

図 2.2.4.3.4-8 取り外した受光素子（左）、取り付けた受光素子（右）

計測コンフィグレーションを図2.2.4.3.4-9に、計測結果を表2.2.4.3.4-3に示す。

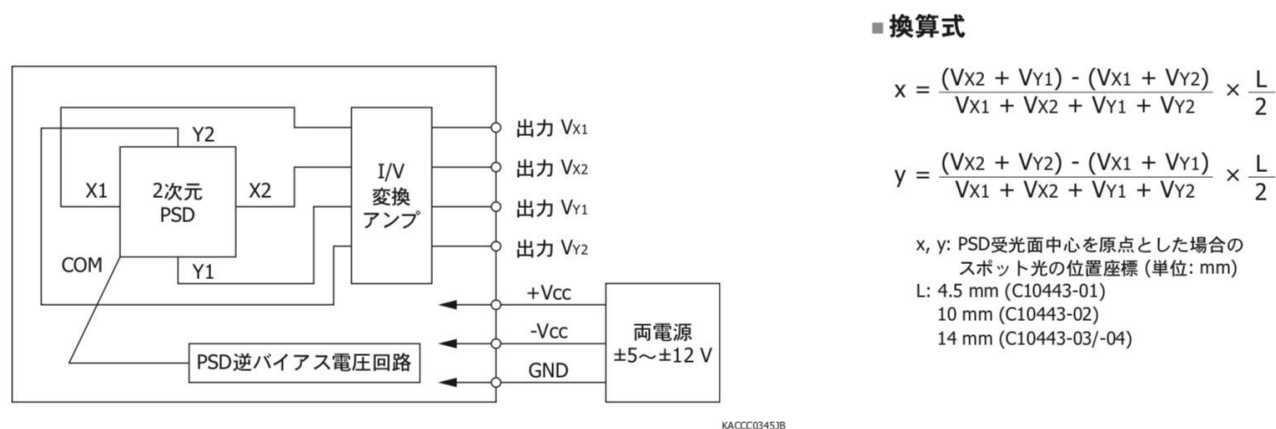


図 2.2.4.3.4-9 計測コンフィグレーション

表 2.2.4.3.4-3 計測結果

Direction	Signal Voltage				Pos		Signal Intensity	
	V_X1 (V)	V_X2 (V)	V_Y1 (V)	V_Y2 (V)	X (mm)	Y (mm)	TotalCurr (uA)	Photon (uW)
Saturation	-3.729	-3.728	-3.734	-3.735	-0.001	0.000	1492.6	2487.7
Perpendicular	-0.094	-0.084	-0.087	-0.09	-0.165	-0.089	35.5	59.2
45deg	-0.017	-0.039	-0.051	-0.014	2.194	-0.558	12.1	20.2

信号から推定された入射角度

- 垂直: 6.1 deg
- 45°: 37.7deg

確度から期待される強度変化

- 実測値:  $I_{\perp} = 59.2 \text{ uW}$ ,  $I_{45} = 20.2 \text{ uW}$
- 期待値:  $I_{45} = \cos(6.1 \pm 37.7 \text{ deg}) * 59.2 \sim 42.7 \sim 50.4 \text{ uW}$

シグナルから推定された入射角はおおよそセットアップから期待された値のとおりとなった。出力電圧も安定しており、mV オーダーまでふらつきはなく、0.1%程度の分解能は十分出せる S/N だとわかる。

一方で、斜め 45°入射時全発生電流値は、幾何学的に期待された値よりもよりもファクター2で小さい。この可能性として、(1) 入射孔の加工精度の問題（バリなど）、(2) 窓材であるシリコーン樹脂による反射の2つが考えられる。後者が無視できない場合は、やはりシリコーンによるポッティングを避けることが太陽センサとして本 PSD を利用する際に必要となるだろう。

## 2.2.4.4 ミッション系

#### 2.2.4.4.1 一眼レフカメラ

##### (1) 開封時

開封時の様子を図.2.2.4.4.1-1、2.2.4.4.1-2 に示す。



図 2.2.4.4.1-1 一眼レフカメラ開封中



図 2.2.4.4.1-2 一眼レフカメラ開封後

##### (2) 試験内容

選定した一眼レフカメラ及びレンズ一式を用いて実際に恒星の撮影を行い、画像ファイルサイズの評価を行った。

##### (3) 場所・日時

- ・場所：東京工業大学 石川台 1 号館 5 階 553 号室
- ・日時：2019 年 3 月 27 日

##### (4) 使用機器

試験に使用した機器を表 2.2.4.4.1-1、2.2.4.4.1-2 に示す。

表 2.2.4.4.1-1(ハードウェア)

名称	メーカー	型式	シリアルナンバー
カメラボディ	canon	EOS RP	03102200059
カメラレンズ	canon	EF200mmF2.8L II USM	152596
マウントアダプター	canon	コントロールリング マウントアダプター	710200533
SD カード	SanDisk	Industrial 16GB	6372DL85J0ND
三脚	Velbon	GEO N545	0186359_8
雲台	Velbon	PH-157	-
ノート PC	FUJITSU	FMVWTS17	CP687405-01
USB ケーブル	-	USB type A – type C	-

表 2.2.4.4.1-2(ソフトウェア)

名称	メーカー	型式	Ver.
カメラ制御ソフト	canon	EOS Utility	3.10.20.0

画像解析ソフト	canon	PintAide	3.0.4
---------	-------	----------	-------

# (5) 試験方法

1. 図のように試験機器一式を設置する

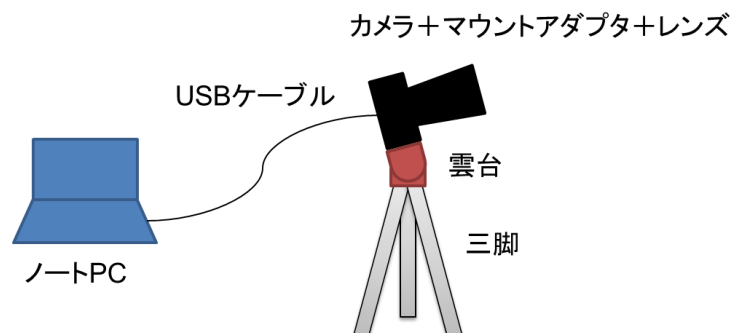


図 2.2.4.4.1-3 試験セットアップ

2. ソフトウェア「EOS Utility」を起動し、ライブビューモードを起動する
3. 北天の明るい恒星を写野に入れ、拡大表示する
4. ソフトウェア「PintAide」を起動し、3.の恒星でフォーカス合わせを行う
5. 表 2.2.4.4.1-3 に示すパラメータでそれぞれ数回撮影を行う

表 2.2.4.4.1-3 撮影パラメータ

No	露出時[s]	F 値	ISO 感度	保存形式
1	1/4	2.8	3200	RAW
2	1/4	2.8	6400	RAW
3	1/4	2.8	12800	RAW
4	1/4	4	3200	RAW
5	1/4	4	6400	RAW
6	1/4	4	12800	RAW
7	1/4	2.8	3200	C-Raw
8	1/4	2.8	6400	C-Raw
9	1/4	2.8	12800	C-Raw
10	1/4	4	3200	C-Raw
11	1/4	4	6400	C-Raw
12	1/4	4	12800	C-Raw

# (6) 試験時の様子

試験時の様子を図 2.2.4.4.1-4 に示す。



図 2.2.4.4.1-4 試験時の様子

#### (7) 試験結果

試験結果を表 2.2.4.4.1-4 に示す。各パラメータにつき 3 回撮影を行ったため、その結果の平均値を示している。ファイルサイズの概算やその傾向が得られた。

表 2.2.4.4.1-4 試験結果

No	容量[MB]
1	27.7
2	31.9
3	35.3
4	26.7
5	30.8
6	34.7
7	14.8
8	19
9	22.6
10	17.8
11	17.9
12	21.9

#### 2.2.4.4.2 真空用マイクロステージ・モータアセンブリ

##### (1) 試験内容

試験① 常温真空下でのアウトガス特性を確認した。

試験② モータの機能確認及び動作試験を行った。



(2) 場所・日時

- ・場所：東京工業大学 河合研実験室
- ・日時：2019 年 3 月 28 日

(3) 使用機器

試験に使用した機器を表 2.2.4.4.2-1 に示す。

表 2.2.4.4.2-1

名称	メーカー	型式
φ500mm 真空チャンバー	武蔵野エンジニアリング	特注
ロータリーポンプ	LEROY SOMER	CF29PR1
ピラニゲージ	Canon Anelva	M-350PG-SD N1G
真空表示機	Canon Anelva	M601GC
モーションコントローラ基板	自作	
モータードライバ	オリエンタルモーター	CV503K
安定化電源	TEXIO	PW24-1.4AQ
オシロスコープ	TEXTRONIX	MDO3024

(4) 試験方法

試験①

1. 真空槽の汚染確認のため真空度を確認する（容量が大きいので 30 分）
2. 被検体を真空槽に入れて、真空度を確認する
3. 差分よりアウトガスの有無を確認する

試験②

1. モーターの配線確認 => ペンタ配列・ピンアサイン確認
2. 制御計算機とモーションコントローラとの通信確立
3. モーションコントローラとモータードライバの接続確認
4. モータードライバとモーターとの接続確認
5. 回転状況の目視確認・消費電力計測

試験コンフィグレーションを図 2.2.4.4.2-1 に示す。

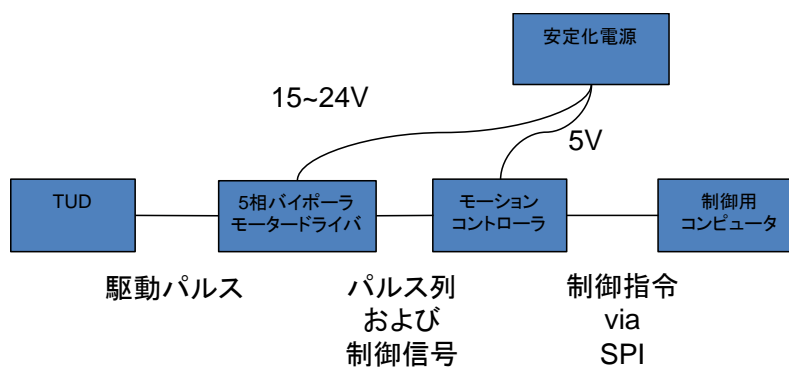


図 2.2.4.4.2-1 試験コンフィグレーション

## (5) 試験時の様子

### 試験①

試験時の様子を図 2.2.4.4.2-2 に示す。

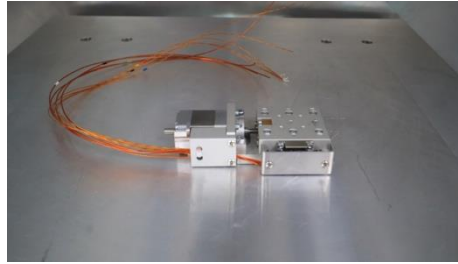


図 2.2.4.4.2-2 試験時の様子

### 試験②

試験時の様子を図 2.2.4.4.2-3 に示す。

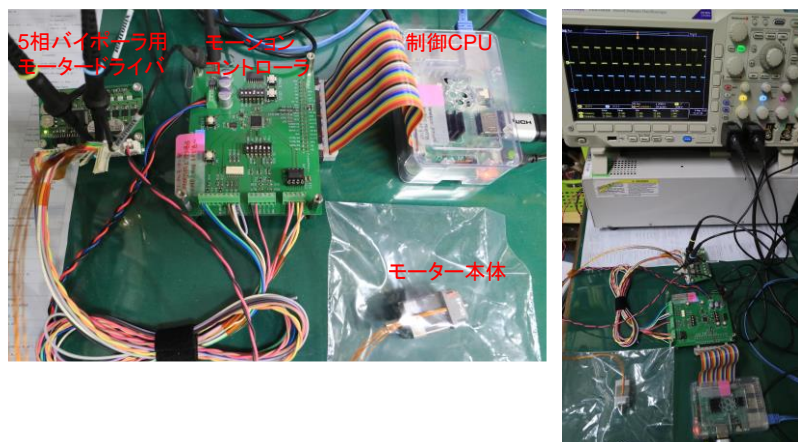


図 2.2.4.4.2-3 試験時の様子

## (6) 試験結果

### 試験①

- 計測時気温：22°C
- 予備測定：真空槽のみでの真空度： $9.3 \times 10^{-1}$  Pa (30min after ponping)
- 本測定：  
@18:10 大気圧      @19:00  $9.5 \times 10^{-1}$  Pa      @19:20  $8.8 \times 10^{-1}$  Pa
- 結論：  
真空槽・ポンプの実力値はおよそ 1Pa であり、常温における明確なアウトガスの排出は認められない。

### 試験②

- 回転動作：
  - 0~2000 PPS までのパルスを入力し、目視により設定通りの速度で回転していることを確認した。(位相変調によるフルブリッジ方形波インバータ)
  - 0~2000 PPS のスタートは加速時間 3 秒の S 字駆動で脱調なく始動可
  - S 字を行わない場合 100 PPS ステップの加減速であれば脱調なく速度調整が可能。
  - 回転時に音は殆ど発生せず (振動も殆ど感じられない)

- 。今後、EMC の確認は必須であろう。

消費電力調査：消費電力の回転速度依存性と駆動電圧依存性の結果を図 2.2.4.4.2-4、5 に示す。

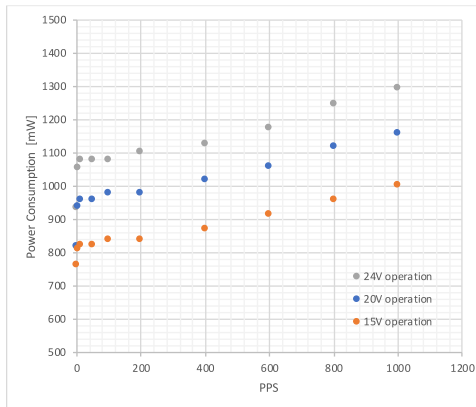


図 2.2.4.4.2-4 消費電力の回転速度依存性

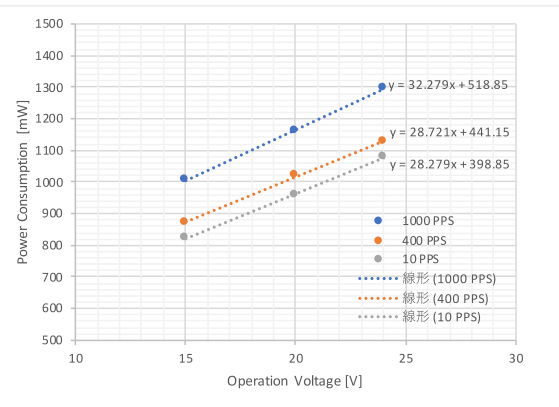


図 2.2.4.4.2-5 消費電力の駆動電圧依存性

- 。回転速度依存性について、高機能なドライバを用いたため、消費電力は極めて低く、500 PPS までは殆ど変化しないが、500PPS 以上になると電力が急激に増大する。
- 。駆動電圧依存性について、電源電圧が変化した場合の出力特性を計測した。消費電力は電源電圧と線形関係（切片あり）であり、コイルのインピーダンスと電圧の関係が電力を決めているものと思われる。（電流自体は位相シフト量で制御されている）
- 。衛星では 12V の利用を想定しているが、このドライバ自体は 14.0V 以下で電圧監視回路により停止してしまう。メーカーからは、「推奨しない」という情報以外得られていない。

#### ・ 結論：

- 。市販のモータードライバ、自作のモーションコントロール基板を用いてステッピングモータの動作確認を行い、期待通りの動作を確認した。
- 。消費電力は 1000 PPS 駆動時で 1W 程度であり、超小型衛星でも十分に動作する。
- 。一方で、ドライバに関してメーカー推奨電圧が 24V 以上になっているため、これをメインバスの 12V 以下に対応するよう改造する必要がある。
- 。部品解析の結果、CPU 駆動用のスイッチングステップダウンコンバータが低電圧判定をしていることが判明。この周囲の抵抗を一つ交換することで、すべての機能を 12V（実際には 7V くらい）で実現できる。

## 2.2.4.5 構造系

### 2.2.4.5.1 BASE PLATE

#### (1) 開封時

開封時の様子を図 2.2.4.5.1-1 に示す。

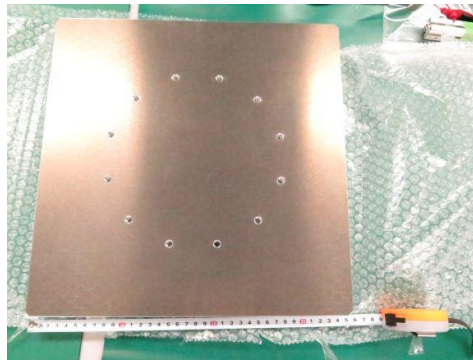


図 2.2.4.5.1-1 BASE PLATE 外観

(2) 試験内容

発注した部品と図面の整合性を確認する。

(3) 場所・日時

- 場所：東京工業大学 石川台 1 号館 5 階 553 号室
- 日時：2019 年 3 月 29 日

(4) 使用機器

試験に使用した機器を表 2.2.4.5.1-2 に示す。

表 2.2.4.5.1-2 試験に使用した機器

名称	型式
ノギス	-
メジャー	-

(5) 試験方法

メジャー及びノギスで寸法を計測する。

(6) 試験時の様子

図 2.2.4.5.1-1 に示す。

(7) 試験結果

図面と同じ寸法であることを確認した。

## 2.2.5 放射線試験

搭載予定デバイスの宇宙線耐性を評価するため、放射線試験を行った。宇宙船による電子デバイスの故障モードは、SEE (Single Event Effects) と TID (Total Ionizing Dose) の 2 つに大別され、そのそれぞれについて試験を行った。

### 2.2.5.1 SEE 試験

#### 2.2.5.1.1 目的

SEE (Single Event Effects) とは、荷電粒子（主に高エネルギーの陽子・中性子、稀に重イオン）が半導体に入射した際に半導体内部で生成された電荷による誤作動そしてそれに起因する永久破壊などを指す。衛星で使用予定の素子に対して、この SEE 耐性の評価を行う。

#### 2.2.5.1.2 場所・日時

- ・ 場所：若狭湾エネルギー研究センター
- ・ 日時：2019 年 1 月 21-23 日

### 2.2.5.1.3 試験内容

SEE による主な故障モードは、CMOS (Complementary MOS, Metal-Oxide-Semiconductor)構造が意図しない短絡を起こす SEL (Single Event Latch up) と、素子内のメモリの 1/0 が書き換わる SEU (Single Event Upset) である。これらの評価のため、我々は衛星搭載予定の各素子に対して、加速器によるプロトンビームを行い、照射中リアルタイムで電源電流及び挙動の監視を行った。電源電流を監視することで、SEL 時に急激に電流が増加する現象を検出する。またマイコン等については繰り返しメモリの読み書きを行い、読み取り値や挙動を評価することで、レジスタやメモリの SEU を検出することとした。

試験対象素子は、表 2.2.5.1.3-1 に示す 8 分類 17 個である。

表 2.2.5.1.3-1 SEE 試験対象素子と評価項目

分類	試験個数	評価項目
オペアンプ	5	電源電流、動作確認(出力電圧)
マルチプレクサ	2	電源電流、動作確認(出力電圧)
ドライバアイソレータ	1	電源電流、動作確認(通信エコーバック)
OBC	3	電源電流、動作確認(RAM 書込/読出、UART)
モータードライバー	2	電源電流、動作確認(モータ回転)
マイコン	2	電源電流、動作確認(RAM 書込/読出、UART)
GNSSR	1	電源電流、動作確認(UART)
通信モジュール	1	電源電流、動作確認(バッファ書込/読出、UART)

### 2.2.5.1.4 試験結果

試験結果を表 2.2.5.1.4-1 に示す。ほとんどの素子が問題なく使用できることがわかった一方、OBC など一部の素子は SEE 耐性が低いことが分かった。これらについては、新規選定品の使用は見送り、過去の実績品を用いるか、別の素子を再選定・再評価するが必要である。

表 2.2.5.1.4-1 SEE 試験結果

分類	試験個数	正常動作個数	故障モード等
オペアンプ	5	5	
マルチプレクサ	2	1	動作せず(永久故障)
ドライバアイソレータ	1	1	
OBC	3	0	電流増、起動せず(永久故障)
モータードライバー	2	2	
マイコン	2	2	
GNSSR	1	1	
通信モジュール	1	1	

## 2.2.5.2 TID 試験

### 2.2.5.2.1 目的

TID (Total Ionizing Dose)とは、放射線によるエネルギー付与や格子欠陥増大による半導体素子の性能変化・経年劣化を指す。衛星で使用予定の素子に対して、この TID 耐性の評価を行う。

### 2.2.5.2.2 場所・日時

- ・場所：東京工業大学 大岡山北実験棟 1 コバルト 60 照射室
- ・日時：2019 年 3 月 25 日

### 2.2.5.2.3 試験内容

TID の評価試験は、透過力の強いガンマ線で簡単に模擬することが可能である。我々は、コバルト 60 を用いて、高度 500km において 10 年分相当の線量を照射した。その間、素子の性能劣化や永久故障を検出するため、各素子について、電源電流と動作状況を監視した。

試験対象素子は、表 2.2.5.2.3-1 に示す 4 分類 5 個である。

表 2.2.5.2.3-1 TID 試験対象素子と評価項目

分類	個数	評価項目
オペアンプ	2	電源電流、動作確認(出力電圧)
マルチプレクサ	1	電源電流、動作確認(出力電圧)
モータードライバ +モータ	1	電源電流、動作確認(モータ回転)
マイコン	1	電源電流、動作確認(RAM 書込/読出、UART)

### 2.2.5.2.4 試験結果

試験結果を表 2.2.5.2.4-1 に示す。1 素子を除いて正常に動作しており、十分な TID 耐性を持つことが分かった。今回故障した素子については、代替の素子を再選定する。

表 2.2.5.2.4-1 TID SEE 試験結果

分類	試験個数	正常動作個数	故障モード等
オペアンプ	2	2	
マルチプレクサ	1	0	電流増加
モータードライバ+モータ	1	1	
マイコン	1	1	

## 2.2.6 「ひばり」衛星で実証する技術を用いた新事業構想

ひばり衛星で実証する可変形状機能（VSAC による迅速な姿勢変更、および VSAC と RW を組み合わせた迅速かつ高指向安定な姿勢変更）を要請される具体的な用途をまとめる。

### 2.2.6.1 科学観測衛星

科学ミッションの例として、極紫外線センサによる重力波対応物体の観測や、3D 動的カラー放射線イメージング技術を用いた透過性が非常に高い 1-10MeV ガンマ線観測がある。どちらも天体のどこで生じるか分からず、短期間で減衰する現象に対応するために高速姿勢変更性能と、その後の観測精度を統計的に優位なデータとするために高指向安定性能が要求されている。

### 2.2.6.2 光学観測衛星

VSAC を光学観測衛星に搭載し、迅速性と指向安定性能を向上することによって短時間に多地域の撮像が可能となる。例えば分解能 10m で、AIS と光学計測のハイブリッドにより、海上の船舶識別に新しい情報が得られる。分解能 5m の 3 次元計測（ステレオ視）は、地上データとのマッチングで、従来得られなかった詳細情報を獲得できる。さらに、3m であれば、陸域での車両補足が可能である。ある特定の施設・地形を重点的に観測することは産業にとって重要である。例えば、養殖産業などでは沿岸地域のみ複数の特定地域に向けて撮影することで効率的にデータを取得できる。

### 2.2.6.3 光通信衛星

衛星 - 衛星間通信や地上 - 衛星間の光通信は、今後の重要な技術である。両者ともに、高速姿勢変更と高指向・追跡安定の両性能が必要である。ここでは特に後者について言及する。雲のない晴れ間を狙って通信接続することが重要なので、迅速かつ高い安定度を持つ姿勢制御が必須である。特に夜間しか通信できないので、総電力が低くできる可能性のある VSAC による姿勢制御は有効である。特に、大学衛星・超小型科学衛星をシリーズ化する場合、免許の要らない光通信はかなり魅力的である。

### 2.2.6.4 合成開口レーダ（SAR）衛星

SAR 衛星においても VSAC 技術の応用により、2 翼の SAP の傾きを変えることで側方観測が可能となる。特に、最近では小型 SAR 衛星の開発が盛んになっており、更なる機能向上を目指して、VSAC の導入の潜在需要はあると考えられる。

### 2.2.6.5 ジンバル搭載衛星

観測カメラや観測センサを高速で動かすためにジンバルを搭載しているケースがあるが、このような場合にもジンバルの代わりに VSAC を搭載することで代替可能である。

### 2.2.6.6 深宇宙探査機

深宇宙においては、探査機に作用する主な外力トルクは太陽輻射圧のみとなり、これが姿勢運動を支配する。通常、深宇宙探査機は発電の観点から軌道上の位置によらず太陽電池が常に太陽方向を指向する必要がある。一方で、地上との通信や任意方向の宇宙空間観測のために、アンテナや観測機器といった搭載機器の指向性が求められる。可変形状機能は、VSAC による迅速な姿勢制御に加え、形状変化することで太陽輻射圧トルクを制御して姿勢を安定化させ、かつ太陽電池の太陽指向および搭



