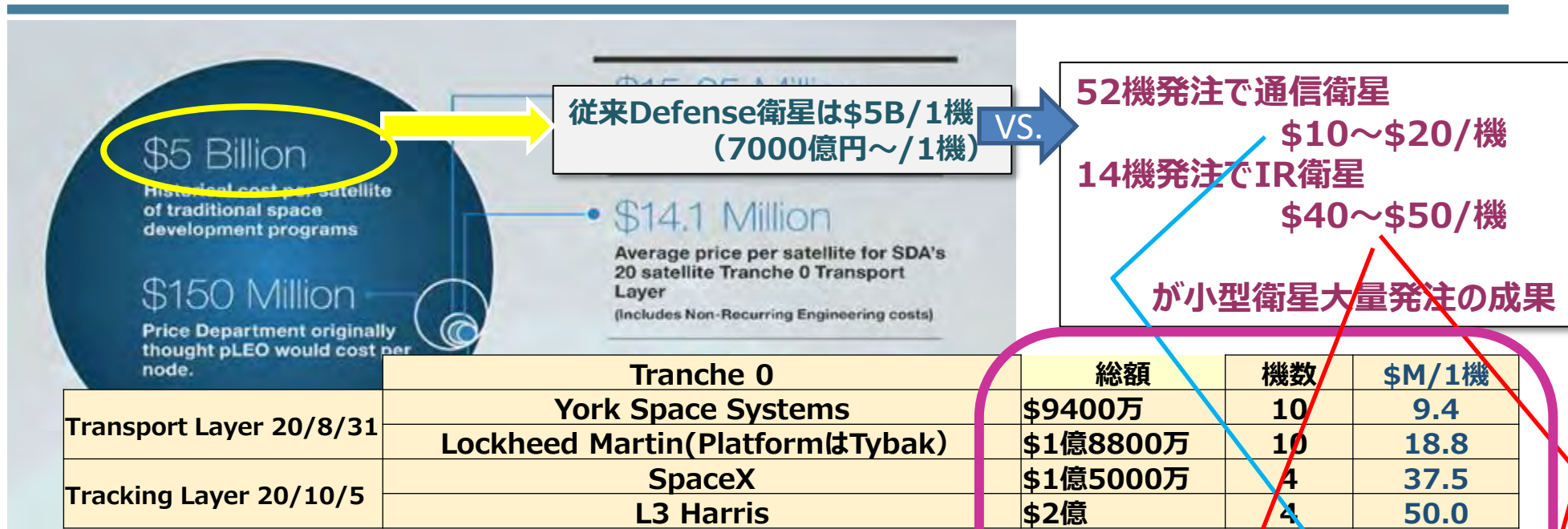
SA Photonics

HQは米カリフォル
ニア州、SBIRで著
名、米防衛企業
CACI傘下に。

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.6 Spiral手法に関する調査 (米国SDA庁 PWSA)

22-003-R-016



SpaceNewsより

Tranche 1		総額	機数	\$M/1機
Transport Layer 22/2/28	York Space Systems	\$3億8200万	42	9.1
	Lockheed Martin Space	\$7億	42	16.7
	Northrop Grumman(全42機をAirbus US S&Dへ発注、OISLはMynaric)	\$6億9200万	42	16.5
Tracking Layer 22/7/18	L3 Harris	\$6億1700万	14	44.1
	Northrop Grumman	\$7億	14	50.0

3月2日ViaSatellite

①Tracking Layer(IR) 7機250M\$ (\$36M/1機)

Raytheonと傘下のBlue Canyon(バス)/Seakr Engineering(ミッションComputing)

②CesiumAstro Link16で飛翔体と通信するLバンAPAA(ビーム数は不明)

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

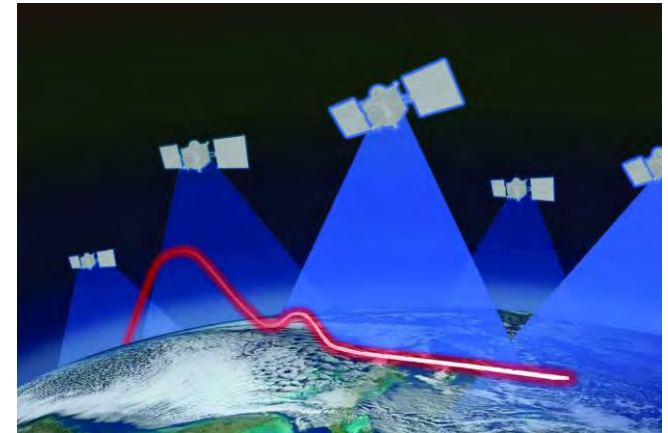
3.1.6 Spiral手法に関する調査 (米国SDA庁 PWSA)

22-003-R-016

① 設立当初の環境

<https://www.airandspaceforces.com/sda-delays-first-satellite-launches/>

- 宇宙軍 (USSF)の創設を含む一連の宇宙開発・管理政策の改革の一環として設立されたSDAは、**当初旧来のDoD流との大きな相違から批判**。
- 2019年の5月当時のUSAF長官は、SDAの創設と宇宙軍USSFの設立に反対、ミサイル追跡などのミッションを実行するための小型大規模なコンステレーションを批判。
- 背景にはWGS・AEHF等、**伝統的軍事通信が大型・ハイエンド・極めて高価な少数の衛星で実現していることからのチャレンジングな仕様と期間**にあり、「戦闘機に喫緊の情報を提供するアーキテクチャを何百もの安価な衛星に依存することは、米国国防上大きなリスク」



② Tranche0実証でSpiral開発の成果が問われる

<https://www.sda.mil/how-the-space-development-agency-could-have-died-any-number-of-ways/>

- PWSAのTranche0のファーストロット28機の打ち上げは昨年9月当初予定から、2023年3月(以降)に延期中
- 20機はトランスポート層 (LM、York)、8機は追跡層 (L3-Harris、Space-X)。
- 2020年8月31日にAward公表、従って**今回遅れても2.5年という極めて短期間で28機の小型衛星の開発と製造**を4社間インターオペラビリティも確認しながら推進。確かに従来DoDと異なる商用衛星以上のスピード感であり**“Spiral開発手法”による性能リスク削減の成果が軌道上で問われる。**

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.17 DX設計手法：MBSE/MBDのRF設計効率化例

22-003-R-016

Matlab/Simulinkを用いた設計(事例調査)

①BAE システムズ社

- マルチ変復調モード、マルチバンド対応をS/Wで変更可能なSDR機器へ適用
- MathWorksとXilinxのツールを使用したモデルベース設計を導入。
- Simulinkを用いることでシミュレーションとデバッグ作業を標準化
 - 熟練者によるコーディング645時間をモデルベース導入で46時間以下に短縮
 - 動作確認段階の前の設計初期段階でシミュレーションでアルゴリズムやS/Wバグへ対処



https://jp.mathworks.com/company/user_stories/bae-systems-achieves-80-reduction-in-software-defined-radio-development-time.html

②DigitalGlobe社(現Maxar Technologies社)

- WorldView-3衛星で衛星/地上間の観測伝送系システムをシミュレーション
- データ伝送速度向上とITUレギュレーション(帯域外/域外放射規定、姿勢Agilityと連動)
- Simulinkで衛星バス・通信系・機器。デバイスレベルのシミュレーションで画像伝送系のデータレート拡大に寄与



https://jp.mathworks.com/company/user_stories/digitalglobe-simulates-complete-satellite-to-ground-communications-systems.html

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.8 強み弱み分析 **中大型衛星**のSDS化と技術

22-003-R-016

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	<p>強み</p> <p>a. 日本の得意なすり合わせ型開発により、各分野で比較的高性能・高信頼で国際的にも不具合の少ない衛星システムを長年提供して来た</p> <p>b. 開発プログラムの中で必要性に紐づいた開発で技術力維持向上を図る土台があった</p> <p>c. 衛星・地上の役割や分担が明確で比較的既定のエコシステムが存在した</p> <p>d. 通信ではSDS向けのETS-9のような実証開発プログラムが少数だが機会あり</p>	<p>弱み</p> <p>a. ハードウェアへの依存が強く衛星の信頼性が高い反面、S/Wによる高機能化や軌道上機能拡充の波に遅れた。</p> <p>b. 衛星事業の動機を持つグローバルIT・通信企業がなく、またESAのような多国籍機関に属さないため単独国予算での宇宙利用事業になっている</p> <p>c. OSやファームが宇宙業界乃至は固有企業・固有プログラムでクローズし民生進化を取り入れるリードに欠けた</p> <p>d. 国内官需や輸出市場が小さくS/W標準化や生産性に関する投資動機に欠けた</p> <p>e. 新規SDS等に関する実証機会が少ない</p>
外部環境	<p>機会</p> <p>a. 観測や探査宇宙機、測位、防衛通信、安全保障など官分野で多くの種類の衛星を国産化し、宇宙利用拡大につなげてきた。</p> <p>b. 大学を中心とした小型衛星文化が日本ユニークな民間衛星事業とエコシステムを形成して来た。</p>	<p>脅威</p> <p>a. 海外企業(欧米・中国)が開発したSDS衛星及びコンステレーションの海外導入による官需への提供機会の縮小</p> <p>b. 逆に海外企業(欧米・中国)によるCOTS・SDS対応の衛星競争力格差により、海外市場の衛星レベル及び機器参入機会の縮小</p> <p>c. 諸外国にSDS関連技術・デジタル技術を川下・川上両方から押さえられることによる安全保障・経済安全保障・宇宙製造事業・技術の縮小。国内には利用事業のみ残る脅威</p>

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.10 補足：国内外デジタルデバイス状況整理 (Update)

22-003-R-016

デバイス	米国	欧州	日本
FPGA	自国の民生品の宇宙用部品化を予算的に支援	自国の設計リソースを集約し、宇宙用部品を開発	海外提携は改めて民生技術の搭載化研究開発に着手
CPU	(1) BAE Systemsの宇宙用 (2) 欧州由来のCobham(現CAES傘下)のLEONプロセッサを購入 (3) COTS部品を活用	(1) オープンソースのIPコアを活用、自在性確保(LEON) (2) 欧州知財のARMを用いたFPGAとの混載デバイス	(1) 特定のIPコアを用いた品種を都度開発 (ソフトウェアの共通性や移植性が薄い)
GPU	民生品技術の搭載化を予算的に支援	EUレベルでイスラエルのRamon. Space社に投資	—
System-on-Chip (SoC)	FPGA, CPU, GPUを混載した民生技術に基づくSoCの宇宙用部品化を予算的に支援(SHRECからPWSAへの適用)	FPGAとCPUの混載、およびGPUの宇宙用部品を開発	国産次世代CPUと国産次世代NB-FPGA、及び周辺I/OをSoC化する開発を行う予定。GPUは未計画
Neuromorphic Devices	民生品技術の搭載化を予算的に支援	—	—

米国国立科学財団 (NFS) 発表資料 : A. D. George, C. M. Wilson, “Onboard Processing With Hybrid and Reconfigurable Computing on Small Satellites,” Proc. of the IEEE, Vol. 106, No. 3, pp. 458 – 470, 2018.をもとに加筆

3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

3.1.10 補足：国内外デジタルデバイス状況整理 (Update)

22-003-R-016

COTS品の活用が多い。COTS品に対して、放射線や重粒子への対応を別途付加している事例もある。プロセッサはARM/AMD/PowerPCなどと幅広く、FPGAと組み合わせたSoCなども活用されている。

製造元(国籍)	モデル	プロセッサ	COTS識別	質量	サイズ	TRL	使用ミッション
BAE (米国)	RAD5545	BAE RAD5545(※34,35)	rad-hard by design	不明	6U-220	不明	—
Space Micro (米国)	CSP	Xilinx Zynq-7020 Dual ARM Core	COTS	74[g]	88.1mm x89.5	不明	ISS(※36)
SEAKER (米国)	Medusa SBC	Freescale Semiconductor PowerPC e500	Ukn	1.2[kg]	Extended 6U	9	—
Ibeos (米国)	EDGE Computer	Nvidia TK1	COTS w/SEE mitigation	150[g]	不明	6	—
Unibap (スウェーデン)	ix5-100	Microchip SmarFusion2 Arm Coretex-M3 AMD G-Series SOC	COTS w/SEE mitigation	不明	96mm x95mm x50mm	8	—
NanoAvionics (リトアニア)	SatBus 3C2	STMicroelectronics STM32 ARM Cortex M7	COTS	136[g]	95.5mm x90.17 x13.94mm	9	HYPSON-1 (※37,38), Bravo(※37,39)

※32:文科省受託事業実施のための秘密情報(開示).pdf P69-70から抜粋

※33:https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/8_soa_avionics_2021.pdf

※34:<http://www.aero-news.net/index.cfm?do=main.textpost&id=4a584ce7-b7c5-434a-8812-266f0ea308c0>

※35:<https://www.baesystems.com/en-us/product/radiation-hardened-electronics>

※36:<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20200000731/downloads/20200000731.pdf>

※37:https://mita.lrv.lt/uploads/mita/documents/files/renginiai/pranesimai/2018-03-08/vytenis_buzas.pdf

※38:<https://nanoavionics.com/news/innovative-ocean-research-from-ntnu-to-ride-on-the-nanoavionics-m6p-nano-satellite-bus/>

※39:<https://nanoavionics.com/news/bravo-nanoavionics-adds-satellite-twin-to-aurora-insights-global-wireless-spectrum-mission/>

3.1 SDSの技術リストと出口となるユースケース例は

3.2 オンボード処理の

3.2.4 強み弱み全体整理、

3.2.5 技術リスト

に統合して示す。

1. はじめに
2. 調査概要
 - 2.1項 目的
 - 2.2項 中間報告(11/8)での議論
3. 調査分析
 - 3.1項 SDS/SDR/SDP (*software defined satellite/radio/payload*)
 - 3.2項 オンボード処理
 - 3.3項 運用の効率化
 - 3.4項 SWアーキテクチャ
 - 3.5項 衛星推進システム
4. 質疑

(調査要求)

- (1) 軌道上オンボード処理が進展していることを踏まえ、世界における各分野のオンボード処理に関する技術動向や事業動向について調査を行うこと。同様の処理をオンボードで実施する場合と地上で実施する場合それぞれの長所・短所等を考慮の上、調査すること。
- (2) オンボード処理の1つの発展形として、観測データ等の記録や処理等を行う衛星を衛星システム内に設置すること等が考えられていることを踏まえ、国内外におけるこれらの動向調査、必要な技術等の調査を行うこと。
- (3) 軌道上での宇宙コンピューティングや軌道上作業等の高度な機能や、基盤となる高性能計算機・デバイス等の最新技術動向（海外の開発状況や企業動向等含む）を調査すること。また他に基盤となる技術があれば、その技術についても抽出し調査すること。
- (4) 本調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

3.2 オンボード処理 Executive Summary

1. 動向

- 各企業はLEOでは先端の産業用デバイスにRHBD(設計によるCOTSの耐放射線強化)を適用。
- **オンボードエッジ処理の実装やアプリケーションの柔軟性**等が大きなトレンド、今後も進展が大きいものと推察。

2. 大手・NewSpace、欧米での動き

- 欧米では各新興企業(Spire等)や大手のLockheed MartinもLEOではRHBDによる評価が定まりつつあるXilinx (AMD)のMPSoC Zinq(生産ライン等産業用、ManyコアMPU/GPU/VPU /Secureモジュール/メモリ/高速IO等を一体化、ヘテロジニアスと呼ばれる)を採用。
- 欧米は宇宙用ハイエンド品も開発継続しており、**宇宙・民生ハイブリッド化も含め3方向**でオンボード化で進展。
- 米国では産官学33機関連携組織SHREC(Center for Space, High-Performance, and Resilient Computing)で宇宙用開発及び産業用RHBDを実施。LockheedはSHRECで開発したCPU (ARM Cortex A9、Xilinx Zinq) をPWSAのTransportレーヤで採用(3月Tranche0打上予定)。
- 欧州は最近EU域内だけではなく米国・イスラエルへも並行して投資。**(EU域内⇒西側内へ拡大、欧米接近)**
- 競争領域はこういった産官学による**デバイス開発競争を既に一周完了し、地上のIT・NW・産業ライン制御レベルの高度なアプリケーションをいかに柔軟でかつ高信頼性で実装できるか**に移行。LEOでの活用中心

3. 国内外強み弱み分析

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

3.2 オンボード処理技術 デバイス (従来大手企業 の動向)

22-003-R-016

3.2 オンボード処理 Executive Summary : 大手のデバイス戦略

米国の次世代動向

1. 大手の産業用ベースの宇宙コンピューティング取り組み

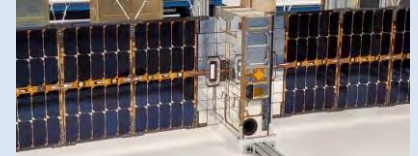
Lockheed 高性能化のためARMコアベースのXilinx ZynqをPWSAに採用

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

2. 大手の宇宙用コンピューティング開発

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

Transportレーヤ Lockheed



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

欧州の次世代動向

1. 宇宙用MPUの高性能化開発を継続

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

2. 産業用ARMを宇宙用へ転用。GNSS機能も実装。

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

産業用や車載ARMのエコシステム

3. ハイブリッドコンピューティング。

例：**TAS** MPSoC(宇宙用FPGAが民生を監視)

Airbus (宇宙用ASICが民生CPUを監視)

Airbus



欧州 DAHLIA
ARM CortexR52(4コア)

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

3.2 オンボード処理技術 (クラウド企業の動向 : 例 : AWS)

22-003-R-016

3.2 オンボード処理 Executive Summary : AWSの動向

1. AWS社(Amazon Web Service社)の従来衛星ビジネスモデルはタイムライン的地上局とクラウド提供
AWS宇宙部門は、衛星事業者がユーザであり、地上局やクラウドサーバ環境をDigitalGlobe、BlackSky、Spire、Capella Space、Open Cosmos、HawkEye 360等に提供。**地上局・運用SW・D/B・観測データ処理・記録**

①局 + 観測クラウド⇒装置事業

②地上クラウドを宇宙に拡大⇒サービス実証

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

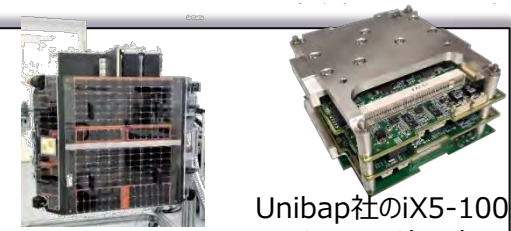
- AWSクラウドサービス用のエッジコンピューティングデバイス「Snowcone」をISSに搬入し地球から操作(※1)。
- 傘下のML Solutions Lab (AWSの機械学習専門家と顧客を結びつけ、機械学習活用コンサルティングを行うAWSサービス (※2)) はAxiom社と協力して、Nikon製カメラで観測した写真を処理するMLモデルを開発。これらの画像データをISSに保存し、Snowconeで処理(※2)。

※1:<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGN240CY0U2A620C2000000/>
※2:<https://www.codexa.net/aws-ml-solutions-lab/>

③衛星搭載クラウド環境の提供

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

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



D-Orbit社の小型衛星 SCV004(バスを提供)
Unibap社のiX5-100 Space Cloud infrastructure computer ARMマルチコア

④最終的的事业戦略は？

3.2 オンボード処理技術

は説明を後述

3.2.1 新興衛星事業者・製造側 のオンボードシステム

22-003-R-016

機関・企業	2nd European Workshop on On-Board Data Processing (2 nd OBDP、2022,June)		大分類
<p>★</p> <p>Spire (米国)</p>	<p><i>Brain in Space Making AI in space accessible to all</i> <i>Samantha Wagner, Spire Global</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 104機の衛星で観測の他にIoT・気象・SDA・トラッキング等の7事業をサービス。またオンボード処理高度化による“Brain in Space”と称する仕組みで、顧客や自社が産業用開発基盤で搭載系アプリケーションを検証しロードするAPI提供。 	<p>観測 + αの7つのSaaS。開発環境とAPIを提供しロード</p>
<p>★</p> <p>KP LABS (ポーランド)</p>	<p><i>System-level hardening techniques used in the COTS</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 産業用計算機コアの耐放射線対策徹底により地上と同等の画像処理アルゴリズムを搭載し、性能・コスト・信頼性の両立を目指している。 	<p>ML・AI 産業用FPGA 宇宙耐性強化</p>
<p>★</p> <p>UNIBAP</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <i>“SpaceCloud Cloud Computing and In-Orbit Demonstration, UNIBAP”</i> ➤ SmallSatConference2022の情報を含めて整理。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ MIT、スタンフォードなどと提携、フレームワークとしてGoogle RPC (Remote Procedure Call)とARMSを使用。Intel MiriadX(VPU)とGPU両方を搭載。最新のiX10等の紹介。 ➤ カスタマが資産として有するNVIDIAのCudaコードからHipifiを利用し、AMDに変換可能、両方の資産が使えることをデモ。将来はiX20で、最大7TFLOPS、その先はAMDの最新のRyzen6000を予定しているとのこと。(* 最新のモバイルPCコア、6nm線幅)。 	
<p>GMV社(スペイン)</p>	<p><i>Boosting Autonomous Navigation solution based on Deep Learning using new rad-tol Kintex Ultrascale FPGA</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 民生FPGAによるDeep Learning(NN)を用いた惑星地形のマッピング (搭載系SW) 	<p>民生FPGA、Deep Learning</p>

3.2 オンボード処理技術

3.2.1 新興衛星事業者 1) Spire社によるシステムとアプリケーション実装 22-003-R-016

① Spire社のビジネスモデル：“Brain in Space”は、NBデータのE2E solution、顧客のパイロードやS/Wを搭載するサービスもあり、その開発環境・UL環境を提供(ASTEC:どの程度課金できるか?)

1. 地上インフラの削減 (運用コスト削減) Spireの狙い
2. コンステレーション効率の向上 (ダウンリンク量の削減)
3. 機微な情報のレイテンシー削減 (迅速な判断)
4. 機敏な意思決定の源泉提供を自動化 (企業・政府向け)
5. データのデリバリ優先度指定を可能に (サービス課金)
6. クラウドでITと同様な衛星アプリ開発環境を顧客に提供



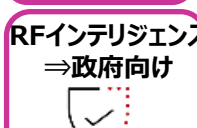
IOT / M2M



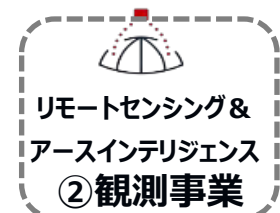
グローバルトラッキング&PNT



テレコム
メッセージング



RFインテリジェンス
⇒政府向け



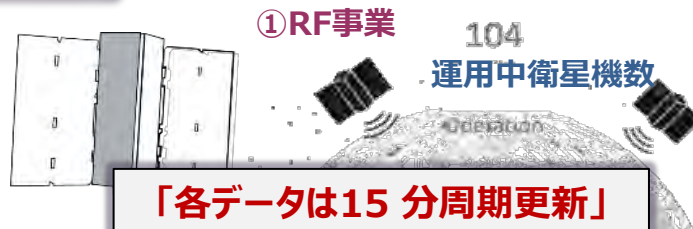
リモートセンシング&
アースインテリジェンス
②観測事業



③安全保障(SDA),
宇宙環境モニタ,
局地的気象

②最新の衛星構成

- 産業用Xilinx (AMD)社 Zynq Ultrascale+
- ◆ 民生産業用FPGA (KP LABS同様)
- ◆ AI アルゴリズムを実装し演算
- Nvidia Jetson TX2i
- ◆ 産業用GPU(256のグラフィックCudaコア)で取得画像処理
- Platform系はXilinx Zynq 7000 Series
- ◆ Platform部は顧客にはOpenしておらず、Spireが管理する(信頼性)。



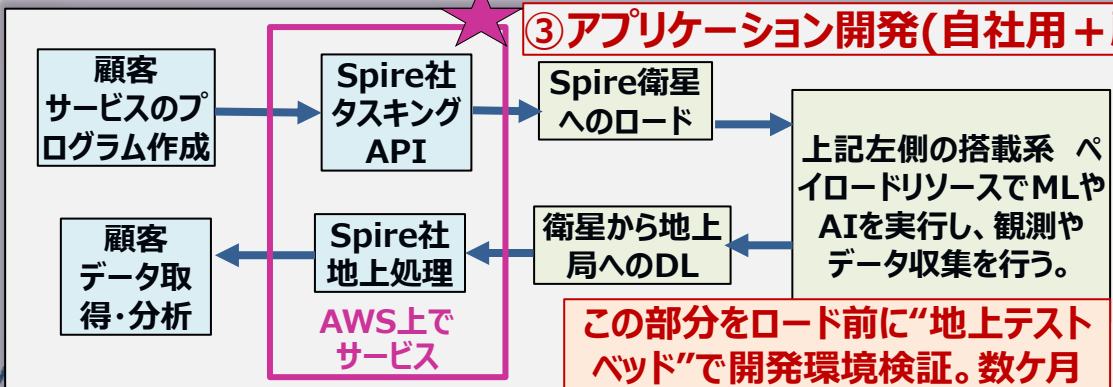
+27M

+70M中で、Spireのみが供給元となるメッセージ数 (僻地・孤立地帯) 1日でのAISにおけるMMSI※キャプチャ数

1日でデリバリするメッセージ数 +70M

MMSI※ (Maritime Mobile Service Identity) AISで規定された海上移動業務識別コード

③アプリケーション開発(自社用+顧客用)



“System-level hardening techniques used in the COTS - based data processing unit” - 2nd European Workshop on On-Board Data Processing (2nd OBDP), Piotr Kuligowski, KPLABS

3.2 オンボード処理技術

3.2.1 新興製造企業 2) KPLABS社によるアプリケーション実装方法

22-003-R-016

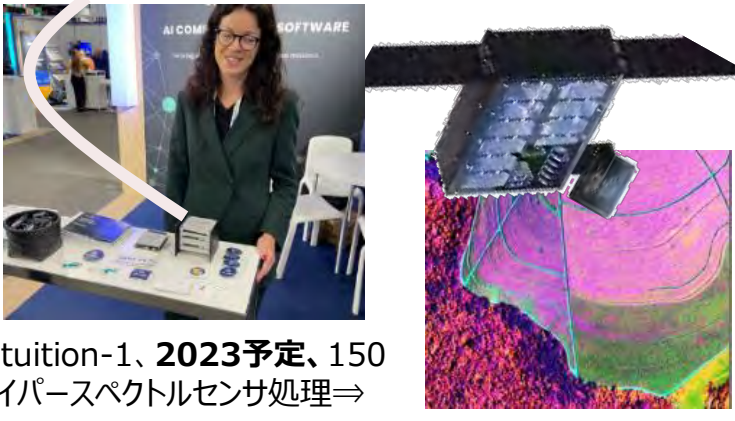
「産業用計算機コアの耐放射線対策徹底により性能・コスト・信頼性の両立を目指している」

①産業用でも放射線耐性が物性的にあるものを選定
5Gワイヤレス・自動運転・産業用IoTなどで使われる先端産業用デバイス

②IPその1 その上でハード・ソフト両面の重粒子・電子線蓄積対策を実施。
③IPその2 アプリはDNN(Deep neural Net)等の機械学習
向け画像認識アルゴリズムの搭載技術を有する。

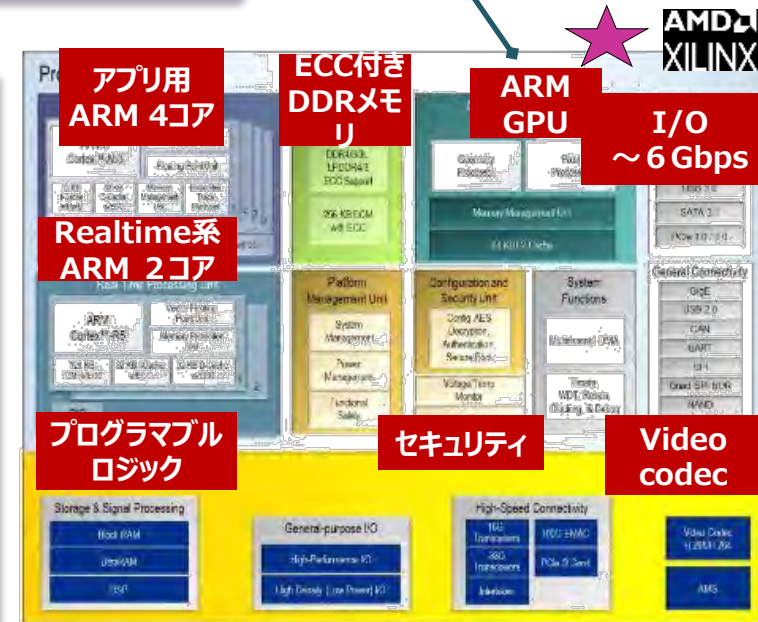
KPLABSは使用しているミッション
MPSoCに下記XILINX(AMD)
のZynq UltraScale+に左記
RHDBを適用し搭載化

④ 1Uサイズのコンパクトな計算機システム



Intuition-1、2023予定、150
ハイパースペクトルセンサ処理⇒

- 1. 放射線耐性COTSパーツ
- 2. 重粒子反転(SEU)対策に全電源ラインに保護回路
- 3. MPSoCの電源にSEU時の過電流保護回路
- 4. 全メモリにbitエラー検知/訂正EDACをSWで実装
- 5. 放射線SEU対策として、可能な範囲でTMR(三重系)、プロセッサは主従実装
- 6. 放射線による機能割込み(SEFI)の検出と自動ブート
- 7. 稼働中もスクラビングによるビットチェック



3.2 オンボード処理技術

3.2.1 SaaS的な事業動向と技術 -Unibap社-

22-003-R-016

- a. Unibapのアプローチは、衛星システムサイドがUnibapの処理ハードウェアを活用できるように、**オープンアーキテクチャを採用すること**。
- b. 2020年12月、ユニバップは**AWSと連携してクラウドサービスを提供すること**を発表した。コンシューマに近いAWS上で軌道上データを集積したり、ロード用のアプリケーション開発(ML/AI等)、APIを構築するためと推測(ASTEC)。⇒**AWSの項で示した通り**。
- c. **Unibap主体の衛星は現在2機軌道上にあり**、宇宙におけるエッジ、クラウド、**AIのテストベッドとして利用**されている。ESAがスポンサーになっており、ユニバップ上で実証された12のオンボードアプリケーションを実証中。ix5-100は、インテルx86-64CPU4つと、AMD製RadeonGPUを1つ実装したフレームワーク(ヘテロロジーニアス、MPSoC)である。
- d. Unibapの1号衛星は2021年6月に、2号衛星は2022年1月にファルコン9で打ち上げられた。

e. Unibapスピーチ@SmallSat2022サマリー

Unibapの目標は以下

- 1) **1～3分で高度なデータプロダクトを生成できること**
- 2) **99.9%の帯域(DL)利用率を達成すること**
- 3) **数日から数週間で高度なアプリケーションを衛星に迅速に展開(UL)できること**
- 4) **衛星利用率を大幅に向上させること**。

gRPC (Google RPC Remote Procedure Calls) は、2015年にGoogleが開発したプロトコルの1つで、オープンソースであり、HTTP2/Protocol Buffers を使ってデータをシリアライズし、高速な通信を実現。提供する機能としては、認証、双方向のストリーミングとフロー制御、同期および非同期のバインディング、キャンセルとタイムアウトの対応など。

- i. gRPC(右記)採用は、**①地上ITで広く使われていること**、**②エッジ処理のユーザー層を拡大するためには顧客が自身のアセットを活用できるように汎用環境を形成すること**、が理由であり、IPとして最近広く使われているgRPCを採用。宇宙のエッジユーザー・コミュニティを成長させることが事業拡大につながるというユニバップの戦略の一環と分析(ASTEC)。
- ii. エッジ処理で重要なのは、**データの信頼性(エラー許容andエラー訂正)**。Unibapは、Troxel Aerospaceと提携し、GPUのエラー訂正を行っている。Troxel社は、**COTS + Troxelミドルウェアとして適用可能な方式で誤り訂正を実装**しており、従来のRad-Harned-Technologiesに代わるアプローチと言及。但しいろいろな方法があるはず(ASTEC)。
- iii. **効果：①コンポーネントに採用する民生先端COTS採用のハードルを下げ、②性能を地上レベルまで引き上げ、③開発環境を地上IT分野と共有し、④さらに開発期間やNonRecコストを削減することが可能。**

3.2 オンボード処理技術

3.2.1 SaaS的な事業動向と技術 -Unibap社-

22-003-R-016

①対象物抽出（飛行中の航空機）

- 飛行する航空機の抽出の地上実験を SARANIASAT社要請で実施。
- SARANIASATはDrone、リモセンのデータフュージョン処理を得意とし、精密農業、政府向けsecureミッション事業。
- UnibapのiX5上のNNで飛行する飛行機を8kX10kタイルで抽出、トラックする。出力はイメージと位置データ。右記は例。



<https://www.youtube.com/watch?v=OpFwRj9XL1M&t=52s>



②対象物抽出（多くの自動車）

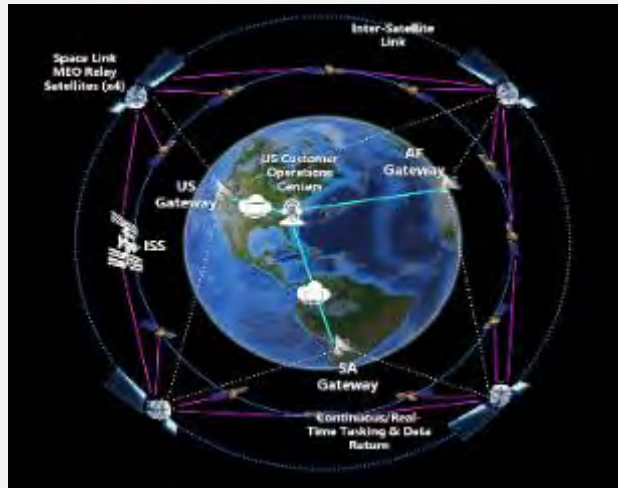
左記の例では212台を0.702 sとあり、かなり早い。

③Worldfloods 洪水の即し検出と警報

- 英国Trilliumは、Unibapの軌道上IX5実装したアプリケーションにより、画像取得の数秒後に洪水を特定
- 洪水マップを緊急対応者に送信する機能を備えた「Worldfloods」をSpaceCloud上でテスト。
- アプリは、オックスフォード大学Frontier Development Lab (FDL) によって開発。

3.2 オンボード技術の調査

3.2.1 SaaS的な事業動向と技術 宇宙サーバ・クラウド、商用中継 22-003-R-016



Spacelink社の宇宙サーバ

LEOコンステの取得した観測データをMEOへ集約し地上へDL 【出典：スペースリンク社】



Blue marble社
光ISL



Blue marble社
再生中継プロセッサ



Inmarsat及びAddvalue社によるCapella SAR画像・TT&Cの中継

Inmarsat-4の有している商用バンド(BGAN)を用いたサービス、が提供 【出展：Spacenews】

プログラム名	軌・事業構想	衛星間タイプ
①Spacelink社(米国) 観測データの中継・サーバ構想	<ul style="list-style-type: none"> ➢ MEOコンステ ➢ 顧客のLEO観測データを集め、処理・地上局へ中継 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ RF ISL (Ka帯) および ➢ Mynaric社製光ISL ➢ Blue marble社製光ISL
②WarpSpace社 観測データの宇宙サーバ・中継	<ul style="list-style-type: none"> ➢ MEOコンステ ➢ 顧客のLEO観測データを集め、処理・地上局へ中継 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 光ISL
③Inmarsat + Addvalue社 CapellaのSAR衛星のTT&C・低速画像のリアルタイム中継	<ul style="list-style-type: none"> ➢ GEO 既存商用衛星の新規サービス ➢ タスキング及びX-SAR画像をリアルタイムで中継・取得可能 (200kbpsと低速) 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Lバンド低速RF

3.2 オンボード処理技術

3.2.2 従来衛星製造企業 のオンボード処理システム

機関・企業	2nd European Workshop on On-Board Data Processing (2 nd OBDP、2022,June)		大分類
<p>Airbus独、 EVOLEO※1、 ESA</p> <p>★</p>	<p>Dependable MPSoC framework for mixed criticality applications</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 民生と宙用部品の混在によるMPSoCの設計検討。XILINXのUltraScale+によるハイエンドペイロード処理と宇宙用PolarFire (Microchip社)FPGAによるCritical Functionの実装で、STT+GNSSやML/AIをUS+上で実施し、Hypervisorで監視。 ➢ 2023軌道上実証。 ➢ 上記民生・宇宙用のハイブリッドシステムをARM社 TrustZoneで“secure”と“non-secure”に分ける思想。 	<p>民生FPGA +宇宙用 FPGA</p>
<p>TAS、CNES、 Ramon社 (イスラエル)</p>	<p>Evaluation of New Generation RAD – HARD Many – Core Architecture for Satellite Payload Applications</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➢ CNESは宇宙用RC64(64コアDSP)の通信ペイロードへの適用を考へており、TASが観測衛星Pleiadesの4バンド光学データ圧縮をCCSDS 123.0-b-2に準拠して評価。64コアによるパラレル処理が貢献。一方、選定は多くの方式からすべきと慎重。 	<p>宇宙用 DSP/CPU Pleiades衛 星の並列処 理評価</p>
<p>ESA、 Airbus、カタ リューナ大</p>	<p>GPU4S (GPUs for Space): Are we there yet?</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 多くの知見(20個)を紹介、“lesson8:NVIDIA GPUs offer higher performance but AMD better properties for space”等。 	<p>民生GPU、 多くのGPU を比較評価</p>
<p>CAES (スウェーデン) (Cobham Geisler)</p>	<p>GR740 SINGLE BOARD COMPUTER</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➢ CAES(=Cobham Geisler, Sweden)の4コアSparcV8系LEON Processorの開発状況紹介。2022/9月に欧州の次期スターセンサ部品に選定とのこと。 	<p>宇宙用 CPU</p>

