

# 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』 中間報告書

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

(財)衛星システム技術推進機構

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

1. はじめに
2. 技術調査概要と目的
3. 衛星システム調査分析内容
  - 3.1 DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)
  - 3.2 オンボード処理技術の調査
  - 3.3 運用の効率化の調査
  - 3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャの調査
  - 3.5 推進系の調査

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

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」

### 【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. はじめに
2. 技術調査概要と目的

## 3. 衛星システム調査分析内容

### 3.1 DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)

- 3.2 オンボード処理技術の調査
- 3.3 運用の効率化の調査
- 3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャの調査
- 3.5 推進系の調査

## 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-012

### (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ーズを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。

### (調査進捗状況)

- (1) ほぼ実施。**SDS、SDRに関して静止通信、LEO通信、観測のユースケースごとに技術と動向を整理。**
- (2) 今後SDS、SDRの国内の現状を踏まえて国内外比較と、日本の宇宙産業に必要なSDS機能やキー技術进行分析する。
- (3) 衛星の大量生産に関して、**アジャイル的开发手法に関してCapella、Blacksky**を調査、またアジャイル的手法ではないが、**米国宇宙軍(USSF)のSDA(庁)**が進めるNDSAプログラムの二本柱の一つと定義する衛星群の**Spiral開発手法**を調査。
- (4) 以上の結果をもとに、**国内産業でのSDSの方向性のヒントや設計製造能力の強み弱み**进行分析する。

### (Executive Summary)

(1) SDS・SDRの状況や定義、機能性能や将来動向

- 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。
- **すなわち観測衛星（コンステレーション）におけるSDSが調査分析のキーと考えている(ASTEC)。**

(2) 今後、国内外比較と開発のロングリストを整理。

# 3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

## 通信・製造大手のSDSに対する見解

22-003-R-012

### 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： <b>Spire GlobalがSDSと称したのが最初</b> 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、 <b>自動的にSpireサーバーへのデータ送信を開始</b> 。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 <b>EutelsatはDBFと通信系計算機によるフレキシブルペイロード</b> 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： <b>イリジウム</b> は、TASによって製造された <b>75個のIridium第二世代</b> 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。	イリジウム
4	2019年3月： <b>ロッキードマーティン</b> 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、 <b>NDSAのTransportレーヤのインテグレータ参入を果たした</b> 。	小型 コンステ
5	2019年5月： <b>エアバス</b> は2019年5月にインマルサットと契約を結び、次世代の静止Kaバンド衛星である <b>インマルサットGX7、8、9</b> の3衛星を受注。 <b>3衛星はADSの最新SDSであるOneSat</b> （3機同時打上可能）の初号機。その後 <b>Intelsat、Optus、スカパからも受注</b>	静止通信 ≒SDR
6	2019年9月： <b>ボーイング</b> は、 <b>SDSと称する静止702X</b> を発表。 <b>SESのO3bmPOWER（MEO）の7機受注のプログラム開発を静止へも拡張</b> 。MEO・GEOの相違はデジタルペイロードやバスでは殆どなく、 <b>MEOがDRA、GEOは反射鏡で利得を約10dB増強</b> 、覆域は±30°から±9°へ縮小。mPowerはFalconで2022年10月打ち上げ予定（2機スタック）。	静止通信 ≒SDR
7	2021年1月： <b>Intelsatは、Airbusと2機の静止Onesat契約を実施</b> 、2023年までに納入。OnesatはInmarに3機、スカパーJSATに1機、Optusに1機、計7機のBacklog。	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)」

最新公開情報及びSmallSat.Conference 2022 でのヒアリング 22-003-R-012

<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では、後述するように数Gbpsの観測データ伝送やテレコマ送受信においてSDR送受信機は、標準機器として市場に数種出ている。
- 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週間で衛星にSWをLoadして対処とある。
- [ASTEC] 上記詳細は不明なるも、ジャミングは衛星受信系へではなくユーザターミナル受信系へが一般的 (容易) なので、衛星側とユーザ端末の変復調方式を都度変更したり (例えば多値偏重から秘匿スペクトラム拡散等へ)、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する等をSW変更で行ったり、ハード的には端末のLNA破壊を防ぐためにアテネータを追加する等、耐ジャミング強化と考えている。
- その対策の早さとSDSによる実装の自由度が印象的。
- なお、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。

### SDS (Software Defined Satellite)

#### 【③ 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なのである。
- 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**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/SDRの調査)」

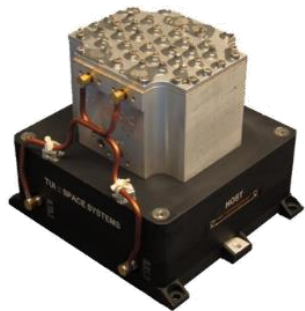
## SDR標準製品の一例

22-003-R-012

### Ththers 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 (?)


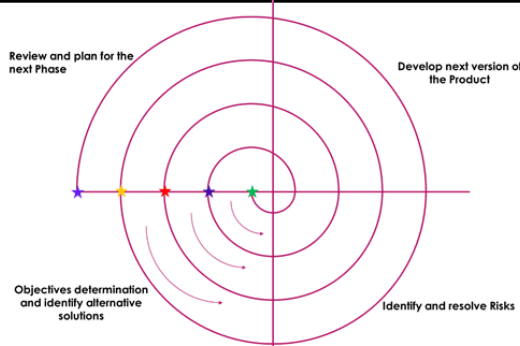
## 3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査 (SDS/SDPの調査)」

### アジャイル的手法に関する調査

# 3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDPの調査)」

## アジャイル的手法に関する調査

22-003-R-012

Agile モデル	Spiral モデル
<p>アジャイル的開発の大原則は<b>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。</b></p> 	<p>スパイラル開発の大原則は、<b>リスクハンドリングとテイク。</b></p>  <div data-bbox="839 385 1326 564" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><a href="https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering-comparison-between-agile-model-and-other-models/">https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering-comparison-between-agile-model-and-other-models/</a>  <a href="https://digitalvarrys.com/agile-vs-waterfall-vs-spiral/">https://digitalvarrys.com/agile-vs-waterfall-vs-spiral/</a></p> </div>
<p>アジャイル的開発では、各タイムラインイベント後に<b>顧客にインクリメントVersionを提供することに重点</b>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>スパイラル開発では、主に様々な種類の<b>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。</b></p>
<p>アジャイル的開発では、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。</p>	<p>スパイラル開発は、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>アジャイル的開発の成果は、基本的に文書に依存しない。</p>	<p>スパイラル開発には、Waterfall型ほどではないが適切な文書が必要。</p>