載機器の任意方向への指向を両立させることができるため、非常に有用である。

### 2.2.7 まとめ

ここまで、スマート宇宙システムとしての可変形状機能を有する衛星の特長、その技術実証を行う超小型衛星ひばりの概要、およびそのミッション、システム開発状況、放射線試験等について述べた。さらに、ひばりで実証される技術の先にある新しいビジネス、宇宙システムの展望をまとめた。近年発展している超小型衛星の分野においても有用性が高く、もし日本が 10-50kg 級の衛星で世界の宇宙ビジネスと勝負する場合、打ち上げ個数では海外に太刀打ちできないため、1 機あたりで複数の姿勢指向点が無駄なくカバーする機能は必要な技術である。さらに、迅速性と高指向安定性の両方を可能にする制御技術が確立でき、実用機器を商品化できれば、高度なりモートセンシング、3 次元計測、天文学などの分野で市場競争力が獲得できる。また、超小型衛星利用したミッションの幅が拡大し、新規市場が開拓されるであろう。将来的な拡張に優れ、現在これを元にした新たな研究分野の検討も行っている。

## 2.3 試験運用設備の利用サービスの提供等

### 2.3.1 放射線実験施設等

新宇宙産業を創出するスマート宇宙機器・システムの耐放射線技術に関しては、東京工業大学科学技術創成研究院先端原子力研究所に設置されているコバルト照射実験施設と連携した。コバルト照射実験施設では、コバルト 60 (60Co) からのガンマ線を宇宙機器部品、化学、電子材料、構造材料、生命科学等に関連した各種の供試体に照射できる。大学、民間企業等のユーザーによる照射試験の実施機会を確保して試験実施を容易にする仕組みを作るとともに、今後のサービス向上を図ることを目指して検討を進めた。

本委託業務実施機関がワンストップかつオンデマンドで大強度のガンマ線照射試験を進められる仕組みを構築すべく、

①国内で超小型大型に限らず宇宙機開発に携わる研究者間で、情報交換やさらなる放射線試験技術の向上を目指す仕組み

②コバルト照射実験施設において、外部機関の試験実施に対する本委託業務経費からの試験実施費用（施設利用料）のサポート

③ホームページの整備

④照射設備の点検調整などの取り組み

について検討をおこない、次のような成果が得られたとともに、課題が明確化した。

①については、放射線試験の実態をまず調査する目的で、統計情報を得られるような利用申請書の内容を検討した。図 2.3.1-1 に準備した共同利用申請書と報告書の様式を示す。申請書の意図は、実験のスケジュールとセットアップが妥当であることを確認できることとして、できるだけシンプルにした。内容については補足として、どういうものを照射したのかについて、具体的な部品番号までは記載しないまでも、電子部品であれば、アンプリファイアなのか電源のコンバータなのか等、どういう部品に興味が集まっているのか、材質についてもどういう用途か、などを把握することを目的としている。試験結果レポートについても簡単に書けることを重視して、当初予定した実験を問題なく終了してデータが取得できたか否か、完了したならどういう結論が得られたか、など、実験完了後すぐ書けるものを考案した。これにより、共同利用を提供する側としても、利用者の実態（統計情報）を得られると、技術動向把握、今後のサービス拡充、宇宙利用促進の為に重要な知見になると考えている。

実際に利用申請書を利用者に依頼するかどうかなどの実施上の課題については、まだ、未検討であり、次年度以降、放射線設備および契約事務と相談することになる。

また、超小型衛星事業者（主に大学）の宇宙機器の放射線試験に関する情報交換研究会等を検討した。これは、国内で超小型大型に限らず宇宙機開発に携わる研究者間で、情報交換やさらなる放射線試験技術の向上を目的とした研究会・交流会を年に 1 回程度実施することで、研究者にとどまらず、放射線試験に興味を持つ民間事業者等の参加も条件付きで受け入れ、産学のコネクションを作る場を提供することを目指す。来年度以降の事業案として、引き続き検討する。

②については、東京工業大学の規則により、本委託業務の主管実施機関研究代表者が各実施機関の利用申し込みと料金支払いを取りまとめて手続きすることは難しく、各実施機関が個別に行う必要があることが明らかとなった。したがって、外部機関の試験実施に対する費用援助はしないこととした。その代わり、次年度以降は、放射線の影響と放射線試験の重要性、試験方法などに関する知識提供の充実を図ることとした。

③と④については、慎重に検討した結果、実施機関以外の利用者也サービスを楽しむ可能

性があるため、本委託業務以外の経費により整備や対応を行った。これについては、次年度以降も引き続き文科省担当者とも相談しながら検討していく。

次年度は、本年度の検討及び実施内容をもとに、実施機関がオンデマンドでガンマ線照射試験を進められる体制を確立し、積極的に照射試験を行うとともに成果をアウトプットしていきたい。

平成 年 月 日  
文科省・宇宙連携機構プログラム「新宇宙産業を創出するスマート宇宙機器・システムの研究開発拠点」事業  
東京工業大学コバルト照射施設共同利用申請書

東工大対応者： 

所 属	
氏 名	

実験参加者

課題

実験目的と内容

照射条件

(1) 照射線量率	[krad/h]
(2) 線量	[krad]
(3) サンプルサイズ	[cm <sup>3</sup> ]
(4) サンプル重量	[kg]
(5) セットアップ時間・撤収時間	[hr]
(5) 計測等のための照射中断時間	[hr]
(6) 夜間無人照射の有無	
(7) 照射室専有の必要性	
(8) 照射室との通信の有無	
(9) 所要日数	[day]
(10) 実験希望日	

平成 年 月 日  
文科省・宇宙連携機構プログラム「新宇宙産業を創出するスマート宇宙機器・システムの研究開発拠点」事業  
東京工業大学コバルト照射施設共同利用報告書

東工大対応者： 

所 属	
氏 名	

実験参加者

課題

実験結果

被検体ごとの状態推移など

考察・結論

申し送り事項

共同利用のあり方、設備等への要望、セットアップ時間等他ユーザーへの助言など。

図 2.3.1-1 準備した共同利用申請書と報告書の様式

### 2.3.2 海外地上管制運用局等

2018 年度はシンガポール大学敷地内にある S バンド局の国際共同利用に関して情報収集を行った。

#### 【背景】

この送受信設備は、かつて理化学研究所が日米仏で開発したガンマ線バースト観測衛星 HETE および HETE-II の運用のために開発したものであり、HETE-II の運用終了後、維持費を確保出来なかったためにマサチューセッツ工科大（MIT）に移管されたものである。MIT は本施設を現在も維持・管理しているが、有効利用されていない状態にある。

#### 【現在の運用状況】

マサチューセッツ工科大を中心とする系外惑星探査衛星 TESS の開発グループは、衛星運用にシンガポール局の S バンド送信機を利用する予定であったため、この設備の維持・改修を行ってきた。直近では、SDR 受信機、制御用計算機システム、ネットワーク機器等が刷新され、あらゆる変調方式に対応できるようになっている。しかしながら、システムデザインの時点で開発方針が変更されたため、現在はこの施設を全く使っていない状態にある。また、この施設を管理しているシンガポール大学も、超小型衛星を開発しており、量子暗号通信実験に応用するための軽微な改修を行ったとのことであるが、現在では運用を停止している。

アンテナはシンガポール大学物理学科の屋上に設置されており、風雨を避けるために繊維強化プラスチック製のレドームに格納されている。周辺のノイズ環境は良好であり、周辺に新しいビルが建設された以外は建設時と大きな変化はなく仰角 10°程度までの遮蔽物はない。この運用に用いる計算機群は物理学科の建屋内に設置されている。

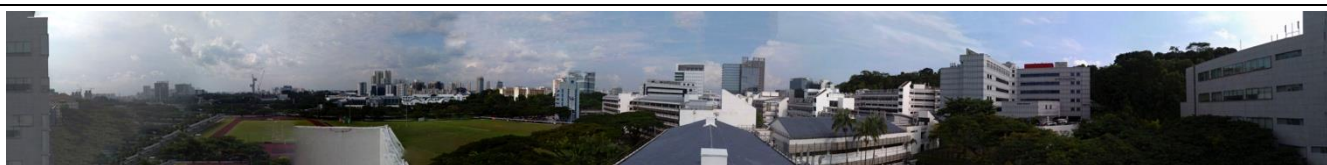


図 2.3.2-1: シンガポール局の設置環境（シンガポール大学物理学科 2011 年撮影）

#### 【必要なリソース】

アンテナ・追尾架台・送受信機・制御 PC はすでに完備されており、すべてリモート制御が可能である。これを外部から用いるにはリモート・ログインのためのサーバー（パソコン）が一台必要となる。このセットアップ等で、最低でも一度は現地での作業が必要になる。制御マニュアル等は既に入手済みである。

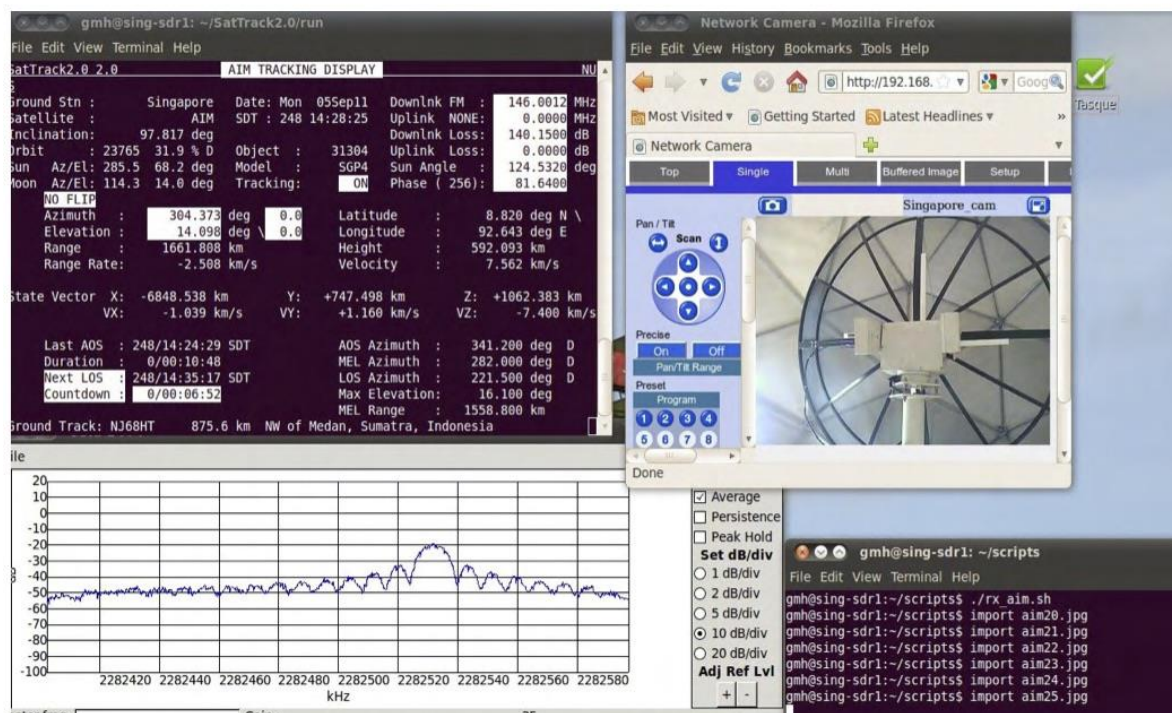


図 2.3.2-2: 地上局システムの制御画面

## 【今後の作業】

ここまでの情報は MIT の Francois Mortari 氏と電子メール等で頂いたものである。前述のとおり、現状だれも利用していない状態であり、MIT としては我々がこれを有効活用することに積極的である。実際にどの様に作業分担を行うのかなどに付いては、より詳細な情報交換を行うため、Mortari 氏を直接訪問しヒアリングを行う必要がある。また、受信機のあるシンガポール大学との調整も今後行う必要がある。現時点では基本的に受信器としての使用を念頭に置いているが、シンガポール大学との協力関係がより強固になれば、コマンド送信も実現する可能性があり、より有用性が高まる。

### 2.3.3 スパコン等を用いた軌道上観測データ・処理技術等の知見共有サービス等

#### 【軌道上データ取得実験】

本年（2019年）、1月18日に内之浦宇宙センターから打ち上げられた JAXA 革新的衛星技術実証プロジェクトの実証一号機（RAPIS-1）には、我々の開発した DLAS（Deep Learning Attitude Sensor）が搭載されており、順調に運用を行っている。これまでに、恒星姿勢センサの較正画像や、地球画像認識実験のための可視光地球画像を収集している。本実験装置は今後1年間を掛けて1000枚以上データを取得する予定である。これまで、東工大を初め多くの大学で超小型衛星による衛星画像の取得は行われてきたが、本ミッションでは X バンドの高速通信により、1日あたり数百メガバイトという大容量のデータを取得することができる。これは日本ではフラッグシップ級の天文衛星のデータ生成量に匹敵するものであり、本ミッションの運用を通して、大量の画像データのデータ取得、解析の知見を獲得しつつある。

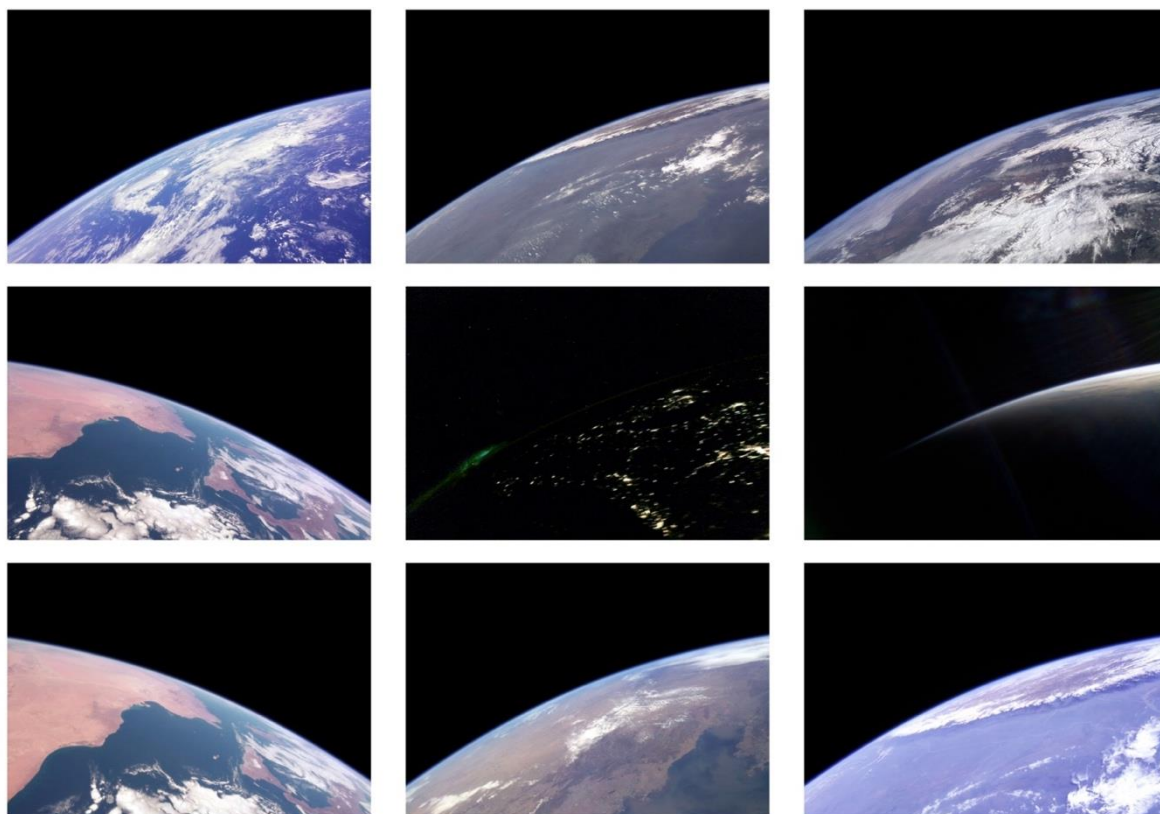


図 2.3.3-1: DLAS/ECAM（Earth CAMera）で取得した衛星画像。各画像についてノーテーションを追加し、画像認識などの AI やそれをさらに応用した衛星姿勢推定実験を進めている。高精細画像の市場価値は周知の事実であるが、広視野画像は市場にほとんど出ていないユニークなデータである。

#### 【データ取得・ストレージ】

定常運用以降、DLAS は週に 2 回以上の観測機会を与えられている。これらのデータは観測運用の次の日本上空通過パスで地上局にダウンリンクされ、衛星運用事業者のデータサーバーにすぐさまアップロードされる。現在はデータ共用の準備段階として科研費で購入した学内のサーバーに自動転送するシステムを構築して、試験的に運用を実施している。



#### 【スパコンの利用・共有サービス等】

これまでのところ、データは基本的に東工大チームと本事業関係者内に閉じているが、DLAS 地球カメラ (ECAM) の学会口頭発表等で公開済みの一部のデータは共同参画機関の天の技に提供し AI 研究に利用されている (§ 2.1.1)。将来的には、学術論文や特許等の成果を発表するまではこれらの衛星情報は内部に留めるが、それ以降はこれらの知見を展開する予定である。特に、アノテーションを施した画像は極めて情報価値が高く、外部へ展開することで新たな価値を創生するきっかけとなるだろう。そこで、現在蓄積しつつある衛星画像をわかりやすいユーザーインターフェースと組み合わせでデータベース化するための議論を行っている。具体的には、会津大学が JAXA と開発した、衛星画像データベースの応用である。既に、はやぶさ 2 の取得画像マッピングなどの実績があり、これを DLAS 取得データに移植したいと考えている。付加情報については、撮影場所・方向・撮影時の詳細な気象情報などを検討している。データベースの実体については東京大学計算基盤センターの利用を検討している。



## 2.4 新規宇宙プロジェクト創出支援と産学ネットワーク形成等

### 2.4.1 ユーザーとの将来利用要求・設計仕様の検討、国際情勢調査・将来動向検討等

#### 2.4.1.1 スマート宇宙機器・システムに関する検討会議

真剣に宇宙プロジェクトを興そうとするユーザーの開拓・参入・育成等を目指して、「スマート宇宙機器・システム」に関する検討会議を定期的で開催した。具体的には、実施機関（主管実施機関：東京工業大学、共同参画機関：日本大学、(株)テクノソルバ、サカセアドテック(株)、(株)天の技）に所属する実施担当者および関係者による定例会議、そして、研究協力者および一般の方を対象としたシンポジウム（研究会）を開催した。その他、スマート宇宙システムの対象である超小型衛星「ひばり」の開発に関する定期会議を開催した（2.5 節にて後述）。ここでは前者 2 件について述べる。

##### 2.4.1.1.1 スマート宇宙機器システム定例会議

1～2 か月に 1 回程度の頻度で開催する本会議において、各業務・機関ごとに、本事業の今年度活動報告と予算執行状況を報告してもらい、マイルストーンとイベントの内容詳細と注意点の確認などを行った。下記に会議日程等を示す。

第 1 回定例会議	2018 年 9 月 27 日	午後 3 時～6 時半	東工大・大岡山	参加者 17 名
第 2 回定例会議	2018 年 12 月 4 日	午後 1 時～5 時半	東工大・大岡山	参加者 11 名
第 3 回定例会議	2019 年 1 月 15 日	午後 3 時～4 時	Skype 会議	参加者 8 名
第 4 回定例会議	2019 年 3 月 19 日	午後 3 時～6 時半	東工大・大岡山	参加者 11 名

##### 2.4.1.1.2 スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）

年に少なくとも 1 回は、研究協力者や一般参加者も含めた会議を行うことで、真剣に宇宙プロジェクトを興そうとするユーザーの開拓・参入・育成等を目指している。2018 年度は、下記のように、スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）として開催した。

第 1 回スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）	2019 年 1 月 22 日	午後 1 時～6 時半
東工大・大岡山	参加者 55 名（内、skype 参加 5 名）	

大学関係者、企業関係者、文科省関係者など、宇宙開発から宇宙ビジネスに興味を持つ多くの方が参加した。図 2.4.1.1.2-1 にプログラムを、図 2.4.1.1.2-2 にシンポジウムでの様子を示す。

最初のセッションでは本事業の計画概要と各事業の進捗状況について報告した。

次に、世界では OldSpace による宇宙関連基盤をもとに、NewSpace が民間主導・革新的低コストな宇宙ビジネスを展開していることを考慮して、登壇者には、実施機関担当者だけでなく、CSP ジャパン・シニアアナリストである金子氏から、超小型衛星の最新の国際情勢について、また、OldSpace の日本の代表でもある三菱電機の鎌倉製作所・主管技師長である関根氏から、衛星マーケットとビジネスに関する分析、NewSpace の代表として、JAXA から小型衛星開発を受注して見事成功させたアクセルスペース・最高技術責任者・CTO である宮下氏から、当社の過去の実績を踏まえた将来計画、そして、新しい宇宙利用として水産養殖に応用するウミトロン・代表取締役の藤原氏から、本当に役立つ宇宙技術の実装、について発表してもらった。

登壇者の方から衛星開発の技術的な話からビジネス展開までの興味深い話がなされ、討論会では、「新宇宙産業（＝ビジネス、宇宙工学・理学の研究開発も含む）の芽を創出して育成する場を形成するには？」と題して、衛星開発の現場や今後の小型衛星市場の動向、現状の日本の宇宙ビジネスの問題点等、様々な議論が交わされ、大盛況に終わった。

2019 年度も年に 1，2 回程度の頻度で、狙いを明確にして議題を絞ったシンポジウム（研究会）を開催したいと考えている。

日時：H31 年 1 月 22 日（火）午後 1 時～午後 6 時半  
場所：東工大・大岡山キャンパス・石川台 3 号館 304 号室

13:00-13:05 主催者挨拶 松永

**セッション1. スマート宇宙機器システム事業の計画概要**

13:05-13:20 東工大・松永三郎「全体概要とひばり衛星プロジェクト」

13:20-13:30 天の技・工藤 裕、東工大・谷津陽一「AI 技術による衛星画像解析とその応用方法の検討」

13:30-13:40 サカセ・渡邊秋人、東工大・古谷 寛「軽量高剛性伸縮収納ブーム・アレイ」

13:40-13:50 テクノソルバ・中村和行、日大・宮崎康行「小型衛星用高精度展開アンテナの開発」

13:50-14:00 東工大・林崎規祐、谷津陽一「放射線試験サービス」

14:00-14:10 質疑応答

14:10-14:20 休憩

**セッション2. 超小型衛星の国際動向調査報告**

14:20-15:10 CSP・金岡充晃「超小型衛星の最新国際動向」

15:10-15:25 質疑応答

15:25-15:35 休憩

**セッション3. 宇宙利用ビジネスの展開**

15:35-16:05 三菱電機・関根功治「通信・測位・観測衛星のマーケットとビジネス展開」

16:05-16:35 アクセルスペース・宮下直己「超小型衛星群による新しい地球観測インフラの構築」

16:35-17:05 ウミトロン・藤原 謙「宇宙技術の社会実装に向けて考えたこと」

17:05-17:20 質疑応答

17:20-17:30 休憩

**セッション4. 討論会（登壇者＋参加者）**

17:30-18:30 新宇宙産業（＝ビジネス、宇宙工学・理学の研究開発も含む）の芽を創出して育成する場を形成するには？

18:30-18:40 休憩

18:40-20:30 懇親会

図 2.4.1.1.2-1 シンポジウムプログラム



図 2.4.1.1.2-2 シンポジウムでの様子

なお、本シンポジウムについては、本事業の website にて開示している：

スマート宇宙 HP: <http://lss.mes.titech.ac.jp/smartspace/index.html>

シンポジウム: <http://lss.mes.titech.ac.jp/smartspace/symposiums.html>

さらに、「超小型人工衛星で宇宙産業を切り拓く ―宇宙への想いを繋ぐ学生と研究者―」という題名の記事を、東工大のトップページにて、スペシャルトピックス（様々な記事の中でも特に注目に値する記事）として掲載した。その中では、本事業の実施担当者である東工大の松永、谷津、研究協力者である坂本、そして、上記シンポジウムで発表したアクセルスペースの宮下、およびウミトロンの藤原の記事が特集されている。図 2.4.1.1.2-3 に、東工大 webpage での記事（一部）を示す。

## 超小型人工衛星で宇宙産業を切り拓く

—宇宙への想いを繋ぐ学生と研究者—



2019年1月18日、鹿児島県内之浦から、冬の晴れ渡る青空に向けて、全長26メートル、重さ約100トンのロケットが打ち上げられた。

これは、民間企業や大学が開発した7機の人工衛星を搭載した宇宙航空研究開発機構（JAXA）のイプシロンロケット4号機である。これらの人工衛星が投入されたのは高度500キロメートルの太陽同期軌道で、リモートセンシング（地球観測）など、近年活発化している宇宙ビジネス・宇宙利用を促進する上で必要となる技術的課題の実証が主な目的だ。今回13のテーマが採択され、東工大は、「深層学習を活用した革新的地球センサ・スタートラッカー（DLAS）」と「多機能展開実験3Uキューブサット（OrigamiSat-1）」という2つのテーマを担っている。今後、宇宙ビジネス・宇宙利用において、中心的役割を果たすと考えられるのが、従来の大型人工衛星に比べて、より安価・短時間で開発できる超小型人工衛星だ。東工大はその世界的なパイオニアである。そして、その研究開発および人材育成に取り組むのが、工学院機械系で宇宙システムを研究する松永三郎教授である。そこで、本特集では松永教授へのインタビュー、今回、JAXAの革新的衛星技術実証プログラムに採択され、現在地球周囲中の2つのテーマの概況、さらに、東工大の研究成果を活用し、民間の宇宙開発を推進するベンチャー企業「株式会社アクセルスペース」「ウミロン株式会社」の2社を取り上げ、東工大の宇宙と人工衛星に関する研究の最前線を紹介する。



