

文部科学省殿 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

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

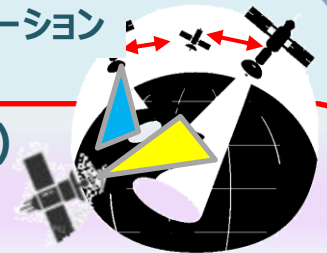
3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

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

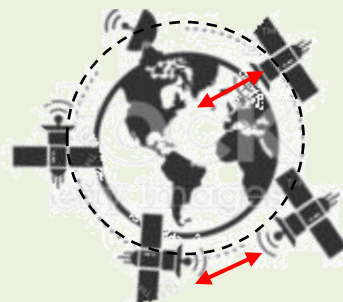
① 静止通信SDS(≒SDR)

～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、一部再生中継器
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

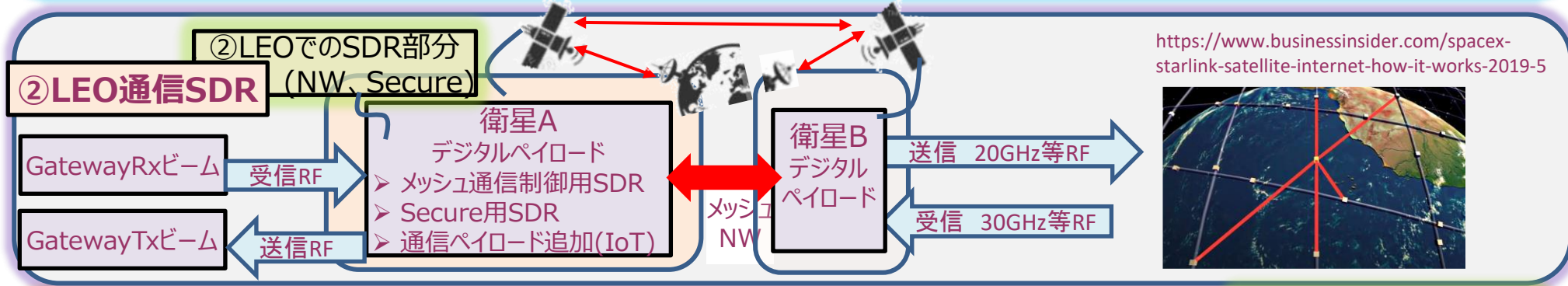
- a. 画像化/差分/ML/AIによる情報化・圧縮・再訪頻度・情報レイテンシ削減ニーズへの対応のオンボード化
 - b. 顧客やアプリケーション変更
 - c. Hosted的衛星利用
- SDS≒ML/AI高次処理⇒SDR機能

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)」

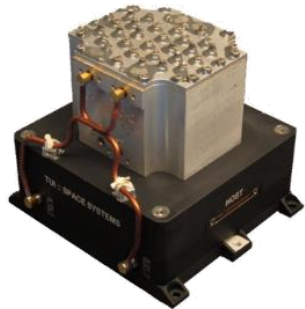
3.1.2 SDR標準製品の一例

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ト参加を果たした。	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/MEO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行かない。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。

- 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
- 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。
- 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
- ➡ 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。
- ➡ 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
- 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

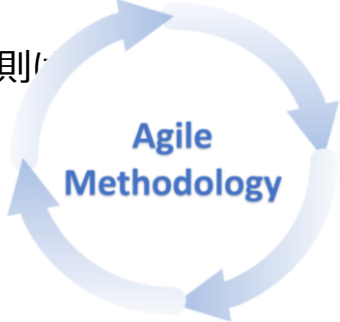
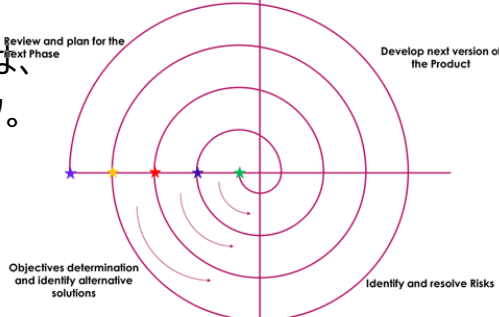
注意：これらの言葉は、主に民・官コンステレーション系で使われているが、ソフトウェア工学における“Agile software development”、ソフトウェア開発工程における“Spiral model”の一般的定義と同一ではない。

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)