- ※1 EVOLEO(独) : 本拠ポルトガル。発表は独拠点。宇宙、輸送、エネルギー、健康、産業、NewSpace対象の欧州デジタルデバイス拠点、中小企業へも投資。
- ※2 MPSoC : Multiprocessor System on a Chip : XILINX社が表明したマルチタスクのヘテロジニアスプロセッサ。CPU/GPU/FPGA/VPUをパッケージ化。

3.2 オンボード処理技術

3.2.2 従来衛星製造企業 のオンボード処理システム

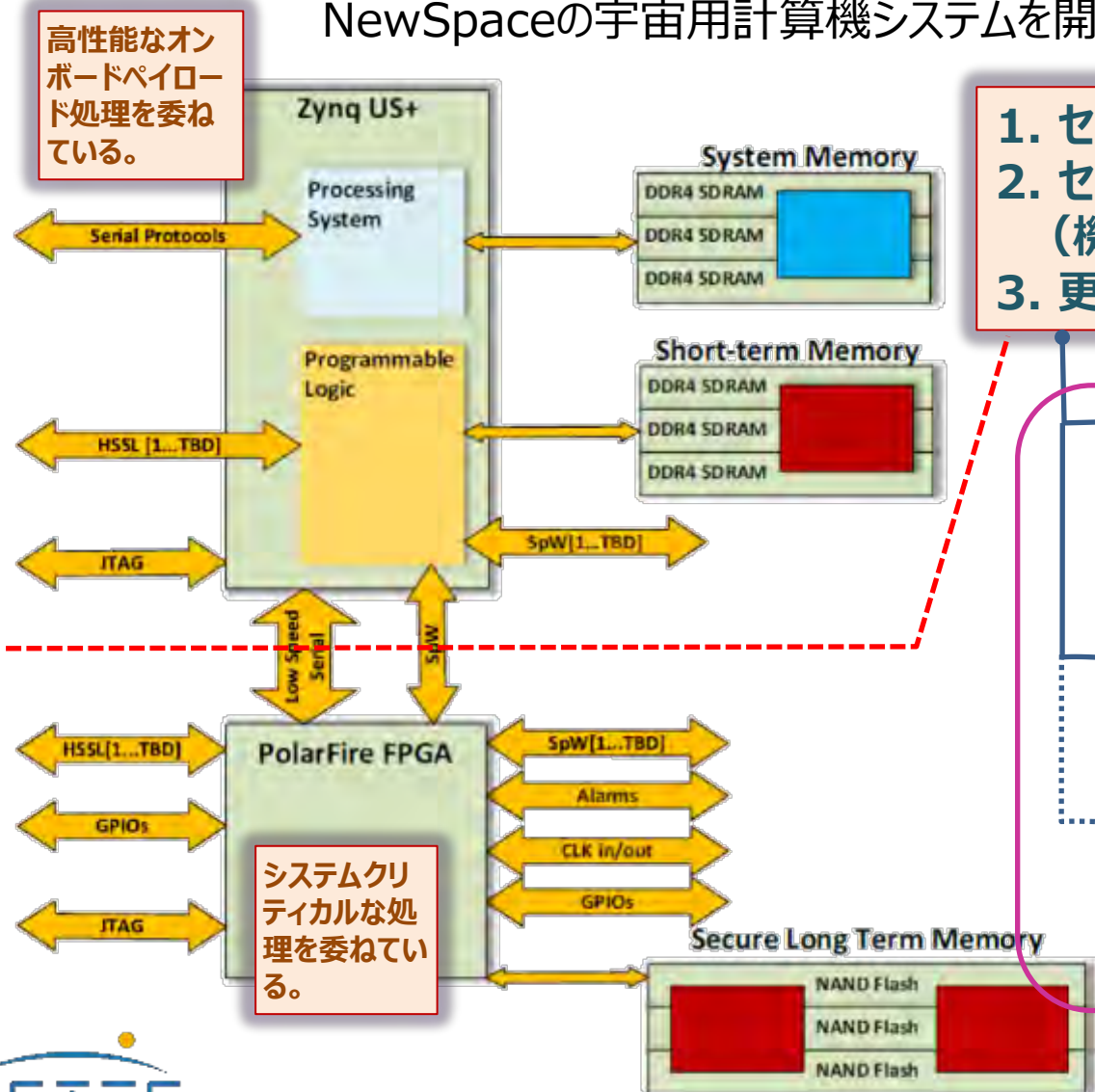
機関・企業	2nd European Workshop on On-Board Data Processing (2 nd OBDP、2022,June)		大分類
Airbus仏	High Performance Parallel Payload Processing for Space (HP4S)	▶ 欧州GR740とKarley社Rad-tolerantを単独及び強調させて比較。	宇宙用CPU、民生
DSI Aerospace Technologie、独	High-Performance Data Processing Unit for Space Applications	宇宙用既製品RTG4から民生のrad-tolerant、あるいはそうでないZinq Ultrascale+まで5種類をベンチマーク評価。自社製にKintexを組み込んだシステムを宣伝。	民生FPGA (tolerant型) の組み合わせ
TAS仏 (Ruag)	multiMIND – High Performance Processing System for Robust NewSpace Payloads	宇宙用、民生のみ、ハイブリッドシステムを数種類比較、ESA IoT衛星 (AIテストベッド, EM2022)等へ選定中	民生、宇宙用、ハイブリッド
Airbus仏、ESA、CNES	NG-Ultra validation and on-board processing board development	宇宙用FPGA(SoC)であるNG-Ultraの開発の紹介。AirbusはDAHLIAプログラムを主導し(TAS・STマイクロ・NanoXplorer社が参画)、これらをAssyしたシステムも検討	宇宙用 FPGA(SoC)の開発
Ramon (イスラエル)	Ramon Space RC64-based AI/ML Inference Engine	欧州プロセッサGR712開発時に耐放射線IPを供給、独自に宇宙用64コアプロセッサ (DSP)を開発しML・AI・通信制御等に応用。これらの紹介。	宇宙用64~256コアプロセッサ(DSP)
SEAKR	Blackjackの実証衛星Mandrake-1,-2の自律コンピューティングシステムの調査分析。Web情報による。	ブラックジャック (DARPAコンステ) の開発リスクを抑制するためのMandrake衛星で実証する自律コンピューティングシステム。BMC3(バトルマネジメント、コマンド、コントロールおよびコミュニケーション)の機能を衛星に初めて実装とのこと。なお、今年5月にMandrake2の2機の衛星間通信を成功。	

3.2 オンボード処理技術

3.2.2 オンボード処理システム -ESA/Airbus/EVOLEO-

22-003-R-016

ESA、Airbus、EVOLEOのチーミングで開発中。EVOLEOは欧州で戦略的にNewSpaceの宇宙用計算機システムを開発する拠点、生産はしない。



1. セキュアサイドとノンセキュアサイドの分離
2. セキュア/ノンセキュア間データとフローの監視 (機械学習も用いてcautionや故障検知)
3. 更に外部スーパーバイザで上記を監視

● Zynq UltraScale+ (図の上部)

- 高性能なオンボード処理
- オンボードSWによるペイロード アプリケーション

● PolarFire FPGA

- システムクリティカルな機能、制御機能

● OBC (上記と別に実装、図中にはない)

- TLM/CMD、SpaceWireルータ
- ペイロード計算機ボードの監視と回復
- 重要データの保存、TMR(3重)構成のNANDフラッシュ処理

3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.2 オンボード処理システム -イスラエル Ramon Space社-

22-003-R-016

RAMON Space

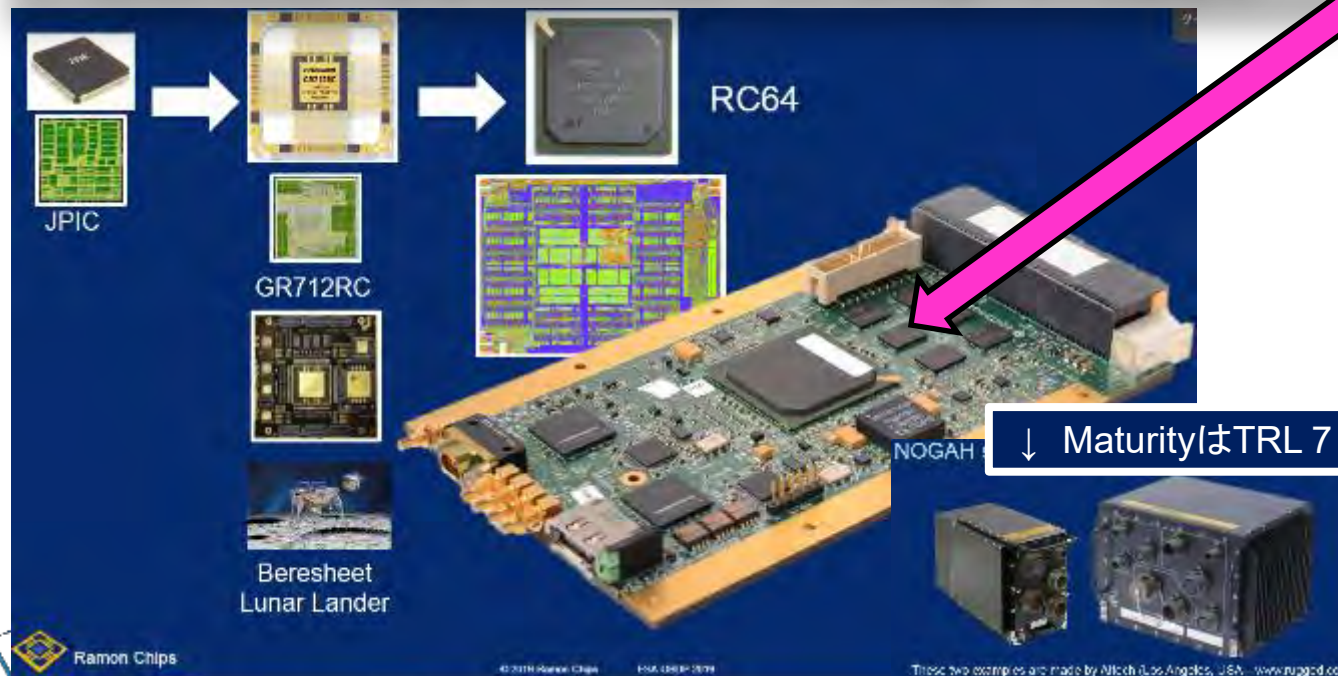
- GR712のGeisler-IPでは、Radiation-Hardened-by-Design (RHBD) SOIで貢献。
- ESAもイスラエル政府とともに開発資金を提供。
- 一方ビジネス的には米国に販社を設立し米政府系衛星への供給を図る。
- DSPマルチコア数64個、300 MHz, 40GFLOPS。
- このRC64を多数組み合わせさせてデジタルパイロードを構成。

最近の開発状況

- LEOだけではなくGEOの用途(通信帯域数100Gbps)や寿命もScope
- AI/MLのCNNや必要な256コアDSP、VCC用PB級メモリも開発中

<https://indico.esa.int/event/182/contributions/1510/attachments/1398/1623/1240-Ginosar.pdf>

現在の欧州標準の
GR712-LEON3の
500倍とのこと



左記はESA資金での3U衛星向け送信機 (1Gbps) 通信衛星向けに下記用途を考えている。

- DBF
- Channelization
- Modems
- Interference Detection and Mitigation

Written permission from ASTEC

3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.2 オンボード処理システム -イスラエル Ramon Space社-

22-003-R-016

VGG※による各ML機能 Ramon資料より

• ML in Space for EO/Remote Sensing

- Cloud detection
- Object identification
- Change detection

• ML in Space for Communications

- DVB-S2X / RCS2 modems
- Anomaly & interference detection
- Modulation classifier
- PNT

⇒抗堪性変調方式 (Deep Learningを利用した耐ジャミング変調)

• ML in Space for Robotics, Vision Based Navigation, Docking & Landing

• ML in Space Network

SDN and Constellation Networking

• ML in Space for Cybersecurity

• ML in Space for ...

<https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-atpi-public/8f68ec8c7b664da898372c1ef3ed9b6c>

⇒観測エッジ処理

- ⇒雲除去
- ⇒対象同定
- ⇒変化点抽出

VGG※ (Visual Geometry Group)
Oxford開発のMLアルゴリズム

⇒通信

- ⇒スペクトラム/信号分析
- ⇒通信異常やジャミング検知

⇒ロボティクス・画像航法

⇒通信NW

⇒セキュリティ・サイバー

30 © 2021 Ramon.Space

メモリに対する対策 (VGGRC64のAI用メモリ対策)

1TByteメモリを10×10cmのcardで実現

- まずはLEO向け1TBで5年を保証
- GEO向け100TB~1PB、寿命設計20~30yを開発中

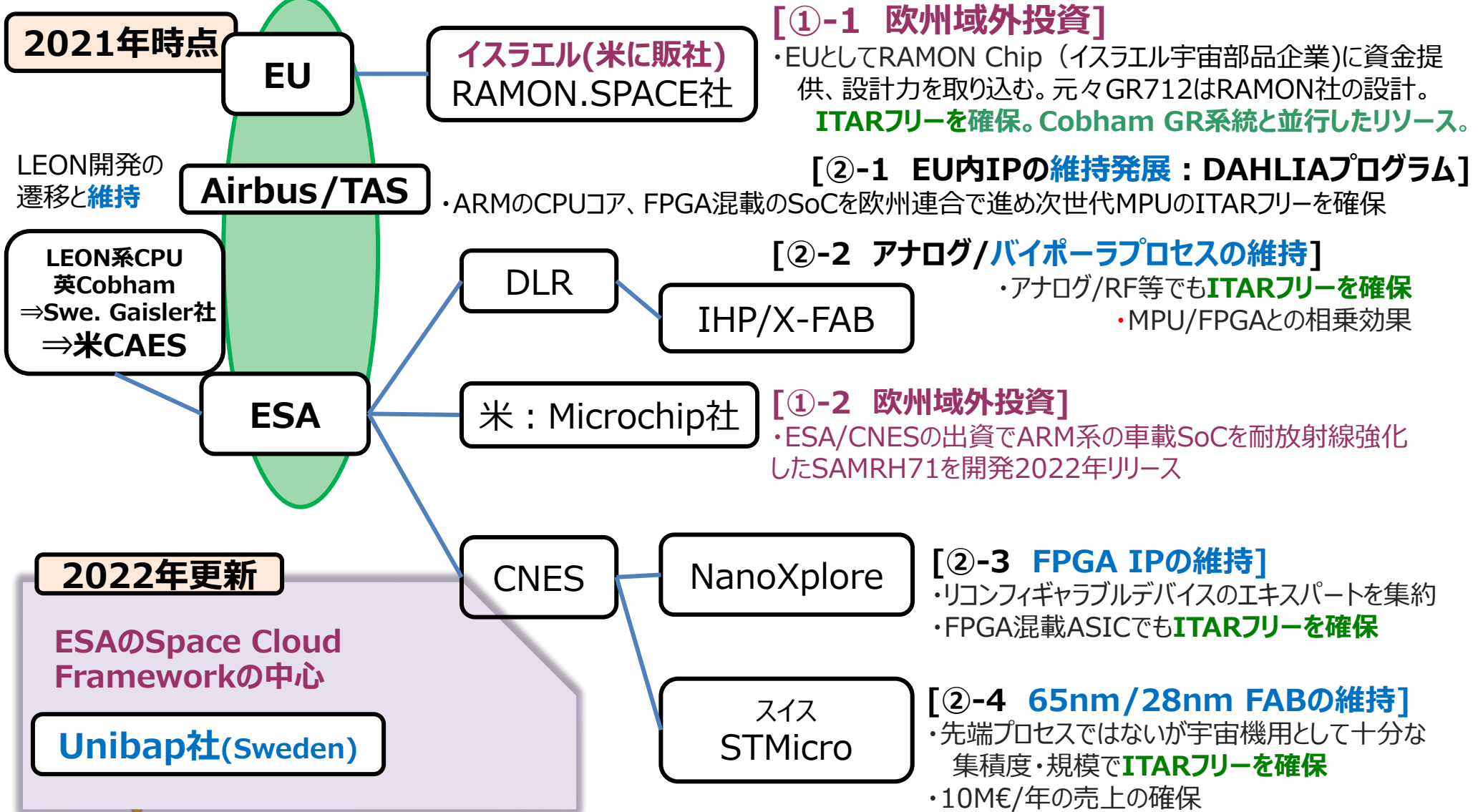


3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.2 オンボード処理システム 欧州におけるCPU/FPGAの複合的開発状況

22-003-R-016

欧州はデバイス開発を網羅的・複合的に進めている印象



3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.2 オンボード処理システム -SEAKR社-

22-003-R-016

- **Pit Boss** ブラックジャックの開発リスクを抑制するプロぐらむ。ARM社の高性能マルチコアプロセッサと複数のGPUを組み込んだSEAKR社開発のペイロード計算機システム実証。
- 昨年Falconで2機打上、5月に軌道上実証（次ページ）。
- スーパーコンピューティング級と称するミッション処理ハードウェア・ソフトウェアの総称。機能要素としては大きくは「コンピューティング機能」「暗号化・セキュリティ機能」「ミッション機器の制御機能」「各種モジュラーソフトウェアを連携させるシステムインテグレーション機能」から構成されている模様。
- BMC3(バトルマネジメント、コマンド、コントロールおよびコミュニケーション)の機能を衛星に初めて実装とのこと。
- 開発体制は以下で、多くのC4ISR、IT企業、新興企業が名を連ねている。

◇Prime	SEAKR Engineering社（現Raytheon Technologies傘下）
分担	スーパーコンピューティングハードウェア
SEAKRのチームには、Microsoft、Applied Technology Associates、Advanced Solutions Inc、Kythera Space Solutions（⇒Satellite 2021参照）、KryptPhase	
◇SubPrime (CoPrime)	Scientific Systems Co. Inc(SSCI)社
分担	コラボレーティブミッション自律ソフトウェア
SSCIチームには、Orbit Logic、Emergent Space Technologies、Raytheon BBN、LeafLabs、Kitware、HawkEye360、Innoflight	

<https://apnews.com/press-release/pr-newswire/technology-c27dd10605038525788338f621217a3c>
<https://www.ssci.com/category/ssci-in-the-news/>

Proprietary Information : Not to be disclosed or reproduced without specific written permission from ASTEC

3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.2 オンボード処理システム -SEAKR社-

22-003-R-016



Mandrake-2 2機

2021年7月

2022年5月

Falcon-9で打上

2機の間で衛星間光通信実証を成功

結果は40分で280Gbit(平均115Mbps)で送受信。
相対距離は114km。

<https://breakingdefense.com/2022/08/darpas-mandrake-2-satellites-communicating-at-the-speed-of-light/>

Mandrake1(1機 : 打上未)

- Pit Bossシステム (計算機システム・通信NW制御) の軌道上実証、放射線影響とプロセッサ検証。
- SEAKR (現Raytheon technologies傘下)がPitBoss提供とともにプライム。
- その下で、Astro Digital社が衛星バス提供、Advanced Solutions社がフライトソフトウェア作成
- Maverick Space Systems社が統合・総合テスト担当とのこと。GPU3台、20mGSDカメラ

<https://www.seakr.com/proliferated-space/>

Mandrake2(2機、5月にOISL成功との発表)

- Blackjackに搭載される衛星間光端末(SA Photonics社)を用いた光通信実証。
- 衛星間、衛星地上間、USAFの飛翔体 (MQ-1 Predatorの後継のMQ-9 Reaper) との光通信。
- SDA主導でLINKSと呼ばれる他の小型衛星との通信実証も予定。

<https://spaceflightnow.com/2021/06/28/space-development-agencys-first-satellites-to-launch-on-spacex-rideshare-mission/>

3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.3 強み弱み分析 1) 観測衛星のオンボード処理化に関する条件整理

22-003-R-016

A. 光学リモートセンシング衛星における一般的な画像処理プロセス

- 1.Raw画像生成（いわゆるLevel 0相当） + メタデータの生成（RPCファイルなど）
- 2.プロダクト画像生成（放射輝度補正や幾何補正などを行ったLevel 1~1B）
- 3.GIS処理（オルソ補正、モザイク画像生成など。Level2以上）
- 4.高次処理（AI処理で言われるような物体検知・数のカウントなど）

なお、販売するデータは以下の2ないし3であり、工学的メタデータが添付される場合もある。

B. オンボード処理導入にあたっての検討条件・制約

- 1.A.項プロセスを進めるに従い生データよりデータ量は増えるため多くのストレージを必要とする
- 2.オンボード処理をA.項のどのレベルまで、どの程度の画像精度を前提に行うかのニーズ分析が重要
- 3.コンピューティングリソース（主にGPU/FPGAやメモリの電力）が主要な物理的制約
- 4.GIS処理はDEMデータやBase Mapなどが必要で、これらの最新値を衛星内に常駐させるのは現状ではあまり現実的ではない。
- 5.高次処理では衛星バスデータを利用するため、オンボード処理の場合この機能を追加することが必要。
- 6.オンボード処理の一つの動機であったダウンリンク速度は近年向上が進み必ずしも大きなボトルネックではなくなりつつある

C. ユーザニーズとコスト対価のトレードオフ

- 1.上記B.の条件を考慮しつつ、『撮像量や機会を増やす(=データ量を増やす)』ことと、『オンボード処理をする(=データの付加価値を付ける)』ことの組み合わせでユーザの期待に対応できるか、
即ちコストプラスの価値ありとカスタマが受け入れ、事業側の利益向上にもなるかが判断ポイント。
- 2.他方で、一般的な高機能化競争のように他衛星事業者の動向も重要。オンボードが差別化機能でかつ他事業者が許容可能なコスト対価で供給できる場合、オンボードはトレンド技術となる。他の技術と同様である。

3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.3 強み弱み分析 2) 観測衛星のオンボード処理化SWOT その1(小型観測衛星) 22-003-R-016

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	<p>強み</p> <p>a. FPGAベースの中央集権型アーキテクチャとなっており、事後的にソフトの追加・修正可能な余地が大きい</p> <p>b. 衛星開発から運用だけでなく衛星画像プロダクト生成を全て自社で完結しており、必要なノウハウを保有している</p> <p>c. 光通信端末の開発を行っており、オンボード処理が前提としている即時DLを念頭に置いた技術開発を進められている。</p>	<p>弱み</p> <p>a. オンボードで画像プロダクトを生成するようなデータストレージ体系になっていない。</p> <p>b. 現在軌道上にある衛星については画像生成を地上で行う前提でシステムが構成されているため、プロダクト化されたデータを前提にしたオンボード処理については、具体的な(実現可能性のある)議論を行うことが難しい。</p>
外部環境	<p>機会</p> <p>a. 半導体の技術進歩に伴い、省電力・省リソースで大きなコンピューティングパワーを使えるようになってきている。</p> <p>b. 衛星データを実運用の中で使うことが想定され始めており、利用用途開拓の機運が高い</p> <p>c. 地上では通常行わない低レベルデータに対して処理を実施することとなり、この点で技術的にも新しいサービス開発の機会となる</p>	<p>脅威</p> <p>a. 多くの地球観測衛星オペレーターが検討・実証を始めているリアルタイムタスキング・リレー衛星によるデータ中継が業界に与える影響が大きく、適切な時期に技術獲得ができないと取り残される可能性がある</p> <p>b. 特に実装するオンボード処理の内容によって適切なプロダクト処理が異なる可能性があり、実装・利用用途について技術的な実現可能性を踏まえた準備と当初設計が必要</p>

3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.3 強み弱み分析 2) 観測衛星のオンボード処理化SWOT その2(中大型観測・通信) 016

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

3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.4 オンボード処理・SDSに関する強み弱み整理・重要項目 ASTEC

22-003-R-016

- オンボードやそのシステム技術であるSDSに関して遅れは認めない。一方今までの長年にわたる宇宙ミッションでの成功実績、今後の開発投資、民間衛星事業のスピード感を鑑み、下記によりシステムの成果を早期に狙うことも可能では。

次頁に抽出

動向分析サマリ

海外の動向分析

通信・観測・測位でSDSの開発と実用が進む。背景にデバイス・エッジ処理等地上民生技術の適用進展と軌道上可変性(サービス・安全保障)ニーズという需給一致性がある。

1. 静止通信衛星

- 米国はDoDプログラム/企業で軍事向け、欧州はARTES/オペレータ/企業でデュアルユースにデバイス・計算機・通信システムを継続的に開発
- 欧米民間グローバルオペレータ (Viasat、SES等) はデジタルペイロードによるSDSを実配備し、需要変化の速いデータ通信サービスに対応。市場が大きくまた域内調達の基本。
- 測位もNTSでデジタル通信を実証(2023)

2. 観測コンステレーション

- コンステレーション事業者はデータ伝送系のSDR機能と共に軌道上でのソフトウェア書換により観測機能をアップグレードすることを始めている。
- また取得画像のオンボードエッジ処理により、情報取得の効率化やダウンリンクコストの低減を目指す動きも進展。
- 産業用デバイスやML/AI/IT等の日進月歩の技術をタイムリーに衛星に反映する下地が豊富。

3. 通信コンステレーション (PWSA、Starlinkを例)

- 大手もLockheedがPWSAで通信のSDSを先駆けて発表。サイバー探知・周波数変更・衛星間等に計算機とSWで対応。Starlinkもジャミング対応のプログラム変更を衛星と地上に実行。

日本における動向と強み弱み分析

動向

- 通信・測位
1. 静止通信
 - 通信はETS-9、測位は次世代開発でSDSに取り組んでいるが欧米のSDS打上や測位NTS打上計画に比較すると遅れ。
 2. 観測コンステレーション
 - コンステレーションにおけるSDS・オンボード処理深化は今後の事業化の中で進める必要がある。
 3. 通信コンステレーション
 - 安全保障ユースでは左記のPWSA相当の通信のSDS機能は必要。

強み弱み

- 強み**
- ETS-9でデジタル通信処理やDBFに、海外の書き換え可能FPGAを採用、欧米よりも変更柔軟性は高い。
 - 国産次期CPUと次期FPGAのSoC化の開発が開始される。
- 弱み**
- 観測・通信とも国内市場は小規模で海外向けも技術格差で厳しく継続的開発が必要な状況。
 - 実証規模・スループット・ビーム数が小さく海外実用衛星との格差がある。

重要項目

通信衛星

- ①~1Tbps帯域のデジタル処理・②通信アルゴリズムの実装：③衛星間メッシュ制御・④大規模再生中継器技術・⑤宇宙サーバ技術が重要であり、最新デバイス開発あるいは産業用先端品の海外導入+RHBD確立+その上で稼働する通信やセキュリティのアプリケーション開発。

観測衛星

- 災害や安全保障を考えると、①中大型衛星でのインサイト情報提供の迅速さを支えるオンボード処理、今後のコンステレーションの②段階的配備に対応したSDS化(Spiral開発を念頭)は日本の観測のために重要であり、通信と同じく③プログラム当初からSDS化を前提にした衛星システム・運用・H/W・S/Wのアーキテクチャ仕様の設定が重要

デジタルデバイス

- ①バス系は国産中庸品、②ミッションは産業用のRHBD等、産官学で共有する協調領域のロードマップが必要

3.2 オンボード処理技術の調査

3.2.5 オンボード処理・SDSのキー技術リストと出口となるユースケース例

22-003-R-016

オンボードコンピューティング・SDSのキーとなる技術リスト			【出口となるニーズは以下で整理される】
1.1	情報処理 デバイス 部品レベル	<ol style="list-style-type: none"> 1 宇宙用情報処理デバイス技術・メモリー 2 産業用情報処理デバイスの耐放射線技術 (CPU周辺回路技術・スクラビング等) 3 次世代通信用高速デバイス 例:帯域3GHz～ 	<p>【観測ニーズ】</p> <p>①観測における高速・高次画像処理向けデバイス ②地上処理の部分オンボード化③エッジ処理 画像化⇒認識抽出⇒差分解析⇒インサイト情報、 差分データベースやMetaデータの記録処理 ⇒判読性が容易な画像や情報を迅速にインプットするケース ⇒大量のデータから定常的・自動的に変化を抽出するニーズ ⇒対象の検知と画像追尾の自動化が必要となるニーズ</p>
1.2	ミッション 計算機 システム 装置レベル	<ol style="list-style-type: none"> 1 計算機システム(ミッション用または統合化) 2 産業用ベース計算機システム(ハイブリッド含) 3 通信DPP(デジタルパイロードプロセッサ) 	
1.3	オンボード エッジ処理 アプリケーションレベル	<ol style="list-style-type: none"> 1 観測高次処理の実装技術 光学補正・SAR画像化(L1相当※1)、更に対象抽出・差分抽出(L2以上※1が前提)等の観測に関するオンボード処理アルゴリズムやアプリケーションSW 2 スペースNW制御や測位オンボード処理技術 衛星間NW制御、測位信号やRF再構成、電波情報収集等、通信に関するオンボード処理アルゴリズムやアプリケーションSW 3 高機能なオンボードエッジ処理 1項を前提に、機械学習(ML)/AIによる対象自動抽出やその種別の拡大、差分処理、経済・災害・安全保障インテリジェンス情報への変換、ユーザへの自動的インプット <p>※1: L1:シーン抽出・光学補正・SAR結像・幾何処理、 L2以上: オルソ(投影)・高次補正(大気・輝度・放射率・勾配)</p>	<p>【通信・測位ニーズ】</p> <p>①ブロードバンドRF通信の高速I/O対応のデバイス ②IoTやRF情報収集の広帯域I/Oデバイス ③通信(GEO/LEO)のブロードバンド制御(DPP) ④衛星間メッシュ通信のためのNW制御技術の実装 ⑤測位や通信の抗堪性(セキュア機能)の実現 ⇒通信ノード増加や準天頂測位のためのサイバー探知/ セキュアシステム(SDR含)・暗号化等の処理のニーズ ⑥測位信号・パターン生成のデジタル化(SDR・DBF) ⇒需要変化に通信・測位機能を適合させる可変性確保 ⑦地上網の3GPPへのNTN接続技術(5G地上局機能)</p>

※1: L1:シーン抽出・光学補正・SAR結像・幾何処理、
L2以上: オルソ(投影)・高次補正(大気・輝度・放射率・勾配)

3.2 SDS及びオンボード処理に関するまとめ

3.2.6 補足：SDS・オンボードに関する見解（企業の考え+ASTEC） 22-003-R-016

民間や防災・災害監視・安全保障における宇宙利用は世界的に拡大し衛星機能への要求は高度化、日本も地政学的・地理的・産業的に非常に重要な分野

1. オンボード処理においては、上記機能高度化を実現するために、海外でも標準的に使われつつある産業用先端デバイスを今後開発する国産宇宙用デバイスに加えて積極的に利用し、**確実な実証を経て実利用に供することが重要。スピード感のためには慎重さとチャレンジを両立する必要がある。**
2. 特に産業用デバイスの耐放射線設計(RHBD、MPU周辺回路+S/W)は欧米では産官学連合のIPに属し、単に日本が先端品を調達しただけでは宇宙利用は難しく、日本の産官学での共通技術確立が最も効率的で、**かつここは競争領域ではないとする進め方がコストや時間の観点で合理的**
3. また一品物で高額の衛星開発も重要であるがそれだけでは宇宙利用の効率は通信も観測も測位も量的制約から性能も制限され、『高機能+比較優位なコスト+部品耐放射線・熱処理技術+アプリケーションS/Wでの軌道上柔軟性(変容性)+多数機』等への**かじ取りといかにして実現するかロードマップ共有化が必要**
4. また衛星の数が少ない日本では防災や安全保障だけでなくサービスを展開する通信事業者、保険会社、天気予報サービスなどとの利用の連携が重要であり、そのためには**フロントエンド機器は専用でもアプリケーションのSoftware Definedを最大化する衛星概念が開発当初から重要**
5. これらを実現するためには最新S/W技術の取り込みが必要であり、エンタープライズ系で培われているS/W技術や、IoTや車載システムのような衛星以外の組込みS/W技術など、**高度なS/W知識と工学的経験(知見)を有する技術者を継続的に確保する仕組み**は他産業との取り合いも含め宇宙産業では喫緊の課題

1. はじめに
2. 調査概要
 - 2.1項 目的
 - 2.2項 中間報告(11/8)での議論
3. 調査分析
 - 3.1項 SDS/SDR/SDP (*software defined satellite/radio/payload*)
 - 3.2項 オンボード処理
 - 3.3項 運用の効率化
 - 3.4項 SWアーキテクチャ
 - 3.5項 衛星推進システム
4. 質疑

(調査要求)

- (1) 複数衛星(群)による運用を行う上で、**軌道上にて自動で自律的な運用を行うことを想定し、それに必要な技術、また国外における技術開発の動向**を調査すること。併せて、それを支えるための**地上におけ効率的な運用方法**を調査し、必要な技術を調査の上でまとめること。
- (2) 衛星運用を行う**地上局における国内外の最新技術動向**について調査を行うこと。特に、地上局内の運用人数の省力化（無人化含む）等について、国内外の技術を含めた最新動向を調査すること。
- (3) 本調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

3.3 運用の効率化

Executive Summary

22-003-R-016

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

<エグゼクティブサマリ>

- 観測衛星事業においてはタスキングやデータ伝送のための地上通信NWシステムは重要であるが、設備のCAPEXを抑制することも重要であり、観測衛星事業と既存地上局をクラウドで結び付け提供するNW提供型ビジネスが多く出現
- コンステレーションシステムの衛星機数が数10機程度を超えてくると、**衛星側は自動化自律化機能を実装するものの、地上における運用省力化の重要性が増してくる。**
- 同時打上げ数の増加と地上局数の制約から、軌道投入時にすべての衛星と通信することができないため、数10機の衛星の**初期チェックアウトをオンボードで衛星が自動的に実施**することも行われている。地上局-衛星間の通信は従来通り1対1通信でありここも多数機打上や運用では自動化の動機になっている。
- ミッションの観点では、バージョンの異なる多くの衛星が軌道や**可視時TT&C動作、観測・通信ミッション運用、観測ポインティングなどを常時異なる動作**を行うため、**コンステレーションのシミュレーション技術(⇒デジタルツイン的運用)の重要性**が増しており、今までよりシミュレーションの重要性が増している。
- 但しコンステレーション衛星の運用技術の観点では、総じて大きく運用システムを変更するのではなく、従来の衛星運用の延長で課題が生じた場合に逐次対処している傾向がある。
- 一方これに**衛星間通信を搭載して宇宙メッシュ通信が出現すると運用の複雑さは、より増すため**、衛星への自動化運用機能の要求も大きく高度化する(衛星間通信制御、衛星間追尾、多くの衛星の軌道伝搬等)

3.3 運用の効率化

3.3.1 地上NWシステム

22-003-R-016

観測衛星事業者に観測データの通信NWを提供する事業を「NWサービス提供型」及び「地上システム提供型」に分類した。下記に事業の定義と主要な企業を示す。

タイプ	特徴	企業	事業内容
地上システム提供型	地上システムをシームレスに動作できるようにセットアップしたキットを提供する。HWだけでなく、アンテナに追尾指示をだすようなSWも含まれる。	Kratos	メジャー衛星オペレータへの地上システム提供。設備+衛星管制や画像SW1式、最も老舗だが、近年H/Wは調達し、SWで仮想的な汎用の地上NWシステム提供を志向している。
		GMV	同上、但し近年はESAで搭載系AIアプリケーションに進出し傾注。
		GAUSS	
		ISISpace Innovative Solutions In Space	小型衛星向けの安価な地上ターンキーソリューション、UHF、VHF、S
		GomSpace	
		SSTL Surry Satellite Technology Limited	小型向けだが上記よりハイレート、S/X対応
NWサービス提供型	地上ネットワークサービスプロバイダーが衛星事業者に提供する通信NW提供サービスである。顧客の衛星事業者は地上局を所有しなくても、このプロバイダーから地上局を使用する時間を購入する。逆に多くの地上設備を保有する事業者(メジャー衛星事業者等)は空いている時間を時間貸しで貸し出す。	Atlas Space Operations	政府・民間向け。ATLAS地上局は、Freedom™ソフトウェアプラットフォーム上に構築、全軌道対応。RF設備保有
		Kongsberg Satellite Services (KSAT)	LEO中心。50機以上のRF設備保有
		AWS Ground Station	自社RF設備+Cloud
		MS Azure	自社及びパートナーRF設備+Cloud
		Infosteller	Cloudベースの地上局を提供したり、大規模衛星事業者の空いている地上局をI/Fする。RF設備も保有