### 東工大は超小型人工衛星のパイオニア

工学院 機械系  
松永 三郎 教授 インタビュー

現在地球周囲中の2つのテーマ



深層学習を活用した革新的地球センサ・スタートラッカー（DLAS）  
理学院 物理学系  
谷澤 隆一 助教



多機能展開実験3Uキューブサット（OrigamiSat-1）  
工学院 機械系  
飯本 啓 准教授

### 宇宙関連の大学発ベンチャー



世界初の民間商用超小型人工衛星を開発 株式会社アクセルスペース  
宮下 直己  
取締役・CTO



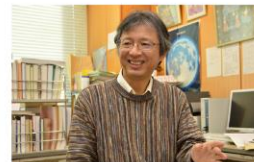
水産養殖に人工衛星情報を活用 ウミロン株式会社  
藤原 謙  
代表取締役

### 「東工大は超小型人工衛星のパイオニア」松永教授インタビュー

松永教授に、超小型人工衛星の研究開発の歴史と現在の状況、そして、それが担う宇宙ビジネス・宇宙利用の未来について話を聞いた。

松永教授が研究開発に取り組み始めた超小型人工衛星とはどのようなものなのでしょう。

松永：宇宙に関する研究開発には莫大な費用と期間がかかるため、これまではJAXAなど国の研究機関との共同研究が中心でした。私たちが目指す超小型人工衛星は、自動車に例えれば、日本で独自に発展した「軽自動車」です。それを大学の一研究室だけで実現するというのが目標でした。2003年に、世界で初めて東工大の松永研究室と東京大学の中須賀真一教授の研究室それぞれで開発し打ち上げたのは、10センチメートル四方の立方体の形をした質量約1キログラムの「キューブサット」でした。その後、私たちはキューブサットを中心に超小型人工衛星を開発してきました。



見た目はただの四角い箱にしか見えませんが、高度な技術が詰まっています。例えば高度約500キロメートルの円軌道では毎秒約7.6キロメートルで回り続け、無線通信を使って人工衛星の位置を確認できなければなりません。そのため、通信システムと太陽電池による自律電源システムが最低限必要です。人工衛星から送られてきた電波を受信したり、コマンドを人工衛星に送信するための地上局も要ります。また、宇宙での周囲の温度に合わせて人工衛星の温度を制御する機構も不可欠ですし、ミッションを遂行するための高機能・高性能な機器も必要です。超小型人工衛星で培った技術は、JAXAなどとの大型プロジェクトにも活かされます。大型プロジェクトの場合、莫大な費用がかかるので失敗が許されません。そのため、超小型人工衛星を使って先端技術を早期に複数回実証することで、リスクを低減できるというメリットもあります。

超小型人工衛星に着手したきっかけを聞かせて下さい。

松永：1998年にハワイで日本と米国の大学が集まり、新たな宇宙のミッションを考える会議を開催したときのこと。当時、人工衛星と言えば、質量約100～1000キログラム、開発期間5～10年、製造費用数十～数百億円が常識でした。そのため、大学の研究室だけで作ることはできませんでした。それに対し、座長をしていたスタンフォード大学のロバート・ウィッグス教授が目の前にあった缶ジュースを見て「CanSatを宇宙に打ち上げよう」と言い始めたのです。CanSatとは缶ジュースの大きさの人工衛星のことです。参加者の大半は真に受けていませんでしたが、その提案に真剣に取り組み翌年に模擬モデルの開発を成功させたのが、唯一、私たちの研究室と東大の中須賀研究室だったのです。それを次の会議で発表したところ、次にウィッグス教授が提案してきたのが、キューブサットだったのです。そしてそれを世界で初めて成功させたのも、私たちだったのです。

図 2.4.1.1.2-3 東工大 webpage での記事（一部）

[https://www.titech.ac.jp/research/stories/space\\_and\\_satellite.html](https://www.titech.ac.jp/research/stories/space_and_satellite.html)

#### 2.4.1.2 国際情勢調査・将来動向検討

米国および欧州における超小型衛星を用いたビジネスおよび技術教育の最新動向を調査した。そして、第1回スマート宇宙システムシンポジウム（研究会）にて、調査報告を行った。

この調査では、特に次の5点に重点をおいた。

- (1) 超小型衛星における打上統計データ
- (2) 米国における超小型衛星ビジネス動向
- (3) 欧州における超小型衛星ビジネス動向
- (4) 欧米宇宙機関及び政府における技術育成戦略
- (5) 超小型衛星における技術動向

これにより得られた知見のポイントを以下に示す。なお、本調査の詳細資料を付録に収録した。

##### (1) 超小型衛星における打上統計データ

- － 2013年以降、30kg以下の超小型衛星の打上げ数が急激に増加し、民間投資による小型衛星事業が着実に拡大、2018年は欧米以外の参入（中国やオーストラリアなど）が見られている（図2.4.1.2-1）。
- － 2018年のアジアにおける小型衛星打上げシェアは45%、日本や中国がけん引役となり、東南アジア諸国が開発参入している。またCubeSat規格が牽引約となっており、中国も本格参入している。
- － 2019年は300機程度の小型衛星打上げが予測され、中国に続き、ロシア参入が注目されている。
- － 100kg以下衛星については、商用衛星が拡大し、民事衛星も堅調に推移。実利用が拡大しつつ、技術開発衛星数も堅調に推移している。
- － 200kg以下衛星の打ち上げ軌道は低軌道が91.2%と圧倒的に多いことに変わりはないが、2018年は火星ミッションのCubeSat「MARCO」が初めて打ち上げられた。
- － また、ミッションとしては、CubeSatでブロックチェーンミッション登場、フォーメーションフライトによる観測の宇宙望遠鏡の打上（観測失敗）、5年前にはマイクロ衛星で製造されていたAISミッションはCubeSatへ移行（exactEarthなど）、IoTコンステ3社が順次衛星を打上開始といったように、CubeSatクラスで高度なミッションを行うことがスタンダードとなりつつある。

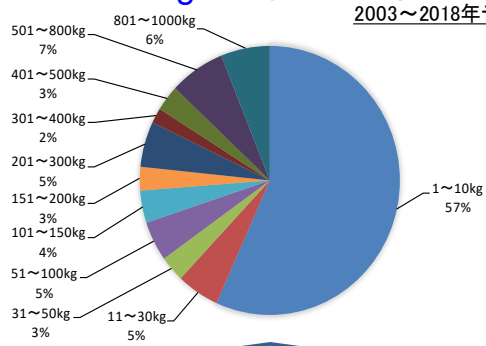
# 重量別、打上統計

2003～2018年データ

1000kg以下衛星の割合

2003～2018年データ

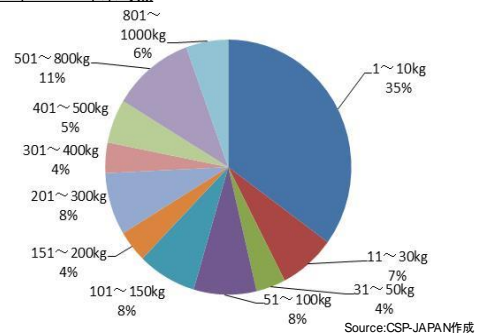
	打上衛星数	打上失敗衛星数
1～10kg	1080	84
11～30kg	101	8
31～50kg	59	6
51～100kg	91	13
101～150kg	74	2
151～200kg	54	2
201～300kg	104	1
301～400kg	35	0
401～500kg	59	3
501～800kg	130	6
801～1000kg	116	1
1001kg以上	1100	41
合計	3003	167



2003年～2013年末時点

	打上衛星数	打上失敗衛星数
1～10kg	208	21
11～30kg	44	4
31～50kg	23	4
51～100kg	49	9
101～150kg	46	2
151～200kg	24	2
201～300kg	47	1
301～400kg	23	0
401～500kg	33	1
501～800kg	64	3
801～1000kg	33	1
1001kg以上	699	29
合計	1293	77

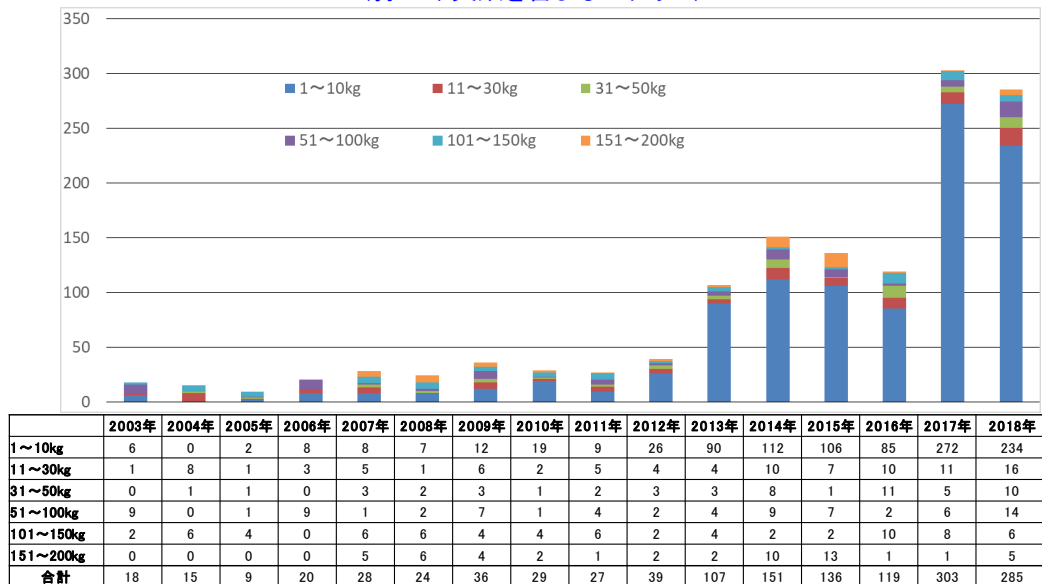
2003年～2013年末時点



Source: CSP-JAPAN作成

## 1～200kg衛星における打上統計(2003年～2018年末)

(打上げ失敗を含まないグラフ)



- 2018年は商用の光学コンステに加え、小型SAR事業衛星も打上開始
- 16Uサイズの商用Cubesat打上開始(IoT)、6Uサイズ火星中継ミッション成功
- 欧米のCubesat規格に中国が本格参入、打上(3Uサイズ、6Uサイズ)

Source: CSP-JAPAN作成

図 2.4.1.2-1 打ち上げ動向

### (2) 米国における超小型衛星ビジネス動向

- ー 米国での超小型衛星の主要企業として、キット販売の Pumpkin 社、キット及びミッションインテグレーションを行う Tyvak Nano-Satellite Systems 社、 CubeSat から ESPA クラス (180kg 程度)



のバス系部品販売と組立て事業を行う BCT（Blue Canyon Technologies）社があり、それを下支える部品及びエンジニアリングサポートを行う企業として少なくとも 85 社以上ある。

- 小型衛星ビジネスは、ビジネスチャンスがあると考えられている。特に投資が多い分野は、高速通信コンステレーション網。現状は 1 社負担では困難であり競合も多く、衛星とロケットとサービスの垂直統合型で実施されている。
- 地球観測分野は、光学衛星網（静止・動画含む）の投資もプレーヤーも多い状況、SAR 衛星は 2018 年に試験衛星が打ち上げ開始、今後マーケットが伸びると期待されている。
- 宇宙デブリ除去、電波情報収集、流れ星事業など、オリジナリティーある事業分野も市場がひろがりつつある。
- さらに ADS-B や AIS などの M2M 通信、IoT ミッションに関する事業は米国以外でも拡大中
- 宇宙状況把握 SSA（Space Situational Awareness）も商用と政府需要として注目されている。
- 一方で、米国における小型衛星ビジネスへの投資が近年過熱気味となっている。これに対して警告する声がある（図 2.4.1.2-2）。
- 米国における、中国への警戒感が非常に強い（中国も CubeSat コンステを展開）
- VC による宇宙投資による一方で、CVC（コーポレートベンチャーキャピタル）の拡大も小型衛星マーケット拡大のポイントとして期待されている。
- 今後は、事業展開した小型衛星ベンチャーのビジネスモデル成立がカギ。

## 宇宙投資の現状

2017年の1年間で世界中の宇宙企業へ投資された金額は約2500億円



Figure E-1. Common investments among the most space-focused VCs.  
宇宙ベンチャー企業へ投資を行う投資側との相関図

投資額や投資元を明らかにしない宇宙スタートアップ企業  
Source: Start-Up Space Update on Investment in Commercial Space Ventures 2018 24

図 2.4.1.2-2 宇宙投資の現状

### (3) 欧州における超小型衛星ビジネス動向

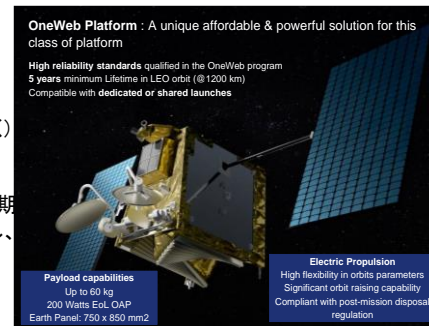
- 欧州では、CubeSat 部品のプレーヤーをいち早く集めて宣伝したオランダ ISIS (Innovative Solutions In Space) 社、CubeSat 部品の販売事業及び衛星開発事業を行う GOMSPACE 社、部品の品質管理と信頼性を重視したイギリス Clyde Space 社がある。

- 世界初の量産衛星である ONEWEB のツールズ量産工場が限定的に公開され、その製造ラインの仕組み、人的資源の配分に関する考え方等の情報をまとめている（図 2.4.1.2-3、図 2.4.1.2-4）。

### Airbus-DS社ONEWEB衛星の量産製造

- 600機のインターネット、プラットフォーム衛星網を構築予定
- 世界初の衛星自動生産工場。1週間に15機ベースの製造体制
- 製造工場はフロリダ州CCAFS敷地内（ケネディ宇宙センター近く）
- 衛星製造のオートメーション化。Airbus-DSにフランス政府も支援
- 衛星重量は150kg前後。電気推進搭載
- Euroconsultの試算によると、CAPEX per Gbps（Gbps当たりの初期投資）では、GEO/HEO HTSが\$2.5M~9.0M（2.5~9億円）に対し、ONEWEBは\$0.25M（2500万円）を目標としている。

既存ではない新たな製造方法の導入



ONEWEB衛星



製造の自動化プロセスの導入



製造ライン

Source : Airbus-DS

図 2.4.1.2-3 Airbus-DS 社による衛星の量産製造

## ツールズONEWEB量産ライン見学レポ

2018年12月6日訪問@Airbus-DSツールズ工場

- 各衛星は移動式の台車の上で組み立てられていた（次の組立・試験プロセスへ移行できるような流れとなっている）
- スラスター、通信ペイロード、構造、太陽電池とアームが“モジュールで製造”され、組み立てられていた
- スラスターモジュールは、1レーン用意され、組立・燃料充填、試験を一括のラインでできるよう設置していた（圧力タンクが12本程度見られた）
- 通信ペイロードモジュールも、1レーンが用意され、組立場所上部にカメラと測距装置？が設置され、製造過程の履歴及び組立作業の支援を行っている。
- 量産製造用のインテグレーションは、（向かって）左から右へ、スラスターモジュール、ペイロードモジュール、構造モジュールへの組み込み、エレキの組立、太陽電池パネルの設置という順序、電気試験を実施する場所も別途あった、チェックアウト用のチャンバー試験装置もあった。
- 現行は16日で1機が出来上がるようにスケジュールが組まれている
- ツールズ工場で10機つくり、ソユーズで打ち上げる。最大でSOYUZで32機打ち上げる計画。
- 2019年は製造を米フロリダに移し、大量生産に移行する。
- 衛星重量は150kg、（従来の）20~30倍安価に作れるようになった
- データアナリティクスを使用して、機械学習によりプロセス管理の改善点を（設計レビューでなく、実際の工数、時間、問題点などの統計的数値から）洗い出している
- ただし、ボトルネックとなる工程を変更するのではなく、基本的にはその作業を支援する環境・ツールなどによって改善する（プロセスは変えない）
- 1作業単位8時間で回るようにしている。実際には5-6時間で終わるようにしてマージンを設けている。つまり、作業員が1日の作業で完結できるようにプロセスを組んでいる。
- ペイロード作業員にTERMA社が入り出していた。



図 2.4.1.2-4 Airbus-DS 社のツールズ工場の状況



#### (4) 欧米宇宙機関及び政府における技術育成戦略

- 超小型衛星の宇宙政策としては、米国は育成が USAF 主体から NASA 主体へ移行している状況であり先端ミッション開発をすすめている。欧州は宇宙機関 ESA、EU 政府の開発支援、各国政府機関による事業化支援の 3 本柱の支援体制を確立している。特に ESA も QB50 プログラムの失敗から 2018 年は、CubeSat 技術の戦略的技術開発のロードマップを発表した。
- その他、各国で図 2.4.1.2-5 のように、戦略的に超小型衛星の開発支援を行っている。

### 各国の超小型衛星戦略

<p><b>アメリカ</b></p> <p>ムダな重複開発がない。大学教育・技術開発・サイエンス・軍事・商用ミッションが生み出されている。商務省が部品供給企業を把握し、必要な企業へNASAや軍を通じて育成予算投入する仕組み。</p> <p>部品の小型高性能化へ力を入れ、Additive Manufacturing導入により、短期・量産技術も開発中、地球近傍ならず深宇宙探査へのミッション化を進めている。民間投資も進みここ数年は宇宙ゴールドラッシュ。開発速度の短縮化を進めることで、他国が先んじて開発しても即座に開発、打上できる追従体制も整えつつある。1U~27Uサイズ開発動向</p> <p>支援元: USAF、NSF、NRO、NASA、民間投資</p> <p>予算規模: USAF-UNP(大学衛星プログラム)は\$1mil/年程度</p> <p>USAFとNROの予算規模は不明だが\$10mil/年前後と推定</p> <p>NSF(全米科学財団)の大学Cubesat支援は\$1.4mil/年程度</p> <p>NASA-HQは革新的超小型衛星開発へ\$5mil/年程度</p> <p>打上体制: 大型ロケット相乗(大学はELaNaプログラム)と小型ロケット</p> <p>打上手段の開発は、DARPA,NASAが民間支援(調達)</p> <p>打上手段: 米国全ての運用ロケットでPPOD、ISIPPODの搭載標準化</p> <p>NASAやNRO及び空軍の政府ロケットへ相乗りする方式</p>	<p><b>フランス</b></p> <p>2012年頃からMyriadeサイズ以下の衛星(Cubesat)を育成する方針へと転換、大学、サイエンス機関、企業らが開発、CNESの支援を受け手実証中。サイエンスミッション及び部品産業育成を中心に実施</p> <p>支援元: CNES(JANUS)、国防研究所</p> <p>体制: 大学、中小企業、宇宙産業団体、仏中堅企業がサポート</p> <p>打上手段: SOYUZ</p>
<p><b>オランダ</b></p> <p>超小型衛星での実績は少ないが商売上手。デルフト工科大学とベンチャーを中心に国際提携で存在感を発揮</p> <p>体制: 国立航空宇宙研究所(NLR)、デルフト工科大学、Dutch Space</p> <p>ベンチャー企業ISIS、大手企業TNO、部品供給SSBVなど</p> <p>打上手段: 外部調達だが、ISISがブローカー役で打上枠を供給</p> <p>搭載標準装置ISIPPODを欧VEGAや米Antaresで実績</p>	<p><b>イギリス</b></p> <p>小型衛星のパイオニアであったイギリスだが、Cubesatは開発着手には遅れ、初打上げは2013年になってから。一方、部品販売は輸出実績を挙げている。コスト重視の姿勢は米国よりも優れている。小さな宇宙機関・大学・企業・投資銀行との連携を強化中</p> <p>支援元: UK Space Agencyなど英国政府</p> <p>体制: SSTL、Clyde Spaceほか、中小企業</p> <p>打上手段: 基本はコスト競争による国際調達。安ければ利用する</p>
<p><b>イタリア</b></p> <p>欧州経済停滞により、存在感があまりないが、米国大学との研究提携で一定の成果を出そうとしている。</p> <p>支援元: ASI、国防省、ESA</p> <p>体制: ローマ大学、トリノ工科大学、ボローニャ大学等が開発</p> <p>打上手段: VEGAロケット及び欧州射場から上がるロケットを使用</p>	<p><b>カナダ</b></p> <p>国際提携路線のオランダとは違い、飛行実績を重ねて衛星や部品を輸出し、商業実績を挙げている。また、米SSL社という国外企業の買収にも積極的。超小型衛星の設計・製造・試験・打上・利用という一環したサービス体制を構築。近年は商用小型衛星サービスも開拓中</p> <p>支援元: CSA</p> <p>体制: UTIAS/SFL、COMDEV、Sinclair Interplanetary他、中小企業</p> <p>打上手段: PSLV、Rockot、SOYUZなどコスト競争による国際調達</p>
	<p><b>ルクセンブルグ</b></p> <p>世界NO.1の静止通信衛星SES社の次世代産業として、宇宙探査と小型衛星サービス産業に注目、政府ファンドで投資して、自国へ引き込みを行っている。2017年にはSPIRE社へ資本参加している。</p> <p>支援元: ルクセンブルク政府</p>

図 2.4.1.2-5 各国の超小型衛星戦略

#### (5) 超小型衛星における技術動向

- 超小型衛星の技術開発動向としては、今後コア技術になると見られる“フォーメーションフライト、ランデブードッキング技術”、“光通信・量子暗号通信技術”、“ハイゲインアンテナと通信技術”に加え、第 4 次産業革命として、次世代製造技術として MBSE、3D プリンター等の革新的技術が開発されている。
- 衛星産業はこれまでの工芸品製作のような業態から量産へと業態へと変化しており(図 2.4.1.2-6)、CubeSat はキット化・標準化・ユニットが進んでいる(図 2.4.1.2-7)。
- 部品メーカーは乱立状態であるが、CubeSat 用だけでなくマイクロ衛星用もコンポーネント、特に姿勢系の統合ユニット化が進んでおり、ユーザにとっては選択肢が広がる傾向(図 2.4.1.2-8)。

## 衛星産業の業態変化(工芸品から量産へ)

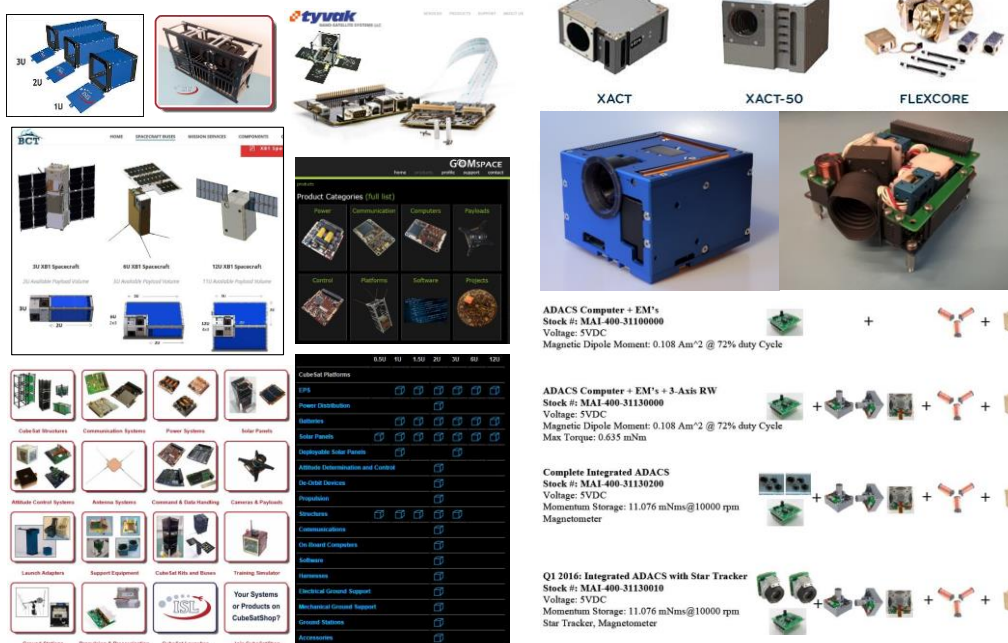
- 2000年初頭、100kg衛星で1m光学分解能は困難と言われていた。しかし現在は?
- 2000年初頭、通信衛星は大型化・超寿命化が進むと言われ、小型コンステ通信は倒産した。現在は?