上記ソフトウェア産業での比較を**衛星に適用すると下記の通り。**

- 従来の単機ミッションの中大型衛星においては、予備がないこと・高額であることからユーザーニーズの収集・分析、システム要件への落とし込み⇒システム仕様⇒サブシステムへの落とし込みは、**ほぼ直線的かつ連続的なアプローチであるWaterfall型乃至は小型でも1~2回程度のSpiral型で行われてきた（WaterfallもしくはSpiral）。**
- 一方衛星コンステレーションの整備では、**衛星バッチを継続的に軌道上配備する必要性**があり、同時にこの衛星バッチ(世代)ごとにその時のマーケットニーズを反映することで、「**最新の製品や技術の投入**」と「**マーケットニーズの反映**」を早いサイクルで回す事が**結果的に可能になった。これが第〇世代というコンステレーションプログラムに共通した開発手法・整備手法になっている（Agile）。**

# 3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)」

Spiral手法に関する調査 (参考・米国SDA庁)

22-003-R-012

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」

# 3.1 「DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDPの調査)」

Spiral手法に関する調査 (参考・米国SDA庁)

22-003-R-012

## 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)

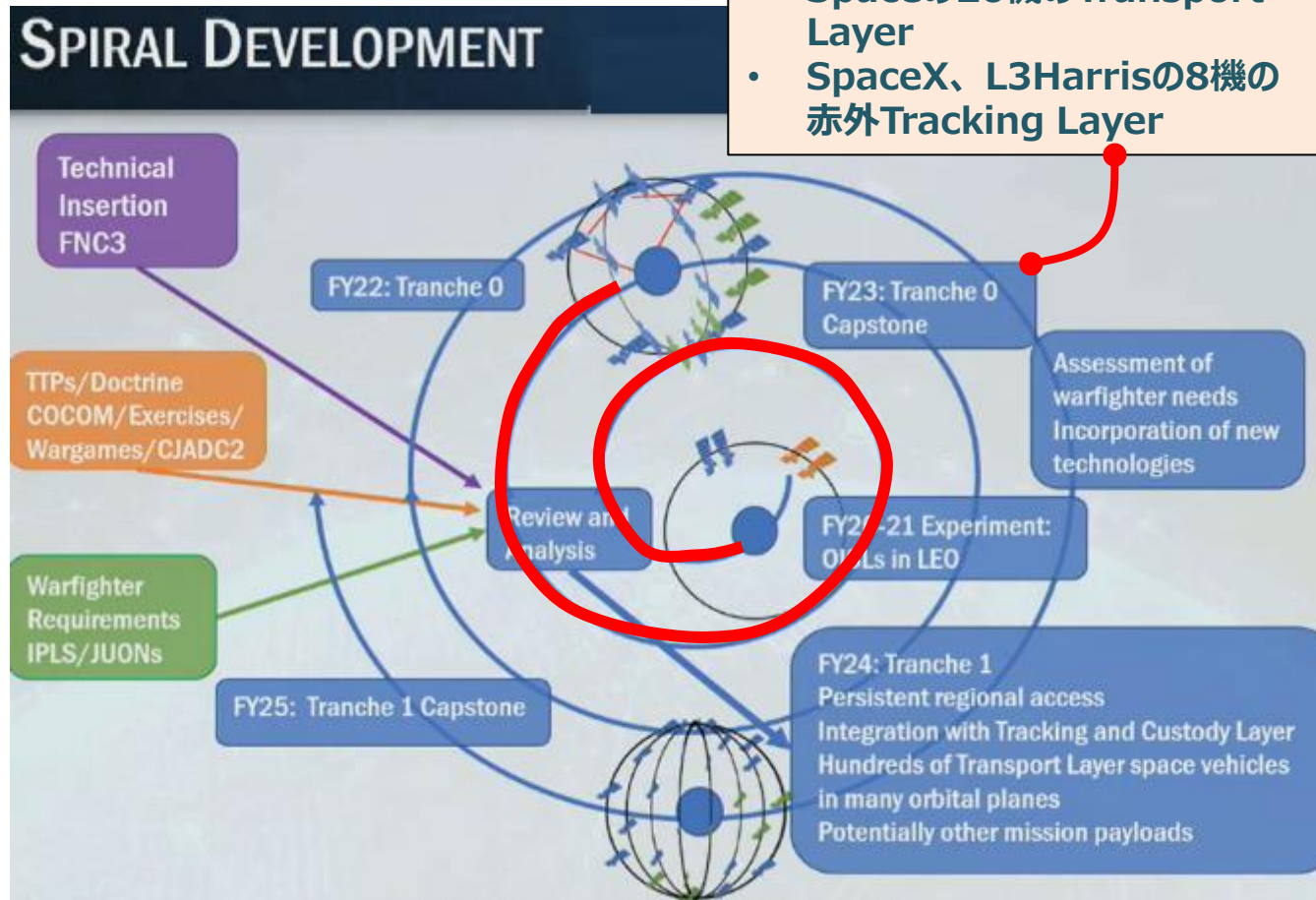
壮大なミッションコンセプトを多数の衛星に分散し全部で満たすことを考える。

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**



### 中間報告を踏まえ、最終報告に向けた重要分析項目

#### 1. 今回整理した「ユースケースごとのSDS整理 p16」の観測SDSに関する深堀り

- SDS機能を利用した衛星コンステレーション（観測データ伝送機能含む）や、国内外宇宙SDSマーケットシェア獲得のために行うべき事項を事業や技術の観点で整理する。静止通信・LEO観測を中心。

#### 2. Agile的衛星開発とSpiral開発に関して。

- 「Agile的衛星開発」は、カスタマーニーズを開発中のプログラムへタイムリーに反映するという事業目的があり、マーケットプログラムに適しているが、反面情報入手は限られる。「Spiral開発」は、固定的な仕様による開発リスクを回避したり、そのための数年ごとのState of artをハードウェアに反映したいという意図で、政府系プログラムに適すると考えている。
- 上記の観点から、最新民生技術の反映と開発リスクの低減のために、ある程度情報の入手可能なSDAプログラムのSpiral開発に焦点を当て、更に深堀りする。



1. はじめに
2. 技術調査概要と目的

## 3. 報告する調査分析内容

3.1 DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)

### 3.2 オンボード処理技術の調査

- 3.3 運用の効率化の調査
- 3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャの調査
- 3.5 推進系の調査

### (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。

### (エグゼクティブサマリ)

(1) オンボード処理に関してSmallSat Conference、Satellite Innovationでの議論・ヒアリングやESAのOBDH (Onboard Data Handling Workshop第二回) での情報を収集し整理した。**多くの企業・機関の試みが、産業用最先端でかつある程度放射線耐性の評価が定まったXILINX(AMD)社のFPGA(ARMコア)等のマルチ処理を、どうSWと独自の周辺回路で耐放射線対処するかとその上で動くアプリケーションに競争領域が移行しつつある。** また宇宙用デバイスの開発 (CPU・FPGA) や、この宇宙用で産業用を監視したりFDIR機能を宇宙用に集約するハイブリッド方式の開発も多くみられる (欧州) 。ほぼ完了している。