3.3 運用の効率化

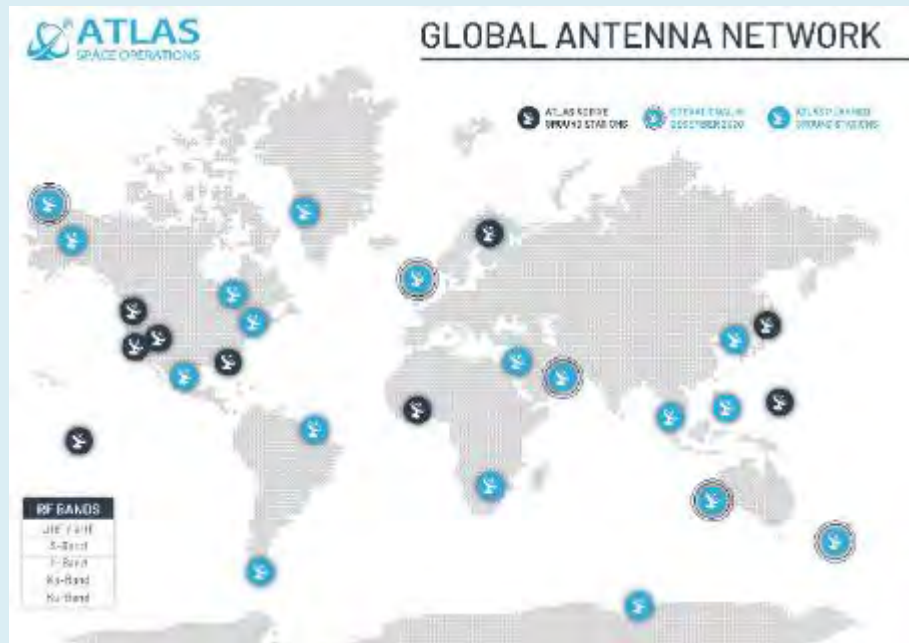
3.3.1 地上NWシステム

22-003-R-016

Atlas Space Operations

政府機関や民間企業向けに衛星 RF 通信サービスを提供している。ATLAS地上局は、Freedom™ソフトウェアプラットフォーム上に構築することで、需要の変化に対して地上局リソースを柔軟に配分することを可能としている。

低地球軌道、MEO、GEO、L1軌道の一通りRF接続をサポートし、さらに深宇宙機能のための技術開発を積極的に推進している。



Kongsberg Satellite Services

地球低軌道衛星を対象に低コストで高信頼性の地上局アンテナネットワークを世界中の12ヶ所以上の地上局で50台以上のアンテナを運用している。(既存の KSAT 地上局アンテナ網も活用)

北極と南極に独自の極局を配置し、極軌道を周回する宇宙機に対して100%のパス可用性を提供、ESA- European Space Operations Centre とともに、光地上局ネットワークを統合しており、2021年1月に光地上局をギリシャに設置した。



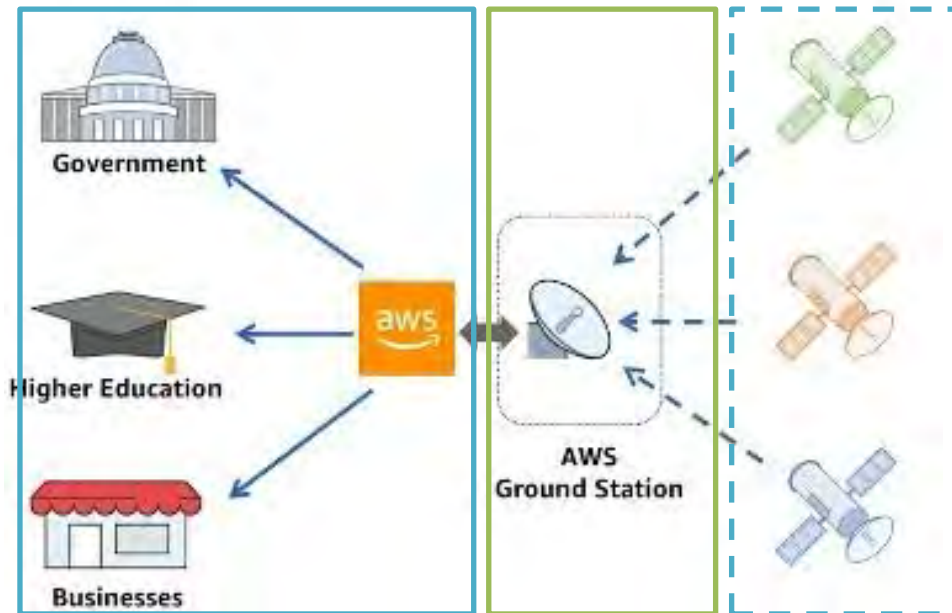
3.3 運用の効率化

3.3.1 地上NWシステム

22-003-R-016

• AWS Ground Station

2020年8月時点で、6拠点、将来的には12拠点以上の独自地上局を活用し、衛星データの保存や処理など、すべての衛星運用をAWSのクラウド上で行う。AWS地上局は、XバンドおよびSバンドの周波帯でLEO/MEOの衛星をカバーし、パスの15分前までコンタクト予約の確認、キャンセル、リスケジュールが可能である。AWSは代表的なSaaS型サービスであり、オペレータのメリットとしては、「地上局の固定費用が不要」、「1分単位で使った分だけ課金」、「直接スケジューリング」、「迅速なデータ取得(クラウド保存も迅速)」がある。



- AWS上への衛星データ蓄積
- オペレータ/顧客ともにAWSクラウドを利用

- 自社グラウンドステーションをSaaS型の地上局サービス

【参考】Azure Orbital

パートナー企業

基地局インフラ
(自社だけでなく他社も利用)

仮想化処理機能

管理ソフトウェア

*AWSと類似しているが技術的にはパートナー企業との連携を活用している

3.3 運用の効率化

3.3.1 地上NWシステム

22-003-R-016

➤ GAUSS

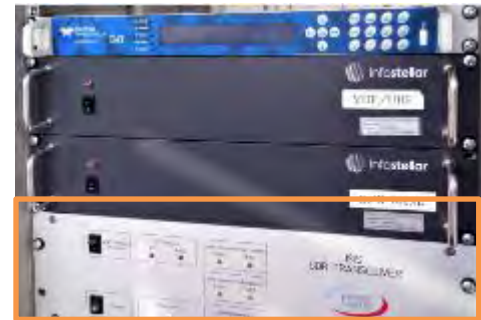
小型衛星向けの安価な地上システムのターンキーソリューションであり、以下の特徴を有する。

<システムの特徴>

- ✓ UHF、VHF、Sバンドを同じポインティングシステムで構成
- ✓ 一般に公開されているリポジトリからのTLE自動ダウンロード(SGP4による軌道伝播)
- ✓ 優先順位設定による複数衛星の制御と処理が可能
- ✓ TCP/IP接続による遠隔地からの地上局運用が可能
- ✓ 無人地上局運用のためのセッションプログラムにより数週間に対応可能
- ✓ 衛星や地上局ハードウェアの異常を検知した場合、電子メールで通知
- ✓ 雷検知による安全なアンテナ操作

<送受信特性>

- ✓ アップリンクとダウンリンクの周波数で個別にドップラーシフト補正が可能
- ✓ VHF：最大100Wまでアップリンクおよびダウンリンクが可能
- ✓ UHF：最大70Wまでアップリンクおよびダウンリンク（SDRはオプション）
- ✓ S-Band：SDRによるダウンリンク



*インフォスタラ(日本企業)も地上局サービス提供にISISpace社製品を使用



GAUSS地上局システム



(参考) ISISpace地上局システム



3.3 運用の効率化 3.3.2 衛星搭載系による運用自動化の状況

ESA ECSS-E-ST-70-11CでのAutonomyの定義と各コンステレーションで考えられる機能(ASTEC考察) 22-003-R-016

ECSS-E-ST-70-11C Space segment operability (31 July 2008)		観測コンステレーション ミッションOrient項目 (案)	通信コンステレーション ミッションOrient項目 (案)
Level E1	内容	地上系のコントロールでミッションを実行 (安全化に関して限定的な軌道上機能を有する)	NA
	機能	ノミナル運用は地上系のリアルタイム運用にて実行、安全化の為にタグ付けされたコマンドにて実行	NA
Level E2	内容	事前計画、地上系の設定に従って軌道上の機能でミッションを実行	地上(SRM)で立案された多数機運用計画に基づいて個々の衛星へ3path(ユーザビーム・GW・衛星間)に関する実時間CMDまたはタイムラインのロードと実行により通信を行う。多数機の通信協調機能に関しては地上計画が管理し他の衛星との協調は行わない
	機能	軌道上の機能としてコマンドのメモリ機能を有する	軌道上の機能としてコマンドのメモリ機能を有する
		<ul style="list-style-type: none"> ノミナル観測は衛星システム・観測系(MDHS/伝送)ともに「タイムライン」に従い自動実行できること。 Anomaly検知時は規定のFDIRに基づき安全モードへ移行。ミッション継続に関しては地上からの指示による。 軌道制御は地上コマンドによる(タイムライン含む) Tip & Cueに関しては地上経由のCMD運用 	<ul style="list-style-type: none"> ノミナル通信は衛星システム・通信系ともに上記3pathを確立する運用を地上からのCMDで行う。 地上系(NOC及びSRM)がユーザ要求(RTNリンク)を受けて、衛星に帯域・周波数等をFWDリンクでCMD指示し通信リンクを確立・切替する。 軌道制御は地上からのコマンドによる。 ユーザとG/W(TTC含)が同一可視を前提

1.NOC(Network operation center)
2.SRM(satellite Resource Manager)

3.3 運用の効率化 3.3.2 衛星搭載系による運用自動化の状況

ESA ECSS-E-ST-70-11CでのAutonomyの定義と各コンステレーションで考えられる機能(ASTEC考察) 22-003-R-016

ECSS-E-ST-70-11C Space segment operability (31 July 2008)			観測コンステレーション ミッションオリент項目 (案)	通信コンステレーション ミッションオリент項目 (案)
Level E3	内容	軌道上でのミッション適合性機能によって実行	地上で立案された簡潔な「観測指標」(例・緯度経度、観測幅、観測モード等の指定のみ)に基づき衛星内のシステム・観測センサを最適に稼働させ目標位置を観測する	地上(SRM)で立案されたユーザ通信要求に基づき個々の衛星が最適な3pathの帯域・周波数・ビーム配置を判断し通信確立・切替を行う
	機能	イベント単位での自律化運用軌道上での機能にて運用を実施	<ul style="list-style-type: none"> 記録・DT・衛星間を自動判定し最適データパスを選定 軌道制御は自動。他衛星の軌道情報を全て有する Anomaly時に関してはLevel3と同じ Tip & Cueに関しては「観測指標」を基にオンボードでCue衛星へのコマンド生成・伝送機能を有する IoT・パラメータチューニングを自動で行えること 一部ML、AI等の機能を有する。 	<ul style="list-style-type: none"> 定常通信はRTNのユーザ要求のみタスキングされ3path通信に必要な動作を衛星で自動化 メッシュNWを含む3pathの管理テーブルは地上で生成されるが、衛星側はテーブルの長期間伝搬機能を有する事。メッシュ再構成は運用による 軌道制御・FDIR：同左
Level E4	内容	目標に向けて軌道上の機能にてミッション実行	上記Level3に加えて下記の内容を有する事。 観測データを高次処理する機能 (画像化・目標抽出・追跡情報・自動差分抽出による観測指標変更・その他ML/AI機能する機能) を有する事	上記Level3では対応していない通信の自動化・自律化機能を有する事。具体的には下記
	機能	ミッションとしての目標を設定して実行	上記Level3に加え下記の機能を有する事 <ul style="list-style-type: none"> 「観測指標」を基に緊急ミッション時は軌道制御を含めた目標のRevisit最小化等の観測が自動でできること 観測欠損に関しては他の衛星パスを用いた代替観測が自動でコンステレーション全体で最適化できること 定常的な高次処理機能により、迅速に「情報」を提供 	Level3に加えて下記の機能を有する事。 <ul style="list-style-type: none"> 他の衛星稼働情報 (非稼働・ΔV実施) を衛星間等でシェアし自動でメッシュNWを再構成できること。地上支援がOverrideすること ユーザーミナル通信要求はRTNリンクから自動で取得し通信パスを校正できること。

3.3 運用の効率化 3.3.2 衛星搭載系による運用自動化の状況

各事業者の運用自動化適用例

22-003-R-016

プログラム(製品)	内容	機能	打上	製造企業	顧客	自律化Level(観測)	自律化Level(通信)
Blackjack	PitBossコンピューティングシステム。ミッションはメッシュNW・早期警戒赤外の実証	SDAにもSpiral的活用されるにAutonomous Control Element(Pit Boss)なるクラウドベースのミッション管理計算機システム実証	2022.10	H/W SEAKR Engineering 及び S/W Scientific Systems Co. Inc(SSCI)	DARPA	観測機能のLevel不明。Level2~3と思われる。PitBossとして下記機能はLevel3~4:「自律的なミッションタスク、センサーデータ収集、オンボード処理およびエッジまた自律的に観測計画をオンボード生成する機能(APS)搭載」	詳細不明なるも、Seakr資料では、「PNTを含むコンステレーションデータのネットワーク及びルーティング制御、ミッション自律化・故障診」断と記載 Level3相当と考えられる。
Mandrake-I/-II	Pit Bossシステムの軌道上実証、放射線影響の軽減とDevice検証 光通信機器実証	Blackjackのリスク低減実証Programであり、PitBossの機能は同じ。	2021.7	同上	DARPA	同上 On-Board Autonomous Planning System (APS)	不明
PWSA Transport Layerの LM-50	LM50(SmartSAT)はペイロードデータにアクセスできるコンピューター(Xavier)を搭載	サイバーセキュリティ機能重視。セキュリティリスクやサイバー脅威を自動的に検出、必要な場合は衛星を迅速にリセット防御する自律機能を構築	2022の公表有	Lockheed	SDA	観測機能のLevel不明。Level2~3と思われる。	不明なるもメッシュNWに関してはLevel3と推測 またLevel4の一部機能を有する。サイバーセキュリティを機能の自律化として規定している。
RC64、RC256 Ramons社 計算機	ミッション計算機として多種の高度オンボード処理を行う	ML⇒CNN画像認識、通信(SDR・コンステNW制御)、Robotics、Cybersecurity、PNT	不明 TRL7	Ramon Chips(イスラエル)	ESA、米国企業	「機能」に記載の通り、Level3~4に相当する多くの機能を保有	「機能」に記載の通り、Level3~4に相当する多くの機能を保有
Clarity (雲除去) /PhiSat	ESAのPhisat搭載のAIによる雲除去アプリケーション	ハイパースペクトルセンサの雲画像除去処理で30%削減、IntelのVPU&AI	2020.9	AIKO (伊)	ESA	観測機能としての自律化は不明、AI採用で一部Level-3	NA
Mirage AI (搭載SW)	軌道上オートノミー向けソフトウェア	TLMやミッション状況を元に自動的に運用スケジュールを生成するAIライブラリ	2019	AIKO (伊)	Satello gic(アルゼンチン)	Mirageは地上用であるが左記でLevel-3として搭載実証中。段階的に開発。	NA

3.3 運用の効率化 3.3.2 衛星搭載系による運用自動化の状況

各事業者の運用自動化適用例

22-003-R-016

プログラム(製品)	内容	機能	打上	製造企業	顧客	自律化Level(観測)	自律化Level(通信)
On-Board Autonomous Planning System (APS)	単独またはコンステレーション向けの運用最適化搭載SW	自律的に観測計画をオンボードで生成したり、観測優先順位を最適化	2022.10	Orbit Logic社	DARPA BJ衛星	観測機能としての自律化は不明、一部Level3~4、様々なパラメータに対して最適な運用計画を生成する部分で機械学習を活用	不明
Skysat	光学画像ぶれ補正機能 (OIS)の自動キャリブレーション	低レベルで衛星をスイープ振動させ、光学系の恒星指向における測定でアクティブな補正機能を有するOISパラメータを自動調整。	2020.8 (SkySat19-21)	Planet社	Planet社	観測機能としての自律化は不明、「機能」記載の通り。Level3として一部、自動でOIS装置のパラメータチューニングを実施。	不明
Dove	姿勢センサや制御パラメータを自動で軌道上で同定・変更するシステム	2種類の姿勢変更で「磁気センサと太陽センサ」「STT・Gyro」の定数を測定・推定し、地上を介するが自動でコマンド発行しパラメータ更新	2017 88機	Planet社	Planet社	観測機能としての自律化は不明、「機能」記載の通り。チェックアウトをLevel3として自動でのパラメータ測定・推定とチューニングを実施。	不明
Iceye & Sentinel	地上運用によるTip & Cue	Sentinel-1(5m)とICEYE(1m)の2機のSAR衛星で連携し、Tips & Cue	2020.11 観測	Iceye社	Iceye社	運用によるTip & Cueを地上で自動化する試み Leve-2	不明
Skysat & Dove	地上運用によるTip & Cue	Dove(120機3.7m/24km)による変化点抽出、Skysat(21機/0.5m /8km)で詳細観測。但し、かなり観測時間間隔が大きい例。	2020.11 観測	Planet社	Iceye社	運用によるTip & Cue、地上で自動化を試みているかは不明。 Leve-2	不明

3.3 運用の効率化 3.3.2 衛星搭載系による運用自動化の状況 各事業者の運用自動化適用例 Skysat (Planet社)

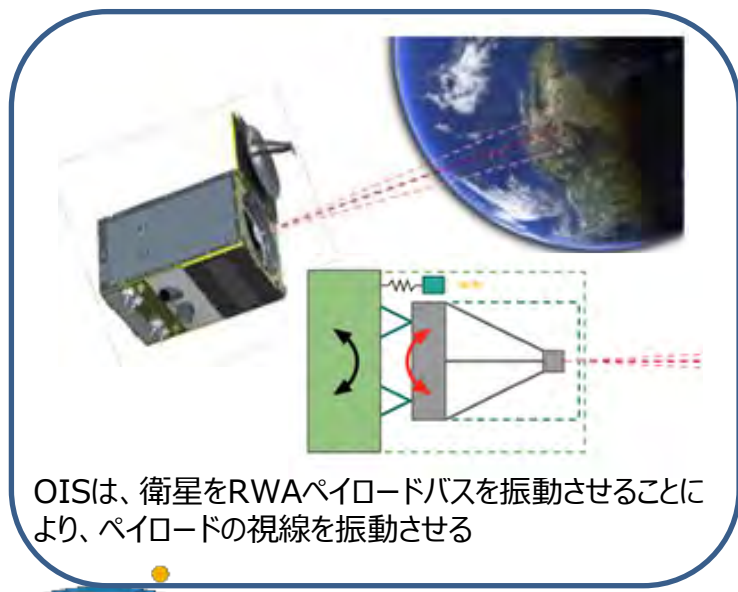
22-003-R-016

多衛星の運用オンボード自動化



Planet Skysatの軌道上キャリブレーション

- Planetが保有する高精度光学衛星SkySat（20機軌道上で運用中）では、**光学系のキャリブレーションを軌道上で自動で実施**。
- 画像のぶれを防止する目的で、光学画像ぶれ補正機能（Optical Image Stabilization(OIS)、加速度計とアクチュエータによるActiveな免振システム）を自動化。
- 具体的には、ぶれの原因であるミラーと機体の振動数が近い場合に共振を起こしやすくなることを防ぐシステムとしている。固有振動数を求めることを目的に衛星のVoice-Coilアクチュエータで低レベルスイープ振動を加える。その後、最適な固有振動数に併せてアイソレーションのためのIOSのパラメータを設定する。この一連の作業を**軌道上で自動で実施**。
- 観測結果を下図に示す。キャリブレーション前はボケがあったものが鮮明になっている。取得画像のサンプルでも鮮明な画像が得られていることが分かる。



3.3 運用の効率化 3.3.2 衛星搭載系による運用自動化の状況 各事業者の運用自動化適用例 Dove (Planet社)

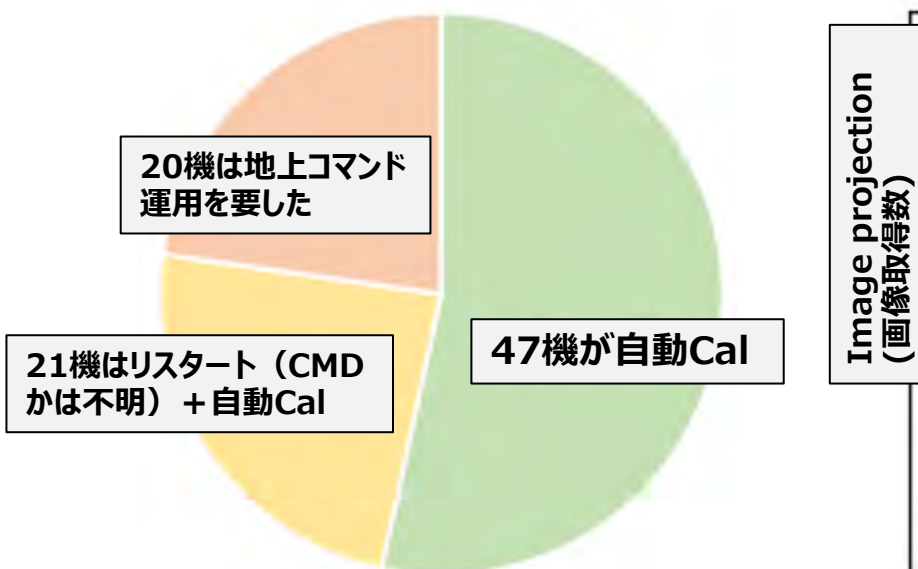
22-003-R-016

多衛星の運用オンボード自動化



Planet Doveの軌道上キャリブレーション

- Planetは、Dove当初は地上のモニタ、コマンドで1個ずつ衛星のチェックアウト／キャリブレーションを実施。
- 同時に軌道投入した多くの衛星のチェックアウトを1個ずつ行うことは、非常に労力を必要とし、またタイムクリティカルな状況が長くなり非現実的と判断。
- 打上げ後のチェックアウト・キャリブレーションを軌道上で行うことに設計や運用方針を変更した。
- 2017年88機の衛星を打上げたミッションでは、47機が全て軌道上のコンピュータで自動でキャリブレーションまで完了。21機はリスタートは必要であったものの自動でキャリブレーションまで完了。残りの20機は地上コマンドを要した。
- キャリブレーションの実施状況は、下図の通りであり、順調にミッションを遂行していることが良く分かる。



オンボードコミッショニング自動化成功率

フロック3pの理論的及び実際のコミッショニング率

<https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3669&context=smallsat>



3.3 運用の効率化 3.3.2 衛星搭載系による運用自動化の状況

各事業者の運用自動化適用例 Dove (Planet社)

22-003-R-016

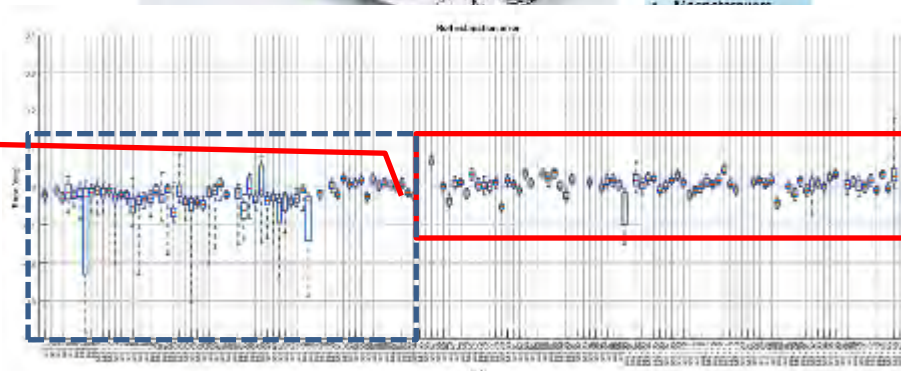
多衛星の運用オンボード自動化

<https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4239&context=smallsat>

論文 : ADCS at Scale: Calibrating and Monitoring the Dove Constellation, Lawrence Leung, Vincent Beukelaers, Simone Chesi, Hyosang Yoon, Daniel S. Walker, Joshua Egbert(Planet Labs Inc.) 2018, SSC18-WKII-03

- Planet社が保有する190機以上の3U衛星DOVE(図)を10人以下の少人数チームで運用
- AOCS運用とキャリブレーションの自動化に注力。打ち上げてから測定・チューニングの思想。
- 運用自体は従来国内衛星と大きな差異ないが「10人で数世代190機もの衛星運用や評価」、「姿勢センサや制御パラメータを自動で軌道上で同定・変更するシステム」は画期的。膨大な数から統計的に評価。
- 必要は発明の母と言われるが、こうしないと省力化できないというニーズから開発しているという印象。
- ✓ 運用チームはアメリカとヨーロッパに拠点、10人以下で全体の健全性を監視
- ✓ 地上でのFDIRツール開発、性能評価、搭載SW再プロ等実施
- ✓ アップグレードもこのチームが行っている。
- ✓ 例1:精度改善や次世代へのフィードバック、第1世代に比較して新しい世代では推定精度改善。STTは迷光や温度依存性を地上でデータベース化
- ✓ 例2:2種類の姿勢変更で「磁気センサと太陽センサ」「STT・Gyro」の定数を決定し、変更。この運用と地上でのパラメータ推定、コマンドによるパラメータ更新が自動化されている。

The Dove Spacecraft

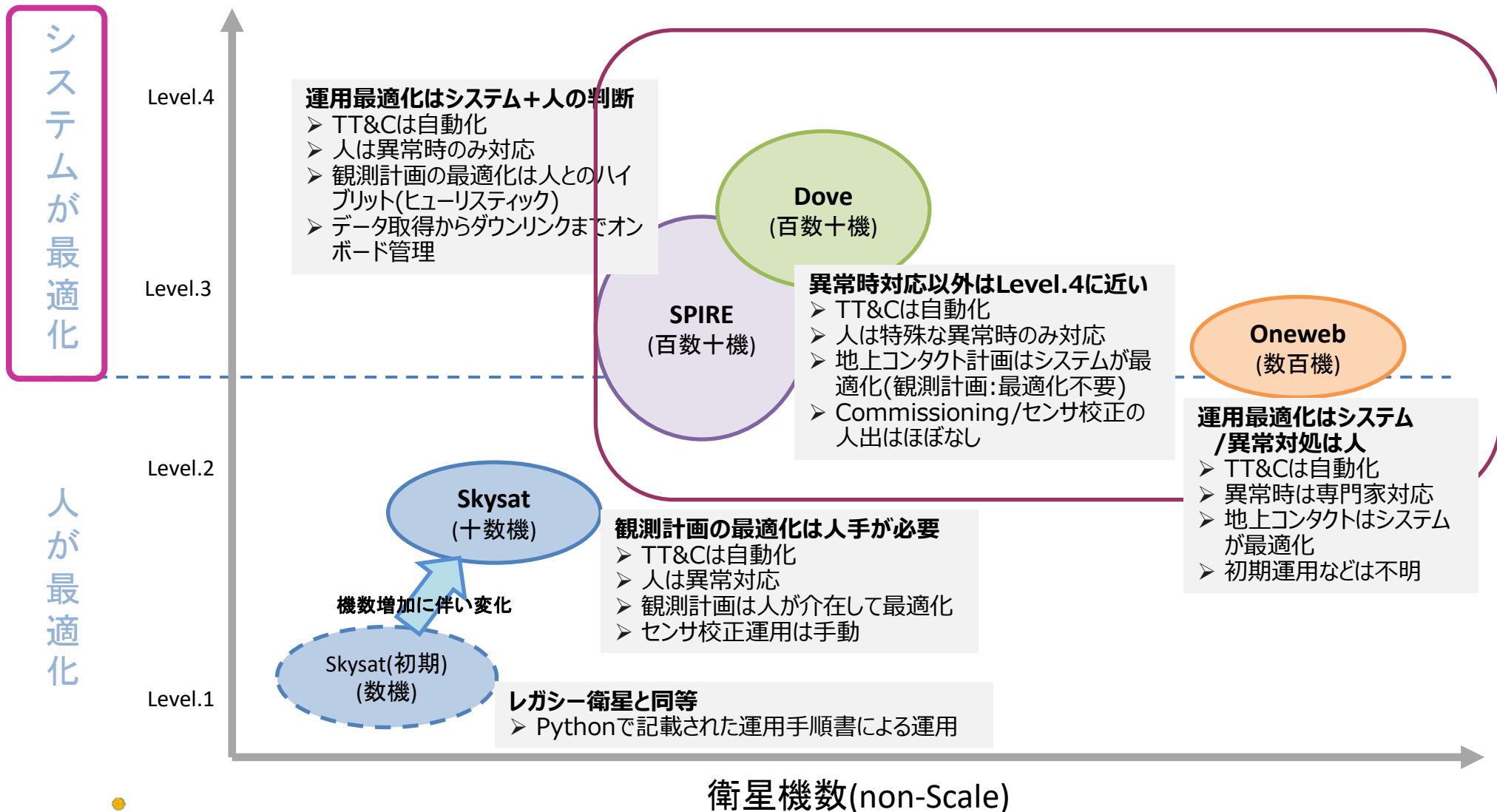


3.3 運用の効率化

3.3.3 衛星運用の効率化技術

22-003-R-016

【コンステプレイヤーの運用省力化レベル】



3.3 運用の効率化

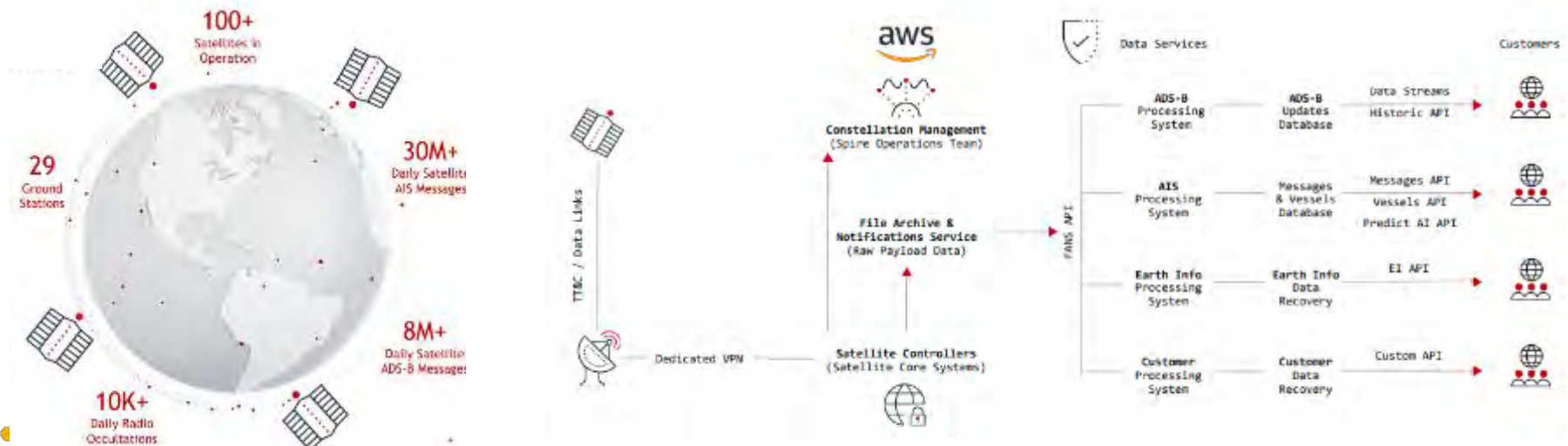
3.3.3 衛星運用の効率化技術

22-003-R-016

➤ SPIREの運用計画システム^[5]

- ✓ SPIRE社のコンステ：LEMIR(3U cubesat)を100機以上運用(地上局数:29)(2021年時点)
- ✓ Spire Space Service：多様なミッション/ペイロードを同時に実行するためには戦略が必要
Solution：End to Endのソリューションサービス
Payload：Spire衛星バスに顧客ペイロードを搭載
Software：Spire衛星に顧客ソフトウェアを搭載
- ✓ 「モデリング/スケジューリング」、「パフォーマンスモニタリング」のツールを整備し、顧客のペイロード/SWとシームレスに統合できるよう「開発環境(API/ライブラリ/OS)」を提供

- ◆ 顧客のペイロードを搭載することもあり、観測計画の最適化に関係する要素が多いことが特徴
- ◆ 上述の背景(異なる目的を有した顧客が複数存在)から、「最適」の指標は1つではなく100機を超える衛星の運用計画を手作業で策定することは不可能であり、「多様な顧客ニーズの反映」を行うために、構想・開発から運用まで通して利用できる開発/運用環境が発展したと考えられる。
- ◆ 衛星異常監視については、正確な予測ができることもありシンプルなアルゴリズムを採用している



コンステレーション特有の軌道運用の効率化要求

(1) コンステレーションは定常運用での再訪性を維持するための相対軌道の維持、デブリ回避マヌーバや復帰、特定領域再訪性優先のための微調整等により**数多くの衛星の軌道維持運用が重要**

(2) **多数機軌道維持のアルゴリズム開発やそのための運用自動化の重要性が増している。**

これらの開発や実用が既に実装されておりキー技術として重要であり既にいくつかのアルゴリズムが検討されている。

多数衛星の自律 ΔV オンボード処理

主なトレンド

【軌道制御自律化】 多数衛星の軌道制御に関して
1)コンステレーション性(Along/Cross間隔や再訪性等)の維持のための ΔV 最小化
2)グローバル観測からリージョナル重視への変更(侵攻事案等)
3)デブリ回避とノミナル軌道への復帰
の大きく三点のKPIがあり、イタリアのAI事業者AIKOやCNESでアルゴリズムや軌道上検証が進められている。

主なプレイヤーと取組み例

【軌道制御自律化】⇒実装技術として進められている。

- a. **CNES**はASTERIAと呼称する「多数機の衝突回避とミッション軌道維持復帰を自律的に行うアルゴリズムを開発」低軌道衛星の軌道(要素)維持と衝突リスク管理を組み合わせたオンボード自律軌道制御アプリケーションであり、コンステレーションのイントラックとクロスの両方を考慮して制御を行う。ESAのOPPSATで軌道上実証を実施。地上でスクリーニングしたデブリの軌道マップを1日に1回ロードしてあとは極力自律的に運用される。回避を自動で判断し基準軌道への復帰も最短化している。
- b. **伊AIKO社は、有事（緊急）の際のコンステレーション変更に関して、最小 ΔV アルゴリズムを遺伝的アルゴリズムで開発、例えばコンステレーションの観測対象をグローバルから、あるリージョナルカバレッジ最適化へ変更するケースを例に、全体で必要な $\Sigma\Delta V$ を最小化するためのアルゴリズムを多目的遺伝的アルゴリズム(multi-objective Genetic Algorithm)で用いて実装。**

動向分析サマリ

Fact Finding及び 海外動向分析

◆地上通信NW事業
海外では既存のKSATや新規参入のAWS・MS AZUREなど、観測衛星事業と**既存地上局をクラウドで結び付け提供するNW提供型ビジネス**が多く出現。観測データ収集NWの標準化が進む。

◆運用の効率化
コンステレーションシステムの衛星機数が数10機程度を超えてくると、衛星側は最大限の自動化を実装するものの、**地上における運用省力化の重要性が増す**。
数10機の衛星の初期チェックアウトをオンボードで衛星が自動的に実施することも行われている(Planet社)。
AIKO社等のように煩雑でLEOでは定常的に必要な**軌道維持をAI等で効率化する専業**も出現。

◆衛星の運用自動化機能
現在はECSSのLEVEL3「イベント単位での自律化運用をオンボード機能で可能」までが殆どであり、**LEVEL4「ミッションとしての目標を設定しそれに向けてオンボード機能で実行」**まではまだ達していないが、コンステレーションはこのLEVEL3相当の**運用自動化と地上運用支援で多数機運用効率化**を進めている(Onweb、Planet)

現状の日本における動向分析

強み弱み

強み **創成期から実績**

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

弱み **多数機運用の動機**

- ✓ 左記の通り単数機乃至は複数機でも**既存のオンボード自動化機能と地上運用をベース**に考えているため、**数10機規模のコンステレーション運用に関する効率的運用方策検討が未定**と思われる。

<官需>
LEOでも単機運用の中大型観測衛星あるいは準天頂のように4機~今後7機の複数機運用でも常時可視のケースでは、搭載系の運用自動化は従来実績を利用し、ドラスティックな変革は少ない。一方今後観測や通信で多数機LEO運用が必要となった場合に搭載系及び地上運用系で変革が必要となることも考えられる。

<商用>
国内の静止商用の運用は24H/7D前提であるが、OPEXを削減するために少ない人数で多くの静止衛星を運用する実績を有する。但しこのケースもドラスティックな変革は必要ではなかった。

重要項目

[考察]

- A) 中大型単機衛星や準天頂のように7機体制を進めている既存プログラムでは、前章の**SDSと同じく、H/WやS/Wの最新化や軌道上Updateを前提に、衛星運用や観測データ処理、通信データ処理の効率化、省人化、自動化、コストや大量データ処理の効率化** のために重要であり開発が必要。
- B) 今後のコンステレーションではクラウドベースの地上NWや、**MLやAIなどの開発環境を提供するクラウドベースの事業との連携**も重要でありベースラインになると考える。。
- C) また多数機軌道維持アルゴリズム、ML/AIによる数百のマルチビームのための移動体通信NWのトラフィック予測と制御、観測データのエッジ処理の高速化・省人化など、**多数機やBB移動体通信ならではのアルゴリズム面での開発や実装、運用蓄積、更には搭載化も重要**。