図 2.4.1.2-6 衛星産業の業態変化

## キット化・標準化・ユニットが進むCubesat

- Cubesat Kit(世界中)/10cm四方形
- 姿勢制御はユニット化も進む



Source: ISIS, Tyvak, BCT, GOMSPACE, Clyde Space, MAI, Hyperion technologies

図 2.4.1.2-7 CubeSat のキット化・標準化・ユニット化

## 世界の小型衛星関連の部品メーカー価格帯

	Micro衛星用			Cubesat用(1U～27U+)		
スタートラッカ	欧州企業 3300～4300万円 (/1ユニット)	北米企業 1400万円 (1ユニット)	中国A社 1000万円 (1ユニット)	北米企業 325万円 (/1ユニット)		
リアクションホイール	欧州企業 1650～4000万円 (/3ユニット)	北米企業 250～600万円 (1ユニット)		北米企業 200～250万円 (1ユニット)	欧州企業 48万円 (/1ユニット)	
ADCS /GNC統合ユニット	価格情報なし			北米企業 131～994万円 (/1ユニット)	欧州企業 2000万円 (/1ユニット)	アフリカ企業 160～330万円 (/1ユニット)
磁気トルカ	欧州企業 1050～1061万円 (/3ユニット)	北米企業 110～140万円 (/1ユニット)		欧州企業 16万円 (/1ユニット)	欧州企業 96万円 (/3ユニット)	欧州企業 20万円 (/3ユニット)
太陽センサー	欧州企業 45～100万円 (/1ユニット)	欧州企業 120万円 (/1ユニット)	欧州企業 87～147万円 (/1ユニット)	欧州企業 33万円 (/1ユニット)	欧州企業 26～43万円 (/1ユニット)	北米企業 60万円 (/1ユニット)
磁気トルカ	欧州企業 1050～1061万円 (/3ユニット)	北米企業 110～140万円 (/1ユニット)		欧州企業 16万円 (/1ユニット)	欧州企業 96万円 (/3ユニット)	欧州企業 20万円 (/3ユニット)

- ◆ 現状は大手企業、古参企業、大学系ベンチャー、政府支援ベンチャーによる乱戦
- ◆ 実績の多い企業はプライス高、実績の少ない企業はプライス低
- ◆ 宇宙部品は近年、より安く、より使いやすいコンセプトが出てきており、姿勢制御コンポーネントについては、統合ユニットとして販売開始。これは、ユーザーが必要部品(STT、RW、MTQ、地球センサー等)を選択し、利用できる環境が整いつつある。
- ◆ 統合ユニットの今後は、**選択肢が拡大(メーカーや自社部品以外も選択可)**する可能性が考えられ、CubesatだけでなくMicrosat用も(BCT社事例)

図 2.4.1.2-8 小型衛星の姿勢系関連の価格帯

## 2.4.2 新規宇宙プロジェクト支援のためのセミナーの実施による産学連携モデルの創出 検討や課題等の外部発信に向けた準備検討

産学連携の重要性はいろいろな場所で叫ばれているが、机上のビジネス理論や法制度の説明会を行っても起業意思のある人材が極めて稀な日本ではほとんど効果がないと思われる。そこで我々は、我々自身で立ち上げた宇宙ベンチャー「天の技」をモデルケース・足がかりとして、産学連携による新規宇宙事業創生の実態調査を行うことにした。これにより、モデルケースの確立と現在の社会環境や法制度の問題点について実体験に基づいた調査を行い、外部に発信することを試みる。本報告もこの情報発信の成果の一部である。

### 【天の技の概要】

天の技は革新的衛星技術実証 1 号機の DLAS の知見をベースに、衛星搭載用コンポーネント販売を目指すベンチャー企業であり、東工大・谷津が技術アドバイザを担当する。



図 2.4.2-1: 東工大発ベンチャー称号授与式（左：天の技・工藤社長、右：東工大益学長）

<https://www.titech.ac.jp/news/2019/043335.html>

### 【大学との連携強化】

近年、個人・企業等の民間投資家は将来性のある投資先をかなり積極的に探している状態にあり、このような投機的資金の流入により宇宙ベンチャー企業がいくつも立ち上がった。ベンチャー企業に多いソフトウェアやデータサービス等の事業とは異なり、人材流動性が低い宇宙開発は技術者の獲得が難しく、事業者自身が全く実機開発経験をもたない様な企業も見られ、実機開発に必要な知見の欠如によりフライトの遅延やミッションの失敗なども起こり、投資家界限では「宇宙ベンチャー」に関して信用収縮の傾向が見られ初めた。天の技の資金調達は、ちょうどこの時期にスタートしたため、より明確に大学のブランドを利用した信用獲得を目論見、東工大認定ベンチャーの称号を利用することにした。東工大ベンチャー制度は、創業者が本学卒業後 5 年未満もしくは、本学教員の開発した知財を応用して事業を行うことを条件にした暖簾制度である。およそ 5 年の間は本学の知財を自由に利用することができ、これ以外の便宜はない。一方、これに関わる教員は、ベンチャーからの報酬が一切許されない上、本学利益相反委員会からの監視対象となり、対象企業との購入契約も厳しく制限される。

天の技は東工大・谷津の開発した知財を応用するという名目で東工大ベンチャーの称号を得た。供与する知的財産を明確化するため、我々は、DLAS 開発時に開発したいくつかのアルゴリズムを特許として出願した。（関連特許：特願 2018-139611 谷津、岩崎、菊谷、松永、特願 2018-134620 谷津）

航空宇宙産業では情報が公開されてしまう特許取得があまり一般的でなく、過去の特許を調査して

も、該当する技術分野の特許件数は極めて少ない。将来的に 天の技 は海外への事業展開を計画しているが、どの部分を特許化し、どの部分を秘匿するかといった特許戦略は大学には経験がなく判断が難しいため、戦略アドバイザーが必要である。このような東工大-天の技間の知的財産のやり取りや特許戦略については、経産省・特許庁からもヒアリングを受けており、連絡窓口は確保できている。

### 【研究資金獲得・投資家対応】

天の技は設立から日が浅く、実機開発経験がなかったために東工大からの技術的サポートが必須であることが明確であったが、NEDO などの公的研究資金獲得の際には東工大の寄与を明文化することを採用条件に課された。また、ベンチャーキャピタルは事業展開の上でも技術的な担保として、東工大担当者を役員に据えることを投資の条件とされた。この条件を満たすため、10 月より東工大・谷津が天の技の役員に就いている。このため、以降のベンチャーキャピタルとの面談や挨拶回りには谷津も同行することになった。

投資家との面談などで得られた重要な知見は投資家と研究者間の「採用・不採用の判断基準」の完全な相違である。宇宙開発は信頼性が全てであり、未実証の技術・装置には価値がないというのが研究者の認識であるが、この部分をどれほど宣伝しても技術に疎い投資家にはほとんど響かず、逆に技術的成立性が皆無でも「きらびやか」な事業プランが喜ばれる。また、「きらびやか」なプランには多くの場合根拠が必要ない。このような考え方の相違により、投資家の喜ぶビジネスプランは研究者の視点からみて荒唐無稽なものが多い。また、投資家の求めるゲインは一声「100 倍」である。このような数字は、情報・ソフトウェア事業では一般的であるが、定期的な超小型衛星の打ち上げがない日本国内の宇宙系ハードウェア事業にとっては極めて厳しいハードルである。

「超小型衛星」や「ほどよし信頼性」という単語は、「早い」「安い」「簡単」というキャッチフレーズで多くの人々に好意的に認知されつつあるが、その開発の実態は地道な検証実験の積み重ねであり、本質的に高度な技術である。実際に、超小型衛星はもともと故障する可能性のある部品を使って、大型衛星よりも遥かに小さな体積に詰め込むため、安全マージンが極めて小さく、システムズ・エンジニアリングによる信頼性管理が困難である。事業者の甘い認識と現実の宇宙とのギャップをいかに埋めるかが、民間宇宙事業がスタートアップで成功するかどうかの分かれ道になるだろう。技術に疎い投資家・経営者が多い状況では、もともとの計画に不備のあった事業であっても、それらの失敗が投資家心理的にマイナスに影響すると、今後の日本のニュースペース全体の将来を左右しかねない。

### 【人材確保】

スタートアップの大きな課題の一つが人材確保である。天の技では、この課題を克服する方法として、東工大の学生をアルバイトとして採用することにした。このため、オフィスを大学の近辺に移転し、文部科学省の平成 30 年度宇宙航空科学技術推進委託費で採択された本事業の関連研究室の学生、アマチュアロケットサークルの部員を育成・雇用している。もともと、高水準の教育を受けている学生であり、搭載品の設計・製造・計測なども通常の人材と比較して遥かにコストパフォーマンスが高い。一方で、アルバイトであるがゆえの進捗管理の難しさも露呈している。本質的にこの課題を解決するためには、アルバイトを管理監督できる正社員の増員が必須であろう。

### 【情報発信】

天の技の事業について、可能な限り多くの情報発信を行うべく、多数のプレスリリースを実施した。



メディアの目に触れる回数を稼ぐため、JAXA 革新的衛星技術実証 2 号機のプレスリリースへの積極的参加・利用、東工大単独プレスリリース、投資家からのプレスリリースを行った。本事業に関連するプレスリリース・Web ページ等を以下にまとめる。

- [1] 深層学習でリアルタイム軌道上画像識別を実現  
[https://www.titech.ac.jp/news/pdf/tokyotechpr20181218\\_dlas.pdf](https://www.titech.ac.jp/news/pdf/tokyotechpr20181218_dlas.pdf)  
<https://www.titech.ac.jp/news/2018/043225.html>
- [2] 研究テーマを宇宙で実証 JAXA のイプシロンロケット 4 号機で打ち上げへ  
<https://www.titech.ac.jp/news/2019/043335.html>
- [3] 超小型人工衛星で宇宙産業を切り開く  
[https://www.titech.ac.jp/research/stories/space\\_and\\_satellite.html](https://www.titech.ac.jp/research/stories/space_and_satellite.html)
- [4] 新宇宙産業を創出するスマート宇宙機器・システムの研究開発拠点  
<http://lss.mes.titech.ac.jp/smartspace/>
- [5] 深層学習を応用した革新的姿勢センサの開発  
<http://www.hp.phys.titech.ac.jp/yatsu/DLAS/>
- [6] Facebook DLAS Project ページ  
<https://www.facebook.com/TokyoTechSmallSatTeam/>
- [7] JAXA 革新的衛星技術実証プログラム  
<http://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/index.html>
- [8] みらい創造一号ファンドが、宇宙関連ベンチャー 2 社への新規投資を実施いたしました  
[http://miraisozo.co.jp/wp/wp-content/uploads/2018/12/181227\\_mirai1\\_invest4.pdf](http://miraisozo.co.jp/wp/wp-content/uploads/2018/12/181227_mirai1_invest4.pdf)
- [9] 【MBC 試作ファンド】超小型衛星用製品の開発をおこなう宇宙スタートアップへ投資  
<https://makersboot.camp/ja/pressrelease-ja/new-startup-investment-amanogi/>

また、これらウェブベースでの情報発信に加え、経産省の支援を受けてコロラド州で開かれた展示会へ製品を出展した。展示ブースでは、試作中の恒星姿勢計（STT）のモックアップ展示と、パンフレットの配布などを行った。現実問題として、日本はキューブサットの開発・産業化において完全に立ち遅れた状態であり、特に姿勢制御系については、国内に競合する企業が存在しない状態であるが、米国・欧州・インド・中国・南アフリカなどには既に多くのコンポーネント製造業者が事業を始めており、これを切り崩すことは容易ではない。一方で、技術的成熟度では、米国企業数社だけが頭一つ抜けた状態ではあるが、そのほかの企業は軌道上実証で数多くの不具合が報告されている。我々は、JAXA の革新的衛星技術実証 1 号機に続いて 2 号機へのコンポーネント搭載が確定しており、軌道上実証を成功させることで、一躍米国企業と技術的に競合できるポジションを獲得することができるだろう。

海外への情報発信はまだほとんど行っていないものの、既に海外の大手航空宇宙企業から情報収集・投資の問い合わせが来ており、海外事業者の宇宙系スタートアップに対する情報感度の高さ、投資への積極性を痛感させられた。また、衛星軌道上でのエッジ AI・画像識別実験（DLAS/ECAM）に関する発表は、国内の学会とは異なり、海外の学会では Planet 社等から問い合わせがあるなど大変な反響であり、今後も情報科学とのコラボレーションは必須であろう。



図 2.4.2-2: 35th Space Symposium(コロラド州)の天の技展示ブース

### 2.4.3 国内外学術会議における研究成果の発表等

本年度の本事業に関する成果発表を行った（詳細は付録として収録）。

## 2.5 若手研究者等の育成等

### 2.5.1 目的

学生や若手研究者等を対象として、スマート宇宙システムの検討等に関する技術的な検討を行う定期会議等を開催し、学生や若手研究者等による主体的研究開発や協力企業等でのインターンを通じた実践的育成のための基盤整備を行う。

### 2.5.2 定期会議

スマート宇宙システムである超小型衛星「ひばり」、および姿勢センサも含めた各種サブシステムに関する詳細な技術的検討を行うために、基本的に毎週水曜日午後5時から東京工業大学・大岡山キャンパスにて定期会議を開催した。

下記に、定期会議の開催した日時を示す。参加者は、主に、東工大・松永研、河合研の教員、学生、本事業で採用した研究員が参加した。また、1月以降は、天の技の社長も、超小型衛星「ひばり」に搭載を予定している姿勢センサのインターフェイス調整や開発状況報告を行うために毎回参加している。

#### 定期会議の実績

2018年9月26日	午後5時から8時	参加者：12名
2018年10月3日	午後5時から7時	参加者：12名
2018年11月14日	午後5時から9時	参加者：11名
2018年11月21日	午後5時から8時	参加者：13名
2018年11月28日	午後5時から8時	参加者：13名
2018年12月5日	午後5時から8時	参加者：10名
2018年12月12日	午後5時から7時	参加者：12名
2018年12月19日	午後5時から9時	参加者：12名
2018年12月26日	午後5時から7時	参加者：12名
2019年1月9日	午後5時から7時	参加者：11名
2019年1月16日	午後5時から7時	参加者：15名
2019年1月30日	午後5時から8時	参加者：13名
2019年2月6日	午後5時から8時	参加者：10名
2019年2月13日	午後5時から8時	参加者：15名
2019年2月20日	午後5時から8時	参加者：15名
2019年2月27日	午後5時から7時	参加者：13名
2019年3月6日	午後5時から8時	参加者：14名
2019年3月20日	午後5時から9時	参加者：15名
2019年3月27日	午後5時から8時	参加者：14名

### 2.5.3 インターン

学生や若手研究者等による主体的研究開発や協力企業等でのインターンを通じた実践的育成を行った。下記にインターン先の会社名と期間、内容を示す。

#### 1. 株式会社天の技

2018/11～2019/1, 姿勢系から STT へのスペック要求検討

2018/11～2019/3, STT ソフトウェア開発, センサ性能試験

2018/11～2019/3, ECAM 画像処理, FPGA 開発



2018/11～2019/3, STT 回路開発, FPGA 開発, センサ性能試験

2. 株式会社アクセルスペース

2018/6～2019/3, 実衛星の姿勢解析

3. インターステラテクノロジズ株式会社

2019/3, 部品製作, 部品選定

#### 2.5.4 まとめ

宇宙工学に貢献するという理念の下で、衛星開発を真剣に実践することにより、真に有望な若手研究者や技術者が育つ、という方針で、学生らには定期会議やインターンへの積極的な参加を促した。その成果の一端が、この報告書の内容にも反映されている。今後も継続して実践していきたい。

### 3.まとめ

前章までにおいて、本年度における本事業の成果をまとめた。

まず、本事業において、大学等が持つシーズを基にした産学連携で実施する具体的な出口として、2.1 および 2.2 節にて、下記のスマート宇宙機器 3 点、およびスマート宇宙システム 1 点について、仕様検討や概念設計等の開発状況を詳述した。

#### 1) スマート宇宙機器

##### a) 機械学習利用姿勢・観測センサ等

背景の調査、目的、衛星画像からのオブジェクト検出、機械学習を利用した衛星姿勢測定について、延べ、多数の超小型衛星や CubeSat による地球観測は、現在国内外で注目されている領域であり、機械学習等の人工知能技術は衛星の運用や衛星データ解析のスマート化に有用な技術であること、衛星画像でオブジェクト認識を行うための技術的課題を明確化し、商用を見込んだ基本仕様に必要な知見を得た。

##### b) 軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイ等

宇宙用構造材料として、靱性を有する熱可塑性樹脂母材の炭素繊維複合材料（CFRTP）に注目し、その開発に関して記述した。次に、軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイの具体例として、波形断面を持つ閉断面伸展ブームを提案し、その開発および、自己展開パネル構造による展開アレイ構造の検討を行い、商用を見込んだ基本仕様に必要な知見を得た。さらに、国際会議 SciTech2019 にて、展開トラス・ブームと高歪複合材料のセッションが設けられ、この分野の研究・開発の方向性が確かであること、欧米に比較しても先駆的な研究・開発を進めている部分のあることが分かった。

##### c) 高速通信用展開アンテナ等

高速通信用展開アンテナ等の研究開発に関連して、小型衛星に搭載可能な高速通信用展開アンテナの基本仕様を開口径  $\phi 1\text{m}$ 、Ka 帯まで使用可能な展開アンテナとした。この仕様に基づいた設計検討を行い、基本コンセプトを扇子型展開アンテナとし、仕様を満足する設計結果を得た。次に、展開構造の展開運動に大きな影響を与える摺動部に着目して、摺動部の展開性評価をするために、摩擦試験機と真空チャンバーからなる試験装置を製作した。高速通信用展開アンテナ等や軽量高剛性伸展収納ブーム・アレイ等に用いる摩擦摺動部の宇宙環境（高真空かつ低温／高温環境）下での摩擦挙動を定量的に把握するために、今後、この装置を使用できる。

#### 2) スマート宇宙システム

##### a) 可変形状機能超小型衛星システム

スマート宇宙システムとしての可変形状機能を有する超小型衛星システムの設計・開発・評価として、「ひばり」衛星の概要を背景、ミッション定義、システム検討、スケジュールについて述べ、特に、ひばり衛星の BBM 開発に必要な候補機器の選定と動作検証結果を電源系、通信系、姿勢系、ミッション系に分けて詳述した。そして、放射線試験(SEE、TID)の結果についても述べた。さらに、ひばりで実証される技術の先にある新しいビジネス、宇宙システムの展望をまとめた。

次に、実用化促進、宇宙利用産業の発展、新産業の創出、社会的課題の解決を目指して、衛星開発や運用を行う上で必須な下記の試験運用設備を用いた利用サービスを拡充するための活動における課

題や知見に関して、2.3 節にて詳述した。

a) 放射線実験施設等

耐放射線技術に関して、東京工業大学のコバルト照射実験施設と連携し、大学、民間企業等のユーザーによる照射試験の実施機会を確保して試験実施を容易にする仕組みを作るとともに、今後のサービス向上を図るための検討を進めた。

b) 海外地上管制運用局等

通信技術に関して、マサチューセッツ工科大学が管理するシンガポール局（S バンド）等のリモート運用のための検討を進めた。

c) スパコン等を用いた軌道上観測データ・処理技術等の知見共有サービス等

取得した大量データをスパコン等の高性能計算機で解析し、有益な情報を引き出す手法等の検討を行った。

次に、拠点機関及び参画機関以外の機関に所属する研究者や企業関係者等に対しても情報提供をするために、新規宇宙プロジェクト創出支援と産学ネットワーク形成に関連した活動に関して、2.4 節にて詳述した。

a) ユーザーとの将来利用要求・設計仕様の検討、国際情勢調査・将来動向検討等

b) 新規宇宙プロジェクト支援のためのセミナーの実施による産学連携モデルの創出検討や課題等の外部発信に向けた準備検討

c) 国内外学術会議における研究成果の発表等

特に、産学連携の具体的なモデルケースとして、本事業の参画機関である宇宙ベンチャー「天の技」を取り上げ、産学連携による新規宇宙事業創生の実践的な実態調査を行っており、モデルケースの確立と現在の社会環境や法制度の問題点を含む実体験の中間報告をまとめた。

また、本事業の website を開設し、事業を開始したことを周知した。

さらに、スマート宇宙システムシンポジウム（研究会）を開催して、一般の方に対して、本事業の概要、超小型衛星の国際動向、そして、Old Space や New Space を代表する方からの講演、討論会や懇親会を通して、当該分野を振興するための意見交換を行った。

スマート宇宙 HP: <http://lss.mes.titech.ac.jp/smartspace/index.html>

シンポジウム: <http://lss.mes.titech.ac.jp/smartspace/symposiums.html>

最後に、人材育成システム、社会的・産業的な視点を持った人材育成を目指して、本事業を通した若手研究者等の育成に関連した活動を、2.5 節に記載した。

以上より、全体を通して計画通り進んでいると自己評価する。

## 付録 1 学会等発表実績

次頁以降に、2.4.3 節の国内外学術会議における研究成果の発表等の実績を掲載する。

様式第21

学会等発表実績

委託業務題目：新宇宙産業を創出するスマート宇宙機器・システムの研究開発拠点

機関名：国立大学法人東京工業大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
スマート宇宙システムの研究開発拠点構想	松永三郎	UNISEC ワークショップ 2018, 静岡大学, 静岡	2018年12月1-2日	国内
高機能なスマート宇宙機器・システムの研究開発拠点構想	松永三郎, 古谷寛, 谷津陽一, 林崎規祐, 宮崎康行, 中村和行, 渡邊秋人, 工藤裕	No. 18-92講演会 第27回スペース・エンジニアリング・コンファレンス [SEC' 18], 日本機械学会, 桂浜荘, 高知	2018年12月20日（木）, 21日（金）	国内
全体概要とひばり衛星プロジェクト	松永三郎	第1回スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）, 東工大, 東京	2019年1月22日（火）	国内
AI技術による衛星画像解析とその応用方法の検討	工藤 裕, 谷津陽一	第1回スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）, 東工大, 東京	2019年1月22日（火）	国内
高背景輝度での点源抽出や宇宙線の除去を行う超小型衛星用スタートラッカーの開発・軌道上実験について	間宮英生, 飯田康太, 小澤俊貴, 谷津陽一, 河合誠之, 菊谷侑平, 佐々木謙一, 新谷勇介, 小泉 翔, 増田雄斗, 岩崎陽平, 渡邊 奎, 古谷航志, 松永三郎, 下川辺隆史, 工藤裕	日本天文学会2018年秋季年会, 兵庫県立大学姫路工学キャンパス	2018年9月19日（水）～21日（金）	国内
広角地球カメラを用いた姿勢センサーのためのニューラルネットワークを応用した画像識別	佐々木謙一, 菊谷侑平, 小泉翔, 松永三郎	第62回宇宙科学技術連合講演会, 久留米	2018年10月24日～26日	国内
画像認識を用いた低コストかつ高性能な地球センサ・スタートラッカーの性能評価と運用計画	渡邊 奎, 菊谷侑平, 佐々木謙一, 小澤俊貴, 新谷勇介, 小泉 翔, 増田雄斗, 岩崎陽平, 古谷航志, 間宮英生, 谷津陽一, 松永三郎	第62回宇宙科学技術連合講演会, 久留米	2018年10月24日～26日	国内
可視光画像センサを用いた衛星の姿勢変化検出に関する研究	菊谷侑平, 松永三郎	第62回宇宙科学技術連合講演会, 久留米	2018年10月24日～26日	国内
特徴点位置推定を用いた低軌道衛星の相対姿勢検出手法について	菊谷侑平, 松永三郎	No. 18-92講演会 第27回スペース・エンジニアリング・コンファレンス [SEC' 18], 日本機械学会, 桂浜荘, 高知	2018年12月20日（木）, 21日（金）	国内
超小型衛星用スタートラッカの開発と軌道上実証	間宮英生, 小澤俊貴, 谷津陽一, 河合誠之, 菊谷侑平, 佐々木謙一, 新谷勇介, 小泉翔, 増田雄斗, 岩崎陽平, 渡邊 奎, 松永三郎, 下川辺隆史, 工藤裕	日本天文学会2019年春季年会, 法政大学小金井キャンパス	2019年3月14日（木）～17日（日）	国内
軽量高剛性伸張収納ブーム・アレイ	渡邊秋人, 古谷 寛	第1回スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）, 東工大, 東京	2019年1月22日（火）	国内
波形CFRP閉断面ブームの収納・展開機構の試作	岡田秀明, 古谷 寛, 渡邊秋人	第27回スペース・エンジニアリング・コンファレンス [SEC' 18], 高知	Dec. 20-21, 2018.	国内
波型閉断面を有する伸張ブームの断面圧縮に伴う応力分布解析	岡田秀明, 古谷 寛	第34回宇宙構造・材料シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 相模原	Dec. 14, 2018.	国内
コンベックステープの巻き付け張力と曲率の不均一に関する実験的考察	中倉拓哉, 古谷 寛	第34回宇宙構造・材料シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 相模原	Dec. 14, 2018.	国内
OrigamiSat-1における平織布を用いた展開膜の展開抵抗の実験的検討	仲鉢貴臣, 古谷 寛	第34回宇宙構造・材料シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 相模原	Dec. 14, 2018.	国内
コンベックスパネルを用いた二次元自己展開構造の概念モデルの試作	田村 匠, 古谷 寛	第34回宇宙構造・材料シンポジウム, JAXA宇宙科学研究所, 相模原	Dec. 14, 2018.	国内