(2) **観測衛星内におけるエッジ処理 (画像化・抽出・分析・情報化・伝送圧縮)** に関して最新事例を調査し整理を開始継続した。今後本分析を踏まえて、将来予測を実施するとともに、**その実現に必要なキー技術や課題等を整理する計画**である。各社即時性・再訪性・情報付加価値化・地上ITアセット活用を目指している。

(3) **SaaSに近い**事業を始めているSpire社、ユーザのアプリケーション開発を想定してハード提供を進めている新興のKP LABS、Unibap等の動向や (1)、(2) の基盤となる高性能計算機・デバイス等の最新技術動向 (大手のAirbus、TAS、SEAKRやRamon) を調査し整理した。軌道上クラウドサーバ等の新しい事業や技術も一部調査を実施。**大型観測衛星も含めて観測衛星全般のSaaS的なトレンドの深堀りも試みる。**

## 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-012

#### 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）

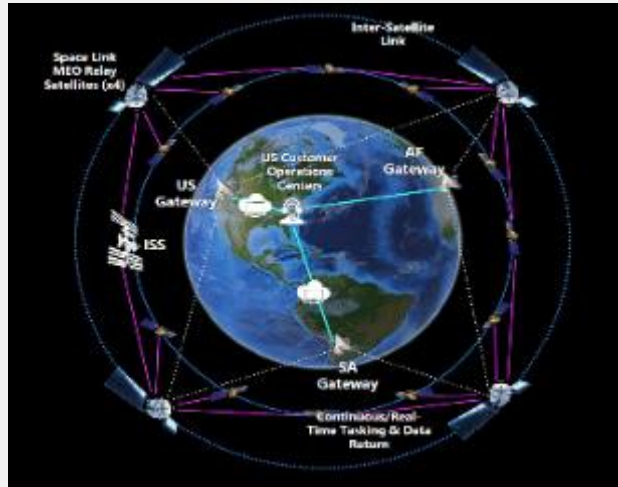
左記の例では212台を0.702 sとあり、かなり早い。

#### 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-012



**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】

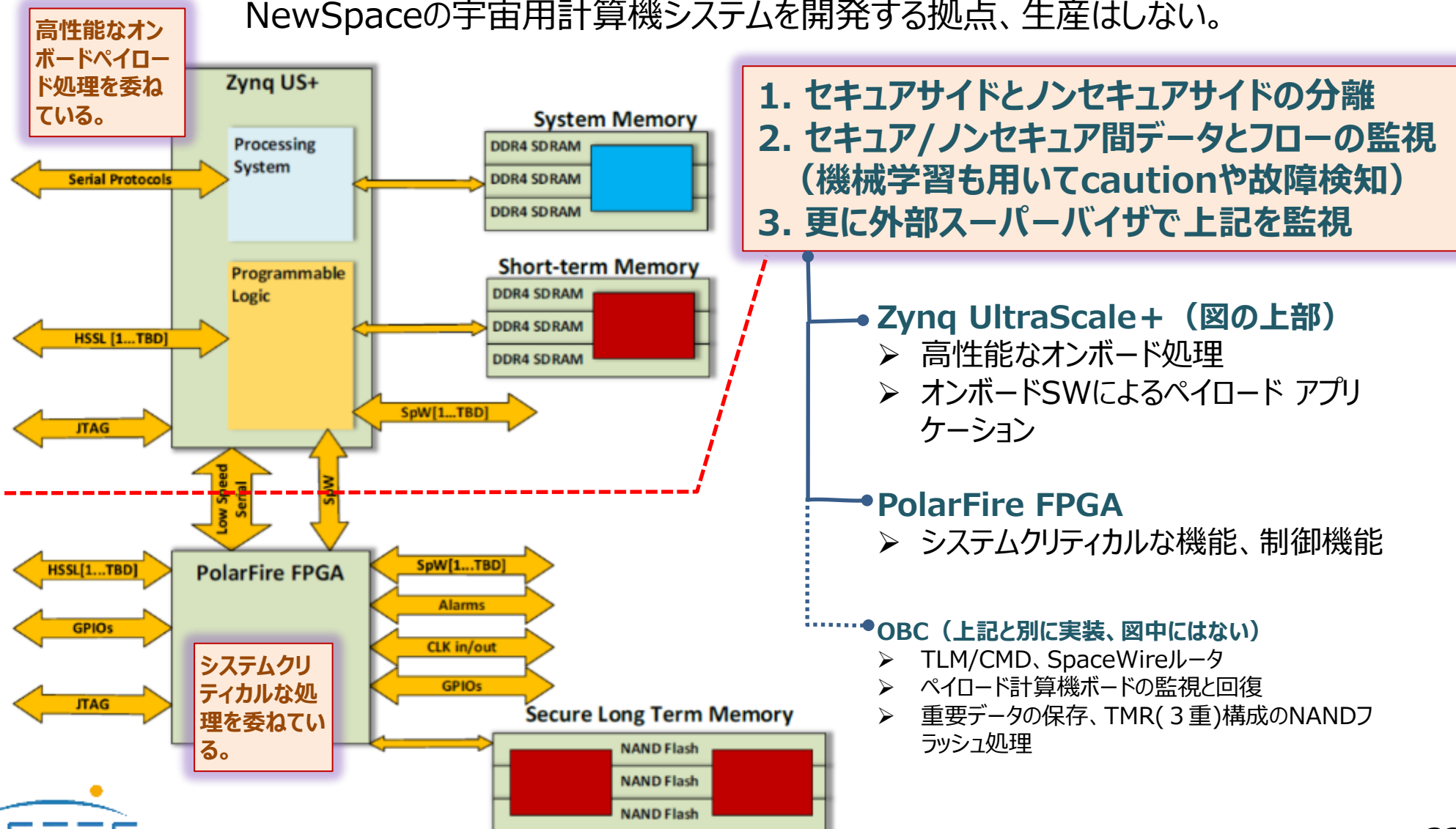
プログラム名	軌・事業構想	衛星間タイプ
① Spacelink社宇宙サーバ 観測データの宇宙サーバ・中継	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ MEOコンステ</li> <li>➢ 顧客のLEO観測データを集め、処理・地上局へ中継</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ RF ISL (Ka帯) および</li> <li>➢ Mynaric社製光ISL</li> <li>➢ Blue marble社製光ISL</li> </ul>
② WarpSpace社 観測データの宇宙サーバ・中継	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ MEOコンステ</li> <li>➢ 顧客のLEO観測データを集め、処理・地上局へ中継</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 光ISL</li> </ul>
③ Inmarsat + 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"> <li>➢ GEO 既存商用衛星の新規サービス</li> <li>➢ 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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ Lバンド低速RF</li> </ul>