1. はじめに
2. 調査概要
 - 2.1項 目的
 - 2.2項 中間報告(11/8)での議論
3. 調査分析
 - 3.1項 SDS/SDR/SDP (*software defined satellite/radio/payload*)
 - 3.2項 オンボード処理
 - 3.3項 運用の効率化
 - 3.4項 SWアーキテクチャ
 - 3.5項 衛星推進システム
4. 質疑

(調査要求)

- (1) 衛星ソフトウェアアーキテクチャに要求される機能構成やアプリケーションインターフェース等について、国外の技術動向を調査すること。
- (2) 本調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

- 中間報告では昨今の衛星システムの上位機能であるSDS (SDR) とオンボード処理機能に関して詳細な調査分析を行い整理した。
- これらのブレークダウンを受けて、衛星ソフトウェアアーキテクチャやAPIがどのように構成されているかの調査結果を報告

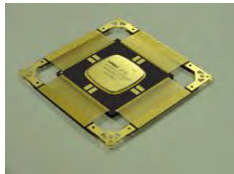
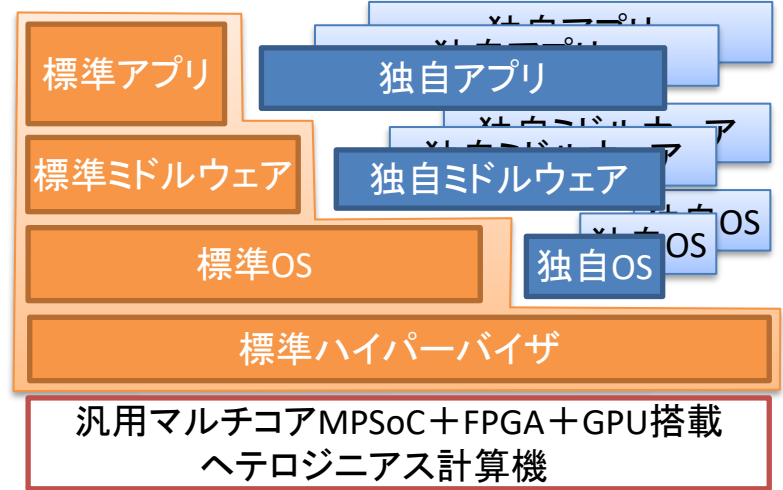
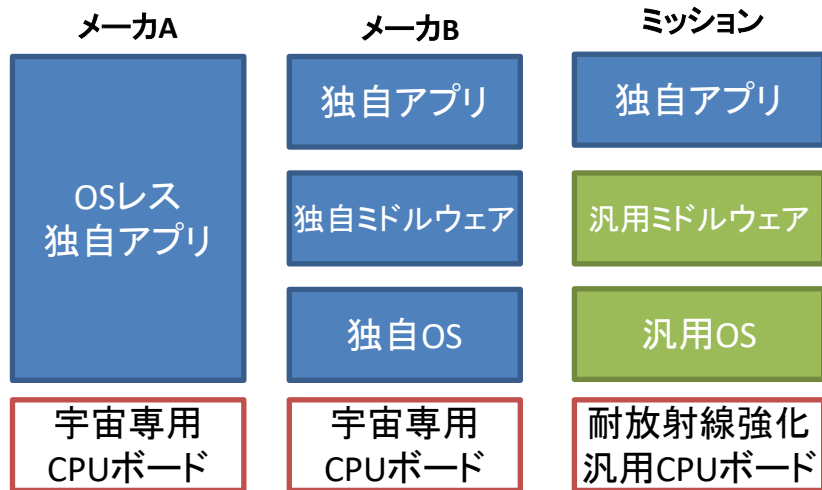
3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ 計算機とソフトウェアの変化

22-003-R-016

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

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

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



宇宙専用CPU HR5000S
©JAXA



RAD6000 CPUボード
©Lockheed Martin



COTSヘテロジニアス計算機
©Unibap

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ ロッキードマーチンの取り組み

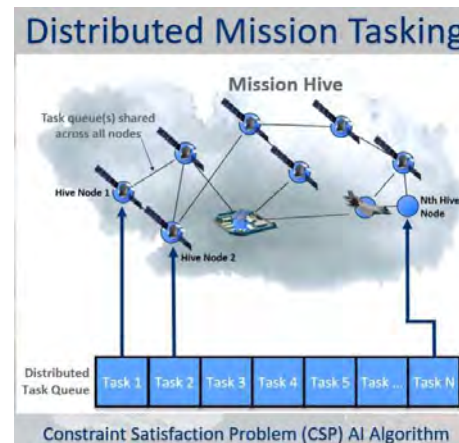
22-003-R-016

- ロッキードマーチンは、プライベート5Gネットワークとエッジコンピューティングによって、ソフトウェアの配信・処理・実行、センターから世界の果て（エッジ）までのデータの収集と配信を実現するためのプラットフォーム環境としてSpaceCloud™とHiveStar™と呼ばれるコンセプトを発表
- SpaceCloud™はDevSecOps設備を使用して重要なミッションアプリケーションのための信頼できるプラットフォームを提供し、「キーボードから軌道まで」のアプリケーションのジャストインタイム配信のための一貫した、安全かつ信頼できるメカニズムを提供
- HiveStar™は、人間の介入を必要とせずに、誰がどのタイミングでどのタスクを実行できるかに基づいて、衛星コンステレーションにミッション・タスクを効果的に分配
- コンステレーションを構成する衛星は、マルチコアCPU計算機やソフトウェア定義無線機等を備えたSmartSat™で実現
- 機能の多くは地上クラウド環境で使用されているOpen source software（Linux、Kubernetes、Istio、Linkerd、Kafka等）で構成されており、最新のクラウド関連技術が活用可能

SpaceCloud™



HiveStar™



SmartSat™



出典 : <https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/space/documents/space/hivestar-spacecloud.pdf>

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ 新興メーカーの取り組み

22-003-R-016

- COTS品のMPSoC等のプロセッサを活用したコンピュータハードウェアの新興メーカーが台頭し、新たなソフトウェアアーキテクチャを提案
- 最新のAI/ML等を活用できるアプリケーションの開発環境を提供し、宇宙関係メーカー以外の参入障壁を排除して市場拡大を目指す

会社名	製品形態	ハードウェア（プロセッサ構成）	ソフトウェア
Unibap (スウェーデン)	汎用ヘテロジニアス計算機 +クラウド開発環境	AMD社 G-Series SOC（CPUx4 +GPUx128） Microchip社 SmartFusion2 （ARM Cortex-M3 + FPGA）	SpaceCloudと呼ぶフレームワークによって、地上クラウドと同様の開発・ユーザ環境を提供
KP Labs (ポーランド)	エッジコンピューティング用 HW + AI/ML処理用ビル ディングブロック付きSDK	CPUコアx2（ARM Cortex-R5F） Xilinx社 Zynq UltraScale MPSoc （ARM Cortex-A53x4 + Cortex-R5x2 + FPGA）	Oryxと呼ぶソフトウェアツールによって、ユーザはAI/ML処理やテレコマ処理等のビルディングブロックを含むSDKを使ってSWを開発
Exo-Space (米国)	AI処理に特化したエッジコ ンピューティングHW + SW 実行サービス	CPUコアx4（ARM Cortex-A53） GPU(詳細不明) MLアクセラレータ(詳細不明)	FeatherWareと呼ぶソフトウェアによって、標準的なAI/MLアルゴリズム TensorFlowの処理を実施したデータを直接ユーザにAPIを介して提供
Zephyr Computing Systems (米国)	センサデータ処理用高性能 計算機 + OS・仮想化ミ ドルウェア	NVIDIA社 Jetson TX2i （Denver CPUx2 + ARM Cortex-A57x4 + Pascal GPUx256）	ソフトウェアは、カスタマイズされた組み込みLinuxディストリビューションと、HWを仮想化するミドルウェアウェアで構成

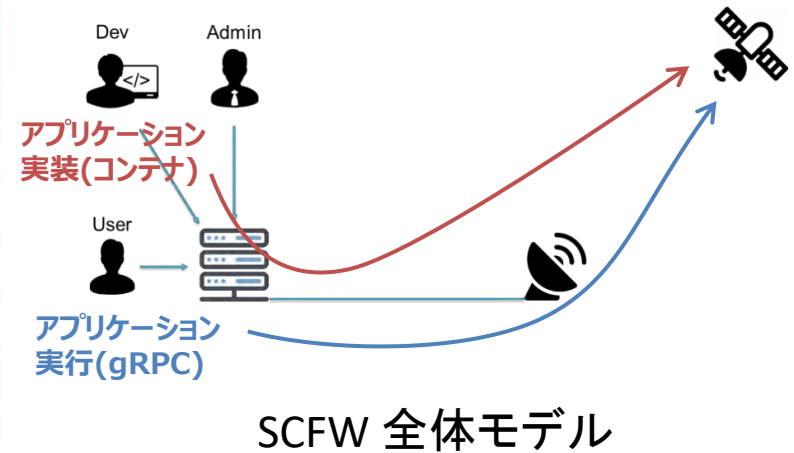
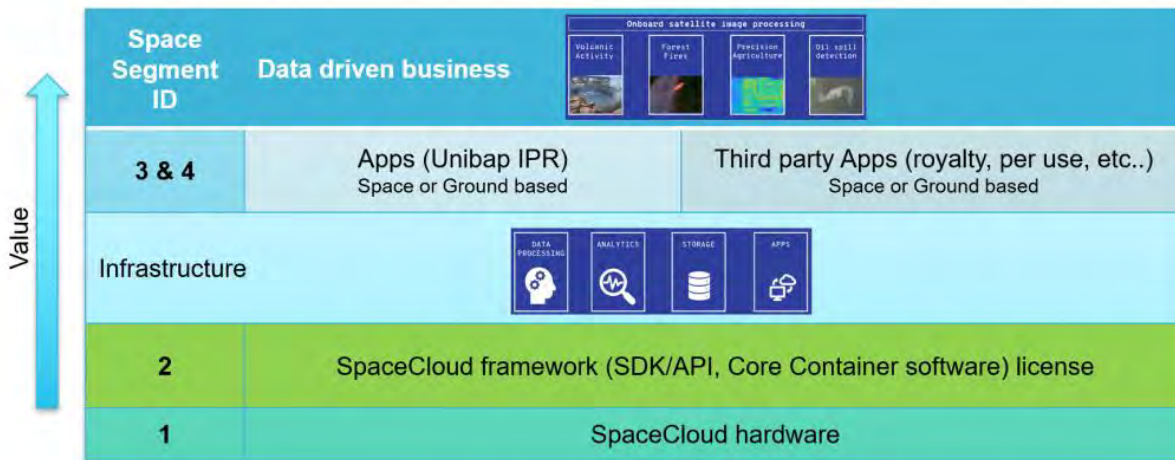
出典 : <https://unibap.com/en/>、<https://kplabs.space/>、<https://www.exo-space.com/>、<https://www.zephyrcomputing.space/>

Proprietary Information : Not to be disclosed or reproduced without specific written permission from ASTEC

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ Unibap

22-003-R-016

- UnibapはCOTS品のMPSoC等を搭載したヘテロジニアスコンピュータをハードウェア製品としており、Troxel Aerospace社の放射線対策用ミドルウェアを経由したソフトウェアインターフェイスを提供
- SpaceCloudフレームワーク（SCFW）というソフトウェアアーキテクチャによって、宇宙専用で作られたハードウェアを、地上品と同様に取り扱うことが可能な計算機ノードに変換し、地上でのクラウドコンピューティングと同様に、アプリケーションの実行やソフトウェアの実装・アップグレードなどを実行可能
- ストレージについてはAmazon Web Servicesと互換のS3（Simple Storage Service）APIが、機械学習や推論はTensorFlow、Apache TVM、PlaidML、OpenVINO、oneAPIなどを利用可能
- アプリケーションの開発者は、一般的なプログラミング言語や機械学習フレームワーク等を使って、地上クラウド環境上で実施するのと同様に開発し、コンテナ形式で実装
- ユーザーは、アプリケーションの実行、ミッションからのデータダウンロード、イベントの発生通知等を、地上で一般的なgRPC（g Remote Procedure Calls）と呼ばれるプロトコルで指示



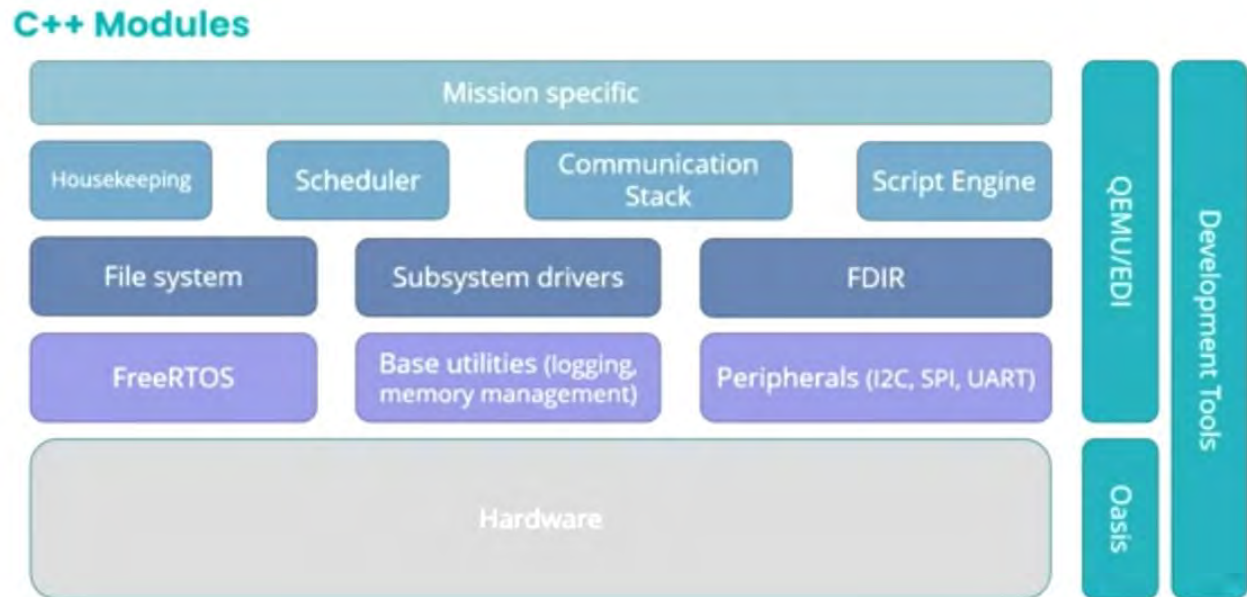
出典 : <https://unibap.com/en/our-offer/space/spacecloud-products/>
<https://unibap.com/en/our-offer/space/spacecloud-services/>

Proprietary Information : Not to be disclosed or reproduced without specific written permission from ASTEC

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ KP Labs

22-003-R-016

- KP Labsはハードウェア(HW)とソフトウェア(SW)両方のエッジコンピューティング製品を提供
- KP LabsのSWとHWは連動して開発されているが、サードパーティのHWやSWとも連動することも可能
- HWに関しては、技術的に実行可能であればFreeRTOSのようなOSSを使用することも、KP Labsが提供するAIやML等のSW製品を使用することも可能
- SWに関しては、ユーザーはビルディングブロックを含むSDK(Software Development Kit)を入手し、あらかじめ定義されたビルディングブロックを使用するか、独自のものを作成し、KP Labsのハードウェアで実行することが可能
- Herdとよばれるアルゴリズムのセットを提供しており、ユーザはKP LabsのHWを使うことも、独自のHWを使うことも可能



KP LabsのSDK(Software Development Kit)の構成

出典 : <https://kplabs.space/antelope/>、<https://kplabs.space/oryx/>

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ

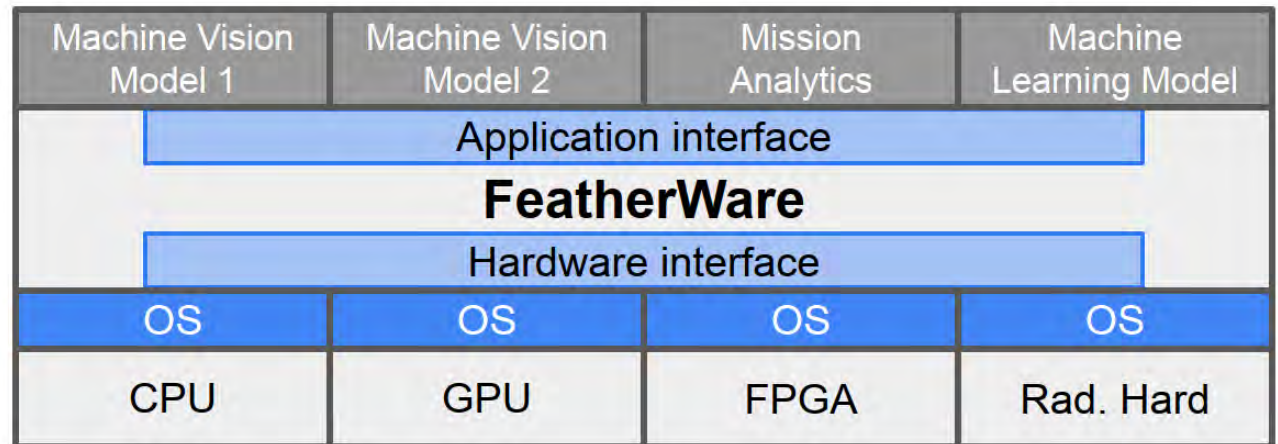
Exo-Space

22-003-R-016

- Exo-Space は宇宙でデータ処理インフラを構築するためのAI、マシンビジョンの技術を、宇宙の過酷な環境に耐えられるエッジなソフトウェアとハードウェアのパッケージとして提供
- ハードウェアとしてはFeatherBoxと呼ばれる0.5Uの処理ユニットを提供
- FeatherBoxは、軌道上での人工知能アプリケーションのためのデータ処理ユニットであり、専用のCPU、GPU、AIアクセラレータで構成
- FeatherBoxには、1秒間に4兆回の演算を行うことができる機械学習システムが組み込まれており、より多くの処理が必要な場合は、複数のプロセッサにモデルをパイプライン接続することも可能
- ソフトウェアは、FeatherBoxで動作する専用ソフトウェアであるFeatherWareとして提供
- FeatherWareは、衛星に搭載されたカメラからリアルタイムで画像を受信し、その生画像をGoogleが開発したOSSであるTensorFlowをベースとしたAI/MLモデルを通して実行
- ハードウェアは仮想化されており、処理されたデータはAPIを通じてダウンロードされてユーザに提供



FeatherBox外観



FeatherWareのアーキテクチャ

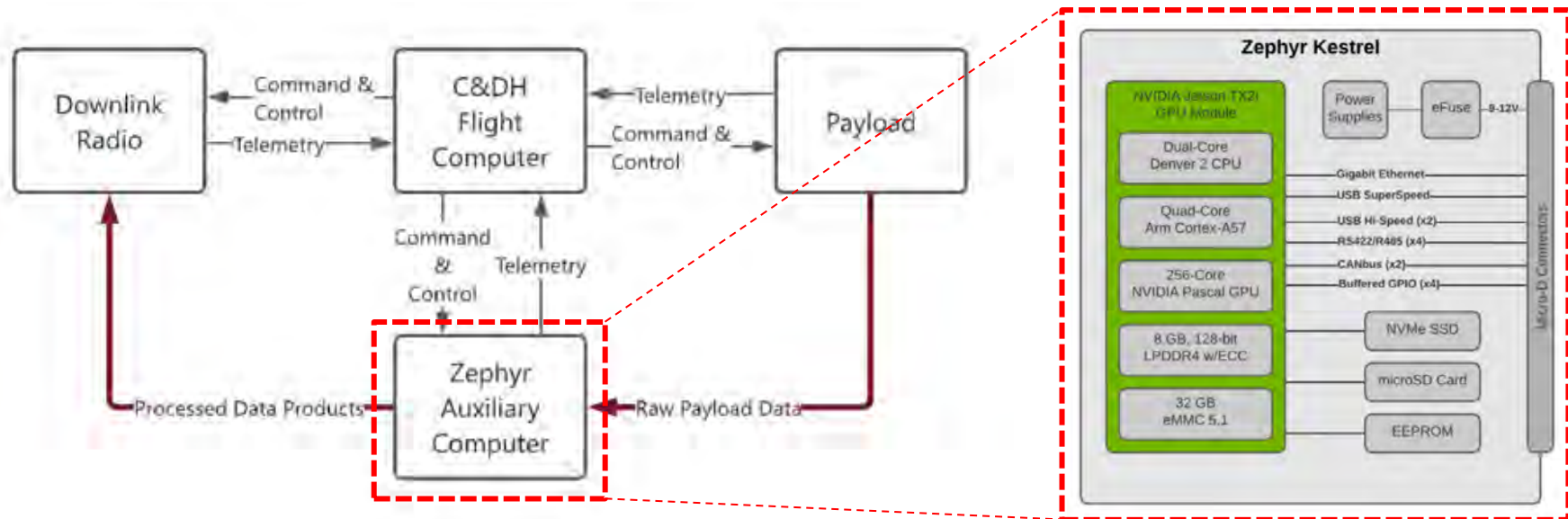
出典 : <https://www.exo-space.com/featherbox>, <https://www.exo-space.com/featherware>

Proprietary Information : Not to be disclosed or reproduced without specific written permission from ASTEC

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ Zephyr Computing Systems

22-003-R-016

- Zephyr Computing Systemsは、主にセンサデータ処理向けのエッジコンピューティングのためのハードウェアとソフトウェアのソリューションを提供
- センサデータ処理専用の高性能な補助プロセッサとして搭載
- ハードウェアとしては、COTS製品のプロセッサを宇宙へ持ち込むことを志向しており、NVIDIA社の工業品AIモジュールであるJetson TX2iをベースとして開発
- 次の製品では、Xilinxの最新AIチップであるVersal ACAPチップを搭載したSoM (System on Module) を設計する計画
- ソフトウェアは、オープンソースのカスタマイズフレームワーク (YoctoプロジェクトとOpenEmbedded) を使用して組み込み用にカスタマイズされたLinuxディストリビューションと、ユーザがアプリケーション開発に集中できるようにするために複雑なインターフェイスを仮想化するミドルウェアウェアで構成



出典 : <https://www.zephyrcomputing.space/data-processing>
https://drive.google.com/file/d/1-ff3fACIOPhrTz_6ZpUVOEvWfhqZOL0R/view

Proprietary Information : Not to be disclosed or reproduced without specific written permission from ASTEC

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ UnibapとAWSの連携

22-003-R-016

- UnibapはAmazon Web Service (AWS)とパートナーシップを2020年12月に締結し、UnibapのSpaceCloudフレームワークにAWSのクラウド、ストレージ、エッジサービスを統合するための協業を実施
- 2022年11月には、D-Orbit社が打ち上げたION衛星にUnibapのヘテロジニアス計算機iX5-100を搭載し、AWSの計算処理および機械学習 (ML) ソフトウェア一式を実行することに成功
- 衛星画像をリアルタイムに解析するAWS MLモデルや、接続が制限される時間帯でもクラウド管理と解析を行うAWS IoT Greengrassなど、地球観測ミッションに必要な以下のようなツールを共同で実証した
 - データサイズが大きい衛星画像やデータセットをより小さなファイルに分割
 - AWSのAIとMLサービスで画像のサイズを最大42%削減し、軌道上でリアルタイムの推論を実現
 - 複数の地上局でのダウンリンクにおいて、データの双方向の移動を管理し、衛星とAWSクラウド間の信頼性の高いTCP/IPプロキシ管理によって通信の遅延耐性を向上
 - 複数のコンタクトを介したダウンリンクで手動処理を省略し、ファイル転送を自動的に実施
- 実験では、衛星センサーのデータにさまざまなMLモデルを適用し、空中の雲や山火事の煙、地上の建物や船などの物体を高速かつ自動的に特定した



D-Orbit社が
打ち上げたION衛星
©D-Orbit



Unibapの
ヘテロジニアス計算機
iX5-100
©Unibap

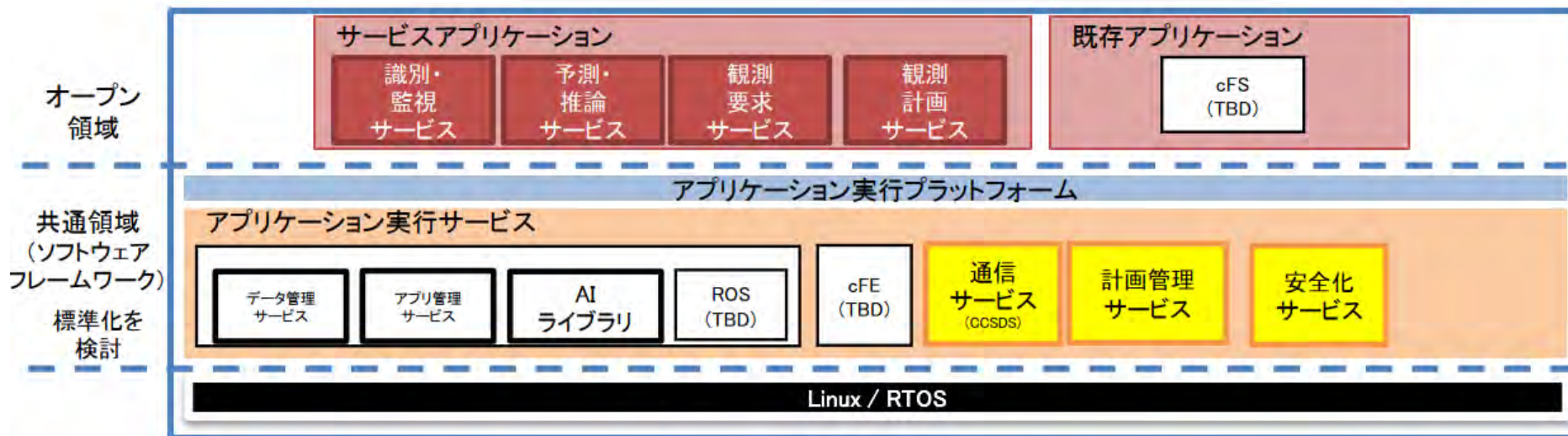
出典 : <https://www.bequoted.com/bolag/unibap/pressmeddelande/unibap-becomes-a-member-of-amazon-web-services-aws-partner-n-81530/>
<https://aws.amazon.com/jp/blogs/publicsector/aws-successfully-runs-aws-compute-machine-learning-services-orbiting-satellite-first-space-experiment/>

Proprietary Information : Not to be disclosed or reproduced without specific written permission from ASTEC

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ 日本の取り組み (JAXA)

22-003-R-016

- JAXAが主催するDX研究会での研究テーマの一つ「**軌道上エッジコンピューティングを使った新たなサービスの提供**」において、以下をコンセプトとしたソフトウェアプラットフォームを研究中
 - サービス提供したい人が開発したアプリケーションを、容易に軌道上で動作させ、短期間で検証できる
 - 動かしたい環境「地上・軌道上」を自由に選ぶことができる
 - それぞれのアプリケーションは独立もしくは、連携して動作する
 - アプリケーションの入れ替えを含めた動作、優先順位、リソース、タイミングを管理する
 - サービスアプリケーションとバス運用の協調動作、複数衛星通信サービス（インターオペラビリティ）
 - 用途に合わせた時間保証、安全化保証を満たす
 - 他の同様なソフトウェアプラットフォームとの親和性を視野に入れる
 - 日本、海外衛星へのサービスアプリケーションの搭載を考え、標準化（仕様・関数・使い方）を視野に入れる



研究テーマで想定しているソフトウェアプラットフォームの案 © J A X A

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ 日本の強み弱みと技術開発戦略

22-003-R-016

動向分析サマリ		
Fact Finding及び 海外動向分析	現状の日本における動向分析	
	強み弱み	
<p><米国> ロッキードマーチンは、ソフトウェア開発プラットフォームとしてSpaceCloudとHiveStarと呼ばれるコンセプトを推進</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ SpaceCloudはDevSecOps設備としてミッションアプリケーション開発のための信頼できるプラットフォームを提供 ✓ HiveStarは、自動的に衛星コンステレーションにタスクを効果的に分配 <p><その他、欧米新興企業> COTS品プロセッサを活用した新興メーカーが台頭し、新たなソフトウェアアーキテクチャを提案</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 最新のAI/ML等を活用できるアプリケーションの開発環境を提供し、宇宙関係メーカー以外の参入障壁を排除して市場を拡大 ✓ AWSと連携して地上と同様のクラウドベースでの開発環境を提供 	<p><JAXA> 刷新プロジェクトで軌道上エッジコンピューティングを使った新たなサービスアーキテクチャを検討中</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 軌道上における高度な衛星利用サービス実現に向けたハイエンドヘテロジニアス計算機 ✓ ハイエンドヘテロジニアス搭載計算機を用いた高度な衛星利用サービス ✓ 上記に必要なソフトウェアプラットフォームコンセプト構築・実証を推進中 	<p>強み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 従来型計算機の耐放射線性向上技術は保有 ✓ 高信頼性ソフトウェアの開発実績は豊富 <p>弱み</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ クラウドベースの衛星搭載ソフトウェア開発の経験の不足 ✓ アジャイル型の衛星搭載ソフトウェア開発経験の不足 ✓ 最新のAI・MLを容易に実装できるOSSの活用経験も不足

重要項目
<p>[考察] 衛星のSDS化と、これに伴う搭載ソフトウェアの高機能化・大規模化に対応するためには、最新の民生ソフトウェア技術を適用可能なソフトウェアアーキテクチャの導入が必須である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 海外製も含めた最新ヘテロジニアス計算機を活用し、最新のソフトウェアアーキテクチャに基づく開発経験を蓄積 ➢ クラウドベースの開発、アジャイル（的な）開発を積極的に推進し、最新OSSも活用 ➢ 参入障壁を下げることによって、宇宙業界以外からのソフトウェア開発リソースを積極的に導入 ➢ 欧米でも最新ソフトウェアアーキテクチャは事業者毎にそれぞれ取り組んでおり、業界レベルでの標準化は進んでいないため、日本が業界標準を策定して優位に立つことも可能 ➢ そのためには、オープンクローズ戦略の明確化やエコシステムの構築等の課題解決に早急に取り組むことが必要



1. はじめに
2. 調査概要
 - 2.1項 目的
 - 2.2項 中間報告(11/8)での議論
3. 調査分析
 - 3.1項 SDS/SDR/SDP (*software defined satellite/radio/payload*)
 - 3.2項 オンボード処理
 - 3.3項 運用の効率化
 - 3.4項 SWアーキテクチャ
 - 3.5項 衛星推進システム
4. 質疑

(調査要求)

- (1) 国内外の衛星に搭載される推進系の現在の技術開発状況を整理し、今後の動向についてまとめること。今後、電気推進の重要性が高くなることが予測されるが、特にロシア製を含めた今後の世界における技術及びサプライチェーンについてまとめること。
- (2) 本調査において、日本の強み・弱みを分析し、まとめること。

上記調査要求に基づき、国内外の衛星搭載推進系の技術開発の現状の整理と、動向調査を実施した。

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査

- ①化学推進（グリーン、モジュールパッケージ化の1液エンジン、水推薬の方式）
 - ②電気推進（HET、Ion）
 - ③電気推進（FEEP/スプレー/MEP）
- それぞれの主な開発製造企業、代表例の説明
- ④Dual mode thrusterの調査
 - ⑤参考：LM Goes-R（噴射時も気象観測：最も複雑な推進システム）

3.5.1.2 サプライチェーンの調査と課題

タンク、供給系全般、化学/電気スラスタ、PPU

3.5.1.3 衛星サイズや機数による推進系の特徴

静止大型だけでなく、MEO、LEOでも電気が採用多い

3.5.1.4 LEO/MEO直接投入と衛星側での ΔV の比較

LEO/MEOでも分離から運用軌道は衛星側で行う例が増加、IspとBOL質量の関係調査。

3.5.1.5 電源系調査 電気推進のPPU

上記調査を基に、下記で強み弱みを整理した。

3.5.2 日本の立ち位置分析

3.5.2.1 強み・弱み分析

3.5.2.2 推進系の日本にとってのキー技術

3.5.3 新しい推進系に関する見解（企業＋ASTEC）

(Executive Summary)

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

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

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

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

(Executive Summary)

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

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

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

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査

①化学推進（グリーン、モジュールパッケージ化の1液エンジン、水推薬の方式）

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査①化学

22-003-R-016

①化学推進(グリーン[有害性の少ない推薬]、モジュールパッケージ化された1液エンジン、水分解反応)

- 企業・機関で開発実用化されている推進系の調査を実施
- グリーンは国内、海外ともに軌道上実証済み。採用の拡大には至っていないが、低毒化の潮流は今後継続すると思料

	国内	米国/欧州	備考
グリーン	<ul style="list-style-type: none"> □ IA:低毒性推進の異常燃焼リスク、高コスト化を解決するため、0.5N級で、従来より危険性がないHAN系※推薬(HNP225)とするエンジンを開発 ※ 硝酸ヒドロキシルアンモニウム:Hydroxyl Ammonium Nitrate □ MHI:1N級の※HAN系推薬(SHP163)を用いつつ燃焼圧を下げることで課題の触媒温度を低く抑えた推進システムを開発。小型実証衛星1号機のミッション機器として軌道上実証済み。 	<ul style="list-style-type: none"> • AEROJET:NASAのGreen Propellant Infusion Mission (GPIM) ミッションでグリーンプロペラントエンジン開発、実証済み。燃料としてはHAN系推薬(AF-M315E)を採用。AF-M315Eは副産物としてかなりの量の水を生成するため、スタートラッカーのような光学面に水が付着する可能性あり。 • Bradford(ECAPS):ADN(AmmoniumDiNitramide)にメタノール、アンモニアを混合させたLMP-103Sを燃料として採用 	<p>https://www.ihp.co.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/1d230a571d86f7ff8cec9761e90517ca.pdf</p> <p>https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/561/561050.pdf</p>
モジュールパッケージ化1液エンジン	<ul style="list-style-type: none"> • IA:100kg級の小型衛星をターゲットにデブリ回避向け一体型推進装置を開発中。推進剤として、非爆発性燃料であるHNP225を採用が可能 	<ul style="list-style-type: none"> • AEROJET:小型衛星、CubeSat向けとして推進パッケージ化。燃料もヒドラジン系とグリーンプロペラント系両方に対応。 • Bradford(ECAPS):ADN系グリーンプロペラントエンジンを搭載したモジュールパッケージを開発 • VACCO:推薬はグリーン推薬(LMP-130S:ADN、ジニトラミン酸のアンモニウム塩)ベース。30cm角のユニットに4N級の4対のスラスタが一体化。オフモジュレーションによるΔVと3軸姿勢を実現(ASTEC分析) 	<p>https://spacenews.com/green-propellant-successfully-demonstrated-on-nasa-mission/https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140012587/downloads/20140012587.pdf</p> <p>https://www.ihp.co.jp/ia/products/space/pinot/pinot-g/jp/assets/pdf/Pinot-G_leaflet_JP_Rev5.pdf</p> <p>https://www.cubesat-propulsion.com/wp-content/uploads/2015/10/VACCO-CubeSat-Propulsion-Systems-Overview-pdf-for-download-page.pdf</p>

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査①化学

22-003-R-016

- ✓ 企業・機関で開発実用化されている推進系の調査を実施
- ✓ 水分解反応によるスラスタは無毒化推進であり、この潮流は今後も継続するものと思料。超低推力スラスタで十分なCubeSAT等での採用が候補