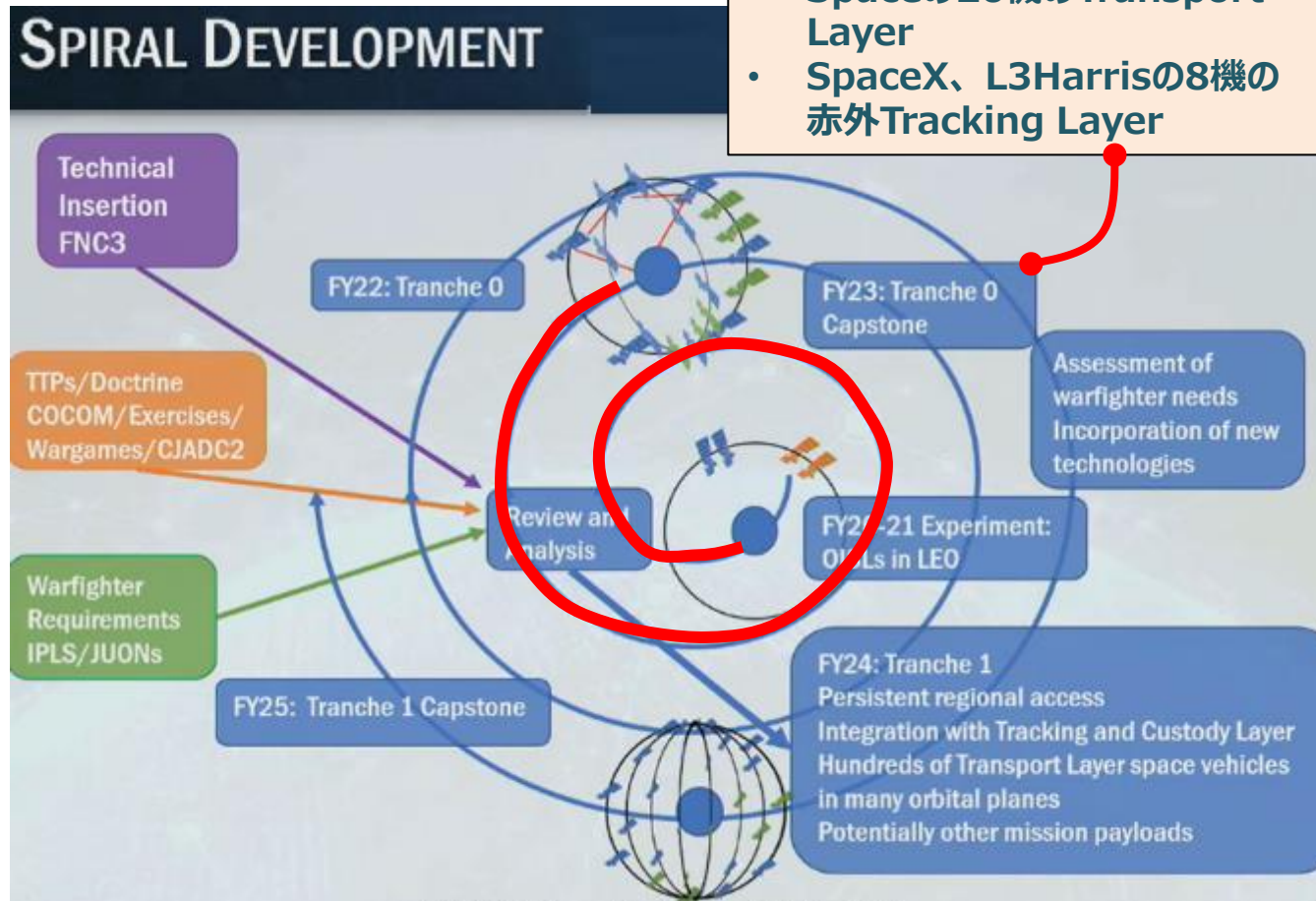
壮大なミッションコンセプトを多数の衛星に分散し全部で満たすことを考える。

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。

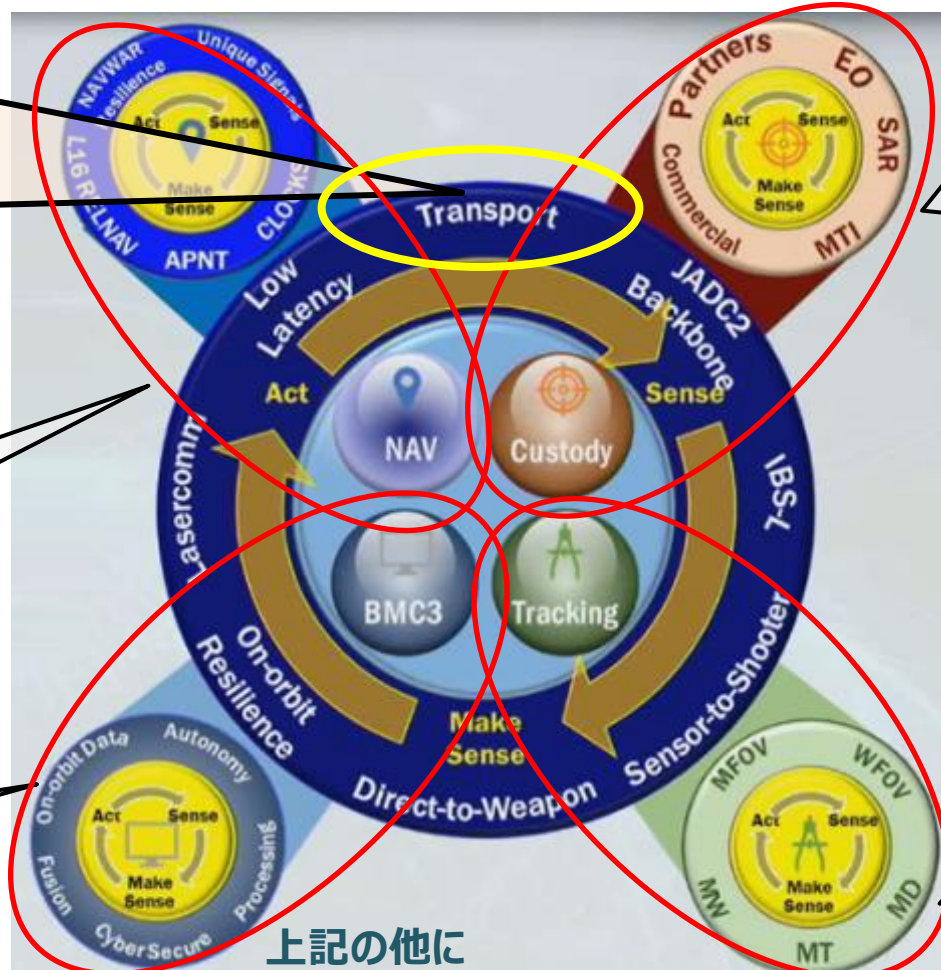
右記の青全体のサークルを指す。

- 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

ENABLING INTEROPERABILITY

- Recognizing the need for an interoperability test environment, SDA has been investing in such a capability prior to Tranche 0
- SDA has partnered with the Naval Research Laboratory (NRL)
- Currently supports network and physical layer interoperability testing; adding PAT testing capability for Tranche 1
- Used to validate interoperability, not verify compliance with the standard!