## 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-012

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 -SEAKR社-

22-003-R-012



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/>

## 中間報告を踏まえ、最終報告に向けた重要分析項目

### 1. 観測・通信のSaaSに関して

日本としてのSaaS的な取り組みを整理する。海外例をもう少し深堀り。

### 2. オンボード処理に関して

産業用デバイス、特にもともと放射線耐性がある程度定評のあるCPU・GPUを統合したMPSoCで、産業用と同等機能を衛星で実現することが大きなトレンドになっている。各社・各機関で放射線耐性をどう実現するかがIPとして重要になっており、世界は多くの組織で協力・競争を行っている。

この状況を踏まえて、「スピード感＋環境の揃った産業用部品の活用」という事業側面と「部品安全保障的な考え」との両面から日本としてどのようなアプローチが必要かを一案を整理する。



1. はじめに
2. 技術調査概要と目的

## 3. 報告する調査分析内容

3.1 DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)

3.2 オンボード処理技術の調査

### 3.3 運用の効率化の調査

3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャの調査

3.5 推進系の調査

### (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る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。

### 1) 100以上の衛星群を有する観測衛星の運用効率化

代表例をもとにSummary

Planet社（創業以来462機の打ち上げ、190機の衛星を運用中）の省力化・自律化

1. SkySat、Planetなどのコンステレーションでは、如何に運用を省力化するかがコスト上非常に重要な課題
2. Planet社は実際の運用を進める中で、特にチェックアウトの省力化を進展。
3. 衛星の健全性の確認とトラブルシュートに運用の中心
4. SkySatは高分解能の写真を撮る場所を決めて命令するタスキングが必要
5. 衛星の自律的運用を進め、衛星数が増えても人手を減らすことに注力
6. 一方観測運用の自動化は撮像対象の選定はまだオンボード処理的にも今後の課題の状況。3.2項の進展にも依存する状況。

# 3.3 運用の効率化

## 1) Skysat (Planet社)

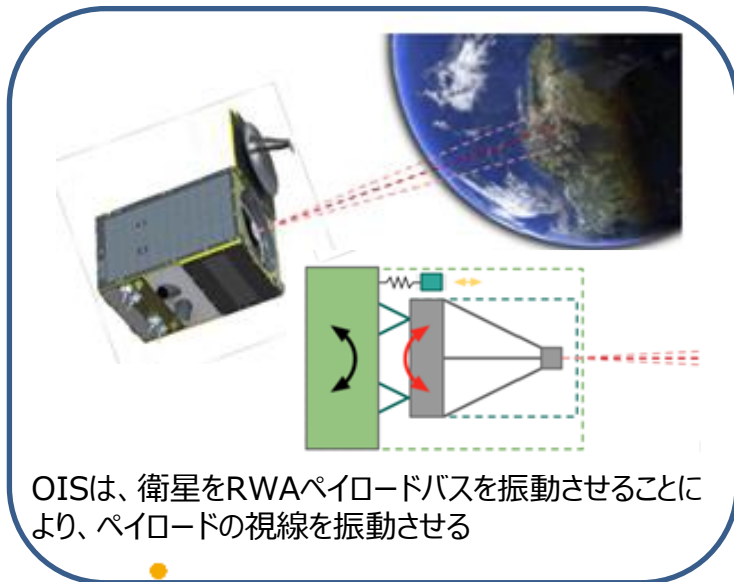
22-003-R-012

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

## 2) Dove (Planet社)

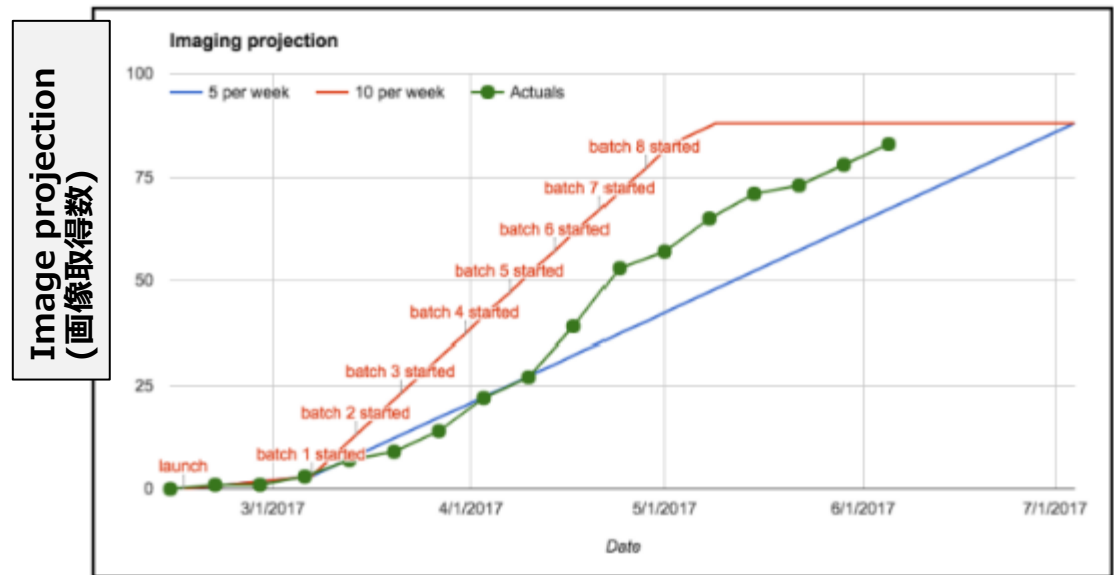
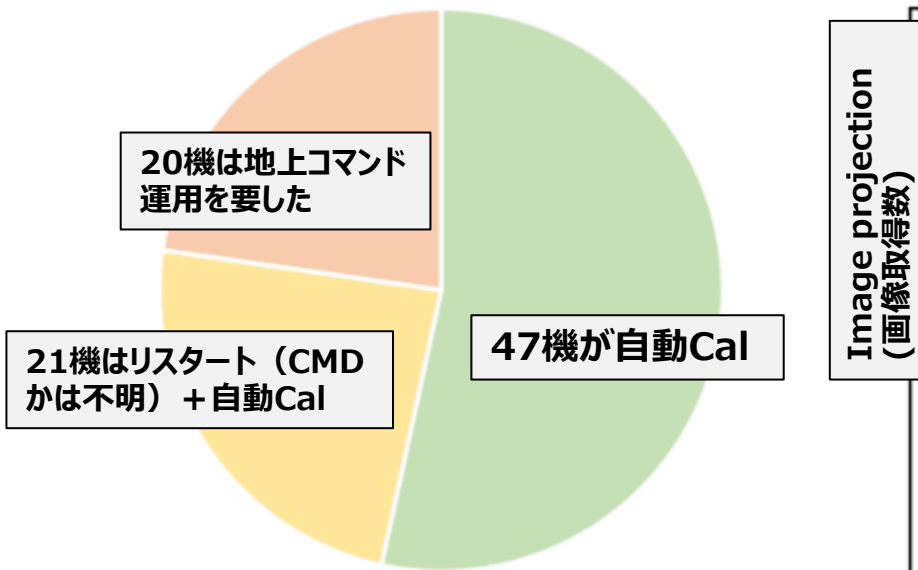
22-003-R-012