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
波形閉断面伸張ブームの展開トルク特性計測	岡田秀明, 古谷 寛	第62回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2018-4298, 久留米	Oct. 24-26, 2018.	国内
Concept and Structural Properties of Deployable Boom with Corrugated Closed Section	Hideaki Okada, Hiroshi Furuya	69th IAC, IAC-18. C2. 2. 7, Bremen	Oct. 1-5, 2018.	国外
小型衛星用高精度展開アンテナの開発	中村和行, 宮崎康行	第1回スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）, 東工大, 東京	2019年1月22日（火）	国内
指向安定性を考慮した可変形状姿勢制御のための駆動機構検討	渡邊奎, 新谷勇介, 松永三郎	日本機械学会 2018年度年次大会, 関西大学, 大阪	2018年9月9日（日）～12日（水）	国内
可変形状機能と大気抵抗を用いた超小型衛星の軌道と姿勢の制御	岩崎陽平, 松永三郎	第62回宇宙科学技術連合講演会, 久留米	2018年10月24日～26日	国内
可変形状姿勢制御のための駆動機構の計測システムの構築	新谷勇介, 松永三郎	第62回宇宙科学技術連合講演会, 久留米	2018年10月24日～26日	国内
可変形状姿勢制御方式における衛星のモデル化誤差や外乱を考慮した制御アルゴリズム	恒光 翼, 松永三郎	第62回宇宙科学技術連合講演会, 久留米	2018年10月24日～26日	国内
形状可変機構とSGCMGを併用した角運動量保存則に基づく姿勢制御について	河尻翔太, 松永三郎	第62回宇宙科学技術連合講演会, 久留米	2018年10月24日～26日	国内
放射線試験サービス	林崎規託, 谷津陽一	第1回スマート宇宙機器システムシンポジウム（研究会）, 東工大, 東京	2019年1月22日（火）	国内

## 付録 2 超小型衛星におけるビジネス動向調査

次頁以降に、2.4.1.2 節の国際情勢調査・将来動向検討での議論の元になった資料を掲載する。

「新宇宙産業を創出するスマート宇宙機器・システムの研究開発拠点」

# 超小型衛星におけるビジネス 動向調査

## 成果報告書

シー・エス・ピー・ジャパン(株)  
航空宇宙政策・産業グループシニアアナリスト  
金岡充晃

kaneoka@csp.co.jp

2019年3月15日





# 報告書概要

- 本報告資料は、Cubesatが打上げられた2013年～2018年末までの打上統計データをまとめている。2013年以降、30kg以下の超小型衛星の打上げ数が急激に増加し、民間投資による小型衛星事業が着実に拡大、2018年は欧米以外の参入（中国やオーストラリアなど）が見られている。
- 2018年のアジアにおける小型衛星打上げシェアは45%、日本や中国がけん引役となり、東南アジア諸国が開発参入している。また、Cubesat規格が牽引約となっており、中国も本格参入
- 2019年は300機程度の小型衛星打上げが予測され、中国に続き、ロシア参入が注目されている。
- 米国での超小型衛星の主要企業として、キット販売のPumpkin社、キット及びミッションインテグレーションを行う Tyvak Nano-Satellite Systems社、CubesatからESPAクラス（180kg程度）のバス系部品販売と組立て事業を行うBCT（Blue Canyon Technologies）社があり、それを下支えする部品及びエンジニアリングサポートを行う企業として少なくとも85社以上ある。
- 欧州では、Cubesat部品のプレーヤーをいち早く集めて宣伝したオランダISIS（Innovative Solutions In Space）社、Cubesat部品の販売事業及び衛星開発事業を行うGOMSPACE社、部品の品質管理と信頼性を重視したイギリスClyde Space社がある。
- 世界初の量産衛星であるONEWEBのツールズ量産工場が限定的に公開され、その製造ラインの仕組み、人的資源の配分に関する考え方等の情報をまとめている。
- 超小型衛星の宇宙政策としては、米国は育成がUSAF主体からNASA主体へ移行している状況であり先端ミッション開発をすすめている。欧州は宇宙機関ESA、EU政府の開発支援、各国政府機関による事業化支援の3本柱の支援体制を確立している。特にESAもQB50プログラムの失敗から2018年は、Cubesat技術の戦略的技術開発のロードマップを発表した。
- 超小型衛星の技術開発動向としては、今後コア技術になると見られる“フォーメーションフライト、ランデブードッキング技術”、“光通信・量子暗号通信技術”、“ハイゲインアンテナと通信技術”に加え、第4次産業革命として、次世代製造技術としてMBSE、3Dプリンター等の革新的技術が開発されている。

# CONTENTS

1. 超小型衛星における打上統計データ・・・・・・・・ P4
2. 米国における超小型衛星ビジネス動向・・・・・・・・ P20
3. 欧州における超小型衛星ビジネス動向・・・・・・・・ P27
4. 欧米宇宙機関及び政府における技術育成戦略 ・P32
5. 超小型衛星における技術動向・・・・・・・・ P41

# 1. 超小型衛星における 打上統計データ

2019年3月版

# 重量別、打上統計

2003～2018年データ

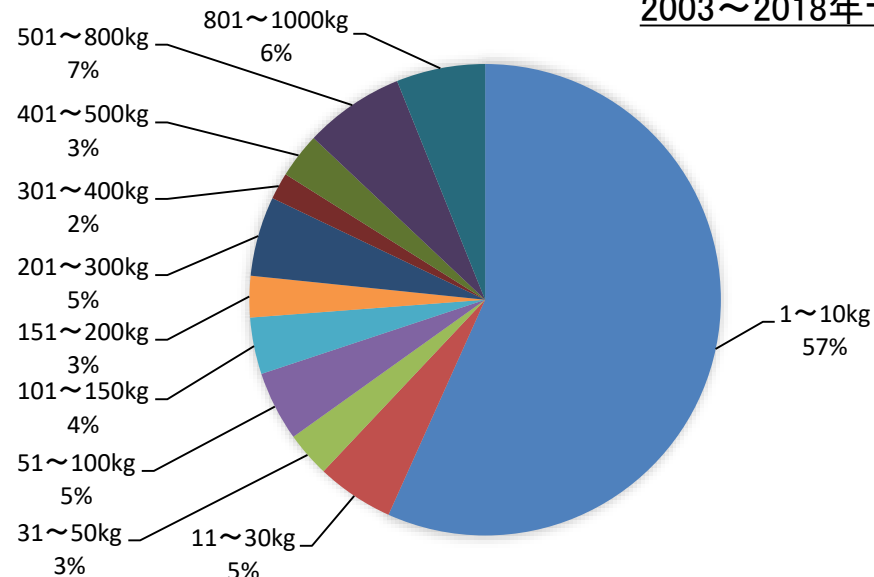
	打上衛星数	打上失敗衛星数
1～10kg	1080	84
11～30kg	101	8
31～50kg	59	6
51～100kg	91	13
101～150kg	74	2
151～200kg	54	2
201～300kg	104	1
301～400kg	35	0
401～500kg	59	3
501～800kg	130	6
801～1000kg	116	1
1001kg以上	1100	41
合計	3003	167

2003年～2013年末時点

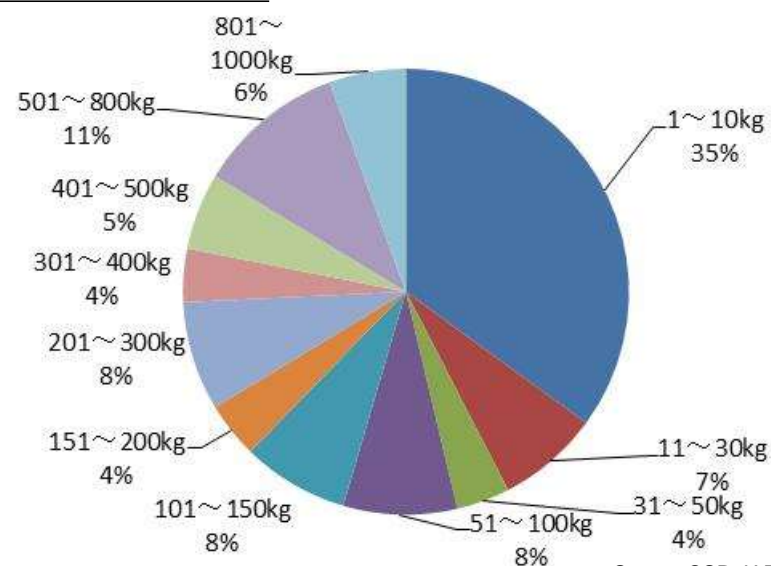
	打上衛星数	打上失敗衛星数
1～10kg	208	21
11～30kg	44	4
31～50kg	23	4
51～100kg	49	9
101～150kg	46	2
151～200kg	24	2
201～300kg	47	1
301～400kg	23	0
401～500kg	33	1
501～800kg	64	3
801～1000kg	33	1
1001kg以上	699	29
合計	1293	77

1000kg以下衛星の割合

2003～2018年データ

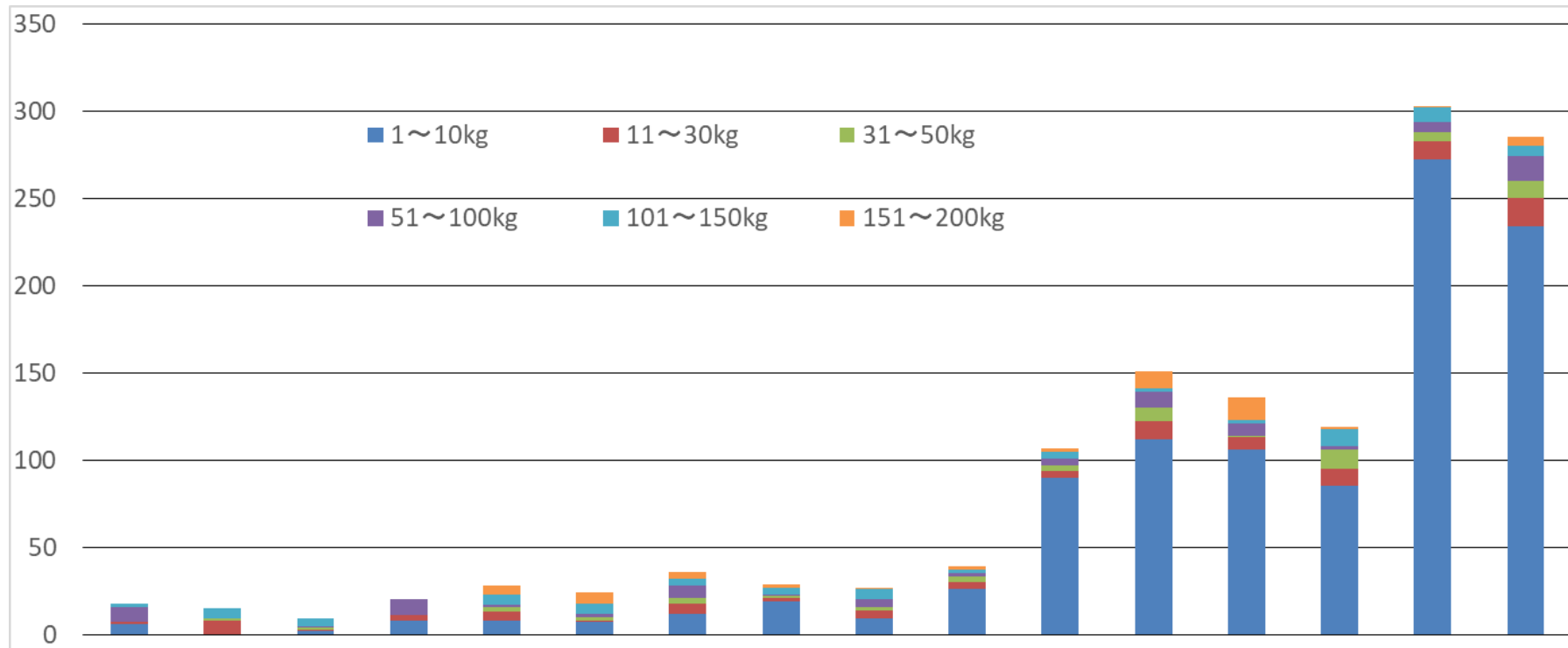


2003年～2013年末時点



# 1~200kg衛星における打上統計(2003年~2018年末)

(打上げ失敗を含まないグラフ)

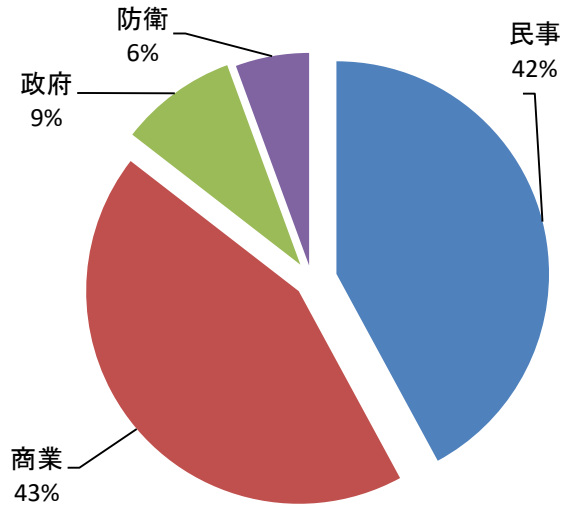


	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
1~10kg	6	0	2	8	8	7	12	19	9	26	90	112	106	85	272	234
11~30kg	1	8	1	3	5	1	6	2	5	4	4	10	7	10	11	16
31~50kg	0	1	1	0	3	2	3	1	2	3	3	8	1	11	5	10
51~100kg	9	0	1	9	1	2	7	1	4	2	4	9	7	2	6	14
101~150kg	2	6	4	0	6	6	4	4	6	2	4	2	2	10	8	6
151~200kg	0	0	0	0	5	6	4	2	1	2	2	10	13	1	1	5
合計	18	15	9	20	28	24	36	29	27	39	107	151	136	119	303	285

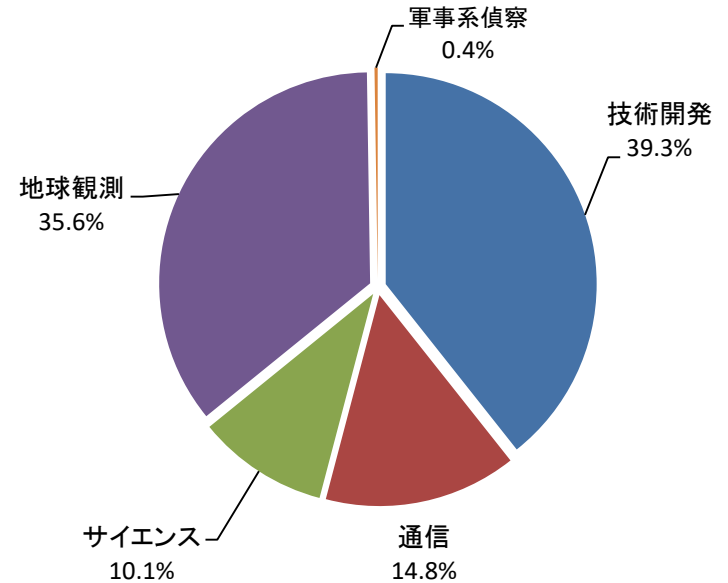
- 2018年は商用の光学コンステに加え、小型SAR事業衛星も打上開始
- 16Uサイズの商用Cubesat打上開始(IoT)、6Uサイズ火星中継ミッション成功
- 欧米のCubesat規格に中国が本格参入、打上(3Uサイズ、6Uサイズ)

# 100kg以下衛星の種類及びミッション (2003～2018年)

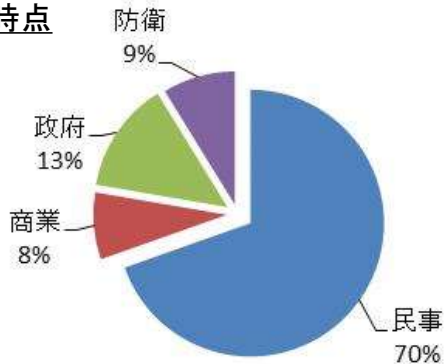
2003～2018年データ 衛星の分野分析



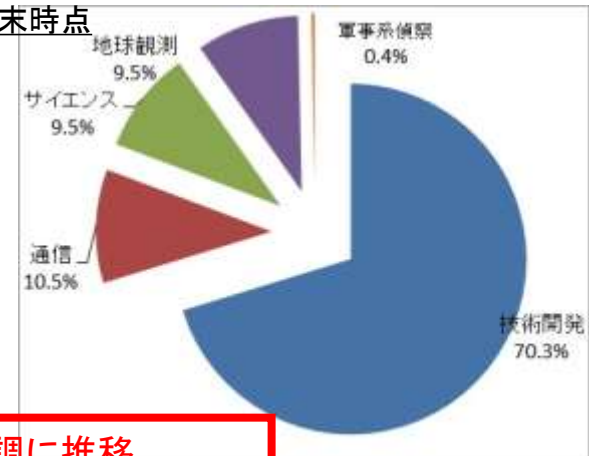
2003～2018年データ 衛星のミッション分析



2003年～2013年末時点



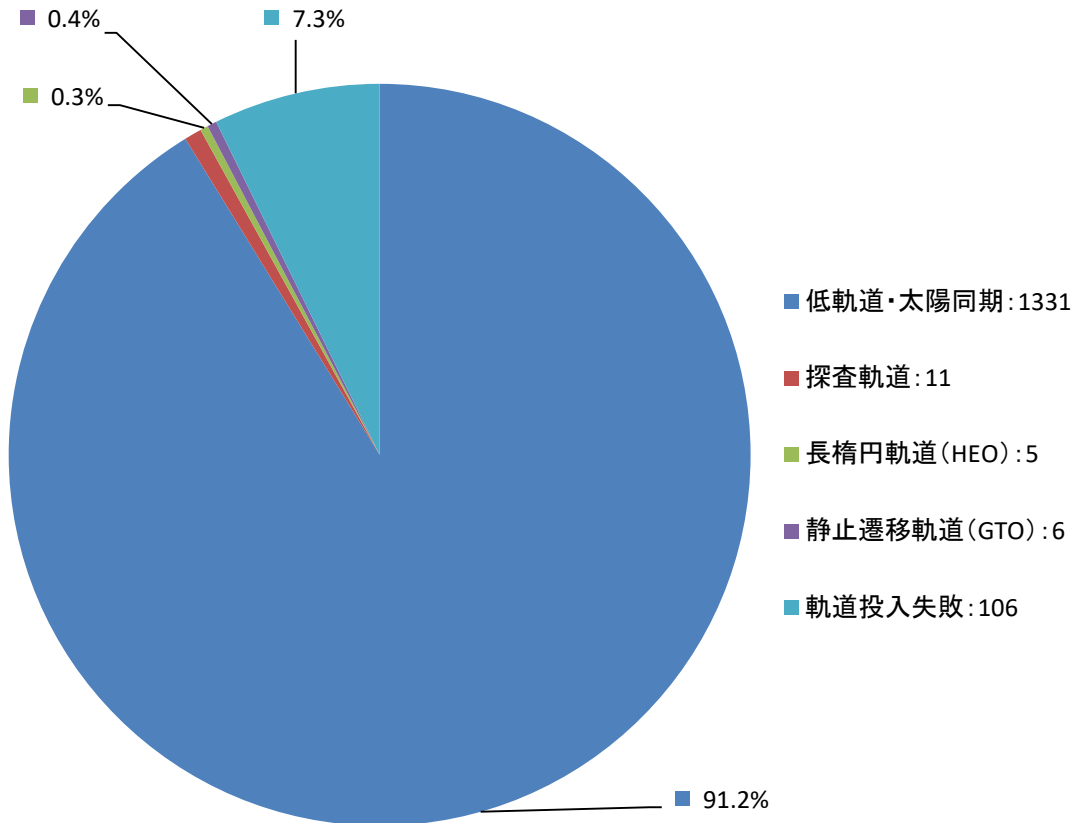
2003年～2013年末時点



商用衛星が拡大し、民事衛星も堅調に推移  
実利用が拡大しつつ、技術開発衛星数も堅調に推移

# 200kg以下の打上軌道

(2003～2018年)



低軌道で投入が圧倒的に多い

2018年はCubesatの火星ミッション初打上 (MARCO)



# Cubesat打上実績の分析

## サイズの傾向

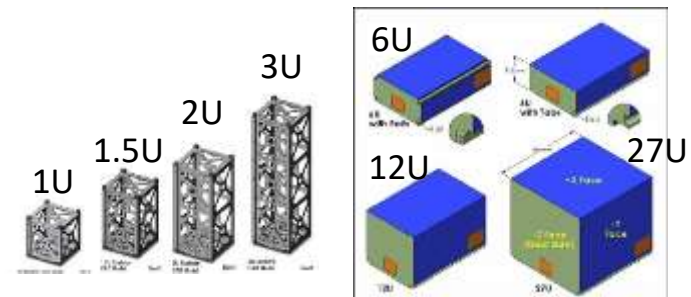
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	合計
0.25U																4	4
1U	5		3	14	6	3	8	5	6	15	43	17	12	12	15	35	199
1.5U								4	2		13		18	2	4	2	45
2U				1		1	1			2	3	6	7	6	37	14	78
3U	1			1	1	2		7	2	6	27	107	76	59	203	141	633
3.5U、5U															2	0	2
6U												2	2	2	12	36	54
16U																1	1
他	2	10	2	12	6	2	9	5	7	7	8	19	18	15	10	17	149
合計	8	10	5	28	13	8	18	21	17	30	94	151	133	96	283	250	915

備考: 他とは、15cm四方、17cm四方など、標準化サイズではない30kg以下の衛星

## 開発組織の傾向

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	合計
大学・高校衛星	7	6	4	18	10	6	13	9	9	20	35	32	28	22	67	71	357
宇宙機関		1	1	6			2	3		2	10	4	16	10	13	11	79
軍事・国家研究所	1			3				7		3	27	3	15	11	10	41	121
民間企業		3		1	3	2	3	2	8	5	22	112	74	53	193	127	608
合計	8	10	5	28	13	8	18	21	17	30	94	151	133	96	283	250	915

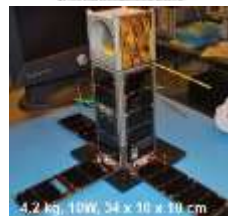
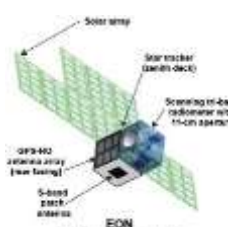
- Cubesatでブロックチェーンミッションが初登場
- FF観測の宇宙望遠鏡ミッション打上(観測失敗)
- 5年前にマイクロ衛星で製造されていたAISミッションはCubesatへ移行(exactEarthなど)
- IoTコンステ3社が順次衛星を打上開始



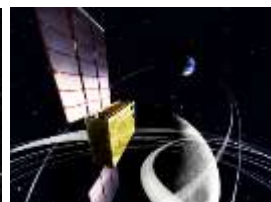
# 2018年時点のCubesatミッション



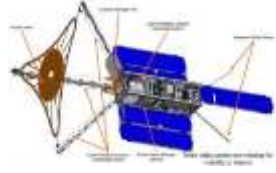
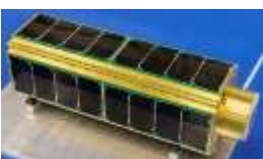
(画像+動画)



中分解能光学 M2M/IoT/AIS/ADS-B マイクロ波観測(気象) GPS掩蔽観測(気象) 電波混雑・解析等 ガスエミッション 風速観測(気象) 高速通信Cube  
 Corvus-HD(16U) Lemur(3U) EON-MW(12U) Lemur(3U) Pathfinder Promethean Labs Hyper Cube Analytical Space  
 Dove,Flock(3U) GOMX 3(3U) MicroMAS(3U) PlanetiQ(3U) Bluefield NSLComm



(Ionosphere Thermosphere)



バイオ実験衛星 月・火星・小惑星探査 FF/ドッキング Re-entry De-Orbit 戦域通信 測位衛星精度向上 サイエンス  
 BioSentinel(6U) EQUULEUS(6U) CPOD(3U) 再突入回収(3U) SMDC-ONE(3U) DICE(1.5U) RainCube(6U)  
 SPORESAT(3U) Lunar-Icecube(6U) AMODS(3U) EGG(3U) SMDC TechSat(3U) QB50ミッション FS-7(3U)

民間投資による商用事業の拡大、地球近傍のみならず月・火星等の探査へも

# ナノ/マイクロ衛星の商用ミッション動向2018(82社)

## 地球観測(光学)



**Planet**

(画像・動画配信)



**BlackSky Global**

(高頻度画像・動画の販売)



**AxelSpace**

(画像の販売)



**AstroDigital**

(光学MSの販売)



**Earth-i**

(フルカラー動画)



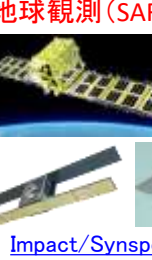
**EarthNow**

(動画中継)



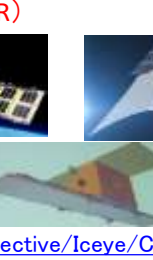
**UrtheCast**

(光学+ SAR像の販売)



**Satellogic**

(画像+動画+ハイパー)



**DMCii**

(MS画像の提供)



**OMNI Earth**

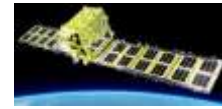
(高品質MS画像の提供)



**Norstar space data**

(ハイパー+衝突回避情報)

## 地球観測(SAR)



**Impact/Synspective/Iceye/Capella Space**



**Umbra-Lab/Airbus-DS**

(小型SAR衛星)