U.S. NAVAL RESEARCH LABORATORY



- 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。

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。

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

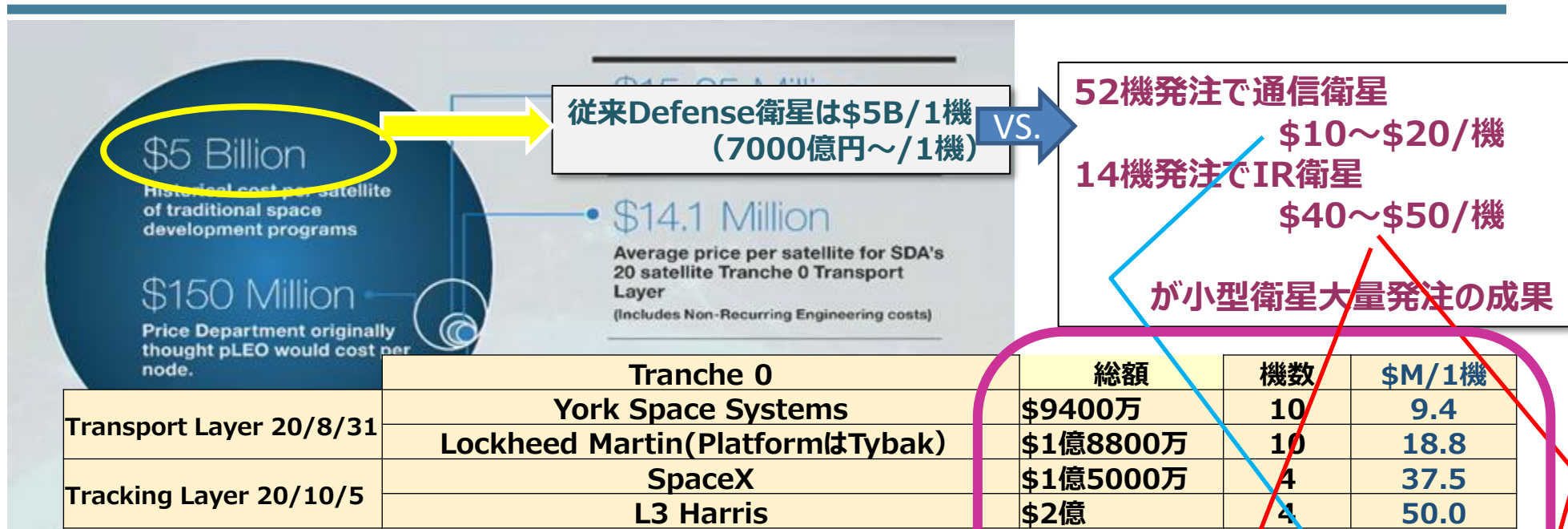
SA Photonics

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)」

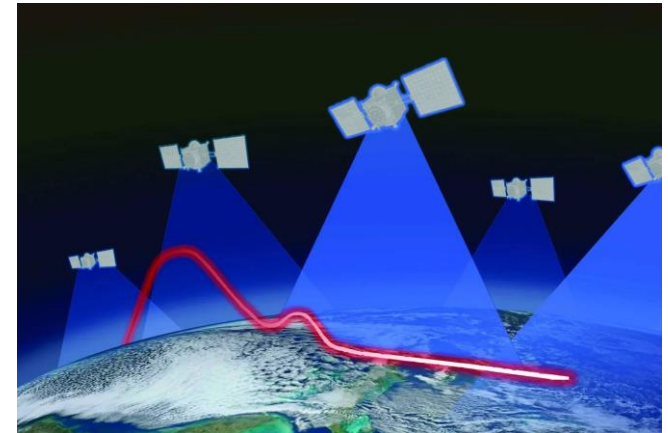
3.1.6 Spiral手法に関する調査 (米国SDA庁 PWSA)

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	HYPPO-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

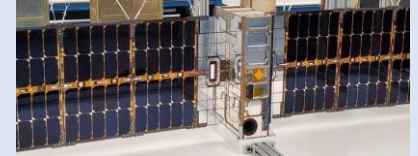
Lockheed 高性能化のためARMコアベースのXilinx ZynqをPWSAに採用

- 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を組み合わせて、**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**

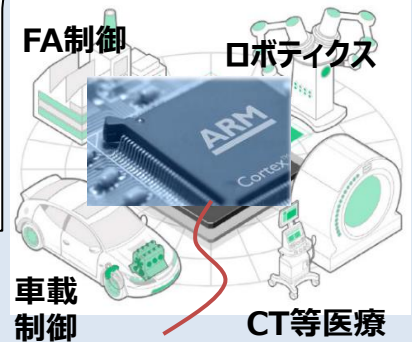
産業用や車載ARMのエコシステム

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/DGXZQOGN240CY0U2A620C200000/>
※2:<https://www.codexa.net/aws-ml-solutions-lab/>

③衛星搭載クラウド環境の提供

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

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



D-Orbit社の小型衛星SCV004(バスを提供)



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

④最終的事業戦略は？

3.2 オンボード処理技術

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

は説明を後述

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



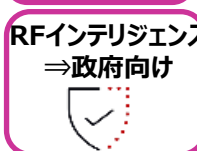
IOT / M2M



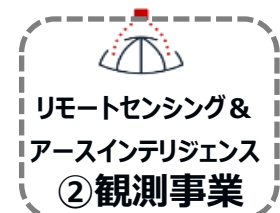
グローバルトラッキング&PNT



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)。



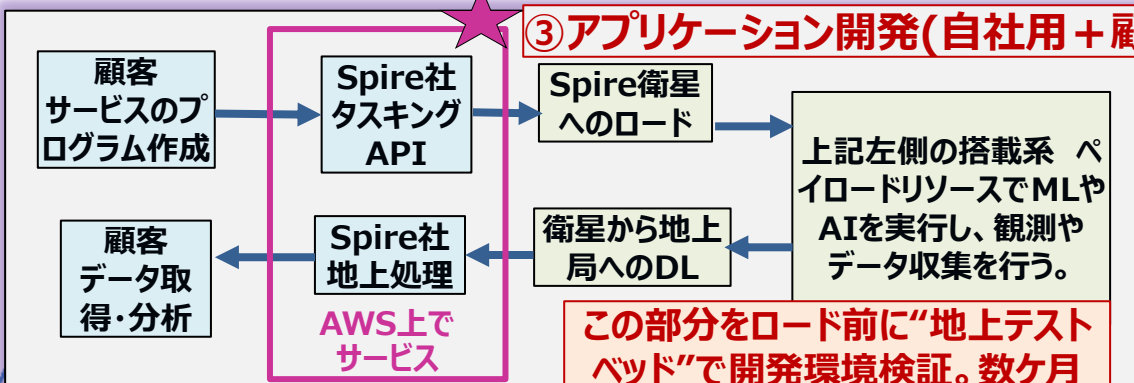
+27M

+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

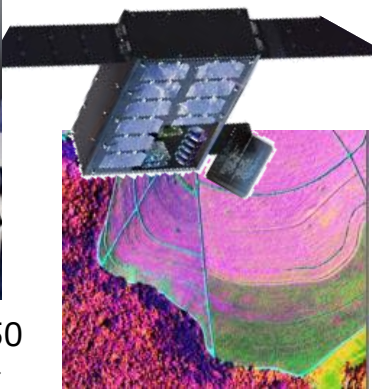
「産業用計算機コアの耐放射線対策徹底により性能・コスト・信頼性の両立を目指している」