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>



## 3.2 オンボード技術の調査

### 3) Dove (Planet社)

22-003-R-012

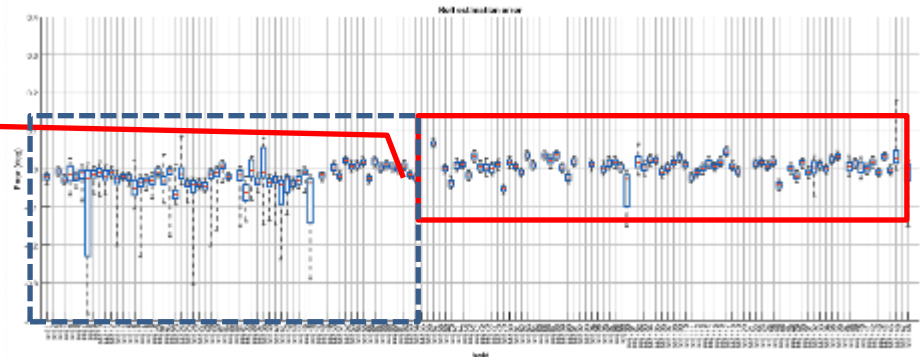
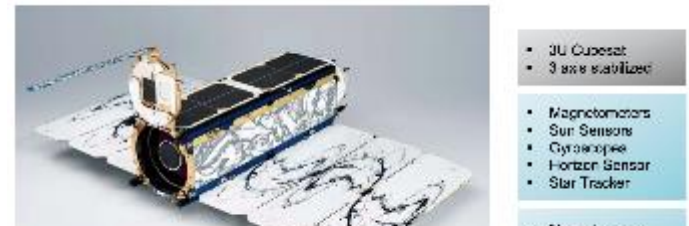
#### 多衛星の運用オンボード自動化

<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



## 2) 軌道制御の自動化

### 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 $\Delta V$ 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 $\Delta V$ 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回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 $\Delta V$ 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。**



#### 中間報告を踏まえ、最終報告に向けた重要分析項目

1. 3.1項SDS、3.2項オンボード処理の今後のさらなる進展を条件とした上で、**求められる多数機の効率的運用やそのためのキー技術を整理する。**

1. はじめに
2. 技術調査概要と目的

## 3. 報告する調査分析内容

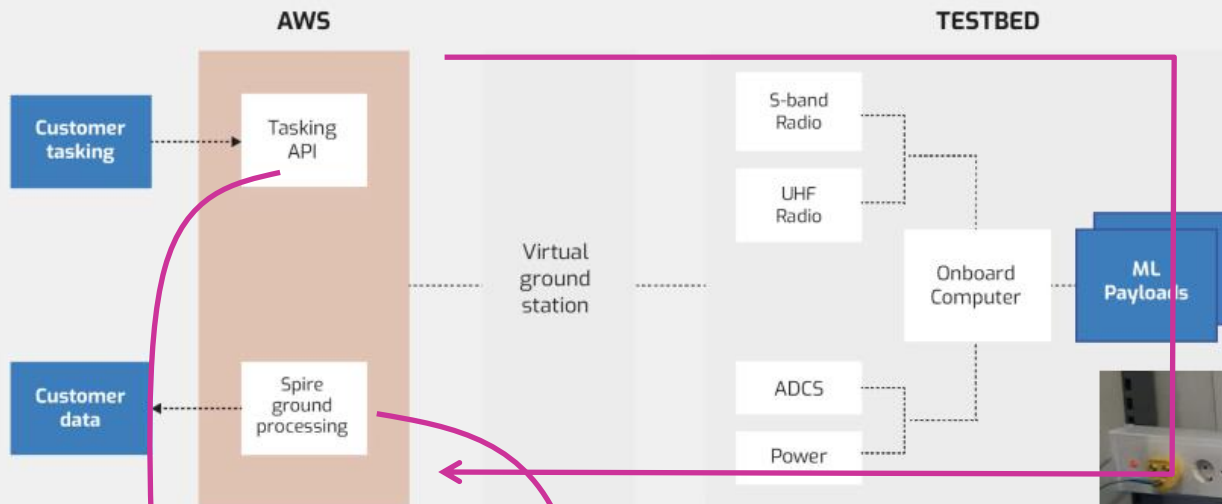
- 3.1 DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)
- 3.2 オンボード処理技術の調査
- 3.3 運用の効率化の調査
- 3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャの調査**
- 3.5 推進系の調査

### (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。
- これらのブレイクダウンを受けて、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を最終報告までに行う予定。

# 3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャ アプリケーションの開発と軌道上実証例



## カスタマアプリケーションの軌道上実証方式

- Tasking API を用いて、必要なデータファイルをアップロードする
- tasking/uploads API のエンドポイントを利用し、アップロードが完了するまで待つ
- Tasking API を用いて、ペイロード処理ウィンドウをスケジューリング。
- ペイロードの処理ウィンドウが完了したら、データバケットをダウンロードする。
- 受信したメッセージの内容やメタデータを、参考データと比較



### 中間報告を踏まえ、最終報告に向けた重要分析項目

1. 従来の単体衛星ごと乃至は機種共通のSWアーキテクチャは日本も資産が十分あると認識。
  - 一方、3.1、3.2で整理したミッション系アプリケーションの開発や構成の海外状況を整理し、ソフトウェアアーキテクチャやAPIの最新状況を整理する。
  - Spireの例は一例。
  - AWS等のクラウド事業者のソフトウェアアーキテクチャへの関与も調査分析。

1. はじめに
2. 技術調査概要と目的

## 3. 報告する調査分析内容

- 3.1 DXによる宇宙利用分野における調査(SDS/SDRの調査)
- 3.2 オンボード処理技術の調査
- 3.3 運用の効率化の調査
- 3.4 衛星ソフトウェアアーキテクチャの調査

## 3.5 推進系の調査

### (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。

### (Executive Summary)

(1) 静止衛星は、搭載ミッションに応じて最適な推進系が選択され、**15kW以上の大電力衛星ではオール電化（Xeホールスラスタが主）が進む**一方、ミッション/電力規模に応じて従来の化学推進が採用されるケースもある。

(2) 低軌道コンステ衛星/中軌道衛星/静止衛星ともに、**ロケットにより分離された後、運用軌道まで高効率な電気推進（Xe/Krホールスラスタ）で遷移させるケースが主体的になっており**、低軌道では燃料もXeに比べて比較的安価なKrの採用も見られる。**電源であるPPUは特にGTOでは部品の耐放射線性の向上を図る必要がある。**

(3) 低軌道衛星は、直接ロケットで軌道投入させるケースではヒドラジン系（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研究/開発は進むが**、適用は主は小型/マイクロ衛星での適用が主。この傾向は今後も続くものと推測されるが、寿命/コストの改善が必要。