	国内	米国/欧州	備考																																				
<p>水を推進剤とする方式</p> <p>※ 水を水蒸気として噴射する方式（レジストジェット）や水蒸気をプラズマ化して噴射する方式（水イオン）などがある。推力が小さい（サブmN級）こと、水はエネルギー変換効率が原理的に低いことが課題であり、CubeSAT向けと考えられる</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pale Blue : 水を推進剤としたレジストジェットはCubeSATにて軌道上実証あり。現在は水レジストジェットスラスタ及び水イオンスラスタの二種類の推進系を一つのコンポーネントに統合した超小型統合推進システムを開発中。8月の「Small Satellite Conference 2022」で技術発表がなされた模様 <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p>Water Ion Thruster (single unit) Pale Blue</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: small;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Current</th> <th>Next step (end of 2021)</th> <th>Future (2022)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Thrust range</td> <td>130 - 300 μN</td> <td>152 - 400 μN</td> <td>183 - 554 μN</td> </tr> <tr> <td>Specific impulse</td> <td>500 - 968 s</td> <td>560 - 1452 s</td> <td>601 - 1987 s</td> </tr> <tr> <td>Power</td> <td>30 - 60 W</td> <td>22 - 62 W</td> <td>25 - 59 W</td> </tr> <tr> <td>Thrust to power ratio</td> <td>4.0 - 5.1 μN/W</td> <td>6.9 - 7.4 μN/W</td> <td>7.3 - 9.4 μN/W</td> </tr> <tr> <td>Total impulse</td> <td>391 - 3323 Ns</td> <td>1098 - 2648 Ns</td> <td>3166 - 6822 Ns</td> </tr> </tbody> </table> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <table border="1" style="width: 30%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tbody> <tr><td>Volume w/o tank</td><td>0.7U</td></tr> <tr><td>Dry mass w/o tank</td><td>1.8 kg</td></tr> <tr><td>Command Interface</td><td>UART, RS422</td></tr> <tr><td>Storage temperature</td><td>0 - 60 °C</td></tr> <tr><td>Operating temperature</td><td>-4 - 49 °C</td></tr> <tr><td>Supply voltage</td><td>5 V and 12 V</td></tr> </tbody> </table> <div style="margin: 0 10px;">  </div> </div> </div> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 東京大 : 水を推進剤としたホールスラスタ研究を実施。100kg級小型衛星への搭載を目指す。 ✓ 大工大 : 水を推進剤としたDCアークジェット研究を実施。推力は小さい（マイクロN級）。水のエネルギー変換効率が低いことが課題。 		Current	Next step (end of 2021)	Future (2022)	Thrust range	130 - 300 μ N	152 - 400 μ N	183 - 554 μ N	Specific impulse	500 - 968 s	560 - 1452 s	601 - 1987 s	Power	30 - 60 W	22 - 62 W	25 - 59 W	Thrust to power ratio	4.0 - 5.1 μ N/W	6.9 - 7.4 μ N/W	7.3 - 9.4 μ N/W	Total impulse	391 - 3323 Ns	1098 - 2648 Ns	3166 - 6822 Ns	Volume w/o tank	0.7U	Dry mass w/o tank	1.8 kg	Command Interface	UART, RS422	Storage temperature	0 - 60 °C	Operating temperature	-4 - 49 °C	Supply voltage	5 V and 12 V	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tethers Unlimited: 水の電気分解による「H₂/O₂反応」。軌道実証あり。Ispは約200s。 	<p>https://pale-blue.co.jp/services.html</p> <p>https://www.researchgate.net/publication/326161542_Fundamental_Ground_Experiment_of_a_Water_Resistojet_Propulsion_System_AQUARIUS_Installed_on_a_6U_CubeSat_EQ_UULEUS</p> <p>https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1769&context=satellites</p> <p>https://jaxa.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=15904&item_no=1&attribute_id=31&file_no=1</p>
	Current	Next step (end of 2021)	Future (2022)																																				
Thrust range	130 - 300 μ N	152 - 400 μ N	183 - 554 μ N																																				
Specific impulse	500 - 968 s	560 - 1452 s	601 - 1987 s																																				
Power	30 - 60 W	22 - 62 W	25 - 59 W																																				
Thrust to power ratio	4.0 - 5.1 μ N/W	6.9 - 7.4 μ N/W	7.3 - 9.4 μ N/W																																				
Total impulse	391 - 3323 Ns	1098 - 2648 Ns	3166 - 6822 Ns																																				
Volume w/o tank	0.7U																																						
Dry mass w/o tank	1.8 kg																																						
Command Interface	UART, RS422																																						
Storage temperature	0 - 60 °C																																						
Operating temperature	-4 - 49 °C																																						
Supply voltage	5 V and 12 V																																						

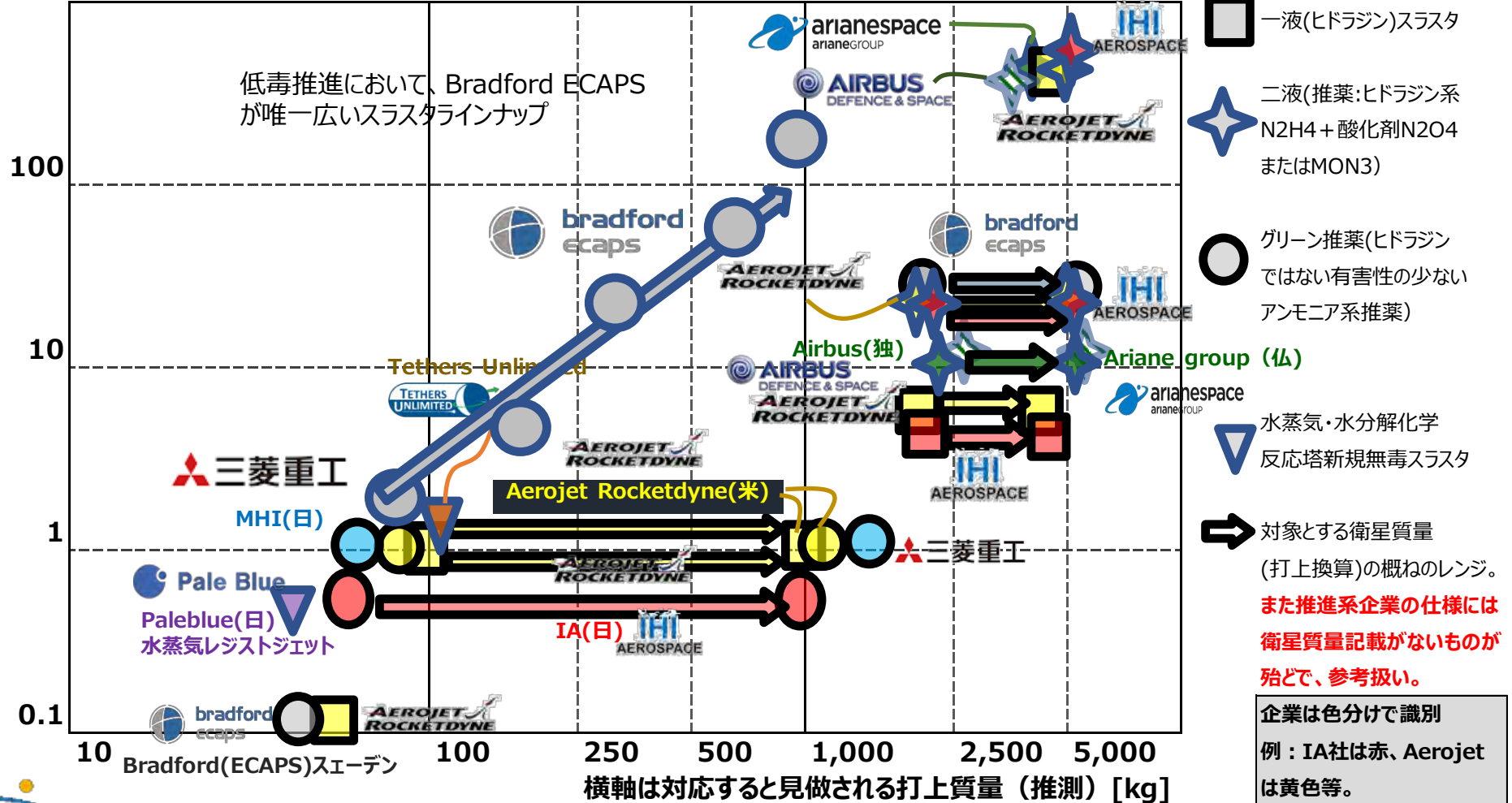
3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査①化学（衛星向け）

22-003-R-016

- a. 二液スラスタに関してはIAが海外大手数社にも標準に採用されている(AKE,BTH⇒Lockheed、NGIS)
- b. 但しAerojetやAirbus等が市場有意。重力天体への宇宙機の離発着に必要な大推力は日本でもニーズ(現500N)
- c. グリーンの大推力(~22N)もデオービットで小型衛星ニーズは有るBradfordが最も品種多く席卷。

1000 推力[N]



3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査

②電気推進（HET、Ion）

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査 ②電気 (HET/イオン)

22-003-R-016

②電気推進系 (ホールスラスト[Xe/Kr, 全ヨウ素]、イオンエンジン、エレクトロスプレー、MEP電気推進[Magnetogradient Electrostatic Plasma[比較的低压で広い放電容積を有する])

- 企業・機関で開発実用化されている推進系の調査を実施
- ホールスラスト開発は国内も進められているが、実用化という観点では欧米露製が大きく先行

	国内	米国/欧州	備考
ホールスラスト	<ul style="list-style-type: none"> IA:技術試験衛星向けとして4-6kWクラスのスラスト開発中 MELCO:技術試験衛星向けとしてIA製ホールスラスト用電源4-6kWクラスを開発中 NETS/古河電工:1kW級ホールスラストを開発中(JAXA宇宙イノベーションパートナーシップ) 	<ul style="list-style-type: none"> Aerojet (米):2~4kW級のXR-5は開発済み、フライト実績あり(6衛星) Safran (仏):PPSシリーズの開発を実施(PPS-1350,PPS-5000等)。Fakel社の技術をベースに開発。ウクライナ問題により欧米の衛星での採用実績が増加 Fakel (露):SPT-100、SPT-140の搭載実績が多数あり。低電力用としてST-25,40を開発。しかし、ロシア情勢によりユーザは他社への乗り換えが発生していると推測 Busek (米国):200W~20kW級のホールスラストをNASAとの契約のもので開発。高圧化、高価な燃料Xe対応のみならず、固形ヨウ素を燃料としたエンジンを開発(Xe、Krに対して安価)。しかし、汚染リスクに対する評価が必要 ApolloFusion (米):2021年にAstra社がApolloFusion社を買収。400W級、1.4kW級のホールスラスト(Xe,Kr)、PPUを開発。Starlinkのスラストは外形などから米Astra社製であると思料。Onweb社もウクライナ情勢により露Fakel社製からAstra社製への変更を発表(22/8) 	<p>Fakel:https://sets.space/development-status-of-the-st-40-hall-thruster/ Busek:http://electricrocket.org/2019/926.pdf Busek:https://spacenews.com/busek-expansion/ NASA:https://core.ac.uk/download/pdf/42696261.pdf</p> <p>https://satsearch.co/products/apollo-fusion-apollo-constellation-engine-ace-krypton-propulsion-system https://www.teslarati.com/spacex-reveals-starlink-satellite-details-launch-time/ https://lilibots.blogspot.com/2020/04/starlink-satellite-dimension-estimates.html https://spacenews.com/astra-to-sell-electric-thrusters-to-airbus-oneweb-satellites/ https://www.furukawa.co.jp/release/2021/kenkai_20210315.html</p>

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査 ②電気 (HET/イオン)

22-003-R-016

- 企業・機関で開発実用化されている推進系の調査を実施
- 海外では安価なヨウ素を用いた小型衛星向けのイオンエンジン開発が主流
- 各種電気推進の大きな潮流はCubeSAT向け低コスト/無毒な燃料を使用したスラスタ開発

	国内	米国/欧州	備考
イオンエンジン	<ul style="list-style-type: none"> 東京大:低電力小型イオンスラスタの研究に取り組む。電力は10-20 W, 質量は3-5 kg程度 JAXA/九州大:昇華性推進剤を用いたイオンエンジン研究を実施 JAXA/三菱電機:ETS-8で20mN/Isp3000sの純国産開発実施、但し実用衛星への搭載には至っていない。 SLATSの定常軌道高度維持にも運用実績あり。 JAXA宇宙研/NEC:はやぶさ1/2で採用、特に2号機ではにミッション完了し、現在も運用中。 	<ul style="list-style-type: none"> Busek (米国): 固形ヨウ素を燃料としたBIT-3 (グリッド型イオンエンジン) は“Lunar IceCube”、“LunaH-Map”でフライト実績あり。 ThrustMe (仏): 小型衛星向けとしてモジュラー開発。グリッド型イオンエンジン技術をベースにヨウ素を燃料としたエンジンである。 	<p>Busek:https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3471&context=smallsat&httpsredir=1&referer=</p> <p>ThrustMe:https://www.nature.com/articles/s41586-021-04015-y.pdf</p> <p>東京大:http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/koizumi/html/htdocs/?page_id=16</p> <p>https://jaxa.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=5317&item_no=1&attribute_id=31&file_no=1</p> <p>https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?action=dlattach;topic=44066.0;attach=1463163</p>

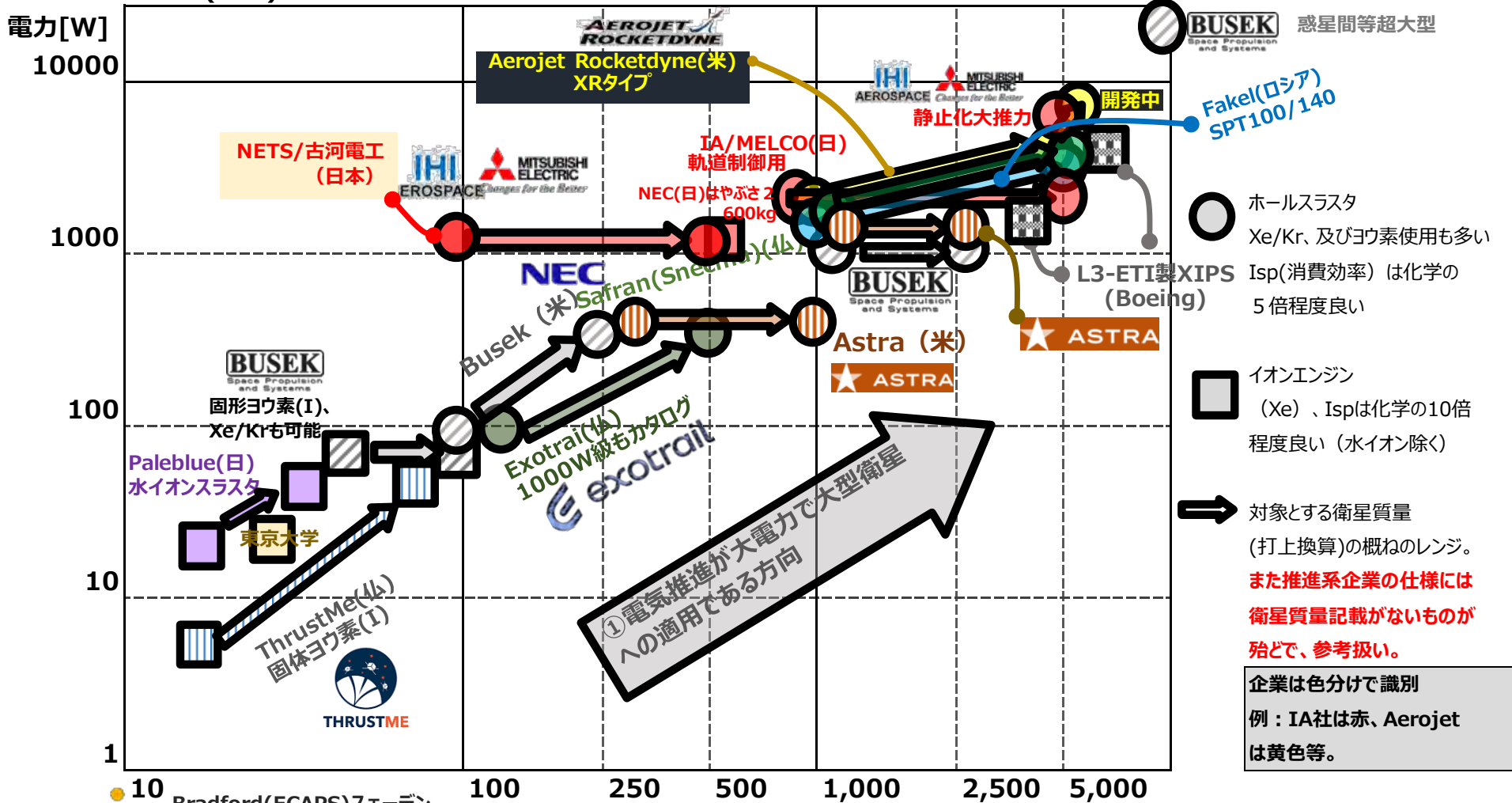
3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査 ②電気 (HET/イオン)

22-003-R-016

- a. 宇宙開発当初より着手、はやぶさ(NEC)、ETS-8/-9/SLATS(MELCO/JAXA、IA)で実績あるが事業化できていない。
- b. Aerojet、Safran、BUSEK、ApolloFusion等、強豪専門が多くスラスタ単体の競争は激しい。
- c. 欧衛星大手は上記専門スラスタに社内高圧電源を組み合わせる全電化衛星を標準シリーズ化

縦軸の(投入)電力は各電気推進タイプ内 (ホールやイオン) で推力にほぼ比例する。一般的な指標となる。

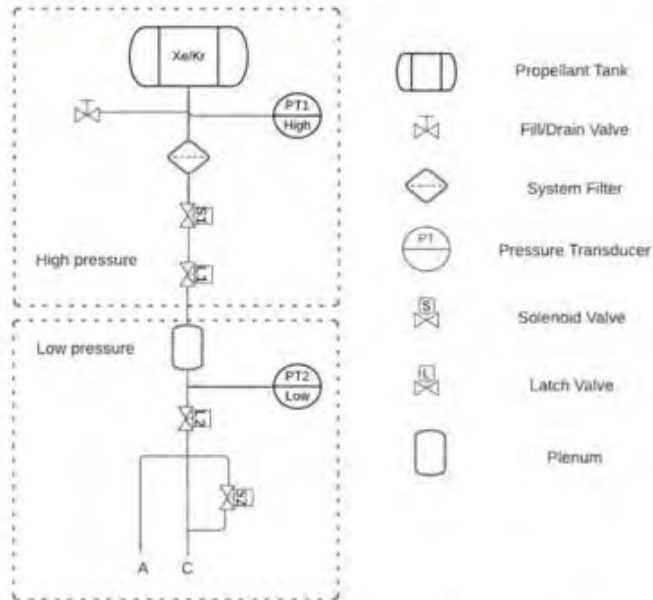


3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査 ②電気 (HET/イオン)

22-003-R-016

- ✓ Astra社のホールスラストシステムはKrを燃料とした低軌道向け小型システム (1.4kW級/Ispは約1800sec) であり、軌道上実績あり
- ✓ PPUは小型化を図っており、質量は約2.5kg。さらに、衛星を低軌道から軌道遷移させるため、耐放射線性を強化



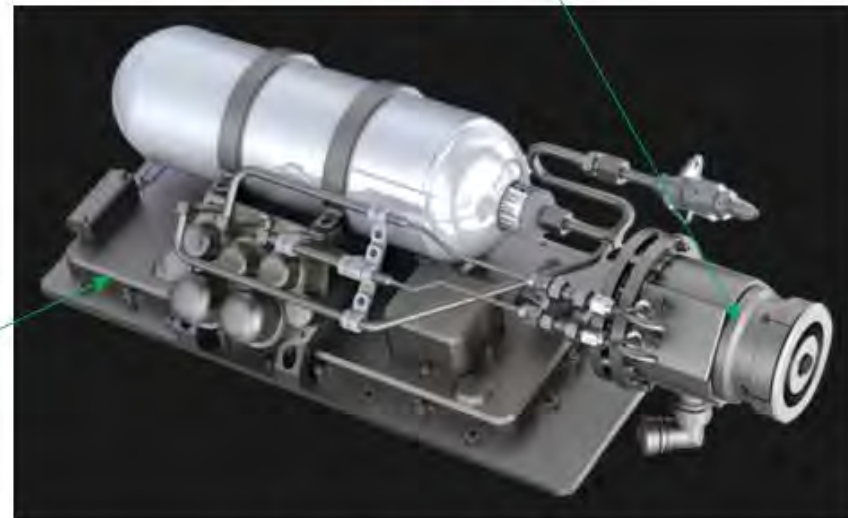
Propulsion Block Diagram



Power Processing Unit



Hall thruster



System overview

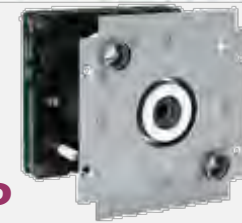
3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査

③電気推進（FEED/スプレー/MEP）

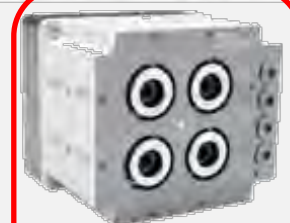
3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査③電気(FEEP/スプレー/MEP) 22-003-R-016

- a. その他、小推力レンジのスラスタにおいて、新規技術の研究開発や、その事業化の動きは活発
- b. 背景に実用フェーズに移行した小型衛星での推進系需要
- c. オーストリア拠点のEnpulsion社の電界放出型電気推進:FEEP
- d. 現在は右記のようにIspは高いが推力は~1mNと極めて小さい。
FEEPは144台の軌道上実績。



ENPULSION
NANO



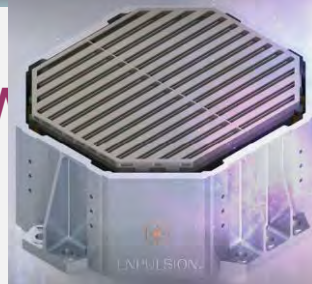
ENPULSION
MICRO R³



*OHB Sweden
selects
ENPULSION
electric
propulsion
for the EIS
mission*

	FLIGHT HERITAGE	DURABLE
DYNAMIC THRUST RANGE	10 μ N TO 350 μ N	200 μ N - 1.35 mN
NOMINAL THRUST	330 μ N	1 mN
SPECIFIC IMPULSE	2,000 TO 6,000 s	1,500 - 6,000 s
PROPELLANT MASS	220 g \pm 5%	1.3 kg
TOTAL IMPULSE	MORE THAN 5,000 Ns	MORE THAN 50,000 Ns
TOTAL SYSTEM POWER	8 - 40 W	30 - 120 W
MASS (DRY / WET) including PPU	680 / 900 g	2.6 kg / 3.9 kg
OUTSIDE DIMENSIONS	Fully Integrated System: Thruster 140 x 120 x 98.6 mm 100.0* x 100.0* x 82.5 mm PPU box: 140 x 120 x 34.0 mm	

一方“NEO”のコードで
20mN, 2500sec, 800V
FEEP+Tank+PPUで
37kgと小型向けでは
かなりのサイズを開発中。



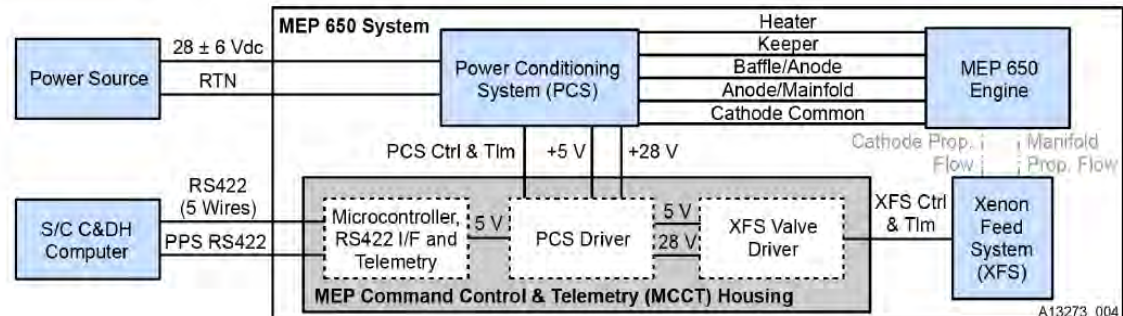
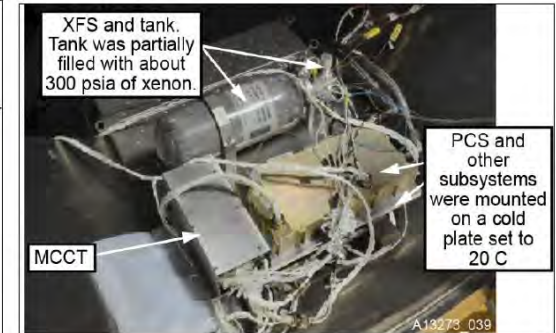
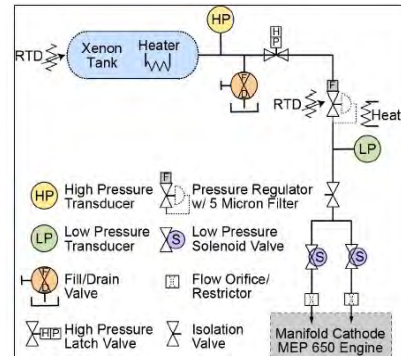
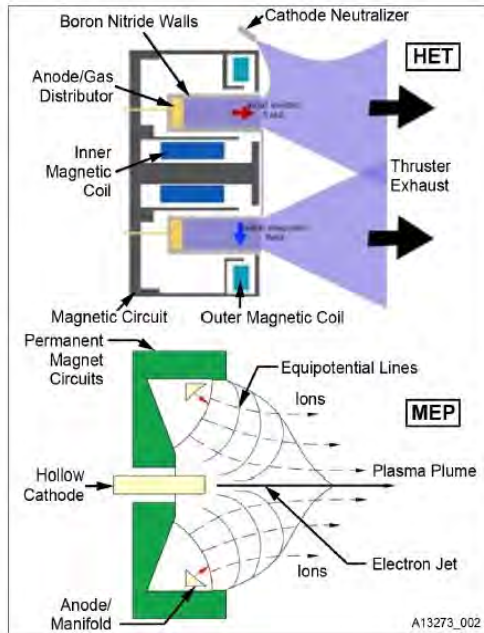
3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査③電気(FEEP/スプレー/MEP) 22-003-R-016

Development Project Overview for MEP Engine Propulsion System for Small Satellites

米国Ball SmallSat 2021より

- a. Ball Aerospaceがホールに代わって開発中のMEP電気推進エンジン (Magnetogradient Electrostatic Plasma)
- b. USAFと連携、技術自体は40年前から日本でも東大で盛んに研究されていた。
- c. ホロカソード採用で高圧の放電容積を要するHETよりも**比較的低压で広い放電容積を実現、構造が簡便**
- d. TRL 6 相当をQualify済み
- e. **30mN/1581s/650Wが仕様。この数値はHETとほぼ同一。但し推奨はXe。**



3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査③電気(FEEP/スプレー/MEP) 22-003-R-016

米国 MIT の研究成果を活用した米国Accion Systems 社のエレクトロスプレースラスタ

Tiled Ionic Liquid Electropray satellite thrusters

- Total impulse: 755 Ns ⇒ 40kg衛星で最大19m/s ⇒ SS02-3年分
- Specific impulse: **1650 sec** ⇒ 良い
- Wet mass: 1.25 kg
- Max axial thrust: **0.45 mN** ⇒ Impulsionと同程度の推力
⇒ $755\text{Ns} / 0.45\text{e-}3\text{N} = 466\text{時間}$



	項目 (右記判定はAccion社による)	TILE(エレクトロスプレー)	FEEP	Hall Effect	Gridded Ion
1	Low Power Operation スロット自由度が高く電力レベルにより多段階の出力が可能	○	—	—	—
2	Low Pressure Propellant 低圧タンクでの推進剤貯蔵が可能	○	○	—	—
3	Inert (不活性) Propellant 金属表面へのコンタミネーションがない (SAP、センサーの検知器[CCD])	○	—	○	○
4	No External Cathode 不具合や効率低下につながる外部カソードが構造上ない。	○	—	—	—
5	High Thermal Efficiency 電力vs推力効率が高いため、複雑な熱パス設計・放熱設計が軽減される	○	—	—	—
6	No Warm Up Periods 運用においてウォームアップ準備動作が不要で機動性が高い	○	—	—	—
7	Compact Design イオン化チャンバー・高圧バルブ系・流量制御系が不要であり軽量小型化に資する	○	○	—	—

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査

④ Dual mode thruster

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.6 Dual mode thruster (本例はXe推進であり昇温による流出速度増加であり化学反応ではない) 6

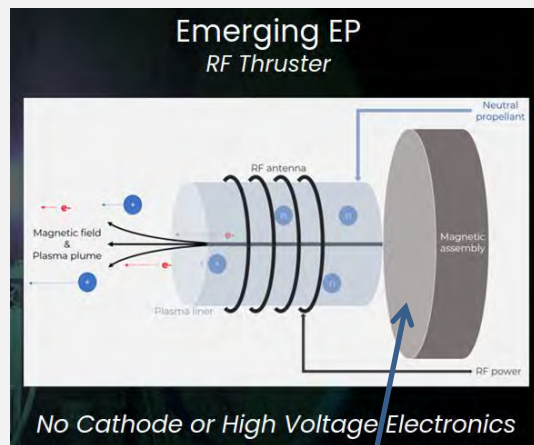
- ①Hybrid推進系 化学推進 (AEF時大推力と姿勢、捕捉、二液化学) + 定常時電気推進 推力範囲大、コスト大
 ②Dual Mode推進系1 ホールスラスト電気推進でPPUの電力により推力を数パターン変更可能 推力範囲小、コスト中
 ③Dual Mode推進系2推進「供給系を共通にした電気推進スラスト+化学スラスト」 推力範囲中、コスト小
- 上記のうち全電化衛星が出現する前の数年前の大型衛星では①が散見、②はいくつかの電気推進システムで実現 (Airbis、ETS-9等)、③は今後の軌道上作業機等で、軌道投入・軌道巡回と機動性の両立に期待できる可能性があるがまだ推力はかなり小さい模様。③に関して今回一例を報告。pLEOが最も対象として良好、中大型衛星への言及はない。
 JAXA：同じHETで電氣的な推進と加熱してIspを保持する化学推進の方法デュアルモードと呼ぶこととする (JAXA研開本)

Keynote Presentation

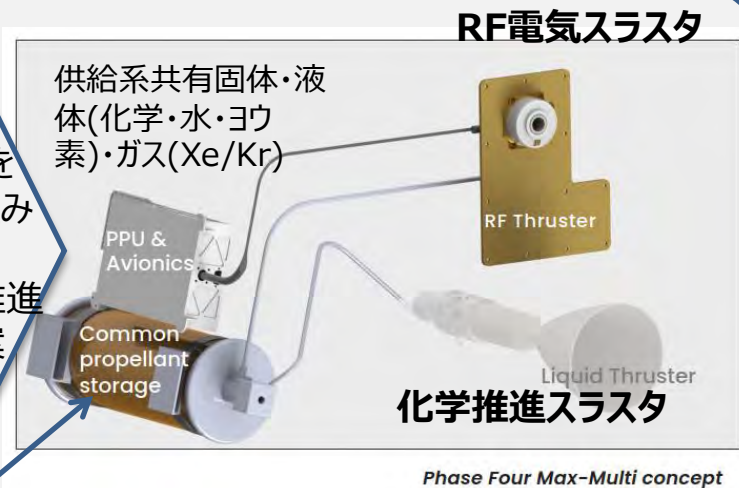


2022 MILSAT SYMPOSIUM

MILSAT Symposium@2022
 Jim Bridenstine
 Former NASA Administrator,
 Acorn Growth Companies



左記RFスラストを化学スラストと組み合わせた“Dual mode推進系”とする構成案



Maxwell Block 1 flight unit

RFスラストの特徴

- 電気推進はMaxwell社供給のRfスラスト
- Phase Four社が装置全体
- 高圧電源が不要、カソードレス
- 固体・液体(化学・水・ヨウ素)・ガス(Xe/Kr)可能
- コスト削減・構造シンプル・軌道上始動短縮

電気と化学のDual modeスラスト

- 共通の推進供給系、共通の電気機器
- ハイスラストは化学で実現
 ⇒ASATへの対処、Debris回避、機動的軌道変更
- 省燃費ΔVはRFスラスト
 ⇒定常軌道維持、軌道投入 (EOR) 、Deorbit

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査

⑤参考：LM Goes-R

(噴射時も気象観測：

現衛星では最も構成が複雑な化学・アークジェット推進システム)

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査④参考：LM Goes-R

22-003-R-016

✓ GOES-R推進系の冗長系は遮断弁は機器冗長、パイロ弁は2重冗長、スラストはN+1冗長

米国現気象衛星GOES-Rの推進系(LM) 静止化・軌道維持・観測中軌道制御に関してそれぞれ役割分担する推進系で非常に効果U(複雑)

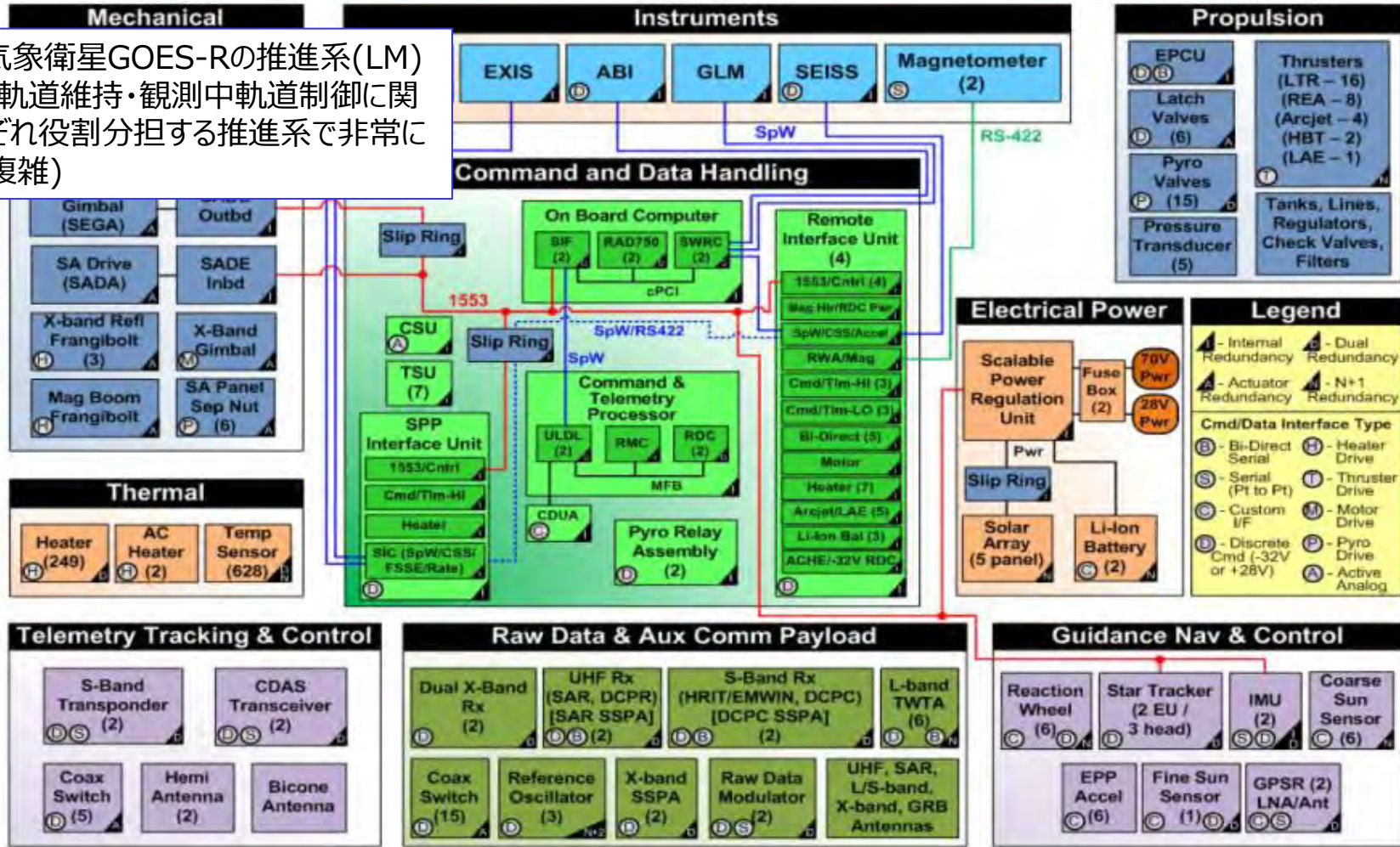


Figure 2-2: GOES-R Series Satellite System Block Diagram

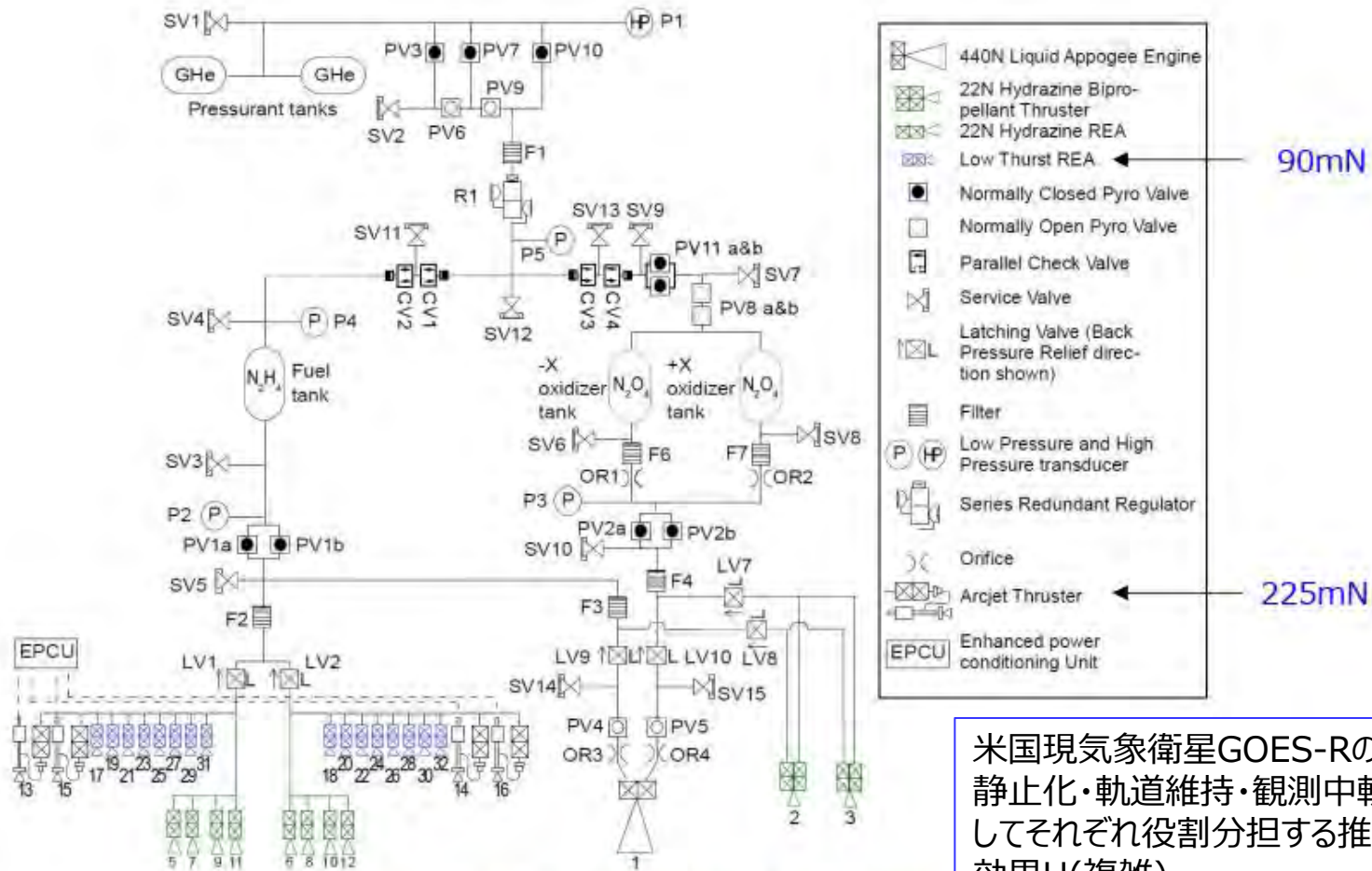
GOES-R システムブロック図

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.1 国内外の推進系全般の調査④参考：LM Goes-R