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。

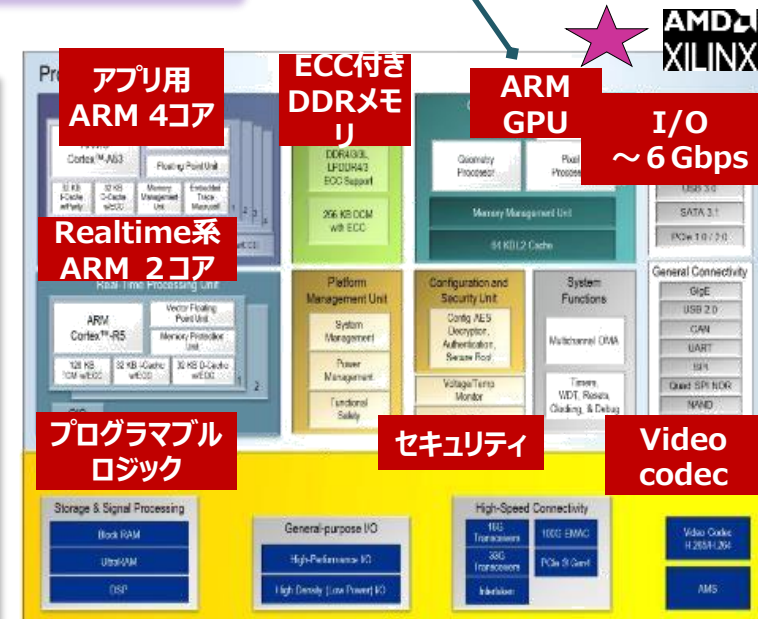
KPLABSは使用しているミッション
MPSoCに下記XILINX(AMD)
のZynq UltraScale+に左記
RHDBを適用し搭載化

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）

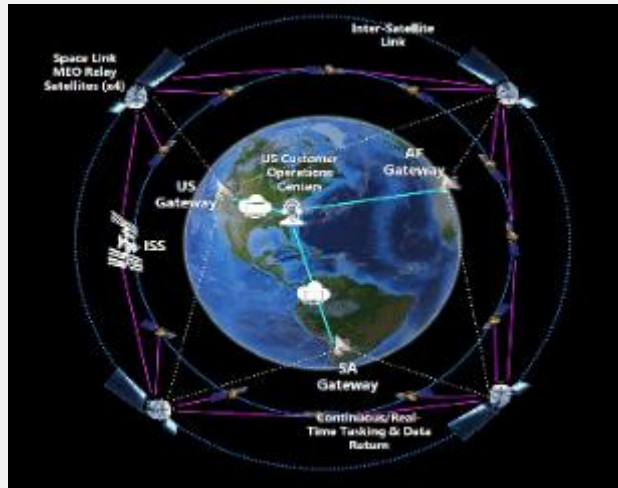
左記の例では212台を0.702 sとあり、かなり早い。

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えており、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コアによる平行処理が貢献。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 リユーナ大</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

22-003-R-016

は説明を後述

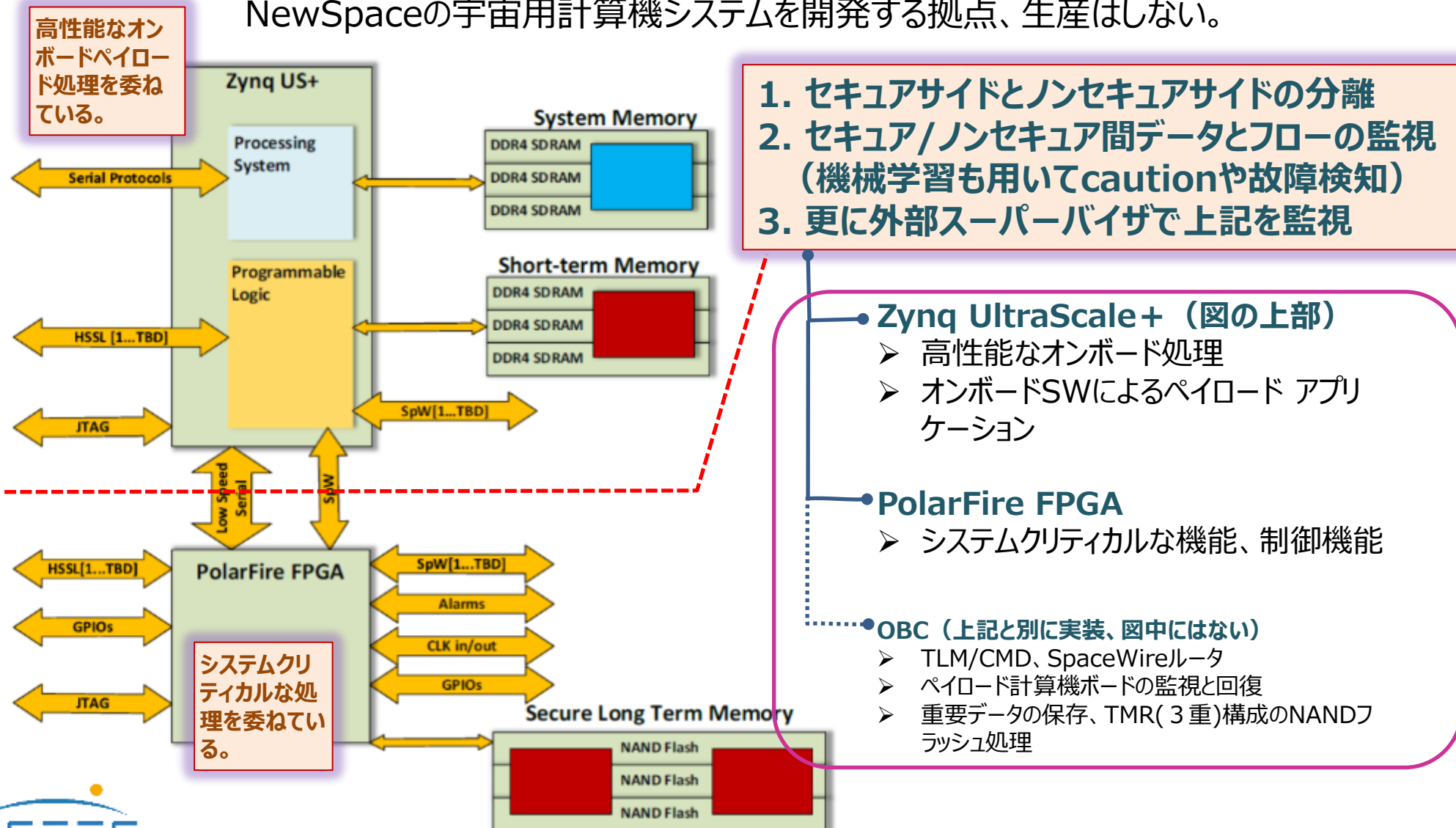
機関・企業	2nd European Workshop on On-Board Data Processing (2 nd OBDP、2022,June)		大分類
Airbus仏	High Performance Parallel Payload Processing for Space (HP4S)	▶ 欧州GR740とKarley社Rad-tolerantを単独及び強調させて比較。	宇宙用CPU、民生
DSI Aerospace Technologie、独	High-Performance Data Processing Unit for Space Applications	宇宙用既製品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。