## 高速通信(インターネット)



**OneWeb Ltd**

(HTS)



**Starlink**

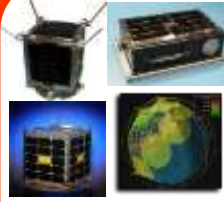
(HTS)



**TELESAT**

(HTS)

## 低速通信(M2M)



**Lux Space/ exactEarth**

DAURIA / SPIRE

(AIS船舶動態監視)



**GOM SPACE/ SPIRE**

(航空機ADS-Bによる経済性向上)

## 光通信(超高速通信)



**Analytical Space/Transcelestial/Laser Light/Cloud**

Constellation  
(光通信サービス)

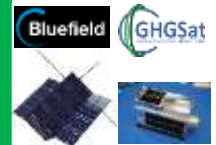
## 気象・宇宙天気



**SPIRE/PlanetIQ/Geo Optics**

(GPS掩蔽観測)

## ガスエミッション



**Bluefield/GHGSat**

Scepter

(メタン、CO2、大気汚染)

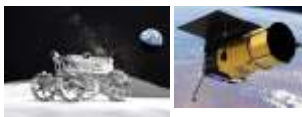
## クラウドストレージ



**Cloud Constellation**

(衛星のデータストレージサービス)

## 月・惑星探査



**ispace/Planetary Resources**

(探査PL枠販売、輸送、資源探査)

## 再突入・回収



**Terminal Velocity**

(再突入・回収サービス)

## デブリ除去



**Astroscale**

(デブリ除去)

## 電波情報



**HawkEye 360/KLEOS**

(電波混雑・解析等)

## 人工流れ星



**ALE**

(人工流れ星)

## 衝突回避情報



**Northstar/B612 Foundation**

(デブリ・隕石回避情報)

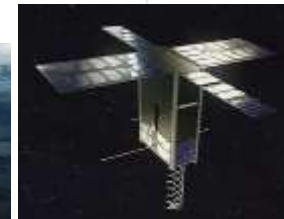
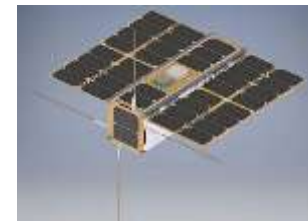
# 2018年の宇宙全体のトピック

- アジア地域における小型衛星打上シェアは45%
- 宇宙分野における商用的な売上は \$ 271 Billion  
(27兆1000億円)
- 2018年に最初の小型衛星を打上げたスタートアップ企業は20社
- 新たに宇宙機関が設立された国は6カ国
- 大型静止衛星の発注減少、商用静止衛星の発注は8機(2010年代は15機前後)
- 宇宙へ投資している国は70カ国



# 2018年の小型衛星トピック1

- KICKSAT 2 : 3Uサイズからchipsatを放出・アマチュア無線ミッション、クラウドファンディングで資金調達
- Sirion Pathfinder 2 : IoT衛星 (M2Mミッション)。商用通信で16Uサイズ打上は世界初。
- 米国以外の『オーストラリアのFleet Space Technologies (3U)』、『スイスAstroCast (3U)』、『カナダのKepler Communications (3U)』、『オランダのHiberGlobal (6U)』のIoTコンステ衛星打上開始



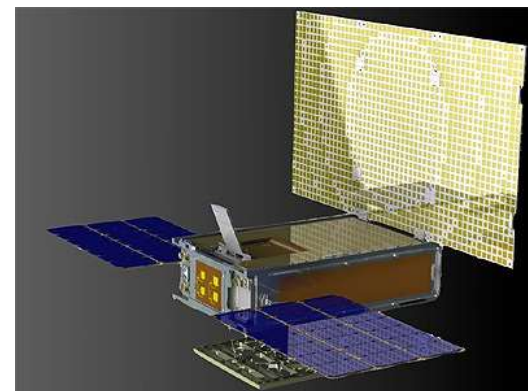
# 2018年の小型衛星トピック2

- 米国と韓国とのフォーメーションフライト天文衛星CANYVAL。光学カメラミッション。3Uサイズで1Uサイズの放出に成功したが、ミッションは失敗したと推測されている。
- ロサンゼルス美術館とSpaceXが共同で、アフリカ人初の宇宙飛行士の24金の像を打上
- SPIRE社 (AIS、ADS-B、GPS-ROミッション) の年間衛星打ち上げ数が28機、PLANET社の打上も年間35機 (2017年はSPIRE36機、Planet92機)



# 2018年の小型衛星トピック3

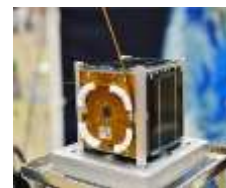
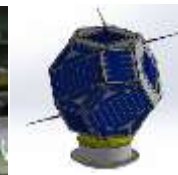
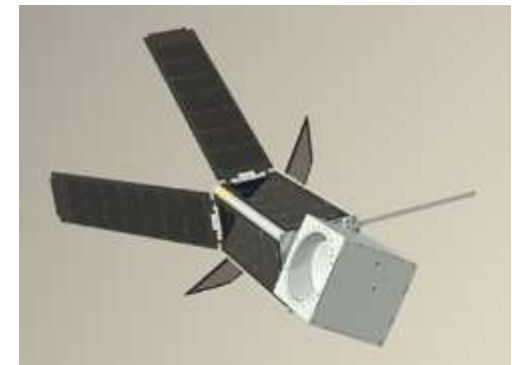
- 火星フライバイして、再突入する火星着陸機Insightのテレメトリーを受信、地球へ送信するMars Cube One(MARCO)2機打上げ
- GPS掩蔽観測コンステ、GEO Optics社の6Uサイズ衛星CICEROコンステ展開開始。
- 中国Laser Fleet社の光通信6Uサイズ衛星Xiaoxiang 1-02 (TY 1-02) が打上。将来は100機コンステを計画。





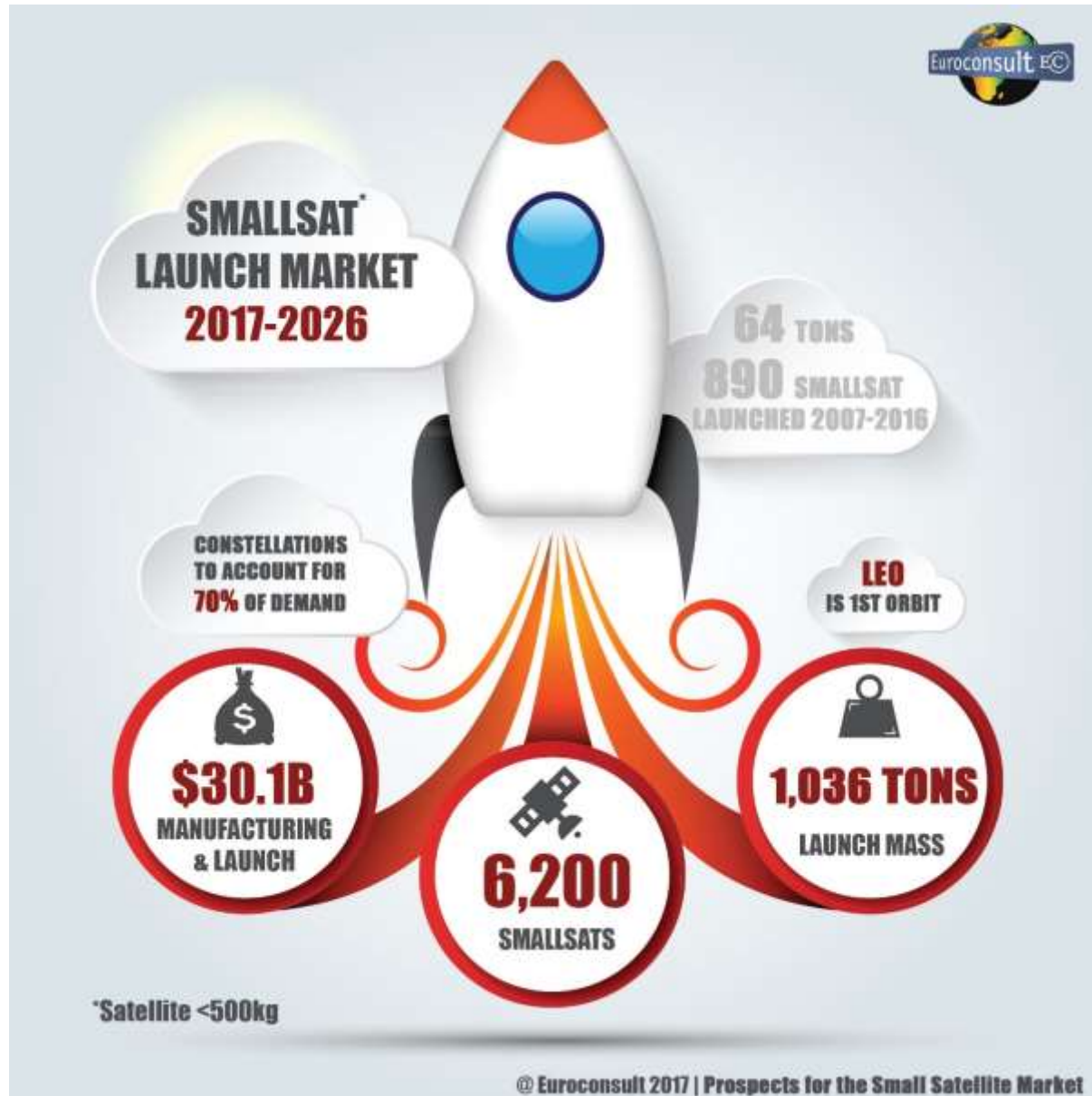
# 2018年の小型衛星トピック4

- スペインAistech社が船動態監視  
& 光学撮影ミッション衛星  
AISTECHSAT 2を打上。将来コン  
ステ計画は25～100機の計画
- マイクロ波放射計搭載のMIT開発  
衛星MicroMAS-2Aが打上。将来  
はGPS掩蔽観測も追加予定
- 日本はAxelspace1機、東京大学1機、  
静岡大学2機、九工大1機、愛知工業  
大学1機、リーマンサットPJ 1機が打  
上。小型衛星は計7機



# EUROCONSULT 小型衛星の需要と市場予測

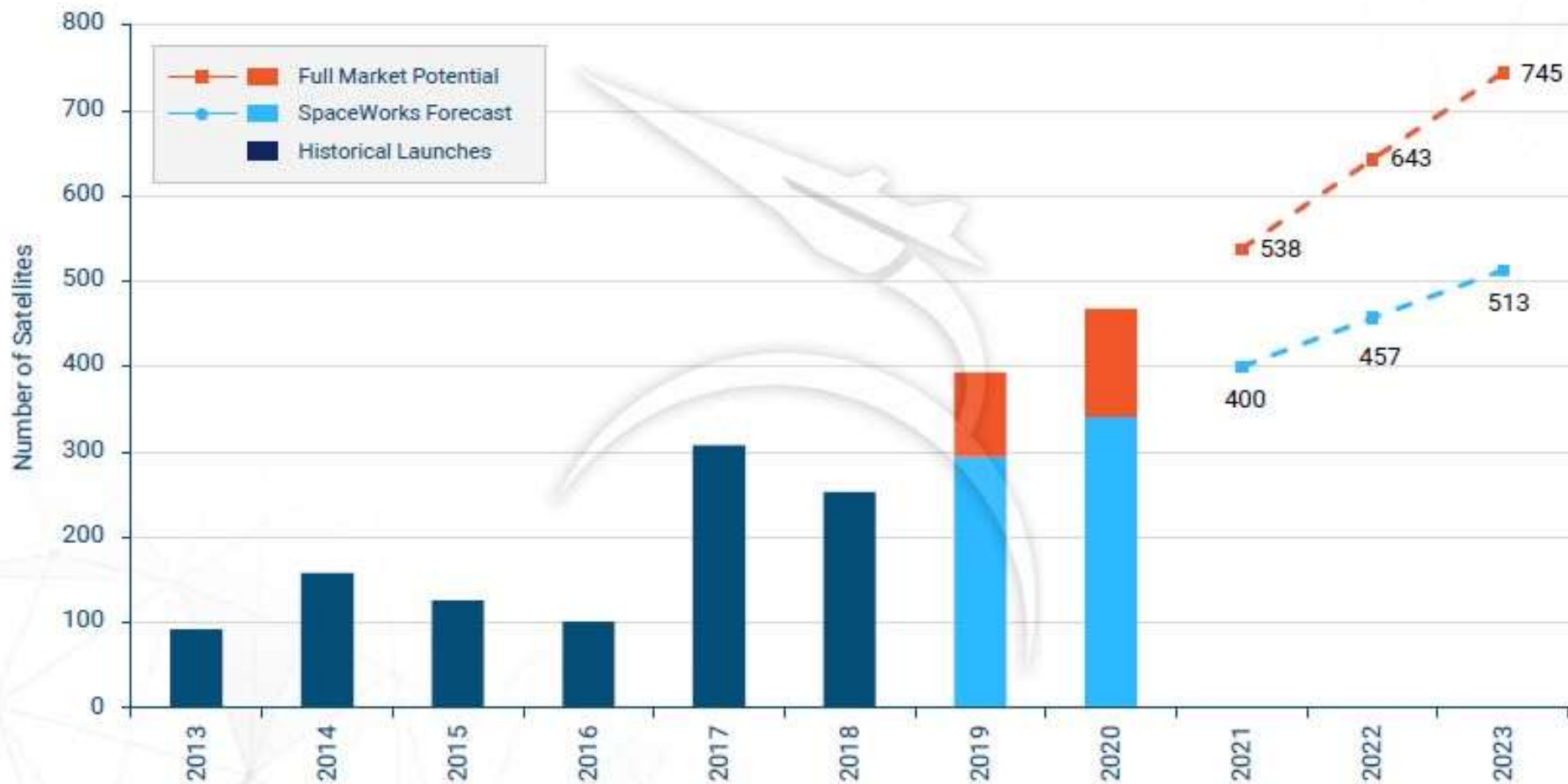
(今後10年間で衛星数は7倍、市場規模は約3兆円)



# SpaceWorks社 小型衛星の需要予測

## SATELLITE LAUNCH HISTORY & MARKET FORECAST

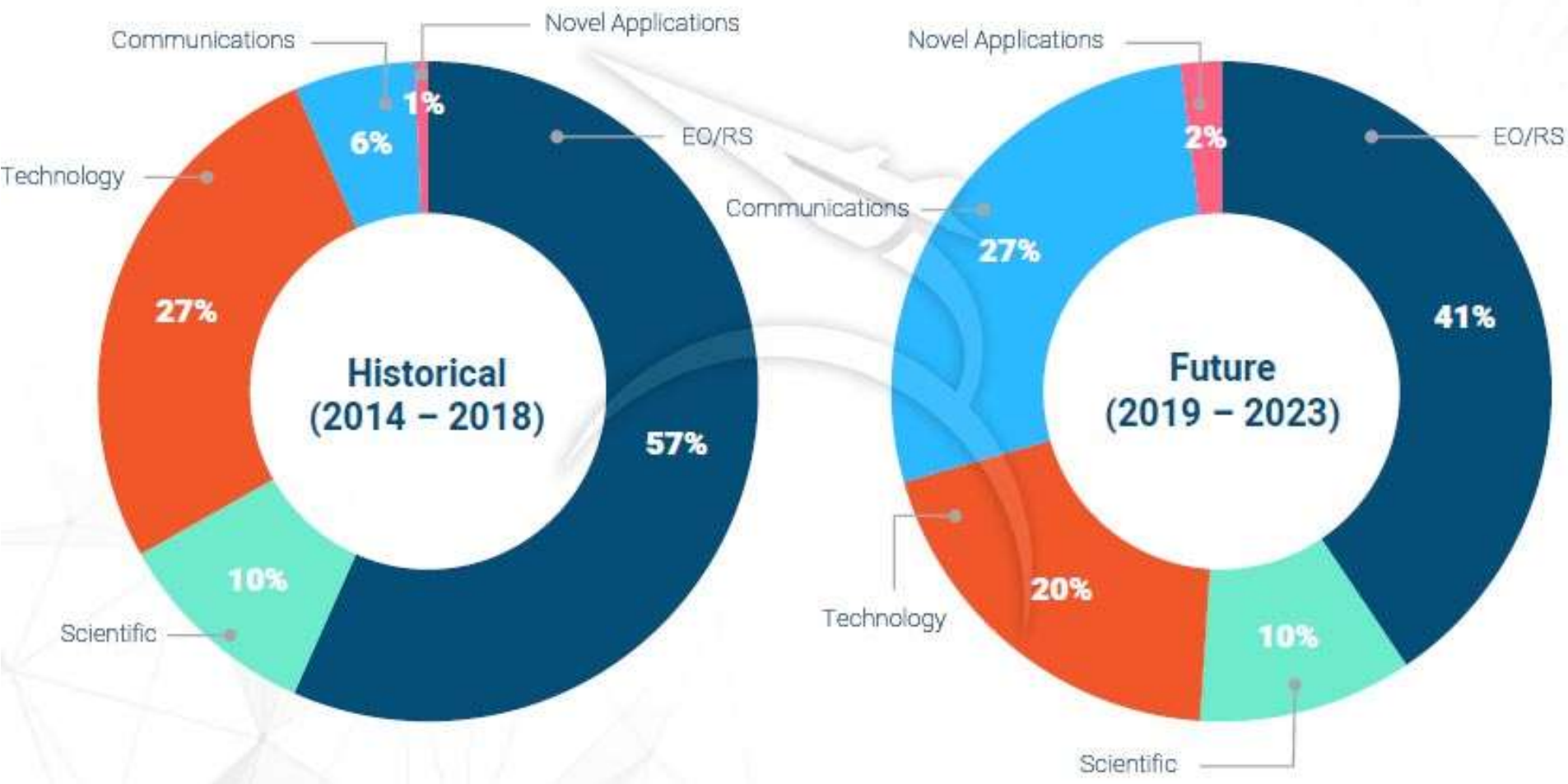
Nano/Microsatellites (1 – 50 kg)



# SpaceWorks社 小型衛星のミッション予測

## SATELLITE APPLICATION TRENDS

Nano/Microsatellites (1 – 50 kg)



## 2. 米国における超小型衛星 ビジネス動向



# 米国、超小型衛星ビジネスの現状(組立企業)

- 2003年に日米欧のCubesat打上後、**Pumpkin社**がキット販売会社として販売開始し、米国における大学、NASA、NSFミッション、企業のCubesat開発をサポートした経緯がある。また、OBCにおいては、米国以外にも**英国Clyde Space社**等を通じて欧州でも販売していた。
- しかし、ビジネス面ではオランダの**Delft工科大学ベンチャーのISIS社**が世界中のCubesat部品を販売するWEBサイト(CubeSatShop.com)を展開し、**カナダトロント大学UTIAS/SFL**が先行してビジネス展開をしていた経緯があり、米国は比較的ビジネスインが遅れていた。
- 2011年、米国Cubesatコミュニティの中心人物であるJordi Puig-Suari氏と当時Boeing Phantom WorkのScott MacGillivray氏が**Tyvak Nano-Satellite Systems**を設立。カリフォルニア州San Louis ObispoのCalpoly近くにCubesat向けアビオニクス事業を開始した。後にロケット向け軽量型Cubesat放出装置のRailPodや、衛星インテグレーション事業、欧州(イタリア)をベースに国際事業を展開する**Terran Orbital Corp**を設立し、打上保険事業等も展開した総合的な超小型衛星ビジネスを展開している。(Tyvak社は現在ロサンゼルス郊外へ移転している)
- また、コロラド州でも2008年設立の**BCT(Blue Canyon Technologies)社**がCubesatからESPAクラス(180kg程度)の衛星のバス系部品販売、衛星組立てを行う事業を開始、NASA、大学、DARPA等の衛星開発を受注、商用衛星でもPlanetiQ社のGPS掩蔽観測衛星の開発と量産を受注している。
- これら衛星製造サービスやキット販売する一方、超小型衛星における部品供給企業が参入している。主に大学ベースのベンチャー企業、中小企業による参入、大手企業による参入など様々である。次項に主要な超小型衛星企業を示す。



# 米国、超小型衛星ビジネスの現状(部品供給企業1)

米国における超小型衛星の部品、センサー等を供給する主要企業を示す。

企業名	分野
AASC(Applied Aerospace Structures Corp)	複合材ベースのアンテナ、熱制御パネル、SAサブストレート、精密衛星構造
Adcole Maryland Aerospace, LLC	ADCSユニット
ALTA DEVICES	太陽電池セル、フレキシブル系
Aperture Optical Sciences	センサー
ATLAS Space Operations Inc	衛星通信ソフトウェア、運用支援
Benchmark Space systems	スラスタシステム(ガス)
Braxton Technologies	COTS品のコマンド制御系
BUSEK	電気推進
CDA InterCorp	機構展開用のモータの設計・製造
Cobham	バルブ、タンク、コネクタ、サブシステム設計製造
Comtech Command & control	通信系
CTD(Composite Technology Development, Inc	宇宙構造系
CUAerospace	熱設計、セイル開発、推進系
EaglePicher Technologies LLC	リチウムイオン電池
EcCLIPTIC Enterprises Corp	ロケット搭載カメラ、放出装置
EyasSat LLC: Cubesat	地上教育キット
Harris Corpration	光学センサー、気象センサー、電子系
Helical Communication Technologies	通信アンテナ
Honeywell, COM-DEV	宇宙部品全般、RW、ジャイロ
IDEAS Engineering & Technology (IDEAS-TEK),	基盤、ボード設計、製造
Ingenicomm Inc	地上局のテレメトリ処理、ソフトウェア
Innoflight Inc	衛星搭載用通信機(C4、COTS品)
Instar Engineering and Consulting	50-180kgレンジの構造、音響、機構解析、エンジニアリングサービス
IONOTRONICS Corp	回路結成、ボード設計、製造
Kaman Corporate	ベアリング機構系
KRATOS	地上局TT&C、RF部品
Kubos Corporation	Cubesat用のFlightソフトウェア
L3	通信系
LACO Technologies	真空チャンパー会社
LASP(Laboratory for Atmospheric and Space Physics)University of Colorado	サイエンスミッション機器の開発
Libration Systems Management, Inc.	Integration and test services
LoadPath	構造システムの製造、Falcon-1の分離構造
Loft Orbital	衛星製造支援、ソフトウェア
M2 Antenna Systems inc	地上局アンテナ、指向機構
Materion Corporation	先端材料開発。合金、複合材の部材製造
Micro Aerospace Solutions(MAS)	小型の電気、機械的なシステム設計支援
Microchip Technology Inc	小型マイクロチップの設計、製造
Millennium Space Systems	RW、衛星製造支援
Mirabilis Design Inc	MBSE、システム設計支援サービス
MIT Lincoln Laboratory:	気象センサー開発
MMA Design LLC	太陽電池、展開機構、展開アンテナ開発
Modular Devices, Inc.	DCコンバータ、RAD-hard品のSolid state relay
Moog/CSA Eng	分離機構及びESPA装置



# 米国、超小型衛星ビジネスの現状(部品供給企業2)

企業名	分野
NanoRacks LLC	ISS打上実験サービス
National Technical Systems(NTS)	地上電波試験等の試験、解析サービス
NEA Electronics	ジンバル、アクチュエータ、コネクタ、電池バイパススイッチ、太陽電池展開機構
Near Space Launch inc	Cubesatバス、衛星搭載通信機Globalstar通信のEyestar、ダウンリンクデータ解析
NovaWurks	HiSatというモジュール型多目的小型衛星の開発ベンチャー
Nuvotronics Inc.	積層構造(3Dプリンタ)を使った、3D RF 回路の製造、マイクロマシン系
Oakman Aerospace Inc	衛星のEnd to End試験、ソフトウェア、システムエンジニアリング、シミュレーションサービス
Omnetics Connector Corporation	コネクタ
Optisys	3Dプリンタを使った金属系、RFアンテナの製造
Orbit Logic	地球観測データの撮像要求とマッチングアプリの開発
Orbital systems:	地上局、アンテナ
Orbital Transports	Cubesat開発における、製造・試験等のトータルサポート
PacSci EMC	De-orbit用の固体スラスタ、固体点火装置
PCB PIEZOTRONICS	センサー(accelerometers, pressure sensors, microphones, torque and force sensors and load cells)
Poco Graphite, Inc	SiC、グラファイトの提供と加工、光学ミラーの製造
Precious Payload Inc	打上サービスのマッチングサービス
PSC(Planetary Systems Corp)	分離機構
Quartus Engineering	光学システムの設計、最適軽量設計、試験、製造アッセンブリサービス、機械機構系が得意
RBC Signals	地上局ネットワークの提供会社
Rincon Research Corporation	RF信号解析、CubesatのRFシステム、ソフト、FPGA、信号処理、データストレージなど
Roccor	宇宙構造系
Sci_zone(Linkstar):	設計支援、周回衛星通信
SEAKR Engineering, Inc	衛星搭載アビオ、オンボードデータ処理、メモリなど
SolAero Technologies, Corp.	太陽電池セル、太陽電池パネル
Space Dynamics Lab	IRUVセンサー、エンジニアリングサービスなど
Space Electronics LLC	宇宙システム全般における地上試験サポート、試験装置
Space Micro	オンボード計算機、TT&C、通信機、スタートラッカ、太陽センサ
Spaceflight	衛星打上サポートサービス、BlackskyglobalのEOサービス、衛星部品販売サービス
Spectrolab	太陽電池セル、パネル、アレー
Spirent Federal Systems	衛星搭載GNSSレシーバー
SRI International	サイエンス系センサー全般
Streamline Circuits	搭載オンボードの回路設計、製造
TELEDYNE BROWN Engineering	システムエンジニアリング、インテグレーション、NASA-SLSプログラム
Tethers Unlimited	通信、材料、宇宙構造、3Dプリンタ
the Hammers Company Corporate	ソフトウェアエンジニアリング企業
The Lee Company	超小型の、精密マイクロ油圧、電気流体システムの製造と販売(マイクロスラスタ向け)
Thermal Management Technologies	熱制御、Cubesat用ラジエーターパネルの製造
TriSept Corporation	Launchインテグレーション、ミッション開発管理及びサポート
TTENDEG	Cubesatクラスで1mのKaバンドハイゲインアンテナ。展開構造
VACCO	液体系スラスタ
Vorago Technologies	Cubesat向けOBC、電力制御システム、プロセッサ
VPT Rad, Inc.	放射線試験サービス
Vulcan Wireless Inc.	Cubesat向け S-Band transponder、Sバンドアンテナ、UHFTラポン
XANFAB, INC.	衛星や航空機向けエレクトロニクス製造