22-003-R-016

32台もの一液・二液・アークジェットの90mN/225mN/22N/440Nを搭載しAEF・軌道制御・姿勢維持・観測中軌道制御・姿勢制御を実施



GOES-R 推進系ブロック図

米国現気象衛星GOES-Rの推進系(LM) 静止化・軌道維持・観測中軌道制御に関してそれぞれ役割分担する推進系で非常に効果U(複雑)

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.2 サプライチェーンの調査と課題

タンク、供給系全般、化学/電気スラスタ、PPU

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.2 サプライチェーンの課題

22-003-R-016

- ✓ 電気推進に関してはロシア製を含め、サプライチェーンの課題も考慮して整理
- ✓ 品質、価格、L/Tなど調達性は全体的に悪化傾向にあり、まとめ買い等調達を工夫してリスク回避を図る必要あり。標準化、リピート性の向上が重要

機器/材料	課題
タンク（海外）	材料であるTi材の入手性悪化に伴い、長納期化、価格は年々高騰
タンク（国産）	海外同様に、Ti材の入手性悪化により、長納期化。ただし、工期は海外よりも長期。また、価格は海外より安価であるが、容量に対する質量は増加。内部の表面張力デバイスについて、軽量なベーン方式の実績が海外に比べて少ない。
化学推進スラスタ（海外）	材料費高騰に伴い価格は高騰。なお、タンク・スラスタノズルあるいはロケットエンジン全体で短納期や低コスト化の実現手段として、耐熱金属を用いた金属積層造形(additive manufacturing)が海外で開発され始めている※脚注。
化学推進スラスタ（国産）	工期は材料調達に時間を要するため、比較的長期。海外と比較して安価で同等の競争力はある。Lockheedの静止衛星、OHBにも採用されている。
電気推進スラスタ（海外）	ロシア製は非常に安価で実績が豊富であるが、政治的なリスクあり。本背景もあり、世界的にロシア製から欧米製への切替えが起こっている。EUからの電気推進の調達性は悪化。
その他 （他の推進系デバイス類）	長納期化傾向。なお、デバイス類は海外製が占める割合が高い。一方、米国デバイスメーカーの品質管理は強化する必要あり
その他（Xe/He）	Xe/Heともに入手性に難あり（価格も高騰）。ただし、Xeの代替燃料であるクリプトンの採用は拡大。クリプトンの場合、推力は低いですが、Ispは良い
その他（電気推進用電源）	海外製の電気推進電源は高価。サンセット部品/改良等による更新もあるため、ノンリカ費用抑制が課題

※ 大手のLockheed、Boeing、Aerojet等だけでなく、新興のAgile space industries, Rocket lab, Relativity space等ロケット・エンジン企業はAdditive manufacturing(3次元造形、3DP)の製造技術に非常に積極的

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.3 衛星サイズや機数による推進系の特徴

静止大型だけでなく、MEO、LEOでも電気が採用多い

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.3 衛星サイズや機数による推進系の特徴

22-003-R-016

✓ 衛星のサイズ（中大型と小型）や整備機数（単独の静止等とコンステレーション）より、採用する推進系方式にどんな特徴があるか、また、その背景（機能性能・SWaP・開発難易度・コスト・運用性等）について調査した。

種類	推進系	特徴	備考
静止 (大型) >4.5ton	<ul style="list-style-type: none"> Eurostar-Neo (Airbus) :All電化 (Eutelsat36D,HotBird13F/G) Spacebus-Neo (TAS) :All電化 (Eutelsat10B,Eutelsat Konnect, Eutelsat Konnect VHTS) 702MP+ (Boeing) :All電化(Viasat3) 	<ul style="list-style-type: none"> 通信衛星での推進系は電気推進への置換えが進み、スラスターの電力規模は5kW級が主流 気象衛星であるGOES-Rシリーズ（世代ごとに纏め発注により事業化をサポートしていると思料）は5トン級で4機をLMにて開発。推進系はアークジェットと低推力1液スラスタを採用（次頁以降参照） 	<p>https://www.jstage.jst.go.jp/article/kjsass/65/9/65_274/_pdf/_char/ja</p> <p>・Eutelsat Konnect VHTSは重さ6.4トン、高さ8.8メートル。Ariane5ロケットで22/9に打上げ</p> <p>https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/GOES-RSeriesDataBook.pdf</p>
静止 (小型) <3.5kg	<ul style="list-style-type: none"> Onesat (Airbus) :All電化(Inmarsat-7,Intelsat42/43,OPTUS-11) Inspire (TAS) :All電化(ARABSAT-7A, SES-26) 702SP (Boeing) :All電化(SES-20/21) 	<ul style="list-style-type: none"> 通信衛星はAll電化衛星が主流 安価を求める衛星では、化学推進を採用（Nilsat301、SES22/23など） 	<p>https://artes.esa.int/projects/onesat-platform-and-propulsion-development</p> <p>https://spacenews.com/arabsat-orders-first-fully-software-defined-satellite/</p>
中軌道	<ul style="list-style-type: none"> GPS III (LM) :2液式、軌道上は一液式 Gallileo 2nd Gen (Airbus/TAS) :All電化 Globalstar3rd GEN (MDA/RocketLab) :不明 	<ul style="list-style-type: none"> GPS IIIはLMのA2100をベースにヒドランジ、NTOを用いた2液推進システムで軌道上運用は一液。 Gallileoの2nd Genはオール電化バスを採用。軌道上での運用可能期間が伸び、1回の打上げで複数の衛星投入が可能（世代ごとに纏め発注により事業化をサポートしていると思料） Globalstarのバス部はRocket Labが担当。ただし、推進系は不明 	<p>https://www.airforce-technology.com/projects/gps-iii-military-satellite/</p> <p>https://sorabatake.jp/25631/</p> <p>https://gnss.asia/new/thales-and-airbus-to-manufacture-the-first-twelve-second-generation-galileo-satellites/</p>
低軌道コンステ	<ul style="list-style-type: none"> Starlink:Krホールスラスタシステム Oneweb:Xeホールスラスタシステム 	<ul style="list-style-type: none"> 衛星分離軌道から運用軌道まではKrホールスラスタで軌道遷移を行う（次頁以降参照）。ロケットエンジンより推進効率が良い電気推進を用いることで複数機を効率的に打上げることが可能 	<p>https://spaceflightnow.com/2019/05/15/spacex-releases-new-details-on-starlink-satellite-design/</p> <p>https://spacenews.com/astra-to-sell-electric-thrusters-to-airbus-onweb-satellites/</p>

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.4 LEO/MEO直接投入と衛星側での ΔV の比較

LEO/MEOでも分離から運用軌道は衛星側で行う例が増加、
IspとBOL質量の関係調査。

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.4 LEO/MEO直接投入と衛星側でのΔVの比較

22-003-R-016

- ✓ LEO/MEOに関して複数～多数機打ち上げの場合のロケットによる直接運用軌道投入（従来方式）と、投入軌道から運用軌道までの衛星側ΔV実施（近年）の両方式に関する推進系の比較調査を実施
- ✓ 電気推進の信頼度増加に伴い、衛星側ΔV実施のケースが増加。ペイロード質量は増加傾向になると思われ、この傾向は変わらないと史料

種類	対象機種	特徴	備考
ロケットによる直接運用軌道投入方式	GPS III (LM) : 2液式、軌道上は1液式 	<p>The GPS III will be equipped with a nickel hydrogen rechargeable battery, bipropellant hydrazine propulsion system, NTO oxidiser, 100lbs liquid apogee engines, unified S-band transponder, network communication element (NCE), navigation payload element (NPE), hosted payload element and antenna subsystem element.</p> <p>The GPS III SV02 satellite, built by Lockheed Martin for the Air Force, uses Aerojet Rocketdyne thrusters for orbit maintenance and adjustment, attitude control and end-of-life decommissioning. The spacecraft is equipped with 12 Aerojet Rocketdyne MR-103G thrusters, each generating 0.2 pounds of thrust, and six MR-106L thrusters, each producing 5 pounds of thrust.</p>	<p>https://www.airforce-technology.com/projects/gps-iii-military-satellite/</p> <p>https://www.rocket.com/article/aerojet-rocketdyne-helping-propel-modernization-gps-satellite-constellation</p>
	Gallileo 1 st Gen(OHB) : 1液式 	<p>The Galileo satellites are equipped with a Hydrazine monopropellant propulsion system consisting of a central Hydrazine tank and two thruster banks, each containing four 1-Newton thrusters. The propulsion system is used for orbit adjustments and constellation maintenance, attitude control and the maneuver to a disposal orbit at the end of the satellite's mission.</p>	<p>https://www.moog.com/news/operating-group-news/2015/galileo-9-10-maintain-orbit-with-moog-propulsion-systems.html</p>

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.4 LEO/MEO直接投入と衛星側でのΔVの比較

22-003-R-016

種類	対象機種	特徴	備考
投入軌道から運用軌道までの衛星側ΔV実施方式	Gallileo 2nd Gen : All電化 	<p>・軌道上での運用可能期間が伸び、1回の打上げで複数の衛星投入が可能ということで電気推進による衛星側ΔV方式を採用予定</p> <p>New on-board technologies include electric propulsion to propel the satellites from the orbit in which they will be launched to the final operational orbits, allowing two satellites to be launched at once despite their increased mass.</p>	https://www.eoportal.org/satellite-missions/galileo-g2#galileo-second-generation-g2
	Starlink : All電化 	<p>・打上げ時の機数を増やすため、ロケットによる直接軌道投入ではなく、ロケットには高度約350kmに投入され、その後効率が良いホールスラスタを使用して軌道遷移を実施（高度約350km⇒500km）。しかし、22/2には地磁気嵐による空力抵抗増加で地上への落下を余儀なくされた。</p> <p>The Starlink satellites carry Hall thrusters, which use electricity and krypton gas to generate an impulse, to maneuver in orbit, maintain altitude and guide the spacecraft back into the atmosphere at the end of their mission.</p> <p>Hall thrusters provide a more fuel-efficient form of propulsion than conventional liquid propellants, but most satellites that use Hall thrusters consume xenon gas.</p>	<p>https://spaceflightnow.com/2019/05/15/spacex-releases-new-details-on-starlink-satellite-design/</p> <p>https://japan.cnet.com/article/35188249/Gen2-Systemは長さ22フィート(約6.7m)、重量2755ポンド(約1250kg)になる模様。第1世代の衛星は573ポンド(約260kg)</p> <p>https://www.inverse.com/innovation/spacex-starlink-satellites-solar-storm</p>
	Oneweb : All電化 	<p>・Starlinkと同様、打上げ時の機数を増やすため、ロケットによる分離後は高効率なホールスラスタで軌道遷移を実施</p> <p>Astra said that Airbus OneWeb Satellites will acquire an unspecified number of its Astra Spacecraft Engines, an electric propulsion system, for Arrow satellites. Astra did not disclose or answer questions about the number of thrusters ordered or the value or duration of the deal.</p> <p>Airbus OneWeb Satellites had previously used electric propulsion systems from Fakel, a Russian company, for the OneWeb satellites it produced. However, those thrusters are no longer available after Russia's invasion of Ukraine and subsequent sanctions.</p>	https://spacenews.com/astra-to-sell-electric-thrusters-to-airbus-oneweb-satellites/

3.5.1 衛星推進系の調査

3.5.1.5 電源系調査

電気推進のPPU

3.5.1 衛星推進系の調査

22-003-R-016

✓ 電気推進に関しては電源系の調査を推力比例する供給電力・電源効率・熱対策の配慮・最新のパワーデバイス/デジタル電源の適用有無・運用自動化のための方式を考慮して調査を実施

メーカー	概況	備考
Astra (米国)	<ul style="list-style-type: none">耐放射線性を向上させるとともに、単一基板を用いた設計を採用Astra社の宇宙機推進系は、1kW以下のキセノンまたはクリプトン電気推進システムで、LeoStella社の様々な衛星に搭載されることが期待されている。Astraは、放射線硬化型設計のPPU (Power Processing Unit) を持ち、多くのマイクロプロセッサをシンプルで信頼性の高い部品に置き換え、95%の効率を持つ単一回路基板設計を実現。	<p>https://astra.com/space-products/astra-spacecraft-engine/ https://www.cnn.co.jp/business/35183356.html</p>
TAS-B (ベルギー)	<ul style="list-style-type: none">PPU MK3 EVO Low Powerを新規開発中。MK3 EVOと同じパッケージながら不要な部品を取外し、1.5kW出力に調整するのみ。需要の少ない1.5kW級を極力ノリカを発生させないように開発することに主眼を置いたアプローチMK3 EVO LPが対応する流量制御器はサーモスロットルではなくプロポーションバルブをベースラインとし、オプションでサーモスロットルに対応可能大電力対応としてAnode電力は4.5kWを5.0kWへ増加、完全にITARフリー化させるため、ITAR部品はESA認定品へ変更Galileo衛星向け対応として耐放射線性を向上PPU for 7kW HETを開発中。これをベースにPPU MK4を開発していく。2024年に7kW級HETとの噛合わせ予定	TAS-Bへのヒアリングによる

3.5.2 日本の立ち位置分析

3.5.2.1 強み・弱み分析

3.5.2 衛星推進系の日本の強み・弱み

3.5.2.1 強み・弱み分析（内部要因）

22-003-R-016

- ✓ 前項までの調査をもとに、日本の衛星推進系に関して、実用化されているもの、開発中のものに分類し、基盤技術（スラスタ・電源・デバイス・システム的な技術・イノベーション）の評価を考慮し、強み弱みの分析を実施
- ✓ 世界的には電気推進が主流。一方、大型も小型（コンステレーション）もミッションや軌道・取扱い・寿命によって電気・化学・其他方式の良さを組み合わせが重要

	推進系	強み	弱み	備考
内部環境	グリーン推進	<ul style="list-style-type: none"> ・MHI社のスラスタは開発済みであり、軌道上実績あり ・IA社のスラスタは開発済み。低価格化への取組み、モジュール販売あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>海外と比べ、採用機会が少なく、軌道上実績が少ない</u> ・<u>他の推進システムと比べて寿命が短く、適用範囲が限定的</u> 	軌道上実績あり
	水を推進剤とする方式	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>水という安全、調達性に優れた推進剤の採用であり、環境に優しい</u> ・他の推進系システムと比べて安価 	<ul style="list-style-type: none"> ・他の推進系に比べて<u>採用機会が少なく、軌道上実績が少ない</u> 	開発中
	ホールスラスタシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・官民に研究者/有識者が多い ・海外調達実績もあり、関連する搭載性技術も保有 	<ul style="list-style-type: none"> ・海外勢に比べて開発が遅れている ・実績を積む機会が少なく、搭載機会も限定的 ・<u>使用する部品は海外調達が多い</u> 	開発中
	イオンエンジンシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・数mN級スラスタははやぶさでフライト実績あり ・25mN級スラスタはETS-8、Slatsでフライト実績あり ・官民に研究者/有識者が多い 	<ul style="list-style-type: none"> ・他の推進系に比べて高価 ・海外勢に比べて実績を積む機会が少なく、搭載機会も限定的 ・ETS-8、Slatsのイオンエンジンは製造困難な状況 	軌道上実績あり

3.5.2 衛星推進系の日本の強み・弱み

3.5.2.1 強み・弱み分析（外部要因）

22-003-R-016

	推進系	機会	脅威	備考
外部環境	グリーン推進	・環境志向の高まり（従来の化学推進系に比べて取扱いが容易）	・水を推進剤とする方式、1液化学推進系との競合 ・推進系の追加搭載による価格上昇	小型衛星向け
	水を推進剤とする方式	・環境志向の高まり（従来の化学推進系に比べて取扱いが容易、推進剤の入手性も良い）	・推進系の追加搭載による価格上昇	CubeSat向け
	ホールスラストシステム	・ペイロード搭載質量の増加により高性能な電気推進システムの採用増加 ・衛星側ΔV増加傾向もあり、電気推進システムの採用増加	・海外競合メーカーの高品質、低コスト化（露Fackel, 仏Safran, 米Astra他実績が豊富な海外競合が多数） ・希ガス（Xe）の入手性悪化	小型衛星～大型衛星向け
	イオンエンジンシステム	・ペイロード搭載質量の増加により高性能な電気推進システムの採用増加 ・衛星側ΔV増加傾向もあり、電気推進システムの採用増加	・低価格電気推進（ホールスラストシステム等）の台頭 ・希ガス（Xe）の入手性悪化	惑星探査、大型静止衛星

3.5.2 衛星推進系の日本の強み・弱み

3.5.2.1 強み・弱み分析 化学

22-003-R-016

衛星推進系（実用化済の技術）

基盤技術（1液推進/2液推進/低毒推進のシステム技術、スラスタ/推薬タンク等の技術・イノベーション）
の評価を考慮して、強み弱みを分析

外部環境

内部環境

	強み	弱み
機会	<ul style="list-style-type: none"> 2液推進スラスタは軌道上実績、海外販売実績あり 静止軌道でのオール電化衛星増加によるシェア縮小リスクがあるも、月周回の活動活発化により採用機会は増加傾向 デジタル化（3Dプリンタ化、MBDなど）を推進し、工期短縮、高品質、低コスト化を進化させる必要あり 	<ul style="list-style-type: none"> 推薬タンクは軽量化のため、LBBタンクの開発を実施（後発） 化学推進用推薬タンクは一定の需要が見込まれるが、海外競合が多数あり Ti材の入手性悪化に伴い、工期短縮が課題
脅威	<ul style="list-style-type: none"> 1液推進スラスタは軌道上実績、海外販売実績あるが、海外競合が多数あり 低毒性推進は開発済み。安全配慮もあり、低毒性燃料を求める方向であるが、寿命は他の推進系に比べ限定。実績は僅か。海外競合が多数あり 低軌道衛星での電気推進の採用増加によるシェア縮小リスクあり デジタル化（3Dプリンタ化、MBDなど）を推進し、工期短縮、高品質、低コスト化を進化させる必要あり 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料、酸化剤の一体型タンクは製造性に難あり。また、システムの簡素化につながることを考慮し、ニーズの掘り起こしが重要

<https://www.salesforce.com/jp/resources/articles/marketing/swot/>

		内部環境	
		強み	弱み
外部環境	機会	強み×機会 機会をとらえて強みを最大に活かす	弱み×機会 弱みによって機会を逃さない
	脅威	強み×脅威 脅威を回避するために強みを活かす	弱み×脅威 弱みと脅威による最悪の事態を回避する

3.5.2 衛星推進系の日本の強み・弱み

3.5.2.1 強み・弱み分析 電気

22-003-R-016

衛星推進系（開発中の技術）

基盤技術（ホール/イオン/水推進/エレクトロスプレーのスラスタ・電源・デバイス・システムの技術・イノベーション）の評価を考慮して、強み弱みを分析

内部環境

	強み	弱み
機会	<ul style="list-style-type: none"> 低推力イオンエンジンシステムは軌道上実績あり 惑星探査向けで採用 サブシステムレベルではデジタル化（3Dプリンタ化、MBDなど）を進めることで工期短縮、高品質、低コスト化を進化させる必要あり 	<ul style="list-style-type: none"> ホールスラスタシステムは大電力/低電力ともに開発中。大電力対応は価格、サイズに課題あり。大電力向けホールスラスタジンバルは開発中だが、価格に課題あり 海外でも低軌道～静止軌道～シスルナ領域向け衛星でのホールスラスタ利用は拡大 推薬の希ガス入手性悪化対応に課題あり 経済安全保障上のリスクもあり、スラスタ/電源は高度化を進め、コスト/サイズの改善を進めた上で、官需衛星での実績作りが重要 サブシステムレベルではデジタル化（3Dプリンタ化、MBDなど）を進めることで工期短縮、高品質、低コスト化を進化させる必要あり
脅威	<ul style="list-style-type: none"> 水推進システムは国産技術が先行するも超低推力であり、CubeSat向けが主 安全配慮もあり、無毒推進の方向性あり しかし、採用機会が限定的であり、ニーズの掘り起しが必要 	<ul style="list-style-type: none"> エレクトロスプレー推進は研究段階。超低推力であり、適用先はCubeSat向け ニーズの掘り起しが必要

外部環境

3.5.2 日本の立ち位置分析

3.5.2.2 推進系の日本にとってのキー技術

3.5.2 衛星推進系の日本の強み・弱み

3.5.2.2 推進系の日本にとってのキー技術

22-003-R-016

- ✓ 静止衛星・中型観測・小型コンステレーション等での衛星推進系で以下の重要な機器の設計、製造技術が重要
- ✓ 海外ではASAT対応として燃料消費を抑制する電気推進と機動性を上げるための化学推進の同時搭載ニーズあり。現在はハイブリッド推進で対応。将来的には単一システムで化学と電気のマルチモード推進化が必要
- ✓ サブシステムレベルではシミュレーション技術、製造/検査技術、試験技術は成熟。今後はデジタル化（3Dプリンタ化、MBDなど）を進めることで工期短縮、高品質、低コスト化を進化させる必要あり
- ✓ Ti材（タンク素材）、Xe、Heガス等希ガスの入手性悪化もあり、代替検討の必要あり

衛星	推進方式	キー技術	保有有無	備考
観測 (LEO)	1液推進	スラスタ	A	IA：4Nスラスタは海外販売実績あり
		推薬タンク	B	前頁の2液式タンク同様に技術を有する。ただし、 Tiの入手性悪化に対する代替品開発が必要
	低毒性推進（小型）	スラスタ	C	IA, MHIで開発実績あり
	水推進（超小型）	スラスタ	C	超小型衛星向けで開発実績あり
小型コンステ (LEO)	オール電化（小電力）	スラスタ	D	開発は可能。ただし、 小型軽量、低コスト化が重要

推進系企業

- A：輸出競争力あり
- B：国内実用衛星で採用
- C：フライト検証済み
- D：TRL6（フライト実績なし）

3.5.2 衛星推進系の日本の強み・弱み

3.5.2.2 推進系の日本にとってのキー技術

22-003-R-016

- ✓ シスルナ領域での活動増加、ASAT回避活動の増加に伴い、衛星搭載推薬量は増加すると思料。これに対応する技術として、燃料補給システムの動向は注目
- ✓ ΔV を効率的に稼ぐ電気推進（低推力/高燃費）、機動性を高める化学推進（大推力/低燃費）のニーズが拡大すると推測※

衛星	推進方式	キー技術	保有有無	備考
大型通信 (GEO)	オール電化 (大電力)	ホールスラスタ	D	開発中。 <u>軽量、低コスト化、クリプトン、アルゴンなど代替推薬対応が必要</u>
中型の測位/観測 (GEO)		電気推進電源 (高電圧電源)	D	開発中。 <u>小型軽量、低コスト化対応が必要</u>
		コールドガススラスタ	E	開発可能
		ジンバル	D	開発中。 <u>小型軽量、低コスト化対応が必要</u>
		電気推進用タンク	E	開発可能。 <u>Ti入手性悪化に対する代替検討が必要</u>
	2液推進※	タンク	B	IA : LBBタンク (×1.25耐圧) MHI : 燃料/酸化剤の一体型タンク Tiの入手性悪化に対する代替品検討が必要
		高圧ガスタンク	C	開発可能。サムテック (アルミライナーは海外品)。
		スラスタ	A	IA : N2H4/MONタイプは海外販売実績あり。 MHI、MMH/MON3タイプの10Nスラスタは開発を中断中。500NクラスはMMH、MONタイプ。

A : 輸出競争力あり
B : 国内実用衛星で採用
C : フライト検証済み
D : TRL6 (フライト実績なし)

※ 電気推進は比較的質量、コストが良いホールスラスタ、化学推進は燃費が良い2液式が拡大すると思料

推進系企業

衛星企業

3.5.3 新しい推進系に関する見解 (企業＋ASTECC)

強み弱み分析からの開発製造側の知見を加味した上での見解（企業＋ASTEC）
推進系は運用軌道への移動や軌道維持だけではなくコンステレーション変更・厳格化されるLEOのEOLでのReorbit(離脱)、軌道上サービスやシスルナ活動、重力天体への離着陸などで従来の成熟期を経て、先進的な開発が各所で進められ宇宙機競争力の源泉になっている。

1. 環境としては、シスルナ領域での活動増加に伴い、**衛星推進系の採用は増加、その中で電気推進系は小型コンステ、低・中軌道、静止軌道、シスルナ含め採用は拡大している状況**
2. 経済安全保障上、**電気推進系（スラスタ、電源、ジンバル）、化学推進系（スラスタ、タンク）のキーデバイスの競争力強化が必要。衛星システム的な競争力も衛星側はキー。**
3. 宇宙での活動領域の拡大により、**燃料の軌道上補給ニーズや軌道上作業と消費効率を同じスラスタまたは異なるスラスタで推進供給系は同一とする新しいデュアルモードエンジン等のニーズが高まると考えている。衛星側設計や開発で考慮すべき点なども検討が必要**
4. 競争力強化を進めるにあたり、**低価格、短工期による差別化が重要なファクタであり、デジタル化（3Dプリンタ、MBDなど）を早急に進め、より効率的な設計/製造/検査手法の見直し、再構築が重要**
5. 希ガスの入手性悪化、Ti材他希少金属の入手性悪化、ロシア情勢による輸入電気スラスタの代替、電気推進高圧電源の高騰は今後も継続すると思われ、**代替検討や国産化の加速が重要**

1. はじめに
2. 技術調査概要と目的
3. 3.1項 SDS/SDR/SDP (*software defined satellite/radio/payload*)
 - 3.2項 オンボード処理
 - 3.3項 運用の効率化
 - 3.4項 SWアーキテクチャ
 - 3.5項 衛星推進システム
- 4. 定常調査業務**
 - 4.1 定常調査・動向調査**
 - 4.2 適宜調査・事実確認**

下記シンポジウム・カンファレンスに参加し情報収集と分析を行い、結果に関して報告書を作成した。
次ページ以降に報告書を示す。

- Smallsat Conference
- International Astronautical Congress
- SATELLITE INNOVATION/MILSAT SYMPOSIUM
- Space Tech Expo Europe

令和4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」

**2022年 Smallsat Conference
@Utah大学**

参加報告書

(財)衛星システム技術推進機構

Advanced Satellite Systems Technology Center

1. 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDPの調査)」 最新公開情報及びSmallSat.Conferenceでのヒアリング

22-003-R-016

SmallSatでの議論、および[Software Defined Satellite](#)に関するWebページから整理、分析を行った。

SDS (Software Defined Satellite)

【通信衛星 GEO/MEOでのSDS】

- 通常はハードウェアで実現されていた機能を、ソフトウェアで実行できるようにした衛星のこと。**GEO HTSで最も言及されている**。GEOではSDR = SDP = SDSという印象。
- ミッションの機能がハードウェア（ペイロード計算機）内部でデジタル化されており、ソフトウェアにより再構成可能な仕組みになっていること。
- 詳しくは、GEO/MEOでは軌道上設計寿命が長いいため、SDS（フレキシブルペイロードを指したり、フルデジタルペイロードを指したりするが、共通的に全通信帯域をデジタル化（A/D変換）して制御できること）により、**15年におけるビーム配置・各チャンネルの帯域・ビーム間接続等をソフトウェアで再構成できる。復調はしない。**

【通信衛星 LEOコンステレーションでのSDS】

- LEOでも最近Starlinkの記事のようにSDSによりジャミングを受けた場合に2週間で衛星にSWをLoadして対処とある。**詳細は不明なるも**想像では、ジャミングは衛星送信系へではなくユーザーミナル受信系へが一般的（容易）なので、衛星側送信機とユーザー端末受信機の変復調方式変更（多値偏重からスペクトラム拡散等へ）やジャミング周波数に受信機がロックしないように周波数ホッピングに変更したりして抗堪性を向上させたと考えている（あくまで想定）。この場合、1)もし衛星側変調方式を変えれるとしたら、あらかじめDual Modeの送信機にしているか、2)変調機能自体が地上MODEMのようにSWなので、このSWを変更したということになり、この**2)の場合はSDS(SDR)となる。前者の場合は例えばALOS-2シリーズ以降マルチモード変調器***になっておりコマンドで変更が可能であるがこの場合はFPGAに書き込んであり、あくまでモード選択だけである。この例のように2)の場合は軌道上でSDRにより対処ができた例となる。

* <https://www.giho.mitsubishielectric.co.jp/giho/pdf/2014/1402107.pdf>

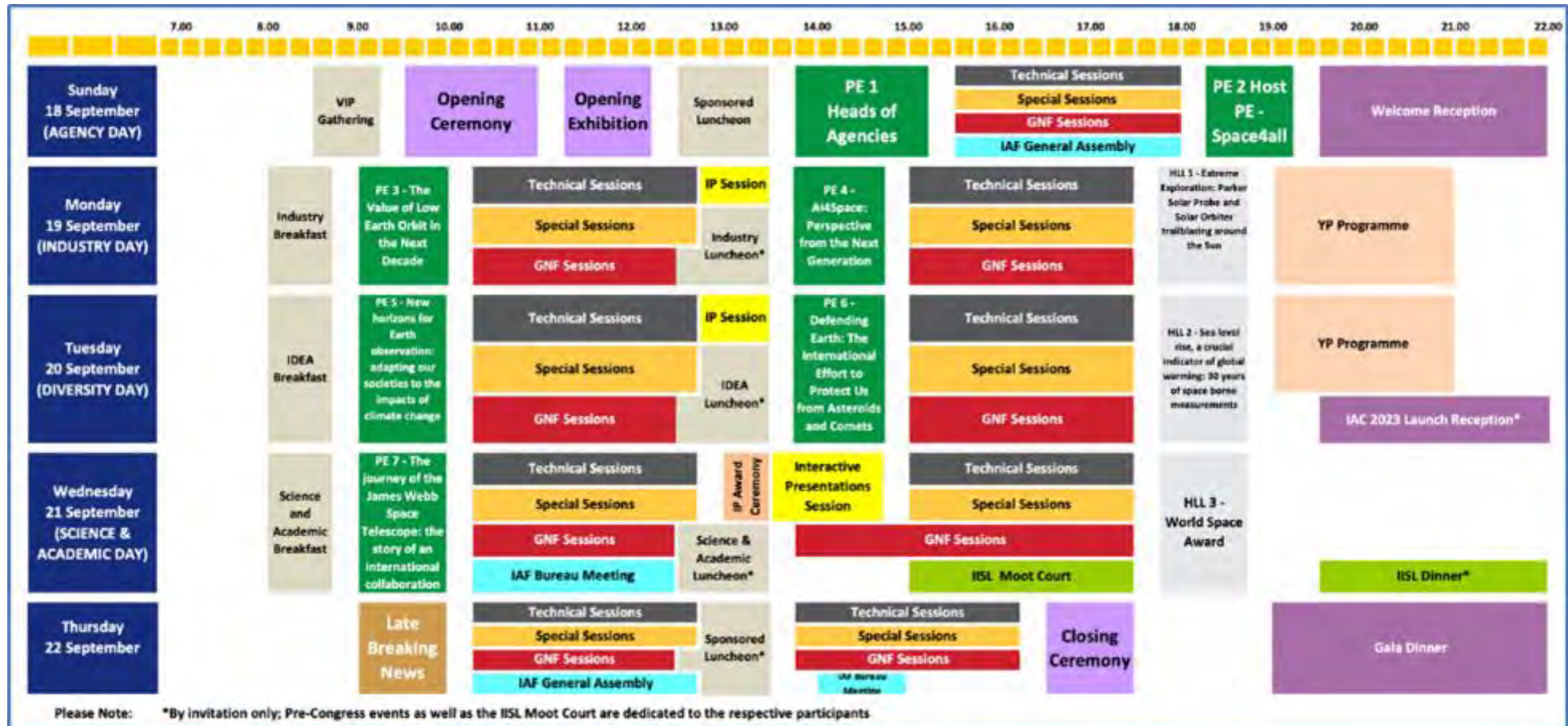
令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業
「将来衛星システムにかかる技術調査」

73rd International Astronautical Congress

参加報告書

(財)衛星システム技術推進機構

Advanced Satellite Systems Technology Center



発表内容は8セッションであったが、対象は主に、①高速通信システム、②シスルナ以遠測位／通信、③GNSS／PNT、④光通信、⑤QKD、⑥IoT、⑦搭載機器や開発手法に分類され、以降の資料にカテゴリズを整理した。以下トップサマリ。

- ①高速通信システムでは、ESAからTASへ委託されたLEOコンステレーションによるTrunkingサービスの収益検討やシステム検討がSymphonieを意識したものとして注目された。よくできている。このくらいASTECできるといいのではと思った。
- MITがSESの協力・委託を受けてMEO mPowerのマルチビーム制御を、時々刻々のトラフィックをAIで学習しながらGateWayと衛星デジタルペイロードの設定とリソースマネジメントを最適化するツールを開発しており、実務に近い検討がされていた。素晴らしい。
- EuroconsultのレポートでもKythera社のKOSが衛星と地上に実装されており同じテーマでつながっている可能性がある(SES・Boeing⇒MIT)。KytheraもMITも欧州IPではないところが少し気になる。
- シスルナ以遠の測位・通信・インターネット等の中期的な発表も多かった。
- IoTは少なかったが中国Head Aerospace(北京)が精力的な事業状況を紹介、納得される内容であった。
- 光はTESAT、DLR、OHB、NICT、他大学等常連が多かった。TESATのLEOLEO用端末のシェアは高い。
- QKDの講演が9件と多く、この点は日本と大きく違うところ。うち企業もTAS 1件、OHB 2件、TESAT 1件と多く、EU委員会とESAの方針や実証計画(Eagle-1)に沿っており、ここでも日本よりかなり先行している。末尾に9講演の要旨を整理。

令和4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」

“Satellite Innovation” 参加報告書
2022年11月14日



(財)衛星システム技術推進機構
Advanced Satellite Systems Technology Center

Satellite Innovationはシリコンバレースペースウィークというイベント名でシリコンバレーシリコンバレーコンピュータ歴史博物館（サンゼ市で2022年10月11日、12日に開催された。

- 800人以上の各機関、各企業のトップマネジメント・技術役員等が参加し、各sessionでこれらトップ5～6名が45分間各テーマで座談会形式で議論を行うPanel Discussion方式と、15分～30分の枠でテクニカルな講演を1名が行うテクニカルセッションからなっている。
- 今回は120人以上の講演者があり、また出展ブースも75以上あった。
- 但しこれら各企業の**展示ブースや参加人数はSmallSatや欧州のIACに比較して格段に小規模**であり、この会議の特徴は**米国を中心とした各機関や企業のトップマネジメントが、自ら事業や市場、及びそれに密接に関わる技術を語る**ところにある。そのBiographyを見るだけで米国宇宙業界のダイナミズムが垣間見れる。
- 但し従来のJPLの歴史やNASAの歴史を語るセッションも数は少ないが存在。
- Satellite Innovationは、**衛星市場、通信5G機能のNTNへの進展、宇宙事業とクラウドシステム、観測事業におけるデータサービスの価値と変容、AIやMLの観測サービスへの適用状況、軌道上組立や製造、宇宙状態監視システムの今、レジリエントなPNTサービスとは、スマートフォンドイレクト通信**等、宇宙業界や研究機関であれば必ず関心を持つテーマを中心に24のsessionがシーケンシャルに一つの会場（約500人程度の収容）で行われる点に特徴がある。IAC等に比較すると際めてコンパクトな会議であるが、テーマは厳選されており、少なくともアジェンダを見ても事前に期待が持てる内容であった。中には予想外のものもあるが、この中で打上事業とJPL歴史の2件を除く、**全sessionの概要と分析を添付する。**