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

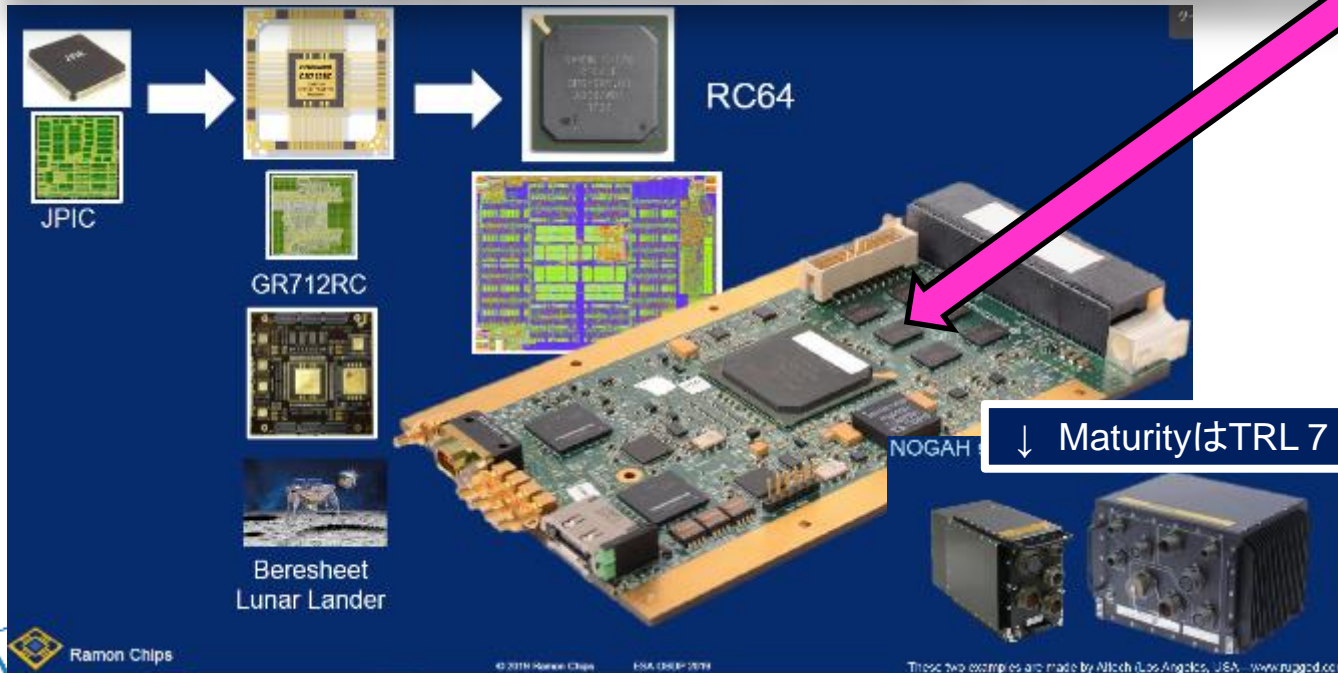


RC64

RAMON CHIPS
RC64-E
SP6Y085.U0
A000/A01
1731

500x
faster than GR712RC

At only 5x power



JPIC

GR712RC

Beresheet Lunar Lander

RC64

NOGAH

↓ MaturityはTRL 7

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

2021年時点

EU

イスラエル(米に販社)
RAMON.SPACE社

[①-1 欧州域外投資]

- ・EUとしてRAMON Chip (イスラエル宇宙部品企業)に資金提供、設計力を取り込む。元々GR712はRAMON社の設計。
ITARフリーを確保。Cobham GR系統と並行したリソース。

[②-1 EU内IPの維持発展 : DAHLIAプログラム]

- ・ARMのCPUコア、FPGA混載のSoCを欧州連合で進め次世代MPUのITARフリーを確保

[②-2 アナログ/バイポーラプロセスの維持]

- ・アナログ/RF等でも**ITARフリーを確保**
・MPU/FPGAとの相乗効果

[①-2 欧州域外投資]

- ・ESA/CNESの出資でARM系の車載SoCを耐放射線強化したSAMRH71を開発2022年リリース

[②-3 FPGA IPの維持]