豊富な国家予算による中大型衛星や防衛技術開発を背景に、超小型衛星における分業が進んでいる。特定の技術に特化した企業が各々の超小型衛星開発をサポートし、スタートアップ事業を下支えしている。

# 全世界における宇宙分野別業界マップ2019

## UPSTREAM



BUILD



LAUNCH



DATA

## DOWNSTREAM



DOWNLINK

STORE



ANALYSE



PRODUCT

## BEYOND EARTH



SERAPHIM CAPITAL

# 宇宙投資の現状

2017年の1年間で世界中の宇宙企業へ投資された金額は約2500億円

投資サイド

宇宙ベンチャー

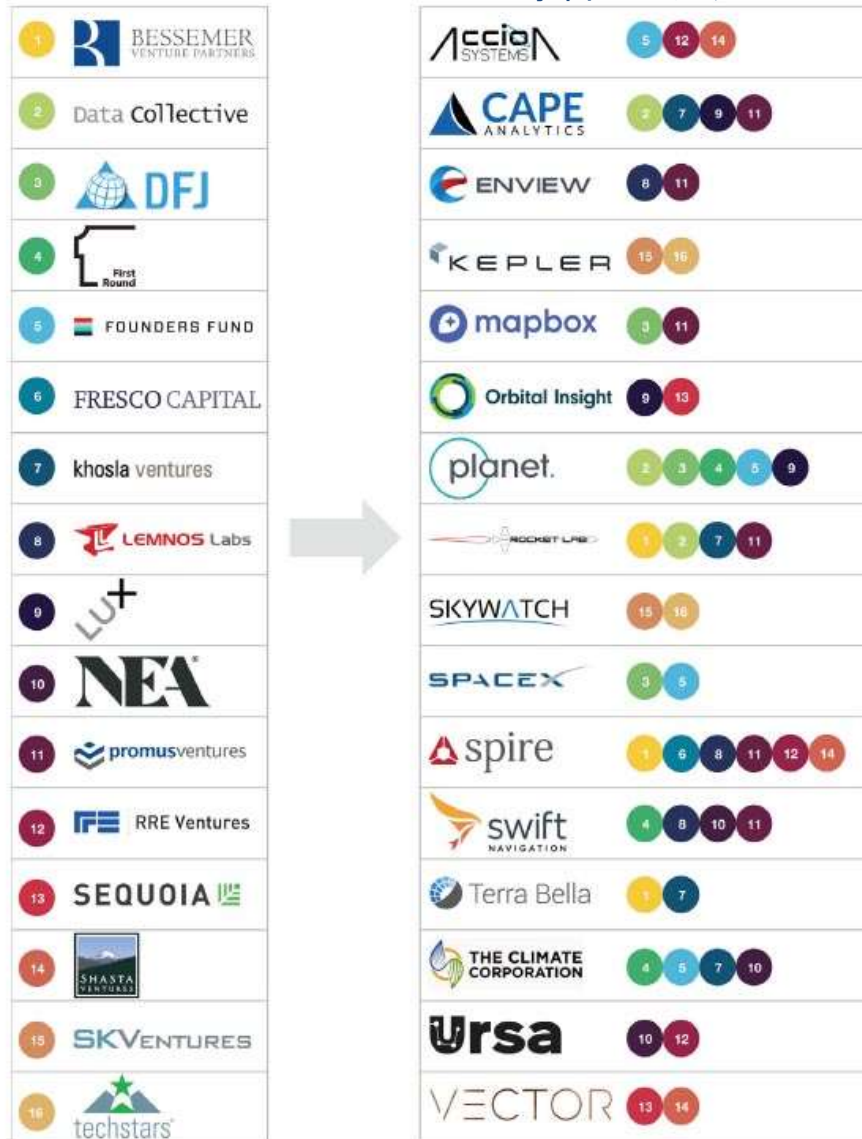


Figure E-1. Common investments among the most space-focused VCs.

宇宙ベンチャー企業へ投資を行う投資側との相関図

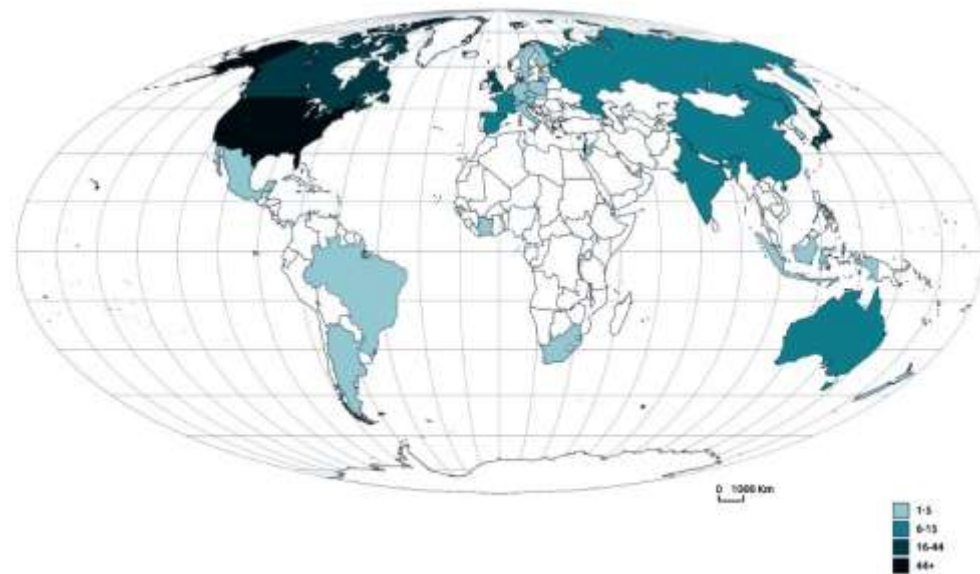


Figure E-3. Investors in start-up space ventures are headquartered in the U.S. and 36 other countries.

宇宙のスタートアップ企業へ投資した数(国別)

## Examples of recently founded start-ups that have not announced investment

B2Space	Odysseus Space	Rose Galactic
CloudIX	Optimized System Engineering	Satelligence
GSV	Orbital Sidekick	SatRevolution
Horizon	Orbital.Works	ShootCapsule
Kaskilo	Promethean Labs	SpaceVee
Levity Space Systems	Rebeam	Sunna-Wedra
Lunasonde	RedWorks	Tendeg
Metavoyant	ResearchSat	Trident Space
MotorSat	Rocketplane Global	

投資額や投資元を明らかにしない宇宙スタートアップ企業



# 超小型衛星ビジネスに関する米国動向

- 小型衛星ビジネスは、ビジネスチャンスがあると考えられている。特に投資が多い分野は、高速通信コンステレーション網。現状は1社負担では困難であり競合も多く、衛星とロケットとサービスの垂直統合型で実施されている。
- 地球観測分野は、光学衛星網(静止・動画含む)の投資もプレーヤーも多い状況、SAR衛星は2018年に試験衛星が打ち上げ開始、今後マーケットが伸びると期待されている。
- 宇宙デブリ除去、電波情報収集、流れ星事業など、オリジナリティーある事業分野も市場がひろがりつつある。
- さらにADS-BやAISなどのM2M通信、IoTミッションに関する事業は米国以外でも拡大中
- 宇宙状況把握SSA(Space Situational Awareness)も商用と政府需要として注目されている。
- 一方で、米国における小型衛星ビジネスへの投資が近年過熱気味となっている。これに対して警告する声がある。
- 米国における、中国への警戒感が非常に強い(中国もCubesatコンステを展開)
- VCによる宇宙投資による一方で、CVC(コーポレートベンチャーキャピタル)の拡大も小型衛星マーケット拡大のポイントとして期待されている。
- 今後は、事業展開した小型衛星ベンチャーのビジネスモデル成立がカギ

### 3. 欧州における超小型衛星 ビジネス動向

# 欧州超小型衛星ビジネスの現状(組立企業)

- 超小型衛星ビジネスで主要なプレーヤーとして、ISIS、GOMSPACE、ClydeSpaceが挙げられる。
- 超小型衛星事業については、オランダDelft工科大学ベンチャーのISIS (Innovative Solutions In Space) が世界中のCubesat部品をあつめたWEBショップを2009年から展開し、部品販売事業への展開を開始、その後インテグレーションサービス、衛星打上サポートサービスを展開、超小型衛星におけるワンストップサービスを確立している。
- デンマークGOMSPACE社は2007年に設立、Cubesat部品の販売事業及び衛星開発事業やADS-B事業を展開しているが、近年はESAから先端技術開発を受注、開発とビジネス事業の両方を展開中。
- ClydeSpaceは2005年に設立、SSTLスピンアウト組とグラスゴーのStrathclyde大学のメンバーにより設立。品質管理と信頼性を重視したこと、事業化時のOBCは米Pumpkin社を採用するなどし、USAFから契約を獲得した経緯がある。2017年に英国女王から表彰をうけ、さらにスウェーデンのAAC Microtec傘下となる。
- 欧州では、小型衛星において、世界初の量産事業を展開するAirbus-DSがあるが、これは、2013年にEADS AstriumからAirbus DSとなる際に、従業員のリストラが実行され、フランス、ツールーズにおける航空宇宙産業が危機的状況に陥った苦い経験から生まれた背景がある。
- Airbus-DSは新たな宇宙事業開拓のため、2015年にシリコンバレーに事務所を設置、同年にONEWEB参画を発表、量産コスト1機5000万円を目標に通信衛星を開発する目標を掲げ、2019年2月に6機打上開始(量産工場については、次項参照)
- イギリスの小型衛星企業であるSSTLは、Galileo衛星のアッセンブリや民間企業から衛星開発(Earth-i等)を受注しており、堅調な経営を続けている一方、スタートアップ企業の衛星をコストが合わず失注している問題が近年発生し、アジアへの営業を強化している。



# Airbus-DS社ONEWEB衛星の量産製造

- 600機のインターネット、プラットフォーム衛星網を構築予定
- 世界初の衛星自動生製造工場。1週間に15機ペースの製造体制
- 製造工場はフロリダ州CCAFS敷地内(ケネディー宇宙センター近く)
- 衛星製造のオートメーション化。Airbus-DSにフランス政府も支援
- 衛星重量は150kg前後。電気推進搭載
- Euroconsultの試算によると、CAPEX per Gbps (Gbps当たりの初期投資)では、GEO/HEO HTSが\$2.5M~9.0M(2.5~9億円)に対し、ONEWEBは\$0.25M(2500万円)を目標としている。

既存ではない新たな製造方法の導入

**OneWeb Platform** : A unique affordable & powerful solution for this class of platform

High reliability standards qualified in the OneWeb program  
5 years minimum Lifetime in LEO orbit (@1200 km)  
Compatible with **dedicated or shared launches**

**Payload capabilities**  
Up to 60 kg  
200 Watts EoL OAP  
Earth Panel: 750 x 850 mm2

**Electric Propulsion**  
High flexibility in orbits parameters  
Significant orbit raising capability  
Compliant with post-mission disposal regulation

ONEWEB衛星



製造の自動化プロセスの導入



製造ライン



# ツールーズONEWEB量産ライン見学レポ

2018年12月6日訪問@Airbus-DSツールーズ工場

- 各衛星は移動式の台車の上で組み立てられていた(次の組立・試験プロセスへ移行できるような流れとなっている)
- スラスター、通信ペイロード、構造、太陽電池とアームが“**モジュールで製造**”され、**組み立て**られていた
- スラスターモジュールは、1レーン用意され、組立・燃料充填、試験を一括のラインでできるよう設置していた(圧力タンクが12本程度見られた)
- 通信ペイロードモジュールも、1レーンが用意され、組立場所上部にカメラと測距装置？が設置され、製造過程の履歴及び組立作業の支援を行っている。
- 量産製造用のインテグレーションは、(向かって)左から右へ、スラスターモジュール、ペイロードモジュール、構造モジュールへの組み込み、エレキの組立、太陽電池パネルの設置という順序、電気試験を実施する場所も別途あった、チェックアウト用のチャンバー試験装置もあった。
- 現行は16日で1機が出来上がるようにスケジュールが組まれている
- トールーズ工場で10機づくり、ソユーズで打ち上げる。最大でSOYUZで32機打ち上げる計画。
- 2019年は製造を米フロリダに移し、大量生産に移行する。
- 衛星重量は150kg、(従来の)20～30倍安価に作れるようになった
- **データアナリティクスを使用して、機械学習によりプロセス管理の改善点を(設計レビューでなく、実際の工数、時間、問題点などの統計的数値から)洗い出している**
- **ただし、ボトルネックとなる工程を変更するのではなく、基本的にはその作業を支援する環境・ツールなどによって改善する(プロセスは変えない)**
- **1作業単位8時間で回るようにしている。実際には5-6時間で終わるようにしてマージンを設けている。つまり、作業員が1日の作業で完結できるようにプロセスを組んでいる。**
- ペイロード作業員にTERMA社が出入りしていた。

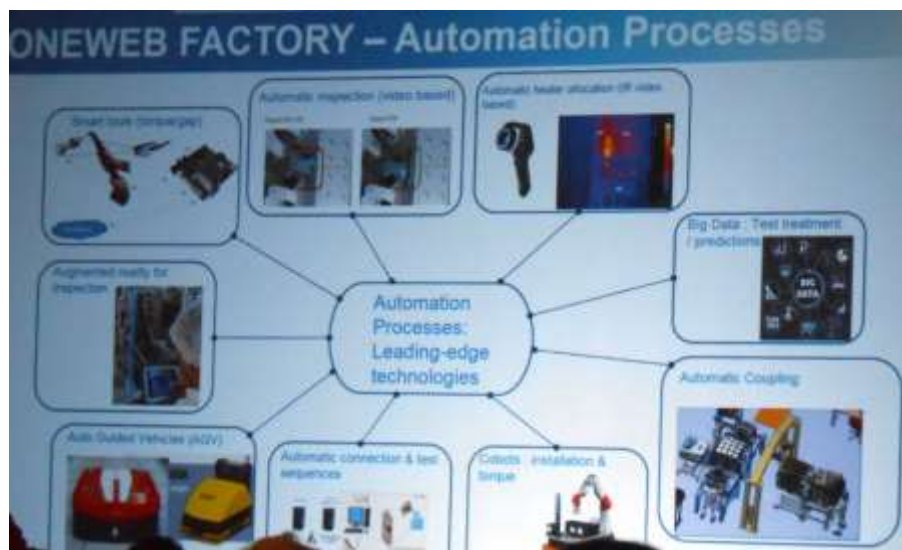




# ONEWEB衛星の量産製造工場@フロリダ



2018年1月時点



衛星製造のオートメーション化に関して以下の技術を採用。

- スマートツール:トルクや誤差寸法を計測
- 自動検査装置(ビデオ認識型)
- 自動熱配分装置(IRビデオ計測型)
- AR(Augmented Reality)型の検査装置／拡張現実画像
- ビックデータ:試験処理(Test treatment)／試験予測(predictions)
- 無人搬送車AGV(Auto Guided Vehicles)
- 自動接続&自動試験シーケンス
- 小型ロボット(取り付け&トルク締め)
- 自動継ぎ手(Automatic Coupling)

## 4. 欧米宇宙機関及び政府 における技術育成動向

# 各国の超小型衛星戦略



## アメリカ

ムダな重複開発がない。大学教育・技術開発・サイエンス・軍事・商用ミッションが生まれている。商務省が部品供給企業を把握し、必要な企業へNASAや軍を通じて育成予算投入する仕組み。

部品の小型高性能化へ力を入れ、Additive Manufacturing導入により、短期・量産技術も開発中、地球近傍ならず深宇宙探査へのミッション化を進めている。民間投資も進みここ数年は宇宙ゴールドラッシュ。開発速度の短縮化を進めることで、他国が先んじて開発しても即座に開発、打上できる追従体制も整えつつある。1U~27Uサイズ開発動向

支援元: USAF、NSF、NRO、NASA、民間投資

予算規模: USAF-UNP(大学衛星プログラム)は\$1mil/年程度

USAFとNROの予算規模は不明だが\$10mil/年前後と推定

NSF(全米科学財団)の大学Cubesat支援は\$1.4mil/年程度

NASA-HQは革新的超小型衛星開発へ\$5mil/年程度

打上体制: 大型ロケット相乗(大学はELaNaプログラム)と小型ロケット

打上手段の開発は、DARPA、NASAが民間支援(調達)

打上手段: 米国全ての運用ロケットでPPOD、ISIPODの搭載標準化

NASAやNRO及び空軍の政府ロケットへ相乗りする方式



## オランダ

超小型衛星での実績は少ないが商売上手。デルフト工科大学とベンチャーを中心に国際提携で存在感を発揮

体制: 国立航空宇宙研究所(NLR)、デルフト工科大学、Dutch Space

ベンチャー企業ISIS、大手企業TNO、部品供給SSBVなど

打上手段: 外部調達だが、ISISがブローカー役で打上枠を供給

搭載標準装置ISIPODを欧VEGAや米Antaresで実績



## イタリア

欧州経済停滞により、存在感があまりないが、米国大学との研究提携で一定の成果を出そうとしている。

支援元: ASI、国防省、ESA

体制: ローマ大学、トリノ工科大学、ボローニャ大学等が開発

打上手段: VEGAロケット及び欧州射場から上がるロケットを使用



## フランス

2012年頃からMyriadeサイズ以下の衛星(Cubesat)を育成する方針へと転換、大学、サイエンス機関、企業らが開発、CNESの支援を受け手実証中。サイエンスミッション及び部品産業育成を中心に実施

支援元: CNES(JANUS)、国防研究所

体制: 大学、中小企業、宇宙産業団体、仏中堅企業がサポート

打上手段: SOYUZ



## イギリス

小型衛星のパイオニアであったイギリスだが、Cubesatは開発着手には遅れ、初打上げは2013年になってから。一方、部品販売は輸出実績を挙げている。コスト重視の姿勢は米国よりも優れている。小さな宇宙機関・大学・企業・投資銀行との連帯を強化中

支援元: UK Space Agencyなど英国政府

体制: SSTL、Clyde Spaceほか、中小企業

打上手段: 基本はコスト競争による国際調達。安ければ利用する



## カナダ

国際提携路線のオランダとは違い、飛行実績を重ねて衛星や部品を輸出し、商業実績を挙げている。また、米SS/L社という国外企業の買収にも積極的。超小型衛星の設計・製造・試験・打上・利用という一環したサービス体制を構築。近年は商用小型衛星サービスも開拓中

支援元: CSA

体制: UTIAS/SFL、COMDEV、Sinclair Interplanetary他、中小企業

打上手段: PSLV、Rockot、SOYUZなどコスト競争による国際調達



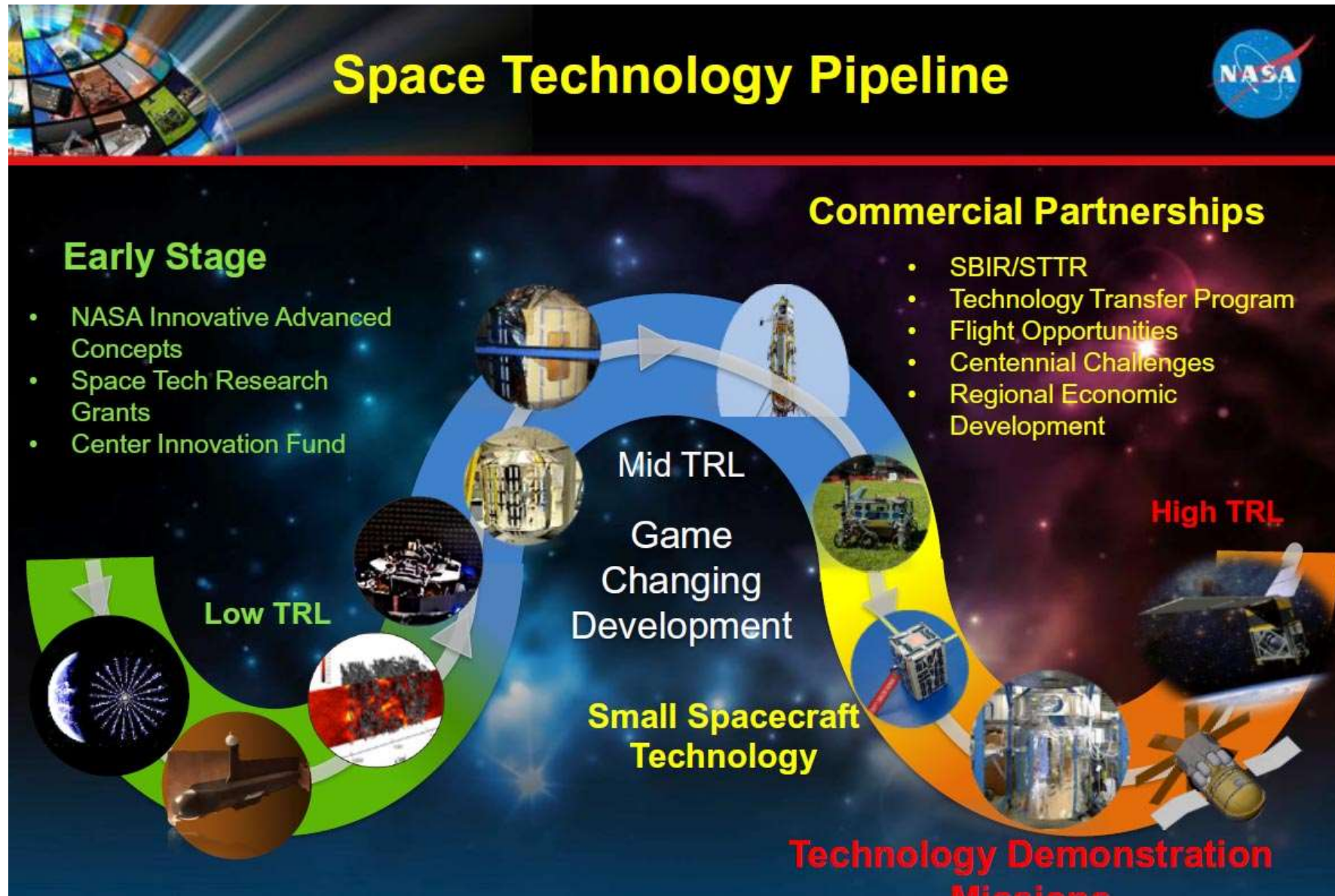
## ルクセンブルグ

世界NO.1の静止通信衛星SES社の次世代産業として、宇宙探査と小型衛星サービス産業に注目、政府ファンドで投資して、自国へ引き込みを行っている。2017年にはSPIRE社へ資本参加している。