令和4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」

“MILSAT SYMPOSIUM 2022 参加報告書”

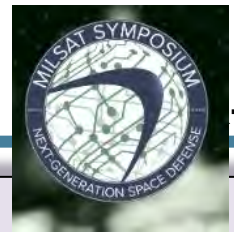
**hold in Silicon Valley
2022年12月15日**



(財)衛星システム技術推進機構

Advanced Satellite Systems Technology Center

概要編



-016

Milsat Symposiumはシリコンバレースペースウィークというイベント名でシリコンバレーシリコンバレーコンピューター歴史博物館（サンゼ市で2022年10月13日、14日に開催された。

- 800 人以上の各機関、各企業のトップマネジメント・技術役員等が参加し、各sessionでこれらトップ5～6名が45分間各テーマで座談会形式で議論を行うPanel Discussion方式と、15分～30分の枠でテクニカルな講演を1名が行うテクニカルセッションからなっている。
- 今回は120人以上の講演者があり、また出展ブースも75以上あった。
- 但しこれら各企業の**展示ブースや参加人数はSmallSatや欧州のIACに比較して格段に小規模**であり、この会議の特徴は**米国を中心とした各機関や企業のトップマネジメントが、自ら事業や市場、及びそれに密接に関わる技術を語る**ところにある。そのBiographyを見るだけで米国宇宙業界のダイナミズムが垣間見れる。
- 但し従来のJPLの歴史やNASAの歴史を語るセッションも数は少ないが存在。
- Satellite Innovationは、**衛星市場、通信5G機能のNTNへの進展、宇宙事業とクラウドシステム、観測事業におけるデータサービスの価値と変容、AIやMLの観測サービスへの適用状況、軌道上組立や製造、宇宙状態監視システムの今、レジリエントなPNTサービスとは、スマートフォーンダイレクト通信**等、宇宙業界や研究機関であれば必ず関心を持つテーマを中心に24のsessionがシーケンシャルに一つの会場（約500人程度の収容）で行われる点に特徴がある。IAC等に比較すると際めてコンパクトな会議であるが、テーマは厳選されており、少なくともアジェンダを見ても事前に期待が持てる内容であった。中には予想外のものもあるが、この中で打上事業とJPL歴史の2件を除く、**全sessionの概要と分析を添付する。**

将来衛星システムにかかる技術調査

Space Tech Expo Europe 調査概要

1. 概要
 2. カンファレンス トピックス
 3. 展示会場 トピックス
- 一般財団法人衛星システム技術推進機構
 - **Advanced Satellite Systems Technology Center
(ASTEC)**

1. 概要

22-003-R-016

Space Tech Expo Europe

- 会期: 2022年11月15日(火)～17日(木)
会場: ドイツ ブレーメン市 (市として宇宙産業を支援)
- 宇宙関連展示会としてヨーロッパ最大規模
- 展示会とカンファレンスを併催
 - ①Industry, ②Smallsats, ③Mobility Connectivity
- 出席者5,000人以上、参加企業500社規模

カンファレンスからの重要項目 (カンファレンスのアジェンダは下記にあり
<https://www.spacetecheurope.com/conference/conference-agenda>)

- (1) ESAキーノートスピーチ
 - 商業化加速を援助
 - 通信分野に16億ユーロを投資
 - 部品における主権確保を方針に盛り込む
- (2) ディスカッション・講演から
 - スタートアップ企業ではエコシステム形成の仕方が重要 (フィンランド ICEYE社)
 - 5Gの最新仕様がリリースされたので、対応した衛星IoTシステムを2023年に市場投入する (スペイン Sateliot社)
 - SDS衛星実用化に伴って、地上系システムもAI/MLを駆使したシステム構築が必須。(スペイン GMV社)



展示会場からのトピックス

- (1) 小型衛星関連の展示多数
- (2) XaaSやAI/ML分野の展示も増加
- (3) UibapのMPUの熱設計方針(シャーシが厚いのは耐放射線対策でなく放熱のため)
- (4) 日本からの出品者
 - ① Astroscale (ブース展示のほかカンファレンスでの技術発表あり)
 - ② Pale Blue
 - ③ Yamaguchi Aerospace Cluster

4.2 適宜調査・事実確認

22-003-R-016

文科省殿からのご指定に基づき、下記に示す適宜調査、事実確認を実施した。

ID	事実確認（A4で1枚以内）を最大24件程度	
A1/A7	・【事実確認（システム※ご相談）】国内外の宇宙関係企業一覧（レガシーも含む）	事実確認・適時調査 その1
A2/A8	・【事実確認（システム※ご相談）】国内外の宇宙関係スタートアップ企業一覧（輸送、衛星問わず全体）	事実確認・適時調査 その1
A3/A9	・【事実確認（システム※ご相談）】国内外の宇宙関係スタートアップ企業の推移（輸送、衛星問わず全体。企業数・売上を含む国別比較。）（バックデータとしてのExcel含む。）	事実確認・適時調査 その1
A4/A10	・【事実確認（システム）】国内外の軌道上サービス（広義）を行っている、または行おうとしている企業一覧。	事実確認・適時調査 その1
A5	・【事実確認（システム）】別添のデブリ関係資料の要約と、どのような技術が必要とされているかの整理（図の形式）	事実確認・適時調査 その1
A6	・【事実確認（システム）】世界の軌道上サービス市場について。（以下URLの要約）	事実確認・適時調査 その1
—	・【事実確認】電気推進と化学推進	事実確認・適時調査 その3
—	・【事実確認】大型・中型・小型の各衛星サイズにおける衛星システムから見た、メリットデメリット	事実確認
	適時調査（A4で5～10枚程度）を6件程度	
B1/B2	適時調査：1件 ・【適時調査（システム）】3D Printerによる成型技術動向について。 （企業一覧で軌道上サービスに関心ある者や事業計画がある者に印。航空宇宙における3Dプリンティングの活用について、国際的には先端動向を引っ張っているか。どの分野に活用することが有益か。）	事実確認・適時調査 その1

令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業

衛星システムにかかる技術調査

「事実確認・適時調査 その1」

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

2022年9月8日

ID	事実確認（A 4で1枚以内）を最大24件程度
A1	・【事実確認（システム※ご相談）】国内外の宇宙関係企業一覧（レガシーも含む）
A2	・【事実確認（システム※ご相談）】国内外の宇宙関係スタートアップ企業一覧（輸送、衛星問わず全体）
A3	・【事実確認（システム※ご相談）】国内外の宇宙関係スタートアップ企業の推移（輸送、衛星問わず全体。企業数・売上を含む国別比較。）（バックデータとしてのExcel含む。）
A4	・【事実確認（システム）】国内外の軌道上サービス（広義）を行っている、または行おうとしている企業一覧。
A5	・【事実確認（システム）】別添のデブリ関係資料の要約と、どのような技術が必要とされているかの整理（図の形式）
A6	・【事実確認（システム）】世界の軌道上サービス市場について。（以下URLの要約）
	適時調査（A4で5～10枚程度）を6件程度
B1	適時調査：1件 ・【適時調査（システム）】3D Printerによる成型技術動向について。 （企業一覧で軌道上サービスに関心ある者や事業計画がある者に印。航空宇宙における3Dプリンティングの活用について、国際的には先端動向を引っ張っているか。どの分野に活用することが有益か。）

国内外の宇宙関連企業一覧は、インターネットのWebサイト上等に存在していることを確認した。確認した企業一覧の例を以下に示す。

【国内】

日本航空宇宙工業会(SJAC)が宇宙関連企業として認識している企業として、以下の資料の20ページ目にまとめられている。

https://www.sjac.or.jp/pdf/data/5_R3_uchu.pdf

法人営業での企業情報取得や営業リスト作成を目的としたサイトで、宇宙開発業界で検索される企業一覧。

<https://baseconnect.in/companies/category/60cbd236-7f72-4366-aa1f-617b9a0d4ff7>

宙畑が昨年末にインタビューを実施した国内の宇宙関連企業50社。

<https://sorabatake.jp/24766/>

つづき

【海外】

Wikipedia上にList of spacecraft manufacturersとして、衛星・輸送機・探査機や搭載機器の製造業者のリストがまとめられている。

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_spacecraft_manufacturers

Wikipedia上に記載されている宇宙関連企業に対するリンク集も存在している。

<https://martinwilson.me/space-brands-wikipedia/>

宇宙関連業務を志す人材に向けた欧州の宇宙関係企業のリスト。

<https://spaceindividuals.com/space-companies>

Spacepolicyonline社がまとめた米国の宇宙関連企業（記事の後半にまとめられている）。

<https://spacepolicyonline.com/topics/commercial-space-activities/#us-aerospace-companies>

【事実確認:A2】国内外の宇宙関係スタートアップ企業一覧 (輸送、衛星問わず全体)

22-003-R-016

国内外の宇宙関係スタートアップ企業一覧は、インターネットのWebサイト上等に存在していることを確認した。確認した企業一覧の例を以下に示す。

【国内】

転職者向けの情報提供サイトとして、宇宙関連で注目されるスタートアップ企業(ベンチャー企業一覧)40社がまとめられている。

<https://www.axc.ne.jp/media/careertips/spacecompany>

【海外】

宇宙関係スタートアップ企業の情報発信サイトSpace Banditに、宇宙関連スタートアップ企業の一覧が示されている。

<https://www.spacebandits.io/startups>

宇宙ベンチャー向け投資会社(Seraphim)がまとめた、宇宙関連スタートアップ企業のエコシステムマップ。

<https://passle-net.s3.amazonaws.com/Passle/5a0979fd3d94761aac861246/MediaLibrary/Document/2021-03-10-18-43-35-477-SeraphimCapitalEcosystemMap2021.pdf>

【事実確認:A1⇒A7追加確認】 主な宇宙関連レガシー企業一覧

22-003-R-016

三菱重工
IHI
ULA
arianespace
 arianeGROUP
中国长城工业集团有限公司
 China Great Wall Industry Corporation
ILS

SKY Perfect JSAT Group
JSI
PASCO
 Surveying the Earth to Create the Future
RESTEC

MITSUBISHI ELECTRIC
NEC
三菱重工
MEISEI
三菱プレジジョン株式会社
 MITSUBISHI PRECISION CO., LTD.
Kawasaki
IHI
BOEING
AIRBUS
LOCKHEED MARTIN
ThalesAlenia Space
NORTHROP GRUMMAN
OHB
Ball
SURREY
L3HARRIS™
TELESPAZIO
 a LEONARDO and THALES company
Raytheon Technologies
TESAT
AEROJET
ROCKETDYNE

INTELSAT.
inmarsat
SES[^]
TELESAT.
dish
eUTELSAT
DIRECTV
Globalstar
iridium
MAXAR
aws
Azure

国内 / 海外
 輸送 / 製造 / 運用・サービス

【事実確認:A2⇒A8追加確認】主な宇宙関連スタートアップ企業一覧

22-003-R-016

Interstellar Technologies
 Blue Origin
 Rocket Lab
 Space One
 Space Walker
 Astra
 Relativity
 SNC Sierra Nevada Corporation
 Virgin Orbit

Infostellar
 Tenchijin
 Space Shift
 Space BD
 JEOS Japan EO-Sats Service

Astroscale
 AXELSPACE
 Synspec
 i space
 IQPS
 WARPSPACE
 Pale Blue
 ALE Co., Ltd.
 planet.
 Capella Space
 ICEYE
 SPIRE
 HawkEye 360
 DAURIA AEROSPACE
 BLUE CANYON TECHNOLOGIES

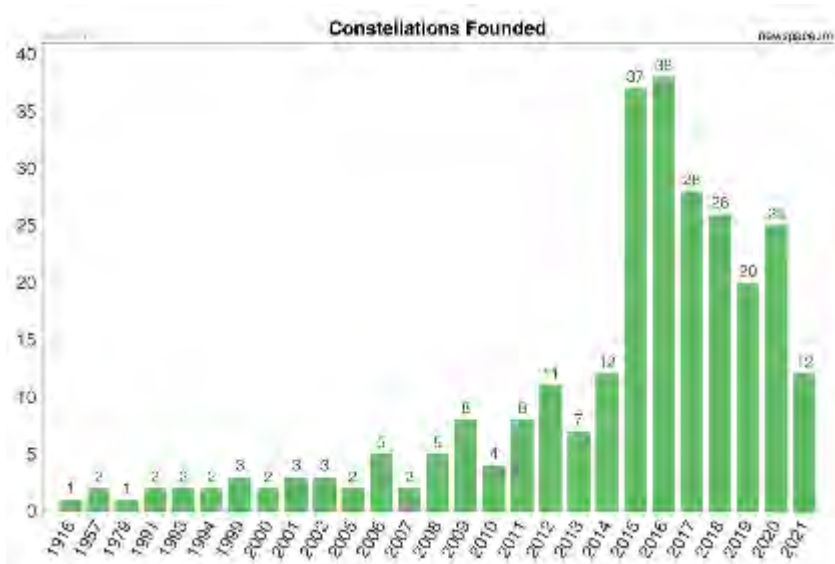
OneWeb
 SpaceX STARLINK
 Orbital Insight
 URSA SPACE
 GeoOptics
 PLANETIQ
 LEO LABS
 SLINGSHOT AEROSPACE

国内 / 海外
 輸送 / 製造 / 運用・サービス

国内外の宇宙関係スタートアップ企業一覧の推移として、小型衛星コンステレーションに焦点を当てた情報がインターネットのWebサイト上等に存在していることを確認した。
確認した情報の例を以下に示す。

<衛星>

コンステレーションシステム数(≒企業数)と国別分布を例として示す。下記以外にもNewSpace Index(<https://www.newspace.im/>)に多数の統計情報があることを確認した。



コンステレーションシステム数の推移



コンステレーションシステム関連企業の国別分布

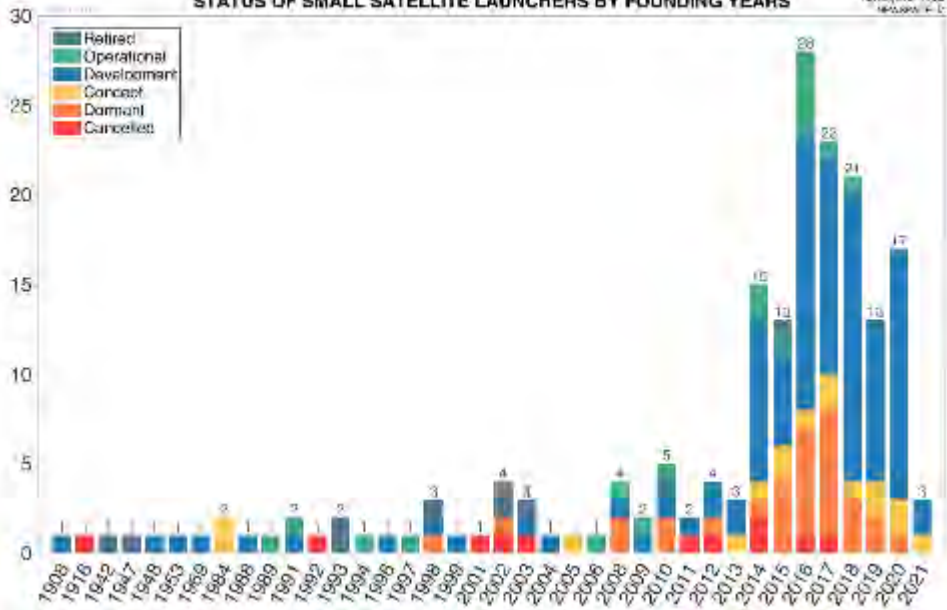
(続き)

小型衛星ランチャー企業に焦点を当てた情報がインターネットのWebサイト上等に存在していることを確認した。確認した情報の例を以下に示す。

<輸送>

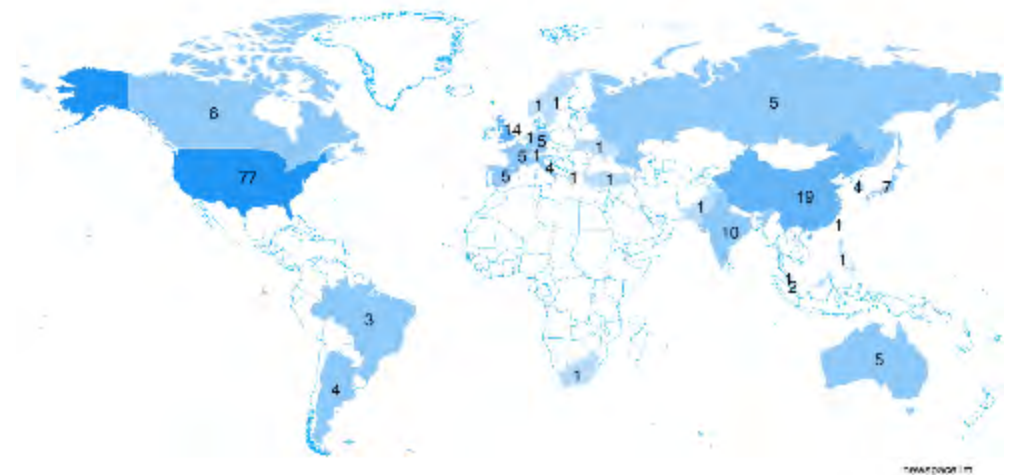
小型衛星ランチャーのステータス推移と国別分布を例として示す。下記以外にもNewSpace Index(<https://www.newspace.im/launchers>)に多数の統計情報があることを確認した。

STATUS OF SMALL SATELLITE LAUNCHERS BY FOUNDING YEARS



● 小型衛星ランチャーのステータス推移

Small Launchers Headquarters Map



● 小型衛星ランチャー関連企業の国別分布

【事実確認:A3】国内外の宇宙関係スタートアップ企業の推移 (輸送、衛星問わず全体。企業数・売上を含む国別比較。)

22-003-R-016

(続き)

宇宙関係スタートアップ企業に投資しているファウンドの情報インターネットのWebサイト上等に存在していることを確認した。確認した情報の例を以下に示す。

・投資ファンドの情報

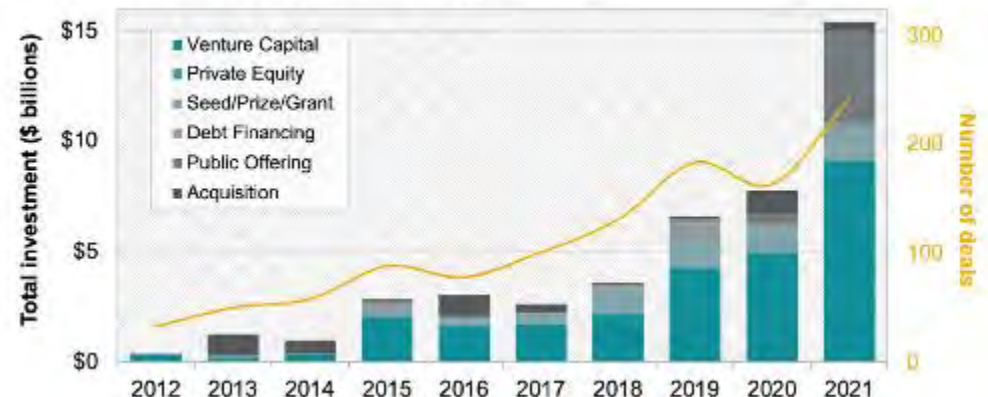
参照先(NewSpace Index) : <https://www.newspace.im/funding>

<例>

Organization	Type	Level	Description	Selected Portfolio
7point Ventures	VC	Pre-seed, Seed	We invest in early stage tech startups which represent billion dollar opportunities.	Moglix
11.2 Capital	VC	Pre-seed, Seed	We invest in founders solving the biggest challenges facing our world.	Orbital Stakekit
360 Capital	VC	Pre-seed, Seed, Series A, Later stage	Passionate & engaging with entrepreneurs and the leading enterprises of tomorrow. We are an Early Stage European VC, investing from Pre-Seed to Series D.	Usherlab, Heral
500 Startups	Acceleration, VC	Pre-seed, Seed, Series A	We uplift founders and entrepreneurs around the world through entrepreneurship.	Gilbour Space

<例>

Investment in Start-Up Space Companies
2012 to 2021, by Investment Type



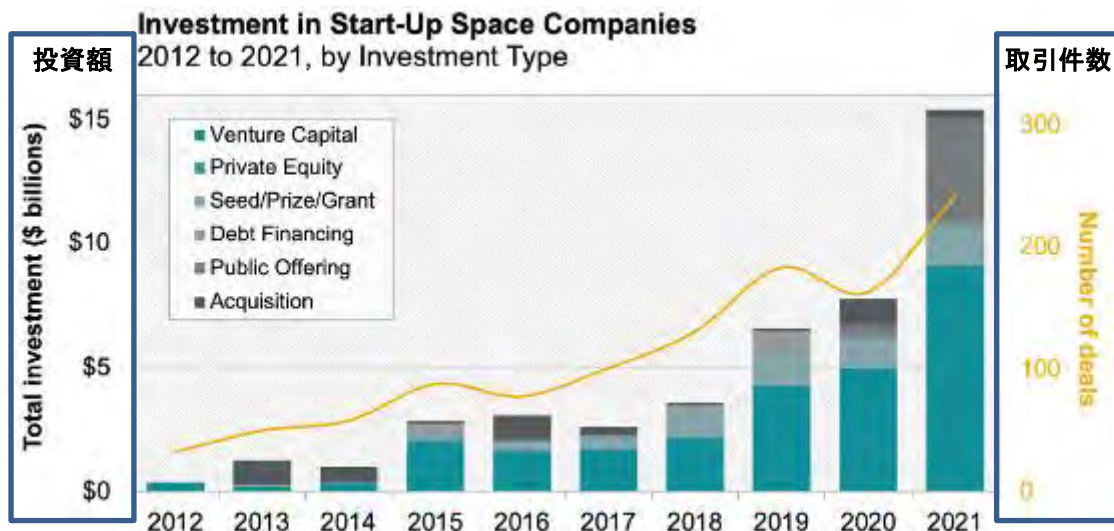
・投資の傾向

参照先(Start-Up Space/Bryce Tech)
: https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2022.pdf

➤ 2020年の比較

世界的には**200件近い**取引が成立しているが国内ではわずか**8件**
 金額面でもおよそ**8 Bドル(≒1.1兆円)**に対し、国内は**105億円(約1%)**

政府系の長期的なアンカーテナント有無も投資環境へ作用していると推察 **資金調達状況**



世界のスタートアップ(宇宙関連)資金調達状況*1

国内のスタートアップ(宇宙関連)投資状況*2

出典

(*1) Start-Up Space/Bryce Tech
https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2022.pdf

(*2) 宇宙ビジネスのトレンド
<https://note.com/strive/n/n21bb0760e191>

Source: SPACETIDE COMPASS Vol.4より作成

【事実確認:A4⇒A10追加確認】【事実確認:A4】国内外の軌道上サービスを行っている、または行おうとしている企業一覧。

22-003-R-016

国内外の軌道上サービス展開している企業

Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations (CONFERS)に参加している会社をリストアップする。

CONFERSとは

- 米国防高等研究計画局(DARPA)の初期シード資金をベースとした業界主導の団体
- 軌道上サービス(OOS: On-Orbit Servicing)、ランデブー及び近接運用(RPO: Rendezvous and Proximity Operations)について、拘束力を有さず、コンセンサスに基づく技術と運用標準として、政府と業界のベストプラクティスを研究、開発、公開することを目的とする団体
- CONFERSのメンバーは米国、欧州及び日本の民間主体。政府機関はオブザーバーとして会議に参加可能。

Web Site <https://www.satelliteconfers.org>

企業名	会社規模	国	事業内容	計画されている軌道上サービス	実施年	備考
Airbus	大	仏	衛星開発、寿命延長、軌道遷移、ロボティクス、宇宙状況認識、デブリ除去	O.CUBED SERVICES 寿命延長、アップグレード、検査等総合的なサービス	不明	
Astroscale	SU	日	寿命延長、軌道遷移、ロボティクス、宇宙状況認識、デブリ除去	ELSA-d (デブリ除去実証) LEX(寿命延長、軌道遷移)	2021年 2020年代後半	
Ball Aerospace	大	米	衛星開発及び衛星関連技術(自立運用、GNC、燃料補給等)開発	Orbital Express(軌道上での燃料移送プログラム)参加	2007年	
ClearSpace	SU	瑞	デブリ除去	ClearSpace-1 デブリ除去	2025年	
ExoAnalytic Solutions, Inc.	大	米	宇宙状況データ		サービス提供中	
iBOSS GmbH	SU	独	ロボティクス	iSSI® (intelligent Space System Interface) 標準モジュール化されたブロックで衛星を製造する	不明	
Kurs Orbital	SU	伊	近接運用/ドッキングシステム開発製造		サービス提供中	

続く

【事実確認:A4⇒A10追加確認】【事実確認:A4】国内外の軌道上サービスを行っている、または行おうとしている企業一覧。

22-003-R-016

企業名	会社規模	国	事業内容	計画されている軌道上サービス	実施年	備考
L3HARRIS	大	米	民間、防衛向け衛星運用システム等	SDA Tracking Layer Tranche-0 及び Tranche-1に参加	Tranche-0 2023 Tranche-1 2025 (打ち上げ予定)	
MDA	大	加	ロボティクス開発	OSAM-1に於けるロボットアーム	2022年以降	
MAXAR Technologies	大	米	衛星開発、燃料補給、組み立て製造、ロボティクス、観測画像提供、	OSAM-1 静止軌道で燃料補給と組立製造を実施	2022年以降	
REDWIRE	SU	米	太陽光発電、3Dプリント		製品供給中	
SPACE LOGISTICS	大	米	衛星開発、燃料補給、組み立て製造、ロボティクス、	MEV-1/-2 ドッキングによる寿命延長サービス	2019年より継続中	
TURION SPACE	SU	米	宇宙状況データ販売、軌道遷移、デブリ除去	DROID 衛星観測サービス	2023年	
VOYAGER SPACE	SU	米	打ち上げ、運行管理サービス、機器開発		サービス提供中	
ATOMOS NUCLEAR AND SPACE	SU	米	原子力を使った推進系機器の製造。タグによる軌道遷移サービス		2023年	
Champaign-Urbana Aerospace	小	米	推進系機器開発		製品供給中	
DAWN AEROSPACE	SU	新	推進系機器開発		製品供給中	
GITAI	SU	日	ロボティクス開発	宇宙領域の作業を安価・安全に遂行可能な宇宙用汎用作業ロボットの開発	2030年までに完了	
IHI AEROSPACE	大	日	推進系機器開発		製品供給中	

【事実確認:A4⇒A10追加確認】【事実確認:A4】国内外の軌道上サービスを行っている、または行おうとしている企業一覧。

22-003-R-016

企業名	会社規模	国	事業内容	計画されている軌道上サービス	実施年	備考
LIFT ME OFF	SU	英	推進系機器開発		製品供給中	
LOCKHEED MARTIN	大	米	衛星開発、運行システム開発	In-space Upgrade Satellite System (LINUSS) 汎用的な小型衛星	2021年予定	
MONENTUS	SU	米	打ち上げ時の軌道遷移	軌道遷移タグ ARDORIDE、VIGORIDE、FERVORIDE	2023年	
Motiv Space Systems	SU	米	ロボティクス開発	OSAM-1に於けるロボットアーム供給	2022年以降	
NovaWurks	SU	米	小型衛星開発	'Hyper-Integrated Satlet' (HISat™)	開発済	
Obruta Space Solutions	SU	米	衛星制御機器開発	Rendezvous, Proximity Operations, and Docking (RPOD) Kit	製品供給中	
OCEANEERING	大	米	ロボティクス開発		製品供給中	
ONE WEB	SU	英	通信衛星運航		サービス提供中	
ORBIT FAB	SU	米	軌道上給油、標準給油バルブ開発	軌道上での給油サービス	2025年	
PARABILIS	SU	米	推進系機器開発		製品供給中	
PROTEAN INDUSTRIES	小	米	ロボティクス開発		製品供給中	
SCOUT	SU	米	ロボティクス開発、オンボード宇宙監視機器開発	OVER Sat 宇宙状況監視衛星	2023年	
SPACELINK Corporation	大	米	衛星間通信サービス		サービス提供中	

【事実確認:A4⇒A10追加確認】【事実確認:A4】国内外の軌道上サービスを行っている、または行おうとしている企業一覧。

22-003-R-016

企業名	会社規模	国	事業内容	計画されている軌道上サービス	実施年	備考
STARFISH	SU	米	寿命延長サービス、デブリ除去、		不明	
TETHERS UNLIMITED	中	米	通信系、推進系機器開発		製品供給中	
THALES ALENIA SPACE	大	仏	衛星関連機器開発		製品供給中	
KALL MORRIS INC	SU	米	デブリ観測、デブリ除去		不明	

NATIONAL ORBITAL DEBRIS IMPLEMENTATION PLANの概要

宇宙ゴミ
スペースデブリ
SPACE JUNK



軌道上のビジネスを展開しようとする、投資しようとする関係者に不確実性とリスクをもたらすもの

- 人間が作った機能しない物体(その破片や要素を含む)と定義
- 低軌道(LEO)上では平均秒速10kmという驚異的な速度で移動
- 動きを制御することができず、軌道上の宇宙機に衝突する危険がある

今まで以上の速さで宇宙機が打ち上げられる昨今、軌道の過密化とデブリが起こす問題が喫緊の課題

OSTP(The Office of Science and Technology Policy)はIWG(Interagency Working Group)の審議の結果やステークホルダー・コミュニティからの意見を考慮し、National Orbital Debris Research and Development Plan (Published 2021)の一部となる軌道上デブリの課題に対処する*Implementation Plan* (包括的な実施計画)を3つの柱をもとに策定した
(次ページにて要約)

デブリに対する米国機関の役割

NASA

- レーダー、望遠鏡での監視
- ODMS(US Government Orbital Debris Mitigation Standard Practices, デブリ軽減手順)の開発主導

The Department of Defense (DOD)

- 宇宙物体のデータ収集、追跡、衝突可能性の通知(The Department of Commerce へ移管中)

The Federal Aviation Administration (FAA)/ Federal Communication Commission (FCC)

- デブリ生成や蓄積を制限する政策や規制の策定

NATIONAL ORBITAL DEBRIS IMPLEMENTATION PLAN の実行内容

1. デブリの低減

- 設計を改良しデブリの低減を図る
 - 提案されたソリューションの評価と推奨
 - デブリ生成過程の調査とソリューションを開発
 - 現状の対策の評価
 - ソフトや自動化を使い衝突防止を図る調査
- 最良の事例、ガイドラインの共有、ウェブサイトの活用
 - 宇宙運用コミュニティにデブリ低減のベストプラクティスを広める
 - 安全目的の為に事故や故障などのデータを共有するフレームワークを作りベストプラクティスに活かす
 - 軌道離脱ガイドラインの見直しの検討と、インパクトの調査
- 過密リスクアセスメントと衝突防止技術の向上
 - 安全の最優先化、ライセンス付与の適正化
- 宇宙機表面の遮蔽性、耐衝撃性、総合的な防御力の向上
 - 技術開発の効果の調査と開発を促進
- 追跡、マヌーバ、デブリ化低減に係る後付け機材の開発
 - 自動廃棄システムやADR、地球へのダメージを減らす制御突入などの研究
 - デブリ低減に寄与するデバイスの開発

2. デブリの追跡と特性評価

- 宇宙環境予測
 - 経験的待機密度モデルの改良、他機関との協力
- 対象物の特性評価、追跡
 - 過密性評価と衝突回避に関する改善点を特定
 - 低軌道にある1cm以下のデブリの特性評価を向上
 - 現システムの有効利用とセンサー処理の向上
 - 軌道上デブリの特性評価モデルの向上
- 過密性のアセスメント
 - 過密性のアセスメントと衝突防止についての向上を図る
- 研究から運用へ
 - デブリの追跡や特性評価を研究から運用能力へ、または将来のミッションを守るために活用する調査

3. デブリの処理

- コストとリスク
 - 軌道上デブリがもたらすリスクの分析
 - デブリ対策や必要な技術開発に必要な費用の見積りや効果の調査
 - リスクを測定するための共通の指標を開発
- デブリ除去技術の開発
 - 投資すべきデブリ除去技術を見据えた包括的な調査
 - 捕獲や軌道の移動に係る標準の開発と評価
- 政策、規則、協力
 - 既存在デブリ除去(ADR)サービスが廃棄順守率の要求を満たすことができるかを判断するプロセスを開発する。標準の評価も含む。
 - 軌道上デブリの浄化に関する国際的な問題の検討を進める

軌道上サービスに必要な技術

- IDAのGlobal Trends in On Orbit Servicing, Assembly and Manufacturing(表1) より軌道上サービスと特にデブリ除去に必要な技術を抽出
- 衛星の打ち上げからデブリの捕獲と軌道離脱までのシーケンスを表2に示す。

軌道上サービスに必要な技術

- 安全に近づく技術
- RPO技術(近接近傍運用技術)
- 推進系技術、GNC(Guidance, navigation, and control)、自立運用の複合的な要素

デブリ除去に必要な技術

- ドッキング、捕獲する技術
- コンピュータービジョン、ロボットアームなどのロボティクス技術
- ドッキングプレート、認識マーカー等、作業を容易にする標準化

表2 商業デブリ除去実証(CRD2)に於けるデブリ除去までのシーケンス



標準化への取り組み例

アストロスケール社 ドッキングプレート
打ち上げ前に装備し、識別マーカと反射器により、近傍接近運用に必要な航法誘導をサポートし、サービサーに磁石による機構で捕獲される
<https://astroscale.com/ja/like-a-tow-hook-for-satellites-astroscale-launches-docking-plate-to-capture-defunct-satellites/>



表1 IDALレポート軌道上サービスに必要な技術

Table 2-1. Relevant Technologies to Develop OSAM Capabilities

	R1: Remote Inspection	R1: Close Inspection	R2: Orbit Maintenance	R2: Orbit Transfer	R2: Deorbit	R3: Refuel	R4: Repair	R5: Replace Parts	R6: Ground Beaming	R6: Solar Reflection	R6: Direct Power	A (Basic)	A (Precision)	A (Platforms)	M (Basic)	M (Advanced)	M (ISRU)	M (Recycling)	
Rough-Control Propulsion	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	
Fine-Control Propulsion	D	C	C	C	C	C	C	C	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	
Basic GNC	C	C	C	C	C	C	C	C	D	C	C	D	D	C	D	D	D	C	
Precision GNC	D	C	C	C	C	C	C	C	D	C	D	D	D	C	D	D	D	C	
Automation	D	C	C	C	C	C	C	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	
AI/Machine Learning													D	C	C	D	D	C	
Fiducials		D	D	D	D	D	D					D	D	D		D	D	D	
Computer Vision	D	C	C	C	C	C	C	C	D	C	C	C	D	D	C	D	D	C	
Basic Robotic Arms		C	C	C	C	C	C	C				C	C	C	D	D	D	C	
Precision Manipulators			D	D	D	D	D	D				D	D	C	D	C		D	
Intra-Spacecraft Mobility							D	D	D			D	D	D	C			D	
Standardized Interfaces		D	D	D	D	D	D	C			C	D	D	C	D	D		D	
Modular Payloads							D	D	C			C	D	D	C	D	D	D	
Cutting Tools							D	C							D	D	D	C	
Space Welding															D	D	C	C	
Verification & Validation								D	D				D	C	D	D	C	C	
Additive Manufacturing													D	D	D	C	C		
Multi-Material Add. Man.															D	D	C		
Materials Separation																	D	C	E
Industrial Processing																	D	C	C
Wireless Power Transfer									C	D					E	E	E	E	
Space Nuclear Power															E	E	E	E	

デブリ除去はR2に分類される

Note: Cells shaded in green (labeled C) are critical to achieve a particular OSAM capability; cells shaded yellow (labeled D) are desirable; and cells shaded blue (labeled E) were designated as enhancing.