- ・リコンフィギャラブルデバイスのエキスパートを集約
・FPGA混載ASICでも**ITARフリーを確保**

[②-4 65nm/28nm FABの維持]

- ・先端プロセスではないが宇宙機用として十分な集積度・規模で**ITARフリーを確保**
・10M€/年の売上の確保

Airbus/TAS

- ・ARMのCPUコア、FPGA混載のSoCを欧州連合で進め次世代MPUのITARフリーを確保

DLR

IHP/X-FAB

米 : Microchip社

ESA

CNES

NanoXplore

スイス
STMicro

LEON系CPU
英Cobham
⇒Swe. Gaisler社
⇒米CAES

2022年更新

ESAのSpace Cloud
Frameworkの中心

Unibap社(Sweden)

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グラム。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> <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>
1.2	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>	

※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は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。**
- ▶ Onweb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で仮想的された汎用の地上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

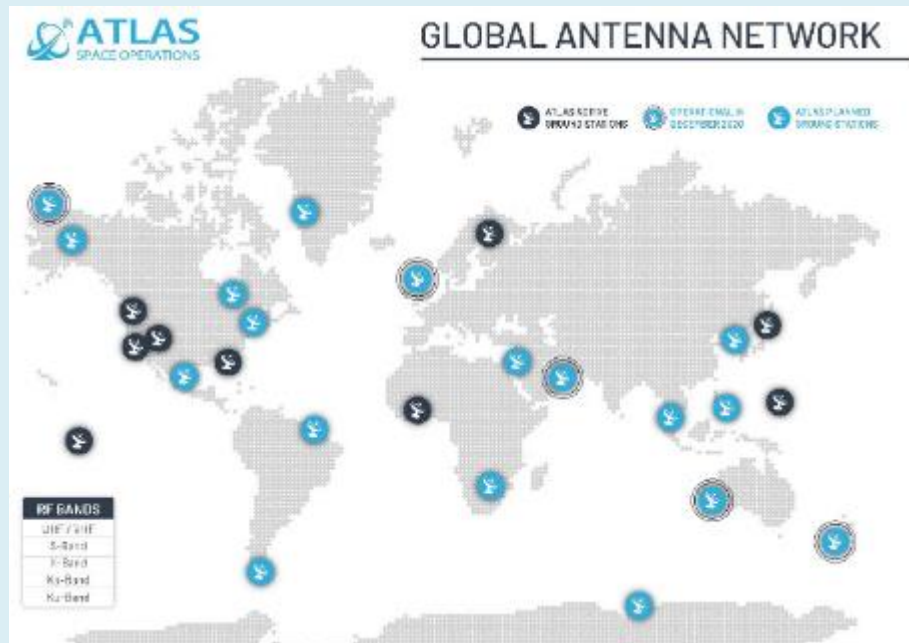
3.3.1 地上NWシステム

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。



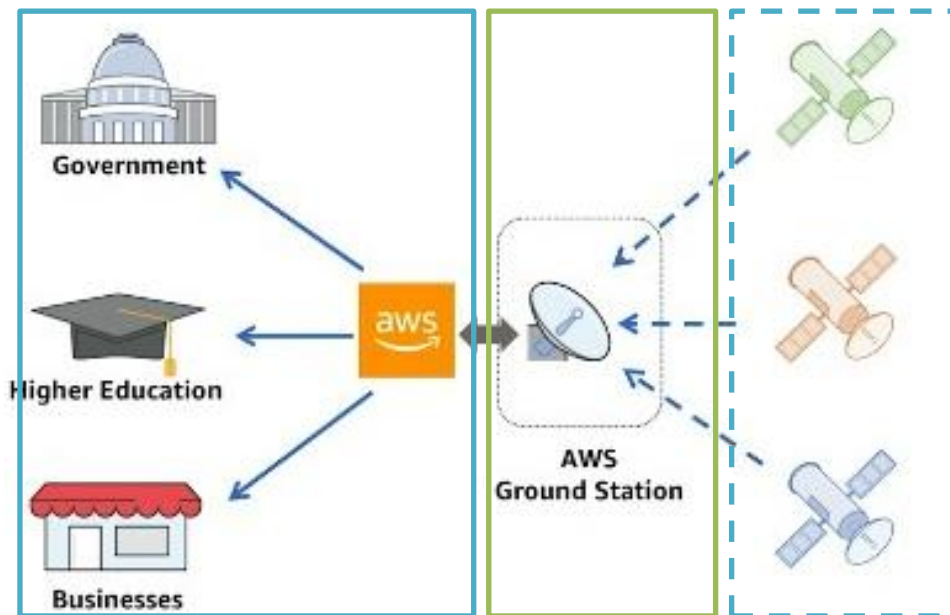
3.3 運用の効率化

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



*インフォステラ(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)

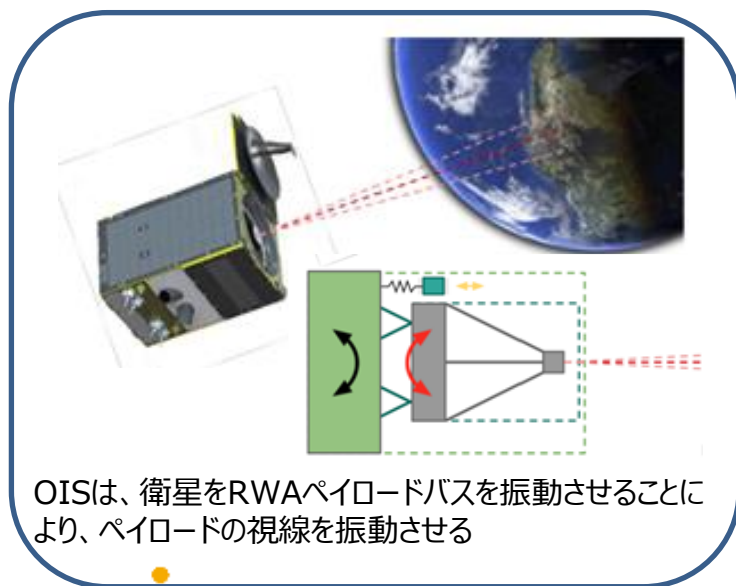
22-003-R-016

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。



OISは、衛星をRWAペイロードバスを振動させることにより、ペイロードの視線を振動させる

OIS補正前
(ぼけあり)