### (Executive Summary)

(4) **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型の低コストモジュールへの標準化**が進んでおり、いくつかのパッケージ製品が主流となっている。

(5) 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）。

(5) 今後日本の推進系製品競争力の強み弱みを分析する予定である。

### 3.5.1 衛星推進系の調査 ①化学推進系

#### ①化学推進（グリーン[有害性の少ない推薬]や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
- ✓ コールドグリーンは国内、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の継続すると思料


	国内	米国/欧州	備考
グリーン	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>IA</b> : 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、従来より有害ではないHAN系※を推薬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)</li> <li>✓ <b>MHI</b> : 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。 ※HAN系(AN(Ammonium Nitrate), 水, メタノール)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>AEROJET</b> : 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AF-M315E※が採用。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。 ※HAN, HEHN, 水</li> <li>✓ <b>Bradford(ECAPS)</b> : ADN(Ammonium Dinitramide)にメタノール、アンモニアを混合させたLMP-103Sが燃料として採用</li> </ul>	<p><a href="https://www.ihi.co.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/1d230a571d86f7ff8cec9761e90517ca.pdf">https://www.ihi.co.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/1d230a571d86f7ff8cec9761e90517ca.pdf</a></p> <p><a href="https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/561/561050.pdf">https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/561/561050.pdf</a></p>
モジュールパッケージ化1液エンジン	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>IA</b> : 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の採用が可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>AEROJET</b> : 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。</li> <li>✓ <b>Bradford(ECAPS)</b> : AND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</li> <li>✓ <b>Vacco</b> : 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対のスラストが一体化。連続+パルスによるΔVと3軸姿勢を実現 (ASTEC分析)。</li> </ul>	<p><a href="https://spacenews.com/green-propellant-successfully-demonstrated-on-nasa-mission/">https://spacenews.com/green-propellant-successfully-demonstrated-on-nasa-mission/</a></p> <p><a href="https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140012587/downloads/20140012587.pdf">https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140012587/downloads/20140012587.pdf</a></p> <p><a href="https://www.ihi.co.jp/ia/products/space/pinot/pinot-g/jp/assets/pdf/Pinot-G_leaflet_JP_Rev5.pdf">https://www.ihi.co.jp/ia/products/space/pinot/pinot-g/jp/assets/pdf/Pinot-G_leaflet_JP_Rev5.pdf</a></p>



### 3.5.1 衛星推進系の調査 ①化学推進系

- ✓ 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ト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。超低推力スラストで十分なCubeSAT等での採用が候補

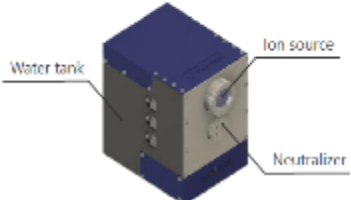
	国内	米国/欧州	備考
<p>水を推進剤とする方式</p> <p>水を水蒸気として噴射する方式（レジストジェット）や水蒸気をプラズマ化して噴射する方式（水イオン）などがある。</p> <p>推力が小さい（サブmN級）ことと、水はエネルギー変換効率が原理的に低いことが課題であり、CubeSat向けと考えられる。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Pale Blue</b> : 水を推進剤としたレジストジェットはCubeSATにて軌道上実証あり。現在は水レジストジェットスラスト及び水イオンスラストの二種類の推進系を一つのコンポーネントに統合した超小型統合推進システムを開発中。革新的衛星技術実証3号機向けに開発し、実証予定であった。8月の「Small Satellite Conference 2022」で技術発表あり。 <b>東京大</b> : 水を推進剤としたホールスラスト研究を実施。100 kg級小型衛星への搭載を目指す。</li> <li>✓ <b>大工大</b> : 水を推進剤としたDCアークジェット研究を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Tethers Unlimited</b>: 水の電気分解により、H<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>の化学反応スラスト。軌道実証あり。Ispは約200s。</li> </ul>	<p><a href="https://pale-blue.co.jp/services.html">https://pale-blue.co.jp/services.html</a></p> <p><a href="https://www.researchgate.net/publication/326161542_Fundamental_Ground_Experiment_of_a_Water_Resistojet_Propulsion_System_AQUARI_US_Installed_on_a_6U_CubeSat_EQ_UULEUS">https://www.researchgate.net/publication/326161542_Fundamental_Ground_Experiment_of_a_Water_Resistojet_Propulsion_System_AQUARI_US_Installed_on_a_6U_CubeSat_EQ_UULEUS</a></p> <p><a href="https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1769&amp;context=smallsat">https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1769&amp;context=smallsat</a></p> <p><a href="https://jaxa.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&amp;item_id=15904&amp;item_no=1&amp;attribute_id=31&amp;file_no=1">https://jaxa.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&amp;item_id=15904&amp;item_no=1&amp;attribute_id=31&amp;file_no=1</a></p>

**Water Ion Thruster (single unit)** 

	Current	Next step (end of 2021)	Future (2022)
Thrust range	136 – 306 μN	152 – 460 μN	183 – 554 μN
Specific impulse	500 – 868 s	560 – 1452 s	931 – 1887 s
Power	30 – 60 W	22 – 62 W	25 – 59 W
Thrust to power ratio	4.6 – 5.1 μN/W	6.9 – 7.4 μN/W	7.3 – 9.4 μN/W
Total impulse	981 – 3323 Ns	1088 – 2848 Ns	3196 – 6822 Ns

Volume w/o tank	0.7U
Dry mass w/o tank	1.6 kg
Command Interface	UART, RS422
Storage temperature	0 – 68 °C
Operating temperature	4 – 49 °C
Supply voltage	5 V and 12 V



### 3.5.1 衛星推進系の調査 ②電気推進系

22-003-R-012

#### 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[Magnetogradiant 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"> <li>✓ <b>IA</b> : 技術試験衛星向けとして4-6kWクラスのスラスト開発中</li> <li>✓ <b>MELCO</b> : 上記IA製ホールスラスト用電源4-6kWクラスを開発中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Aerojet (米)</b> : 2~4kW級のXR-5は開発済み、フライト実績あり(6衛星)</li> <li>✓ <b>Safran (仏)</b> : 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</li> <li>✓ <b>Fakel (露)</b> : 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</li> <li>✓ <b>Busek (米国)</b> : 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</li> <li>✓ <b>ApolloFusion (米)</b> : 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。Oneweb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)</li> </ul>	<p>Fakel: <a href="https://sets.space/development-status-of-the-st-40-hall-thruster/">https://sets.space/development-status-of-the-st-40-hall-thruster/</a></p> <p>Busek: <a href="http://electricrocket.org/2019/926.pdf">http://electricrocket.org/2019/926.pdf</a></p> <p>Busek: <a href="https://spacenews.com/busek-expansion/">https://spacenews.com/busek-expansion/</a></p> <p>NASA: <a href="https://core.ac.uk/download/pdf/42696261.pdf">https://core.ac.uk/download/pdf/42696261.pdf</a></p> <p><a href="https://satsearch.co/products/apollo-fusion-apollo-constellation-engine-ace-krypton-propulsion-system">https://satsearch.co/products/apollo-fusion-apollo-constellation-engine-ace-krypton-propulsion-system</a></p> <p><a href="https://www.teslarati.com/spacex-reveals-starlink-satellite-details-launch-time/">https://www.teslarati.com/spacex-reveals-starlink-satellite-details-launch-time/</a></p> <p><a href="https://lilibots.blogspot.com/2020/04/starlink-satellite-dimension-estimates.html">https://lilibots.blogspot.com/2020/04/starlink-satellite-dimension-estimates.html</a></p> <p><a href="https://spacenews.com/astra-to-sell-electric-thrusters-to-airbus-oneweb-satellites/">https://spacenews.com/astra-to-sell-electric-thrusters-to-airbus-oneweb-satellites/</a></p>