- 横軸に軌道上作業、縦軸に必要な技術が図示
- CがCRITICAL(重要)、DがDESIRABLE(望ましい)技術

出展

Global Trends in On Orbit Servicing , Assembly and Manufacturing (OSAM)

Benjamin A. Corbin, Amana Abdurrezak, Luke P. Newell, Gordon M.Rosler, Bhavya Lal (IDA Document D-13161)

<https://www.ida.org/-/media/feature/publications/g/g/global-trends-in-on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-osam/d-13161.ashx>

NORTHERN SKY RESEARCH社 軌道上サービスのレポート

GEO以外におけるコンステレーションの勃興により\$14.3 Billionドルの収入を予測(2021年-2031年の累積)

- 寿命延長サービスが牽引2021年から2031年までで累積USD4.7 Billion
- 数千の衛星の打ち上げ予定があり、SSA(宇宙状況把握)やADR(デブリ除去)も上向き可能性を持っている
 - SSA / 打ち上げられた衛星を追跡監視する宇宙状況認識 (Space Situational Awareness) 予測USD3.7 Billion
 - ADR / 混雑する中で軌道を確保する(次の衛星を打ち上げる為に故障機をすぐに取り除く) 予測38% CAGR(2021-2031年の年平均)

一方、多くのプログラムは技術実証中であり、中長期的なサービス開始が見込まれている為に急速な上昇を迎えるには時間が必要

さらなる市場の拡大を図る為の方法

- 政府主導の技術開発、プログラム推進からの脱却
- 一万以上の衛星が軌道上サービスの恩恵を受けられるが、ここ10年でみると実際には4,000程の衛星だけが対象となる予測
- コンステレーションが進む中で宇宙軌道の持続的な利用に関する懸念



- 技術の確立
- 実例に蓄積
- ビジネスの確立
- 長期的なコスト低減
- ベストプラクティスの蓄積
- ガイドラインの策定

記事出展

NSR's In-Orbit Services Report Projects \$14.3 Billion in Revenues as Non-Geo Constellations Grow Demand
In-Orbit Services: Satellite Servicing, ADR, and SSA, 5th Edition (IoSM5)
<https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/02/15/2384849/0/en/NSR-s-In-Orbit-Services-Report-Projects-14-3-Billion-in-Revenues-as-Non-Geo-Constellations-Grow-Demand.html>

企業一覧で軌道上サービスに関心ある者や事業計画がある者に印。航空宇宙における3Dプリンティングの活用について、国際的には先端動向を引っ張っているか。どの分野に活用することが有益か。

⇒海外企業は3DPによる宇宙製品を公表している企業、国内は宇宙製品の製造段階にあるレガシー及びスタートアップの企業を対象とした。概念段階の企業は含まない。

1. 米国3DP適用を公表する宇宙企業	15社
2. 欧州・英国・独・豪州の同上	6社
3. 日本レガシー及び製造段階を有するStartUp宇宙企業	19社

は、非常に積極的に3DP（Additive manufacturing）を実用レベルで製品へ多用していると思われる事例。

【適時調査:B1⇒B2】 3D Printerによる成型技術動向について。】

22-003-R-016

米国		衛星	LV	地域	企業の事業内容	3DP適用の製品例	適用レベル	参考URL
1	Boeing	○	○	米	打上ロケット(DELTA・ATLAS)、中大型衛星特に通信衛星に強い。	最新のGEO/MEO通信衛星702Xのブラケット・構造部材に適用	積極的	https://spacenews.com/boeing-to-accelerate-production-of-wgs-satellites/
2	Lockheed Martin	○	○	米	打上ロケット(DELTA・ATLAS)、中大型衛星からNDSA向け小型衛星まで手がける。	最新の静止衛星LM2100の推進タンク・構造部材や	積極的	https://connectedmanufacturing.wbresearch.com/blog/lockheed-martin-using-3d-printing-strategy-to-build-next-generation-spaceships
3	Northrop Grumman Innovation SYstems(2018年Orbital ATK買収)	NA	○	米	打上ロケットペガサス、ミノタウロス、アンタレスや商用衛星・科学探査衛星・軍事衛星等	衛星よりロケットのノズル等に積極的に採用。	積極的、2005年から製品への適用を始めている。	https://news.northropgrumman.com/news/features/innovation-with-the-additive-advantage
4	Aerojet Rocketdyne (rocket engines)	NA	○	米	固体ロケット・液体ロケット・衛星エンジンの代表企業	ロケットエンジンノズルに適用、約20年のノウハウを有する。	積極的	https://www.rocket.com/innovation/additive-manufacturing
5	L3Harris	○	NA	米	光学センサ・宇宙状態監視・RF機器・通信ネットワーク、近年はNDSA向け小型観測衛星。	プリント基板のAdditive製造をISSで実験	一部への適用に留まる。	https://www.3dprintingmedia.net/work/l3harris-sends-3d-printed-electronic-circuit-to-the-iss/
6	Maxar Technologies	○	NA	米	中型高分解能光学衛星WorldView、旧SSLの商用通信衛星事業	導波管やアンテナタワー等旧SSLの資産多。既に2500パーツを打上。	積極的だが製品自体は衛星全体の一部分。	https://spacenews.com/reaching-the-tipping-point-for-3d-printing-satellites/
7	SpaceX	NA	○	米	Falcon-9、スターシップによるロケット事業及びStarlinkによる通信事業	有人脱出用Super Dracoロケットチャンバ、バルブシステム。2013年～	ロケット生産の自動化・納期という観点で積極的。	https://kingsburyuk.com/how-additive-manufacturing-helped-launch-spacex/
8	Blue Origin	NA	○	米	衛星・有人打ち上げロケット製造・サービス事業	月着陸システム用 BE-7 エンジンに採用。	積極的、社内で大きな投資実施	https://moldie.net/a-history-of-the-use-and-impact-of-3d-printing-in-new-space-companies/

【適時調査:B1⇒B2】 3D Printerによる成型技術動向について。】

22-003-R-016

米国

	宇宙企業名	衛星	LV	地域	企業の事業内容	3DP適用の製品例	適用レベル	参考URL
9	Terran Orbital	NA	○	米	米最大の独立系小型衛星メーカー、特にSAR。Lockheed等のファンドを受け年間約1,000機、2026年までに26億ドルの収益を予測。	3Dプリントシステムを備えた世界最大の人工衛星製造工場を保有。	非常に積極的。	https://www.zoomy.club/invest/terra-n-orbital/ https://idarts.co.jp/3dp/terra-orbital-build-spacecraft-factory/
10	Firefly Aerospace (small launch vehicles)	NA	○	米	NASAにより商用ルナペイロードサービス (CLPS) の主要部分として選定	14日以内で、世界最大の全CFRP液体燃料ロケットAlphaを製造。	非常に積極的。 機材は Ingersoll Machine Tools Inc	https://firefly.com/news/firefly-aerospace-to-automate-composite-rocket-production-with-ingersoll-machine-tools/
11	Firehawk Aerospace	NA	○	米	ロケットエンジンのスタートアップ	3Dプリントされた固体燃料棒で駆動する先進的なロケット推進システムを開発。	非常に積極的。	https://www.firehawkaerospace.com/
12	RedWire Space (Made in Space社を2020に買収)	○	NA	米	政府系の特殊機器を手掛けていたがAdcoleも買収し業態を拡大。	セラミックの3DP等宇宙製造を目指している。	非常に積極的。	https://redwirespace.com/missions/?rdws=nnn.xffxcv.tfd&rdwj=44231-395-35348
13	Relativityspace	NA	○	米	3DPによる自動化製造を特徴としたロケット製造事業	Terranは、製品の95%、質量の85%を3Dプリントする計画。Terran1では機体及び全エンジンを3DPするとしている	非常に積極的。	https://www.relativityspace.com/ https://www.relativityspace.com/star-gate
14	Rocket Lab USA	NA	○	NZ、米	ロケット製造・打上サービス事業。近年は企業買収により小型衛星機器事業や衛星本体等垂直型を目指している。	2018年初打ち上げ当初からRutherfordエンジンはAdditive Manufacturing (3DP)を適用し僅か35kg。構造部だけでなくバルブや燃焼室等メカニズムも3DP化。	非常に積極的。	https://www.3dnatives.com/en/rocket-lab-3d-printed-engine260520174/ https://room.eu.com/news/upgraded-electron-rocket-will-be-heading-to-venus-says-rocket-labs-ceo
15	i-Con	月面	NA	米	住宅の3DO製造・建設業	月面基地を3DPで建設すべく230億円Fund獲得	積極的。	

【適時調査:B1⇒B2】 3D Printerによる成型技術動向について。】

22-003-R-016

欧州・英国・豪州

	宇宙企業名	衛星	LV	地域	企業の事業内容	3DP適用の製品例	適用レベル	参考URL
16	Airbus Defense and Space	○	○	仏	欧州最大の防衛宇宙企業。部品レベルの3DP適用が多いがISSに3DPを送り込み無重力での試験を行う。但しやはり宇宙製造を視野に入れている。	航空機からの派生技術も相乗的に活用している。衛星だけでなくArianeロケットで製造側として採用	積極的	https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-02-large-scale-3d-printing-goes-to-space-on-airbus-eurostar-neo-satellites
17	Arianespace	NA	○	仏	Arianeロケットのサービス提供事業、製造はAirbusとSafranが担当。	エンジンのインジェクターヘッド（液酸液水燃料の噴射器ヘッド）の従来248部品を3DPで一体化。	部分適用、米のStartUpほど適用率は高くない。	https://www.eos.info/en/all-3d-printing-applications/aerospace-additive-manufacturing-for-ariane-injection-nozzles
18	Fleet Space	○	NA	豪	Start Up。小型衛星コンステレーションによるAPAAマルチビームによる電波収集衛星。	直接放射アンテナ(64素子×複数台)へ適用し製造。	試作段階	https://www.3dnatives.com/en/fleet-space-has-developed-fully-3d-printed-satellites-030120214/
19	OHB	○	NA	独	ESA向けの気象・Galileo・中継衛星・観測等中規模から小型衛星主流のシステムメーカ。	自社及び子会社で3DPによるOpt-Mechanics等を積極的に推進。	積極的	https://www.ohb-hellas.gr/AdditiveManufacturing.html
20	Thales Alenia Space	○	NA	仏	欧州第二位の防衛宇宙企業。Airbusと同じく部品レベルの3DP適用が多いが品数は非常に多い。	積極的な試みであるが、Airbusと同じく衛星に関しては金属部品(数10cmクラス)が多い。	積極的	https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/additive-manufacturing
21	Virgin Orbit	NA	○	英	航空機発射ロケット製造・打上事業。	DMG 森精機（異金属ハイメタル・異金属コーティング・複合材成形等各種の3DP製造機を開発）が機材提供。世界初の異金属ハイブリッド燃焼器を進めている。	非常に積極的。	https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-industry-insights/aerospace-insights/how-virgin-orbit-is-using-3d-printing/

【適時調査:B1⇒B2】 3D Printerによる成型技術動向について。】

22-003-R-016

日本

	宇宙企業名	衛星	LV	地域	企業の事業内容	3DP適用の製品例	適用レベル	参考URL
22	アイスペース社	NA	NA	日	月面着陸機・探査機・宇宙ロボティクス。	特に公表はない	NA	
23	三菱重工	NA	○	日	ロケット製造・打上事業、防衛陸海空事業、航空機、産業インフラ。	H3のロケットエンジンパーツに適用。但しRocketLabやRelativity等米国StartUpの割合とは差異が大きい。	一部に適用	https://iafastro.directory/iac/paper/id/41748/abstract-pdf/IAC-17,C4,3,10,x41748.brief.pdf?2017-03-23.11:25:28
24	シンスペクティブ社	NA	NA	日	XバンドSARによる小型コンステレーション製造・サービス。	特に公表はない	NA	
25	Gitai	NA	NA	日	宇宙ロボティクス開発	特に公表はない	NA	
26	アストロスケール社	NA	NA	日	軌道上作業機製造・サービス	特に公表はない	NA	
27	アクセルスペース社	NA	NA	日	光学衛星コンステレーション製造・サービス	特に公表はない	NA	
28	三菱電機	NA	NA	日	中大型衛星製造事業。通信・観測・安全保障・測位・気象・宇宙機等。	紫外線硬化樹脂の3DP押し出しによる宇宙での大型アンテナ製造の開発計画を公表。試験衛星でアンテナや機工品に一部適用	一部に適用	https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2022/0517.html
29	日本電気	NA	NA	日	中大型衛星製造事業。通信・観測・安全保障・測位・気象・宇宙機等。	特に公表はない	NA	
30	IA (IHIアイロスペース)	NA	NA	日	イプシロン中型固体ロケット製造・打上事業。H2/3シリーズ固体サブブースター製造	特に公表はない	NA	
31	Sony Space Communications	NA	NA	米販社	光衛星間通信端末の米国ユーザ向け製造	特に公表はない	NA	https://xtech.nikkei.com/atcl/next/column/18/01819/00017/

【適時調査:B1⇒B2】 3D Printerによる成型技術動向について。】

22-003-R-016

日本

	宇宙企業名	衛星	LV	地域	企業の事業内容	3DP適用の製品例	適用レベル	参考URL
32	エレベーションスペース				ISSに替わり、複数の装置を搭載し新材料やデバイス機能の実験・製造等を行う小型回収プラットフォーム。東北大発ベンチャー。	カスタマーの新材料やデバイスの宇宙評価のサービスを提供予定。		https://kahoku.news/articles/20220218khn000085.html
33	QPS研究所	NA	NA	日	SAR衛星事業	特に公表はない	NA	
34	スペースワン	NA	NA	日	小型ロケット製造・打上事業	特に公表はない	NA	
35	パールブルー	NA	NA	日	小型衛星向け水推薬の電気分解による統合型電気推進ユニット	特に公表はない	NA	
36	インターステラテクノロジー	NA	○	日	小型ロケット製造・打上事業	一部公表	ロケットエンジンカバーに一部使用（森精機[DMM]の外販製造サービスを利用と記載）	https://make.dmm.com/blog/3dprinting-user-istellartech-an/
37	PDIエアロスペース	NA	NA	日	ジェットエンジンとロケットエンジンの両モードを有する有翼飛翔体事業	特に公表はない	NA	
38	スペースウォーカー	NA	NA	日	有翼スペースプレーン製造・打上げ事業	特に公表はない	NA	
39	エール (ALE)	NA	NA	日	小型衛星事業	特に公表はない	NA	
40	天地人、インフォステラ、スペースシフト	NA	NA	日	それぞれ画像解析事、管制NW、AI事業なのでNA			

考察

1. レガシー衛星メーカーはTAS、Boeing、Airbus等積極的であるが、ブラケットやタワー等一部の衛星部品が多く劇的な貢献は少ない。
2. 推進系等の金属部品への効果が顕著
3. 新興企業はレガシー系との差別化を確立するために、ロケット全体（タンクや本体だけでなく燃焼器やバルブシステム、インジェクション）を3DP化する企業も多い。
4. 新興の小型衛星企業も試みている。
5. 日本は応用に関しては遅れているが、DMG森精機はAMの先駆者であり宇宙産業との共同開発や装置供給に長じている。（Relativity、Virgin）

1. 宇宙ビジネスは活況、2021年、宇宙インフラ企業は145億米ドルの民間投資を集めた。これは、前年比50%の増加。競争も激化しており、今日の宇宙メーカーは、より軽量で性能の高い部品をより短いスケジュールで大規模に、より厳しい予算で構築するという大きなプレッシャーにさらされている。
2. 人工衛星用のコンポーネントを製造する場合でも、ロケットを製造する場合でも、迅速に製造でき、パフォーマンスを向上させる製品を求めている。従来の製造技術では、コンポーネントを個別に製造してから組み立てる必要があったが、AMはコンポーネントの統合とアセンブリの単一部品としての製造を可能にし、パフォーマンスを向上させ、信頼性を高める。
3. 必要なツールと製造・組み立てプロセスの両方が複雑であったが、AMを使用すると、金型と製造プロセスを設計に組み込むことで簡素化可能。このプロセスにより、リードタイムを数か月短縮可能。
- 4.
5. AMは常に進化している比較的新しい技術であり、時にはリスクが伴う。宇宙メーカーは、AMによる信頼性を確保するため、この分野に長期にわたって多大な投資を行っており（NGSIは20年）、積層造形（DfAM）の設計に精通しているAMサプライヤーを探す必要がある。
6. 宇宙メーカーは、社内の高性能技術と、電子とレーザーの粉末床融合、指向性エネルギー堆積、レーザー焼結から計測、熱処理、精密機械加工までのすべてを含む機能を備えたAMサプライヤーが必要。森精機DMGはその条件を備えている。たとえば、インバーは熱膨張係数（CTE）が低いため、宇宙用途に理想的な特殊な材料であるが、硬度が高く加工が容易ではない。この難しい材料からフライトハードウェアを製造した実績を持つAMサプライヤーを探すことが重要。

<https://www.samuel.com/Burloak-Technologies/news--updates/am-hub-how-will-am-change-the-future-of-space-technology>

宇宙産業でAMが広く採用されるには何が必要か。

1. ほとんどのメーカーは年に1回程度の頻度で依頼を受けていた。現在、注文は年間数百、場合によっては数千にのぼり、メーカーは対応できるように能力を適応させる必要がありAMの合理性が出てきた。
2. ただし、従来の製造プロセスからアディティブマニュファクチャリングへの切り替えには、3Dプリンターへの投資以上の費用がかかる。製造業者はまた、材料開発、後処理、技術の信頼性、熟練労働者の不足に関連する課題に対処し

ASTEC、高い投資収益率を達成する必要がある

【事実確認:B1】3D Printerによる成型技術動向について。 新興Relativity社のロケット 3D製造 (Space-Xへの切り札としている)

22-003-R-016

1. ロケット製造を自動化する初の航空宇宙プラットフォームである Factory of the Future を構築し、インテリジェント ロボティクス、ソフトウェア、データ駆動型 3D 印刷技術を垂直統合。
2. AI採用の機器制御を備えた世界最大の金属3Dプリンターである Stargateを組み込んだRelativityの工場は、生産を継続的に最適化し、大幅に複合化された品質と時間の改善、コストの削減、および以前は不可能だった製品設計を実現。
3. Relativity はアプリケーション レイヤーの 3D プリンティング会社で、ロケットから始まり、未来の工場を航空宇宙の各製品に拡張。





The Rutherford engine from Rocket Lab – almost completely 3D printed

なによりも特徴的なのは、インジェクターからポンプ、プロペラントバルブといった、すべての基本的なコンポーネントに3Dプリント技術が使われていることだ。部品は電子ビーム溶解という技術によって、概ね3日程度でチタン合金からプリントすることが可能だという。

2018年にElectronロケットを初めて打ち上げたが当初からRutherfordエンジンはAdditive Manufacturingを適用し、わずか35kg。構造(トポロジー)最適化により軽量化に寄与。



3Dプリントに電子モーターという技術を使った斬新なコンセプト

令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業

衛星システムにかかる技術調査

「事実確認 その3 (電気推進と化学推進)」

2022年11月21日

一般財団法人衛星システム技術推進機構

Advanced Satellite Systems Technology Center (ASTECC)

システム 1

【事実確認（システム）】 衛星に搭載する推進系（電気推進）について、縦軸に衛星規模（大型～キューブ）、横軸に出力（kw）を設定し、世界と日本の持つ技術をマッピングした図をpptで一枚。

⇒整理の方法（性能表として一般的な、「縦軸を性能[電力 \propto 推力]」としています。）

・横軸

各企業の電気推進系コンポーネントの仕様には対象とする衛星質量の明確な記載がないこともあり、横軸は電力や推力から想定される衛星規模（衛星質量 $\times 1$ ）をASTECで推定し、横軸にしている。
したがって公式の企業発表の仕様ではないため横軸の衛星質量は参考扱いである。

※1スラスタが適応する衛星質量を推定する方法は、より詳しくは運用軌道（維持に必要な軌道上 ΔV 、GEOはLEOより一桁多い等）・軌道投入方法（直接投入か、GEOや最近のStarlinkのように衛星推進系で運用軌道までオービットレイジングするか等）を加味してスラスタ寿命（スループットとも呼ばれ、力積[Ns]で規定）を ΔV で除して可能な衛星質量を算定しスラスタを選定する。

・縦軸

性能は、指定の通り電力としている。なお電気推進の電力と推力の比は、ホールスラスタタイプとイオンエンジンタイプでは異なるが（ホールの方が1桁程度推力が大きい）、同じホールスラスタの中ではおおよそ電力と推力は比例する。従って、電気推進電源への投入電力（消費電力）で電気推進の推進力の大きさが評価できるため縦軸としている。

※2なお、電気推進スラスタの重要な指標として、推力（電気推進は電力とほぼ比例）、スループット（※1記載）、Isp（比推力：Specific Impulse、単位推薬消費率）があり、これらのファクターで性能優劣や選定を行う。

衛星システム事実確認 (主要な電気推進スラスタ[電源込み])

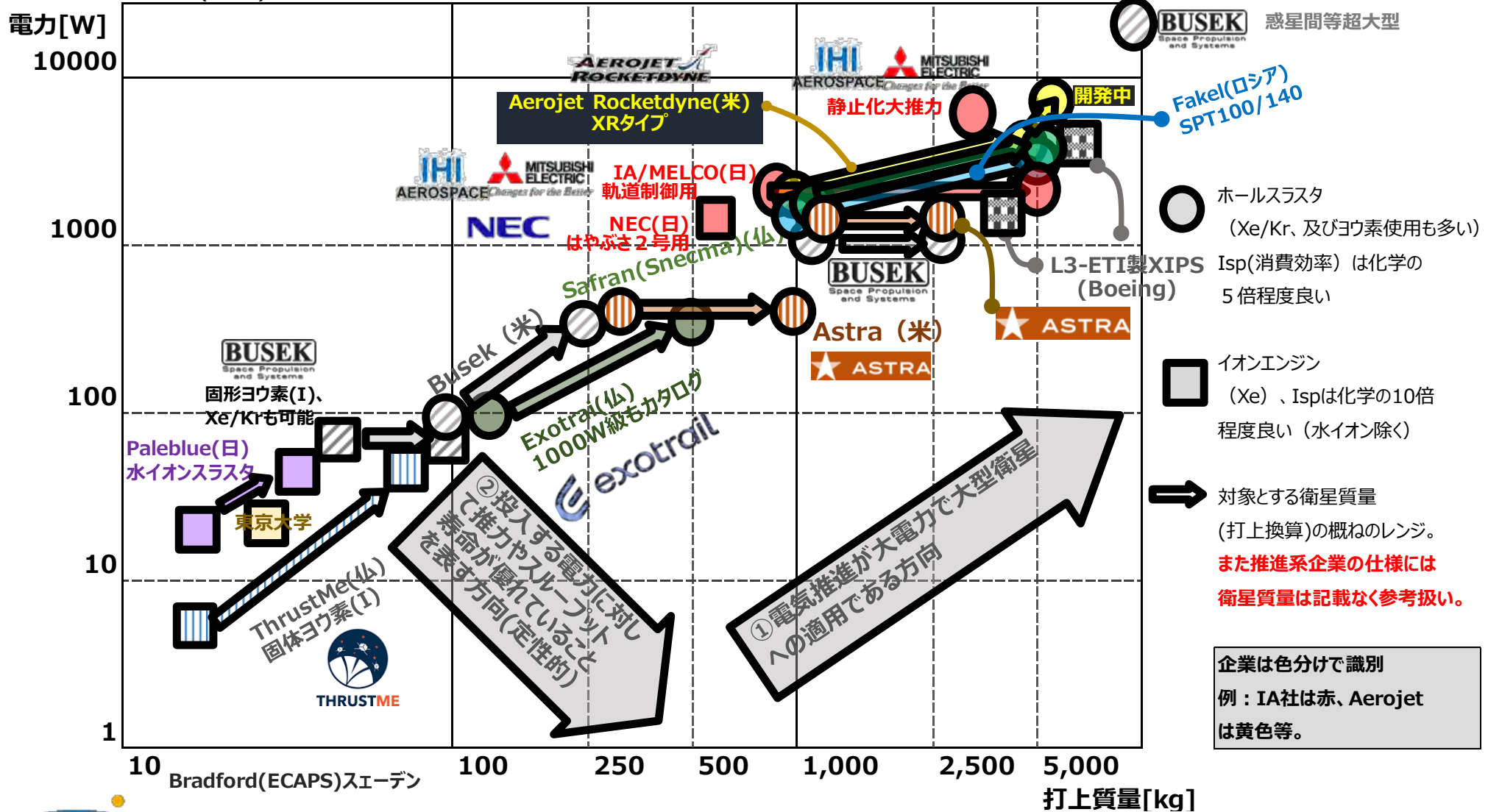
22-003-R-016

		推力mN (参考)	W	対象質量	Type	企業	電源	図中に示す
ホールスラスタ	Xe	132	2000	1000-3000	XR5	Aerojet Rocketdyne	Aerojet Rocketdyne	米
		290	4500	3000-5000	XR5	Aerojet Rocketdyne	Aerojet Rocketdyne	米
		235	6900	4000-6000	TRL6	Aerojet Rocketdyne	Aerojet Rocketdyne	
	Xe	83	1360	1000-3000	SPT100	Fakel		ロシア
		145-270	3000-	3000-5000	SPT140	Fakel		ロシア
	Xe	90	1500	1000-3000	PPS1350	SAFRAN	SAFRAN(SNECMA)	仏
	Xe	270	4500	3000-5000	PPS5000	SAFRAN	SAFRAN(SNECMA)	仏
	Xe	145	3000	1000-3000	PPS5000	SAFRAN	SAFRAN(SNECMA)	仏
	Xe/Kr		400	300-1000		ASTRA		
			1400	1000-3000		ASTRA		
	Xe, Kr,	7	100	100		Busek	Busek	
	Xe, Kr,	17	300	100-300		Busek	Busek	
	Xe, Kr,	101	1500	1000-3000		Busek	Busek	
	Xe, Kr,	1005	20000	5000-10000		Busek	Busek	
	Xe, Kr,	18-60	400-	300-1000		exotrail		
		4 -24	150-450	100-300		exotrail		
		35-80	1000-	500-2000		exotrail		
	Xe	72	1800	1000-3000		IA/MELCO		
		390	6000	4000-6000		IA/MELCO		
水イオン	水	0.15-0.46	22-62	50	TRL6 (革新)	Paleblue	Paleblue	
イオンエンジン	固形I	1.1	75	50-100		Busek		米
	Xe	10	1250	100-300		NEC		日
	固形I	0.3-4.0	5-65	50-100		ThrustMe		仏
	Xe	79	2200	1000-3000	XIPS-25	L-3		米
		168	4500	3000-5000	XIPS-25	L-4		米
		0.3	20	10		東大		
エレクトロスプ	I (ヨウ)	0.15	24	50		BUSEK		

衛星システム事実確認 (主要な電気推進スラスタ[電源込み])

22-003-R-016

縦軸の(投入)電力は各電気推進タイプ内 (ホールやイオン) で推力にほぼ比例する。一般的な指標となる。



システム2

【事実確認（システム）】 衛星に搭載する推進系（化学推進）について、縦軸に衛星規模（大型～キューブ）、横軸に出力（kw）を設定し、世界と日本の持つ技術をマッピングした図をpptで一枚。

⇒整理の方法（性能表として一般的な、「縦軸を性能 [推力]」としています。）

- ・**横軸** 大型～キューブという御要求であるが、各化学推進系の仕様には対象とする衛星種別の明確な記載がないため、推力から想定される衛星打上質量（但し参考扱い）を横軸にしている。
- ・**縦軸** 化学推進の場合燃焼及び化学反応(二液)とノズル効果で推力を出すため投入電力は性能指標にならず（概ね駆動回路電力程度）、縦軸は推力としている。

衛星システム事実確認 (主要な化学推進)

22-003-R-016

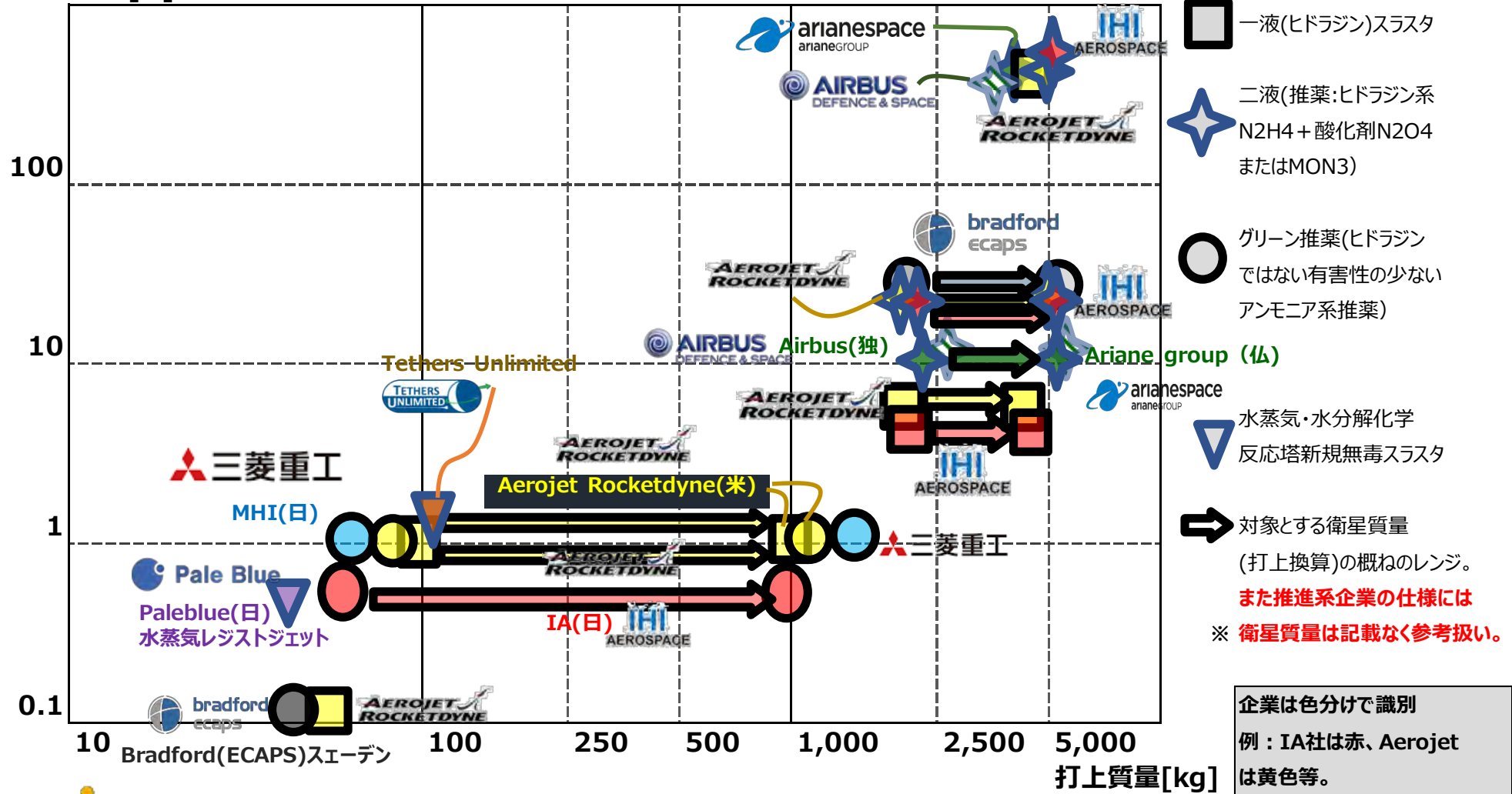
タイプ		推力N	企業	想定する衛星打上質量 k g (参考)
一液	ヒドラジン	4	IA	2000-4000
		1	IA	100-2000
		0.09	Aerojet Rocketdyne	50
		1	Aerojet Rocketdyne	100-1000
		4	Aerojet Rocketdyne	2000-4000
		450	Aerojet Rocketdyne	3000-5000
二液	推薬 + 酸化剤	22	Aerojet Rocketdyne	2000-5000
		450	Aerojet Rocketdyne	2000-5000
		26671.7	Aerojet Rocketdyne	1000000
		22	IA	3000-6000
		450	IA	AKE
		10	Airbus	3000-5000
		400	Airbus	AKE ~6000
		10	Ariane Group	3000-5000
一液	グリーン推薬	1	Aerojet Rocketdyne	100-2000
		0.5	IA	50-1000
		1	MHI	50-2000
		0.1	Bradford (ECAPS)	50
		20	Bradford (ECAPS)	2000-5000
レジスト ジェット	水蒸気	0.46	Paleblue	50
水電気分解化学反応		1.2	Tethered Unlimited	100-300

衛星システム事実確認 (主要な化学推進)

22-003-R-016

化学推進の場合、燃焼及び化学反応(二液)とノズル効果で推力を出すため投入電力は性能指標にならず縦軸は推力となる。

1000 推力[N]



令和4年度地球観測技術等調査研究委託事業

衛星システムにかかる技術調査

“事実確認

大型・中型・小型の各衛星サイズにおける
衛星システムから見た、メリットデメリット”

2022年12月7日

一般財団法人衛星システム技術推進機構

・【事実確認（衛星システム）】

1. 衛星システム

大型・中型・小型の各衛星サイズにおける衛星システムから見た、メリットデメリットを記載した表をお願いします。

想像では、電力量、機動性、メモリ等の格納容量、冗長系、ミッション系の搭載容量等様々な点があると思います。

⇒通信衛星の大中小に関しては別の事実確認で比較しておりますので、**観測衛星に関して整理しています。**

衛星システム事実確認

大型・中型・小型の各衛星サイズにおける衛星システムから見た、メリットデメリット

22-003-R-016

メリット青
デメリット赤

	大型衛星	中型衛星	小型衛星
衛星規模の定義	<ul style="list-style-type: none"> 観測衛星 例として1m等の高分解能で数100kmの広角観測幅を有する光学衛星、または同様な性能でかつマルチスポットやスキャン機能を有する高機能のSAR衛星。電力2～5kW、打上2～4トン程度。例としてALOS-2/-3/-4、MAXAR Worldviewシリーズ 	<ul style="list-style-type: none"> 観測衛星 例として(中～)高分解能であるが観測幅は大型ほど広くない中規模の光学衛星、または同様な性能のSAR衛星。電力1～2kW、打上1トン程度。例としてPleiadesシリーズ、Spotシリーズ、TerraSAR-X等。 	<ul style="list-style-type: none"> 観測衛星 例として中～高分解能であるが観測幅は狭く、小型化と多数機による観測を特徴とした衛星。SARはビームスキャン可能なタイプではなくビーム固定(衛星Bodeyで走査)のタイプが主流。Planet社光学衛星、シンスペクティブ社SAR衛星等。数100kg、電力数100W。
①性能の特徴	<ul style="list-style-type: none"> 性能 高分解能、観測幅大、データ記録再生容量大、伝送量大。 	<ul style="list-style-type: none"> 性能 (中～)高分解能、観測幅中であり、取得データ量の多さよりも分解能と小型化による機動性のメリットがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 性能 (中～)高分解能、観測幅小であり機数による再訪性向上(観測頻度向上)を実現する上でメリットがある。
②電力 メリット青 デメリット赤	<ul style="list-style-type: none"> 大電力のためSARにおいては複数偏波使用や帯域拡大、観測Dutyが高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 中規模電力で観測Dutyは大型より制約がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 更に電力が小さく運用Dutyに制約がある。
③機動性 メリット青 デメリット赤	<ul style="list-style-type: none"> 大型乃至は展開型太陽電池パドルを有する光学衛星では姿勢制御による機動性はよくない。 SARはフェーズドアレー走査で機動性はよい。 	<ul style="list-style-type: none"> 光学では衛星をコンパクトに設計し姿勢制御による機動性を高め、観測幅の制約を補う。SARでは大型と同じく電子走査で解消。 	<ul style="list-style-type: none"> 光学では常に直下観測のタイプもある。総じて機動性は高機能の中型の方が性能が良い。 SARは電子走査できない設計が多く、衛星姿勢制御(ホイール)で行うため走査は電子的走査よりも遅い。
④取得データ・伝送量 メリット青 デメリット赤	<ul style="list-style-type: none"> 分解能×バンド数×観測幅で決まる取得データ量が多く、記録やデータ伝送能力も高い。多くの情報が一度に得られる。 地球観測目的に向いている。 	<ul style="list-style-type: none"> データ量は左記の大型と右記の小型の中間。関心のある特定地域に光学であれば姿勢、SARであれば走査により目的を果たしつつ取得データ最小化可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 取得データ量(情報)は少ない。 但し少ないために伝送時間やコストがかからないというメリットがある。
⑤冗長系	<ul style="list-style-type: none"> 大型で冗長性を衛星内で確実に確保する設計であり、待機冗長構成をとり信頼度を上げる傾向が強い。 半面質量やコスト増加、工期が長い。 	<ul style="list-style-type: none"> 概ね大型衛星と同じ。 一方地球観測衛星としては観測幅の観点で不足する場合もある。 	<ul style="list-style-type: none"> 小型であるため大型衛星と異なり、民生品利用や冗長性の観点で衛星単体で信頼度を高くする冗長性はとれない傾向がある。 半面、機数を多くすることで単体ではなくコンステレーション全体での信頼度や稼働性(Availability)確保を行う傾向がある。
⑥設計製造試験の コスト・工期	<ul style="list-style-type: none"> コスト大、長い工期 	<ul style="list-style-type: none"> コスト、工期とも大型衛星ほどではないが、小型衛星との乖離は大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> 1機当たりのコストは小さく工期は短い。
⑦観測としてのリアルタイム性・再訪性	<ul style="list-style-type: none"> 大型・高額のため、観測幅が広くても機数が少なくなることから本項目は制約が大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> 大型ほどではないが機数は小型コンステレーションほど配備できないため同様な傾向がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 小型・安価であるため、観測幅が狭くても多数機を軌道上配備できる傾向が強く、再訪性やリアルタイム性はよい。



(財)衛星システム技術推進機構

Information : Not to be disclosed or reproduced without specific written permission from ASTEC