OIS補正後
(1pix以下)



<https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5063&context=smallsat>

画像安定化にて撮像されたSkysat画像。モーションブラーは1ピクセル未満に制限されている。

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)

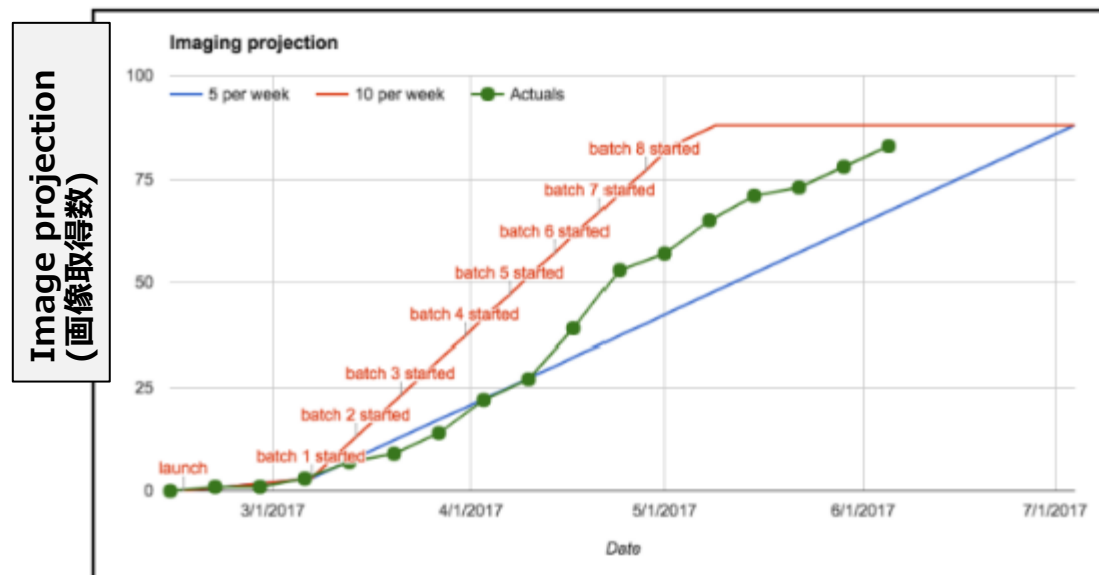
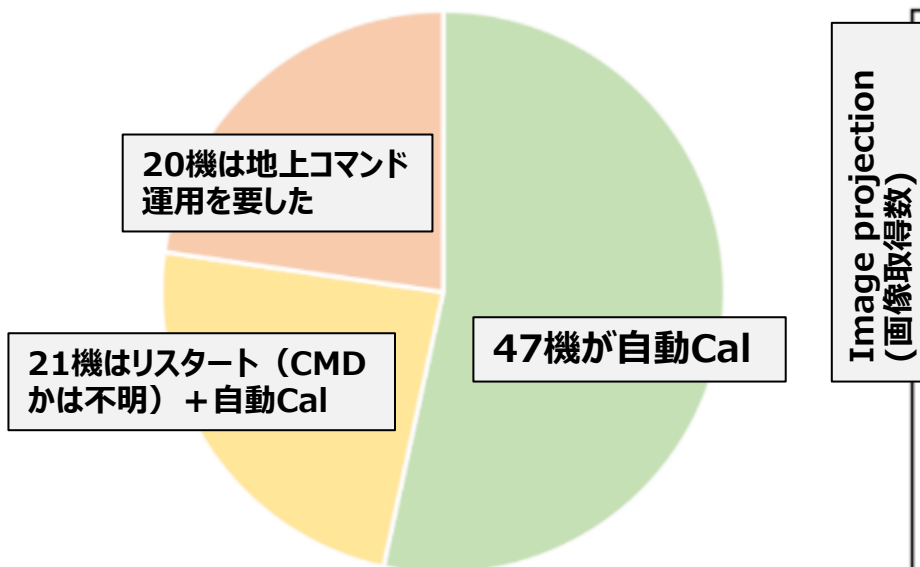
22-003-R-016