### 3.5.1 衛星推進系の調査

22-003-R-012

- ✓ 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"> <li>✓ <b>東京大</b>：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</li> <li>✓ <b>JAXA/九州大</b>：昇華性推進剤を用いたイオンエンジン研究を実施</li> <li>✓ <b>JAXA/MELCO</b>：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採用。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Busek (米国)</b>：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。</li> <li>✓ <b>ThrustMe (仏)</b>：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。</li> <li>✓ <b>Boeing (米)</b>：XIPSの名称で静止衛星の実績豊富。</li> </ul>	<p><b>Busek</b>:<a href="https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3471&amp;context=smallsat&amp;httpsredir=1&amp;referer=">https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3471&amp;context=smallsat&amp;httpsredir=1&amp;referer=</a></p> <p><b>ThrustMe</b>:<a href="https://www.nature.com/articles/s41586-021-04015-y.pdf">https://www.nature.com/articles/s41586-021-04015-y.pdf</a></p> <p><b>東大</b>：<a href="http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/koizumi/html/htdocs/?page_id=16">http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/koizumi/html/htdocs/?page_id=16</a></p>
エレクトロスプレー	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>京都大/横浜国立大</b>：共同で数10kg以下級の超小型人工衛星向け。小型化が可能であることが特徴。電力は1.5 W, 微少推力, 比推力1150 s程度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Busek (米国)</b>：電力は最大24 W、推力は&lt;1uN-150uN、比推力: 850 seconds - 2300 secondsを開発中。超低推力を生むことができるため、衛星のポインティング精度向上が可能</li> </ul>	<p><b>Busek</b>: <a href="https://www.busek.com/electrospray-thrusters">https://www.busek.com/electrospray-thrusters</a></p> <p><b>京都大/横浜国立大</b>: <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/90/5/90_298/_pdf">https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/90/5/90_298/_pdf</a></p>
MEP電気推進	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 情報なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <b>Ball (米国)</b>：USAFの資金を得て、StartUpと組んでMEP (カプス場タイプ) を開発</li> </ul>	

## 3.5.1 衛星推進系の調査

22-003-R-012

### 3.5.1.2 サプライチェーンの課題

- ✓ 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、最近は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る模様。EUからの電気推進の調達性が悪化している旨情報あり
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。特徴は推力は低い、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、ノリカ費用抑制が課題

※脚注（参考） 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

22-003-R-012

### 3.5.1.3 衛星サイズや機数による推進系の特徴

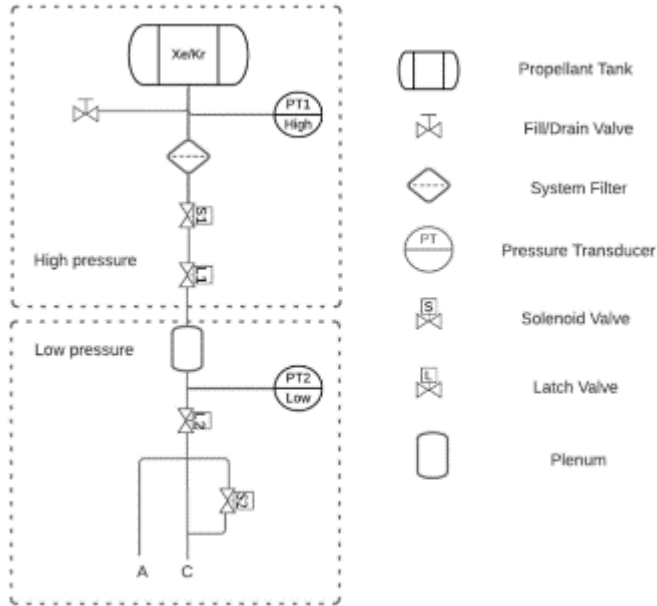
✓ 衛星のサイズ（中大型と小型）や整備機数（単独の静止等とコンステレーション）より、採用する推進系方式にどんな特徴があるか、また、その背景（機能性能・SWaP・開発難易度・コスト・運用性等）について調査した。

種類	推進系	特徴	備考
静止 (大型) >4.5ton	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eurostar-Neo (Airbus) :<b>All電化</b> (Eutelsat36D,HotBird13F/G)</li> <li>Spacebus-Neo (TAS) :<b>All電化</b> (Eutelsat10B,Eutelsat Konnect, <b>Eutelsat Konnect VHTS</b>)</li> <li>702MP+ (Boeing) :<b>All電化</b>(Viasat3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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）</li> </ul>	<p><a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/kjsass/65/9/65_274/_pdf/-char/ja">https://www.jstage.jst.go.jp/article/kjsass/65/9/65_274/_pdf/-char/ja</a></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><a href="https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/GOES-RSeriesDataBook.pdf">https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/GOES-RSeriesDataBook.pdf</a></p>
静止 (小型) <3.5kg	<ul style="list-style-type: none"> <li>Onesat (Airbus) :<b>All電化</b>(Inmarsat-7,Intelsat42/43,OPTUS-11)</li> <li>Inspire (TAS) :<b>All電化</b>(ARABSAT-7A,SES-26)</li> <li>702SP (Boeing) :<b>All電化</b>(SES-20/21)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>通信衛星はAll電化衛星が主流</li> <li>安価を求める衛星では、化学推進を採用（Nilsat301、SES22/23など）</li> </ul>	<p><a href="https://artes.esa.int/projects/onesat-platform-and-propulsion-development">https://artes.esa.int/projects/onesat-platform-and-propulsion-development</a></p> <p><a href="https://spacenews.com/arabsat-orders-first-fully-software-defined-satellite/">https://spacenews.com/arabsat-orders-first-fully-software-defined-satellite/</a></p>
中軌道	<ul style="list-style-type: none"> <li>GPS III (LM) :軌道上は一液式</li> <li>Galileo 2<sup>nd</sup> Gen (<b>Airbus/TAS</b>) :<b>All電化</b></li> <li>Globalstar3<sup>rd</sup> GEN (MDA/Rocket Lab) :不明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GPS IIIはLMのA2100をベースにヒドラジン、NTOを用いた2液推進システムで軌道上運用は一液。</li> <li>Galileo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）</li> <li>Globalstarのバス部はRocket Labが担当。ただし、推進系は不明</li> </ul>	<p><a href="https://www.airforce-technology.com/projects/gps-iii-military-satellite/">https://www.airforce-technology.com/projects/gps-iii-military-satellite/</a></p> <p><a href="https://sorabatake.jp/25631/">https://sorabatake.jp/25631/</a></p> <p><a href="https://gnss.asia/new/thales-and-airbus-to-manufacture-the-first-twelve-second-generation-galileo-satellites/">https://gnss.asia/new/thales-and-airbus-to-manufacture-the-first-twelve-second-generation-galileo-satellites/</a></p>
低軌道コンステ	<ul style="list-style-type: none"> <li>Starlink:Krホールスラスタシステム</li> <li>Oneweb:<b>Xe</b>ホールスラスタシステム</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<p><a href="https://spaceflightnow.com/2019/05/15/spacex-releases-new-details-on-starlink-satellite-design/">https://spaceflightnow.com/2019/05/15/spacex-releases-new-details-on-starlink-satellite-design/</a></p> <p><a href="https://spacenews.com/astra-to-sell-electric-thrusters-to-airbus-oneweb-satellites/">https://spacenews.com/astra-to-sell-electric-thrusters-to-airbus-oneweb-satellites/</a></p>

### 3.5.1 衛星推進系の調査

22-003-R-012

- ✓ 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



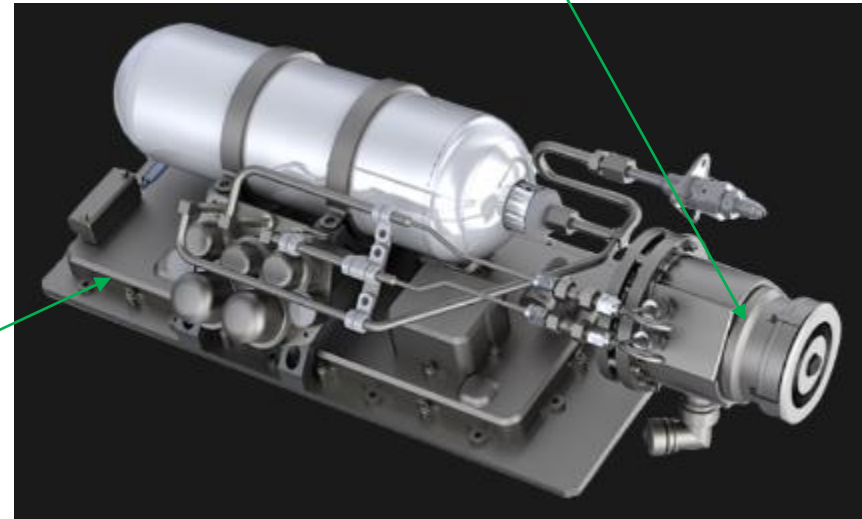
Propulsion Block Diagram



Power Processing Unit



Hall thruster



System overview



## 3.5.2 電気推進高圧電源系の調査

22-003-R-012

### 電源系調査

- ✓ 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"> <li>➤ 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</li> <li>➤ 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。</li> <li>➤ 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。</li> </ul>	<p><a href="https://astra.com/space-products/astra-spacecraft-engine/">https://astra.com/space-products/astra-spacecraft-engine/</a></p> <p><a href="https://www.cnn.co.jp/business/35183356.html">https://www.cnn.co.jp/business/35183356.html</a></p>
TAS-B (ベルギー)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 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</li> <li>➤ 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</li> <li>➤ 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</li> <li>➤ Galileo衛星向け対応として耐放射線性を向上</li> <li>➤ 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。</li> </ul>	TAS-Bへのヒアリングによる

### 3.5.3 運用軌道への軌道制御に関する推進系調査

22-003-R-012

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	Galileo 2 <sup>nd</sup> Gen : <b>All電化</b> 	<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 <b>electric propulsion</b> 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>	<p><a href="https://www.eoportal.org/satellite-missions/galileo-g2#galileo-second-generation-g2">https://www.eoportal.org/satellite-missions/galileo-g2#galileo-second-generation-g2</a></p>
	Starlink : <b>All電化</b> 	<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 <b>Hall thrusters</b>, which use electricity and <b>krypton gas</b> to generate an impulse, to maneuver in orbit, maintain altitude and guide the spacecraft back into the atmosphere at the end of their mission. 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><a href="https://spaceflightnow.com/2019/05/15/spacex-releases-new-details-on-starlink-satellite-design/">https://spaceflightnow.com/2019/05/15/spacex-releases-new-details-on-starlink-satellite-design/</a></p> <p><a href="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)">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)</a></p> <p><a href="https://www.inverse.com/innovation/spacex-starlink-satellites-solar-storm">https://www.inverse.com/innovation/spacex-starlink-satellites-solar-storm</a></p>
	Oneweb : <b>All電化</b> 	<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 <b>electric propulsion system</b>, 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>	<p><a href="https://spacenews.com/astra-to-sell-electric-thrusters-to-airbus-oneweb-satellites/">https://spacenews.com/astra-to-sell-electric-thrusters-to-airbus-oneweb-satellites/</a></p>



#### 中間報告を踏まえ、最終報告に向けた重要分析項目

衛星推進系は、軌道上作業の観点でMobilityが重要になる昨今の傾向に合わせて、海外でも重要なサブシステムとして再注目されている。

- 今回の調査では、電気推進が主流とは言え、大型も小型（コンステレーション）もミッションや軌道・取り扱い・寿命によって電気・化学・其他方式の良さを組み合わせる必要があると分析される。
- それぞれのケース（軌道[探査や重力天体含む]、ミッション）で、日本としては要素技術なのか、サブシステム、システムレベルなのか、乃至は調達なのかという視点で、保有すべき技術と産業競争力の観点を含めて整理する。
- 化学推進系と電気推進系を共通のサブシステムハードウェア構成で実現するハイブリッド方式も今後両者の調書を統合する観点で重要。
- その上で必要な開発技術のロングリストをまとめる。
- 上記のロングリストに当たっては、できるだけ時間的な実現時期を考慮する。

- 3.1、3.2のSDSやオンボード処理の上位動向の調査と整理、推進系に関してはほぼ完了したが「重要方針」に沿って最終報告作成作業を行う。
- 国内外の比較と必要技術のロングリスト（中長期的な概要リスト）を整理する。
- 3.3、3.4に関してはオンボード処理状況がほぼ整理されたため、今後詳細調査分析を今回「重要方針」に沿って進めていく予定である。



(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