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

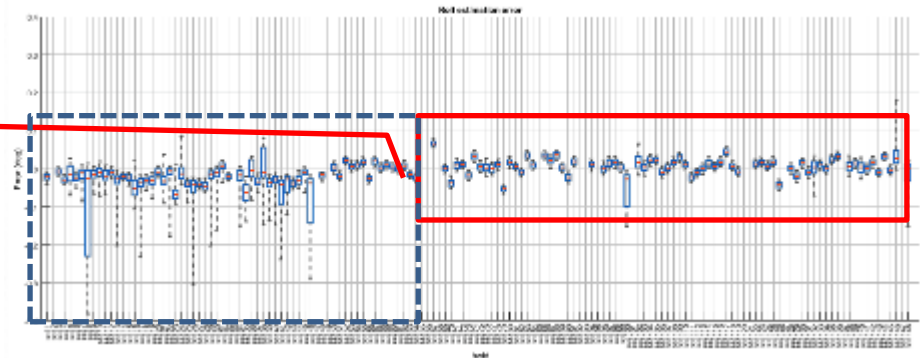
多衛星の運用オンボード自動化

<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

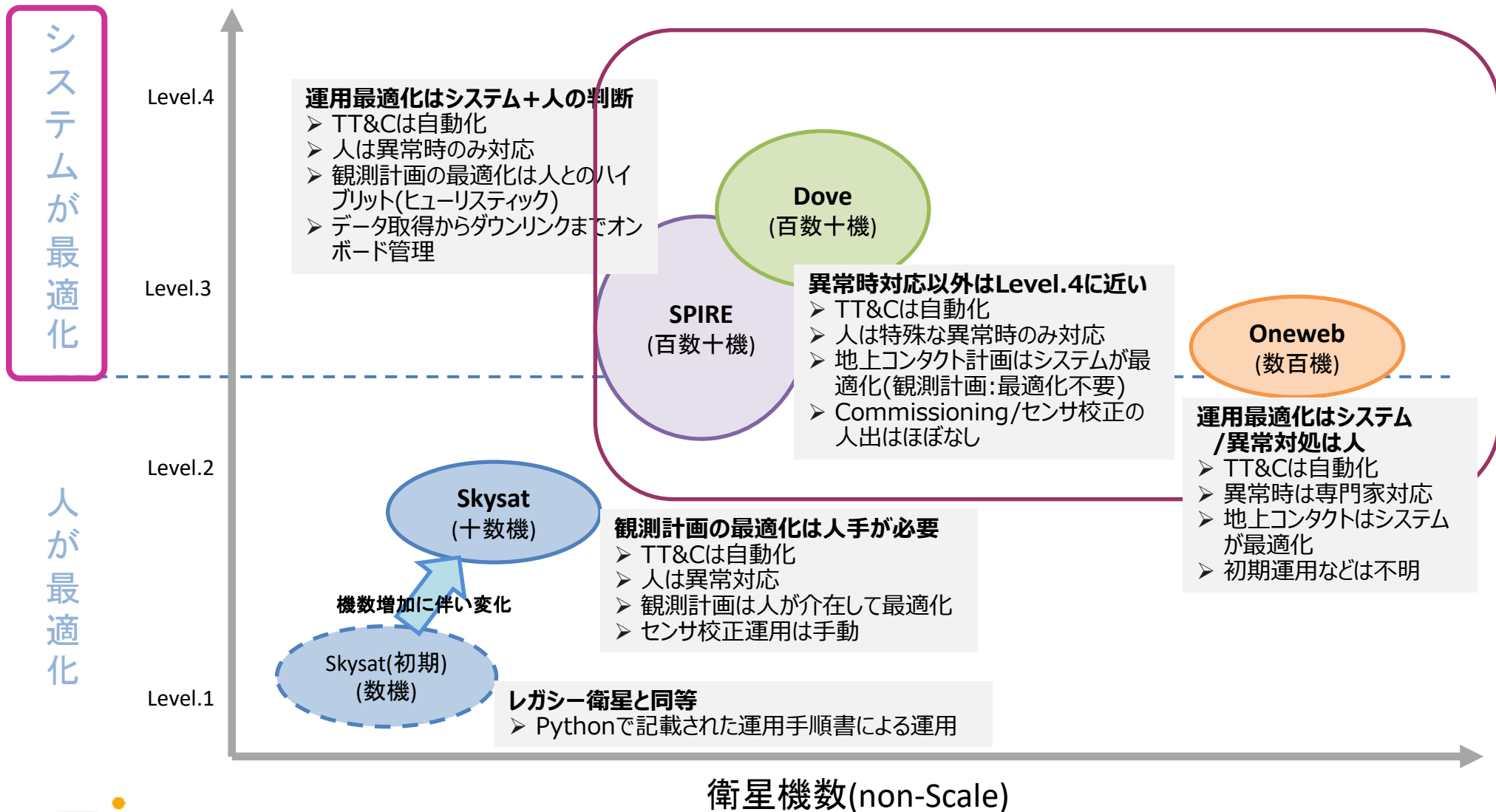


3.3 運用の効率化

3.3.3 衛星運用の効率化技術

22-003-R-016

【コンステレイターの運用省力化レベル】



3.3 運用の効率化

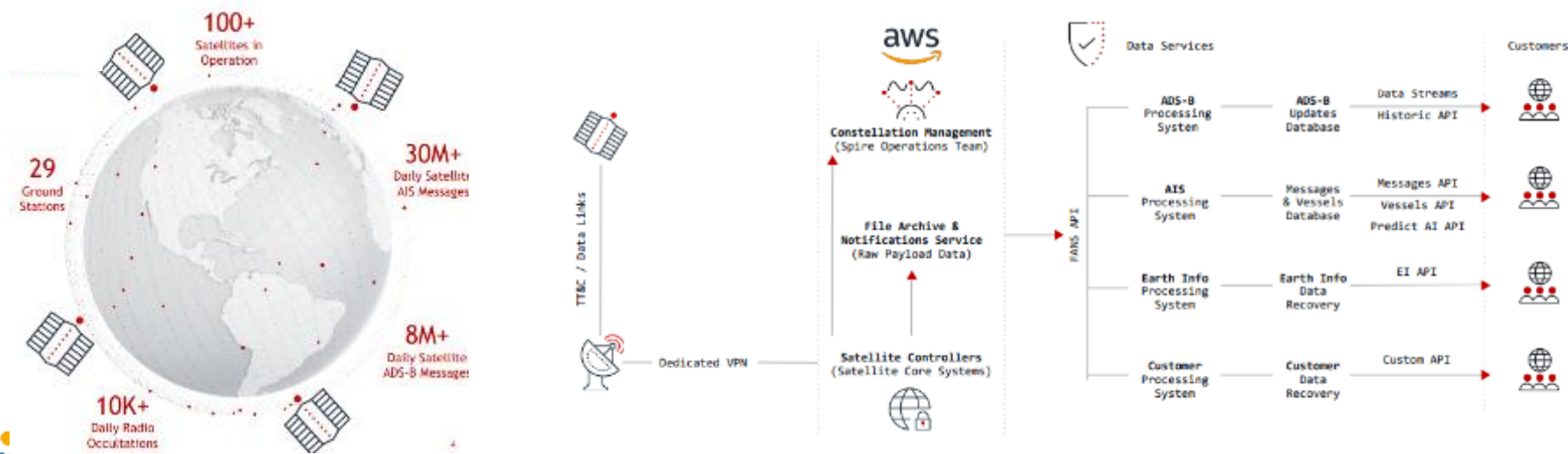
3.3.3 衛星運用の効率化技術

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)でを用いて実装。**

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>◆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。</p> <p>◆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。</p> <p>◆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)</p>	<p><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。</p> <p><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。</p>	<p>強み 創成期から実績</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 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。 <p>弱み 多数機運用の動機</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 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。

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**。