支援元: ルクセンブルク政府



# NASAによる宇宙事業化までの技術開発支援

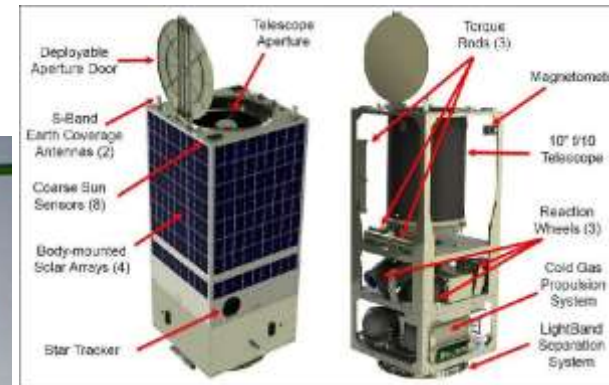


# 米DARPA及び軍の超小型衛星開発



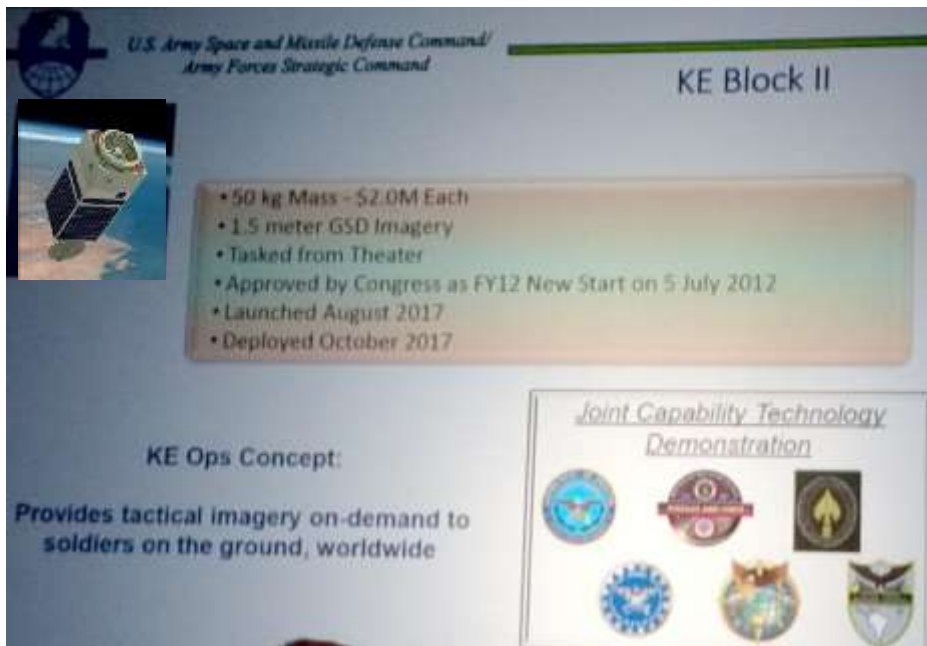
DARPAブラックジャック

- DARPAブラックジャック計画。商用と軍用の組合せによりミッション遂行するコンセプト
- DARPA職員「Cubesatミッションで出来ないものはない、あるなら挙げてみる。反論してみせる」とsmall satellite conference 2018 で発言
- 陸軍は1.5mGSD、重量50kgの光学衛星を量産コスト\$2M目標で開発。モバイル地上局セットで開発、実証済み。将来は戦術通信Cubesat開発予定(Polaris、Gunsmokeなど)



KestrelEye (KE) Block II型

モバイル・インフレータ・アンテナ



KestrelEye (KE) Block II型スペック



陸軍の戦術通信Cubesat





# 欧州ESAによるCubesat技術育成戦略

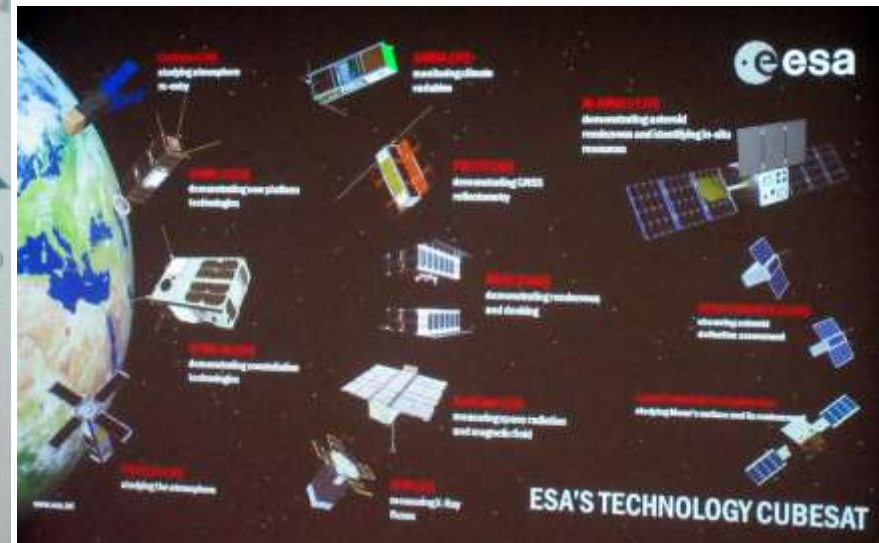
- ESAも米国に続いて技術開発を育成。
- 計画名はGSTPプログラム (General Support Technology Program)
- Cubesatを含む小型衛星技術を育成し、競争力 & 成長を産業界へもたすため
- 大学衛星の打上サポートも実施
- ミッションは、地球近傍に限らず、月・小惑星探査Cubesatミッションがある
- サイズは3U~12Uで計画



## ESAのCubesat技術育成に関わる国と開発項目



## ESAのCubesat技術開発事例



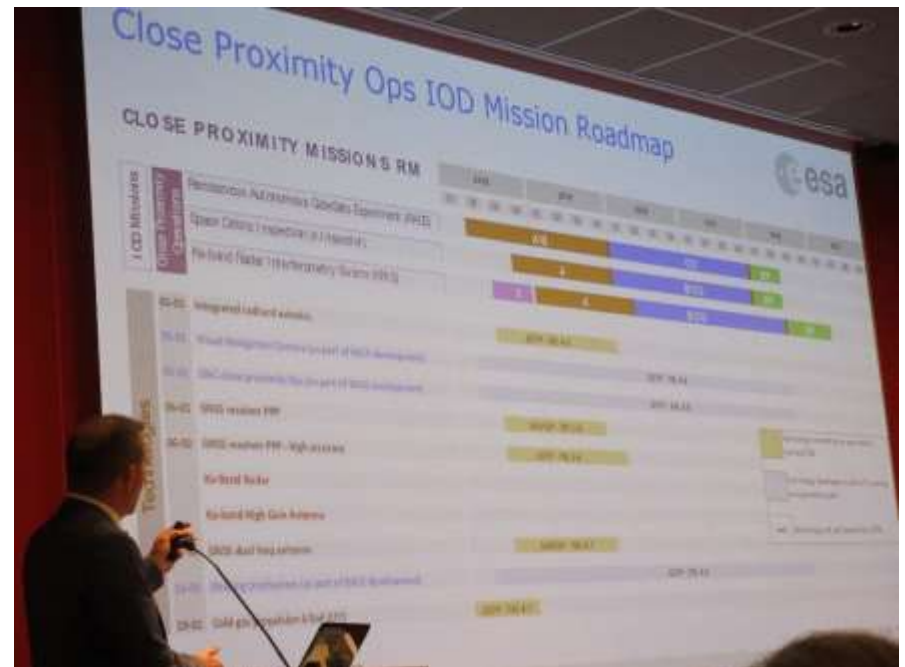
ESAのCubesat技術実証ミッションリスト

# ESA Cubesat技術ロードマップ2018-2023

- 欧州は『EU政府のHorizon2020プログラム』と、『ESAの技術開発ロードマップ戦略』で産業育成という体制。『ドイツDLRやフランスCNESは個別プログラム』でも育成
- ESAはCubesatを『第1波; 2005年までが教育(1U~3U)』、『第2波; 2010年までが技術デモ(3~12U)』、『第3波; 2018年までがOperational(3U~12U)』と位置づけ、**今後は『LEOコンステ、近接オペレーション、LEOより先の軌道』へ利用が広がるという定義**
- これに対応する技術として、「ナノ推進器(電気推進)」、「耐放射線アビオニクス」、「制御技術(RW & STT)」、「高出力型PCDU」、「多様な光学イメージャー」、「ハイゲインアンテナ」、「GNSSレシーバー」、「Ka、Xバンド通信」などを開発項目に挙げている。
- これらCubesat系の先端技術をもって、“ランデブードッキングミッション(RACE)”や“デブリのデオービットや軌道上サービスミッション”、“Kaバンド放射計ミッション”、“月探査Cubesat”、“Deep Space Cubesat(M-ARGO)”等を計画している。また、これら技術が民間商用への波及性があると主張している。



ESAのCubesatロードマップ



各ミッションに必要な技術項目と2023年までのロードマップ

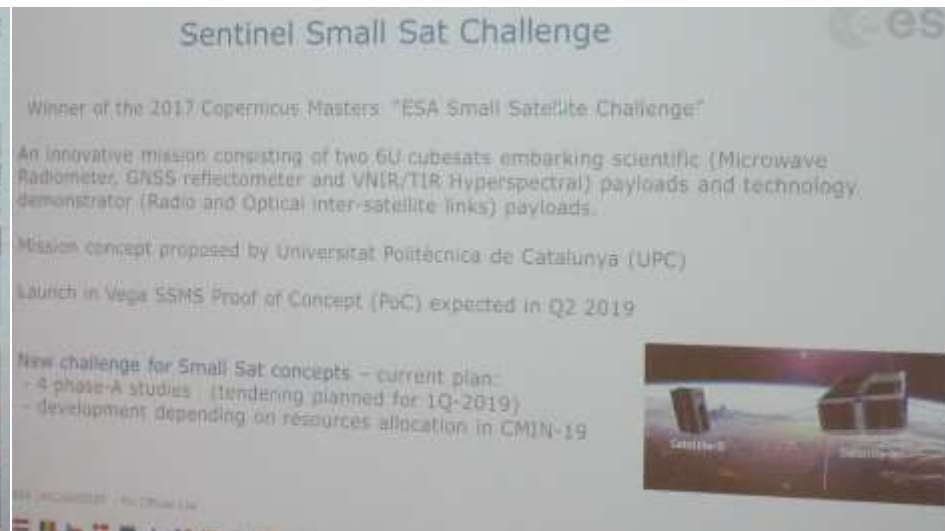


# ESA Cubesat開発支援施設及び小型ミッション開発

- ESAは、実利用型Cubesatの時代を見据え、Cubesat開発サポート施設の開設
  - ✓ ISO-8クリーンルーム、動電型加振機、熱真空チャンバー、電気系試験機器、通信試験装置、ヘルムホルツコイルシステム、太陽シミュレータ、加工装置等
- ESAの地球観測衛星網コペルニクスのミッションを、6UサイズCubesat2機で行うミッション（マイクロ波放射計、GNSS反射計測器、VNIR/TIRハイパー）のイノベーション開発チャレンジの開催。
  - ✓ Sentinelミッションの小型衛星化を見据えた開発



ESAのCubesat支援施設



ESA地球観測衛星の小型衛星化チャレンジ

# ドイツAZOによる宇宙企業育成事例



- 宇宙ベンチャーのインキュベーションセンター
- 宇宙インフラとアプリのビジネスケースを年間600件以上サポート
  - ✓ ESA開発の測位衛星群と地球観測衛星を利用したアプリ開発として2004年からスタート
  - ✓ 2009年から、革新的宇宙技術の事業化支援(宇宙ベンチャー育成)を開始
  - ✓ 設立には、ドイツBMW(ドイツ連邦経済技術省)やDLR(ドイツ宇宙機関)や大手宇宙企業などが関与。現在はESA、BMW、KUKAに加え、特許事務所や銀行(Kreissparkasse München Starnberg Ebersberg)がパートナーとして参加
  - ✓ 拠点はドイツだが、同様の組織であるイギリスCATAPULTとも連携

## 具体例:

### ① Mynaric AG社(光通信機器)

AZOインキュベーションによって育成された、小型衛星向け光通信端末技術企業のViaLight Communications社(2009年設立)が、2017年6月に上場投資会社Auden AGの投資を得て事業会社Mynaric AG社へと進んだ。今後需要が見込まれる光通信衛星技術への市場での市場占有率確保を狙っている。事業化への背景には技術戦略コンサル会社Space-tecが関与。

(ドイツはこの他に光通信機器等を製造するTESATがあるが、小型コンステ衛星向け機器は別途育成か?)

### ② TerraLoupe GmbH(地球観測データ解析企業)

地球観測データアプリの民間事業会社。高解像度の3D地形データと画像解析を組み合わせた情報サービスを計画(米国Orbital Insightのような企業)。

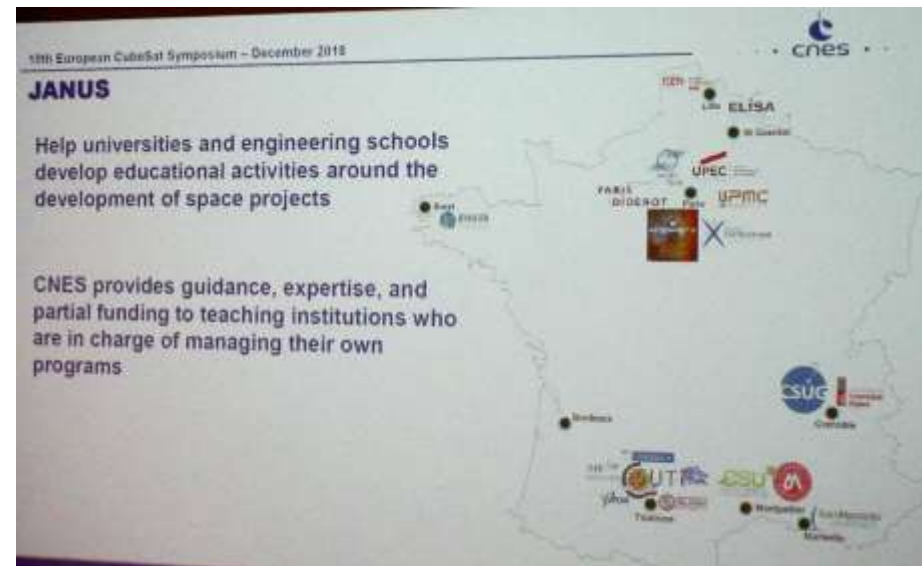
# 仏CNESによるCubesat開発支援JANUS



- フランス宇宙機関CNESが大学等のCubesat技術を育成するため2016年に**JANUS**を創設。ナノ衛星の戦略組織として**Club nano**創設
  - ✓ 当初は「150kg級のMyriade衛星Busサイズ以下をCNESは開発しない」という反対意見があったが、それを押し切ってJANUSを創設(JANUSメンバーからの話)
- CNESによる技術開発サポートやマッチング等の開発支援体制の構築
- 2018年末現在、11の大学や高等教育機関がCNESや国家研究所及び産業界とコラボレーションを行っている。
- 打上ロケットはSOYUZ、FALCON(ISS放出か?)
  - ✓ JANUSは、日本でいう、先端系大学のCubesatに対し、JAXAが技術開発支援や予算化及び、打上支援、産業界とのコラボを実施して、技術開発から事業化までの流れを作り出すような組織



フランスのClub Nano



JANUS

## 5. 超小型衛星における技術動向

# 衛星産業の業態変化(工芸品から量産へ)

- 2000年初頭、100kg衛星で1m光学分解能は困難と言われていた。しかし現在は？
- 2000年初頭、通信衛星は大型化・超寿命化が進むと言われ、小型コンステ通信は倒産した。現在は？

過去(2000年)

現在(2018年)

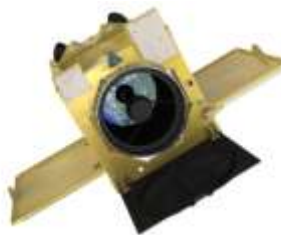
未来



光学衛星



TOPSAT (125kg) @2.5mGSD



Blacksky (55kg) @0.9mGSD



SKYSAT (100kg) @1.0mGSD

?

50~100機単位のコンステ？

通信衛星



Inmarsat-3 (5780kg/15年)



Iridium (700kg/8年)



Inmarsat-5 (4000kg/18年)



ONEWEB (150kg/7年)

900機

?

オール電化？光通信？  
ONEWEB、Starlink第二世代？

ファイナンス  
プレイヤー &

大手企業

- 政府による技術開発支援(大)
- 銀行からの資金調達
- PFI(英skynet)

大手企業/ベンチャー/  
ベンチャー&大手企業

- 政府による技術開発支援(中)
- 銀行からの民間資金調達
- PFI(政府によるサービス購入保証)
- 民間企業投資/ベンチャーキャピタル
- 官学投資ファンド
- クラウドファンディング

?

政府は先端技術&基盤技術のみ支援？  
サービスを政府は購入？  
民間はリスクシェア&垂直統合？ 42



# キット化・標準化・ユニットが進むCubesat

## ● Cubesat Kit(世界中)/10cm四方形型

## ● 姿勢制御はユニット化も進む



XACT



XACT-50



FLEXCORE



ADACS Computer + EM's  
Stock #: MAI-400-31100000  
Voltage: 5VDC  
Magnetic Dipole Moment: 0.108 Am<sup>2</sup> @ 72% duty Cycle



ADACS Computer + EM's + 3-Axis RW  
Stock #: MAI-400-31130000  
Voltage: 5VDC  
Magnetic Dipole Moment: 0.108 Am<sup>2</sup> @ 72% duty Cycle  
Max Torque: 0.635 mNm



Complete Integrated ADACS  
Stock #: MAI-400-31130200  
Voltage: 5VDC  
Momentum Storage: 11,076 mNms@10000 rpm  
Magnetometer



Q1 2016: Integrated ADACS with Star Tracker  
Stock #: MAI-400-31130010  
Voltage: 5VDC  
Momentum Storage: 11,076 mNms@10000 rpm  
Star Tracker, Magnetometer

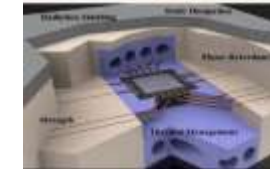


# 小型衛星製造企業の現状

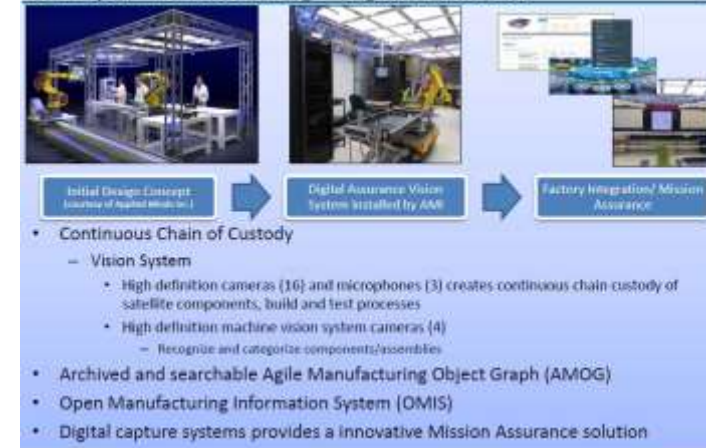
- 小型衛星の量産及びその技術開発のトッププレイヤーはAirbus-DS
  - ONEWEB製造において、欧州(フランス)で量産技術開発、米国で量産設備を構築
- 小型衛星の開発、試作、インテグレーション受注等のトッププレイヤーはSSTL(Airbusグループ企業)
  - SSTLの売上げは年間200億円～300億円と言われている。
  - 海外の小型衛星ビジネスにおいて、ベンチャー企業からの設計依頼(UrtheCast)、量産受注(Earth-i)に加え、政府からセンサー等の技術実証衛星を継続的に受注。
- 地球観測系の小型衛星コンステレーション企業の動向は、「量産は大手企業へ委託する体制」が進んでいる
  - ✓ Planet(旧TerraBella)の衛星SkysatはMDAグループ(Space Systems Loral)が量産担当
    - さらにMDAグループは衛星画像サービス会社Digitalglobeを買収。衛星製造とサービスを統合する戦略
  - ✓ Blacksky Global社の衛星はTAS(Thales Alenia Space)が量産担当
  - ✓ Earth-i衛星(動画撮像)はSSTL(Surrey Satellite Technology Ltd)が量産担当  
(Planet社やSPIRE社というCubesatは内製可能だが、あるサイズ以上はベンチャー企業で量産設備を構築・維持管理するには投資面、信頼性確保面でリスクがある)
- 通信衛星コンステレーションは、投資額が莫大であり、企業間でリスクシェアしなければ成立しない背景がある。サービス・衛星製造・打上まで垂直統合している。



- Additive Manufacturing (AM) and Micro Dispensing (MD)
- AM in general
- The game changing component
- SMDC Challenge



## ORS Open Manufacturing – Digital Assurance



(MBSE、3Dプリンタ、即応製造)

## Next Generation Space Factory

- Evolving missile business drove changes to Raytheon manufacturing
  - Automated factory capabilities
- Adapted Assemble/Test for Small Space Products
  - Backbone of assembly workstation to includes proven production systems
  - Robotic material handling
  - Thermal vacuum chamber
  - Vibration and thermal chambers
  - Solar simulator
  - Star field generator
  - GPS antenna test
  - Inertial measurement test
  - 3-axis magnetometer



Small Space Work Cell

Material Handling Robot

Fusion Test Line and Small Space Cell

# 米国の産軍学共同開発：衛星部品の次世代製造システムの開発

- ✓ 空軍の即応宇宙システムを開発する部署(ORS Office: Operational Responsive Space Office)では、衛星の部品・アッセンブリ製造・試験に**MBSE (Model-Based Systems Engineering)**を導入
- ✓ 衛星バス部品を製造するRaytheon、Northrop Grumman、Boeingらが参加し、
- ✓ ORSと共同研究を行うニューメキシコ大学のCubesat開発団体COSMIACも、宇宙用3Dプリンター材の開発や、電子回路と3Dプリンターを組み合わせた構造一体型回路基盤の試作を実施中

UNCLASSIFIED Cleared for Public Release

## Open Manufacturing Initiative

### Program Goals and Examples

SPACE AND MISSILE SYSTEMS CENTER

Program Goals	Digital Assurance	Open Manufacturing	Responsive Space Part
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demonstrate autonomous manufacturing of low-volume, high-value assets (Open Manufacturing)</li> <li>• Utilize digital techniques to provide mission assurance (Digital Assurance)</li> <li>• Identify, characterize, and utilize viable COTS (Responsive Space Parts)</li> <li>• 4x 6U Mission-Capable CubeSats</li> </ul>	<p>Quality Control through Continuous Custody</p>		<p>Broadreach Rad-Hard CPU → BeagleBone Black Development Board</p> <p><b>Performance:</b> 1GB SDRam (Elpida) 512MB flash w/TMR 1MB L2 Cache</p> <p><b>Performance:</b> 1GHz ARM® Processor 512MB DDR3 RAM 2GB 8-bit flash storage</p> <p>95% reduction in material cost</p>

Assured Space Power Focused on Timely Satisfaction of Joint Force Commanders' Needs

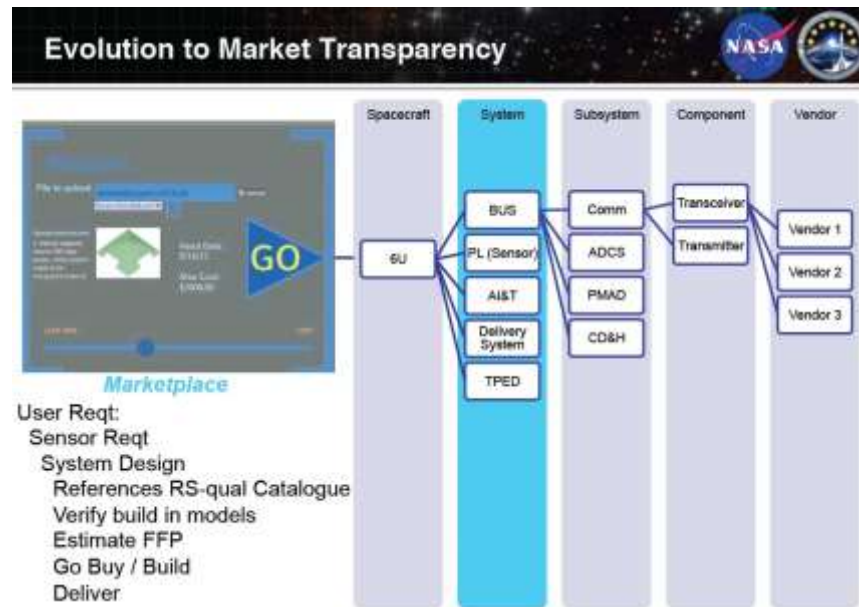
USAF-AFRLの次世代製造技術開発(MBSE、3Dプリンタ、即応製造)

Raytheonにおける宇宙部品の自動製造工場

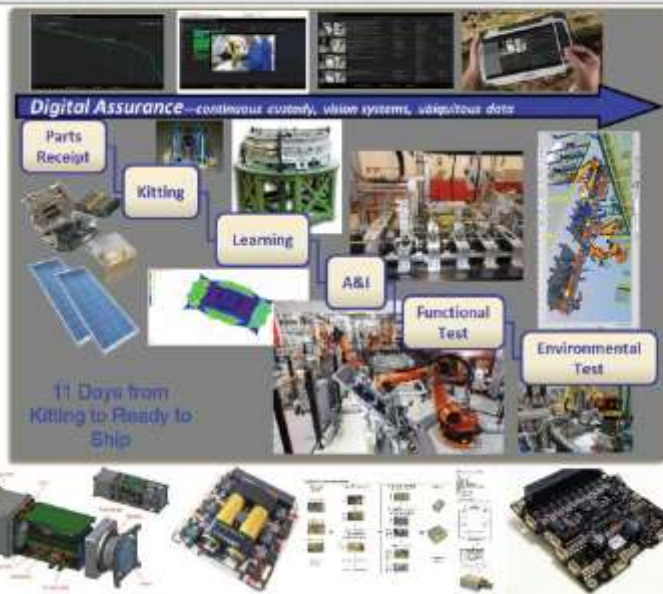
## NASAと米軍の第4次産業革命へ向けた戦略は？

- 米空軍(USAF/AFRL)とNASAでは、将来の様々な宇宙ミッションニーズへ対応する戦略を構築中
- 「部品到着、機器配線、ラーニング、A&I(アセンブリ&インテグレーション)、機能試験、環境試験」フェーズの高速化
- ニーズに応じた早急な宇宙システム製造技術の構築
- これら技術の開発元がRaytheon、Northrop Grumman
- 3Dプリンター、MBSEなど、ハードとソフトの次世代化により、第4次産業革命へむけて企業を育成

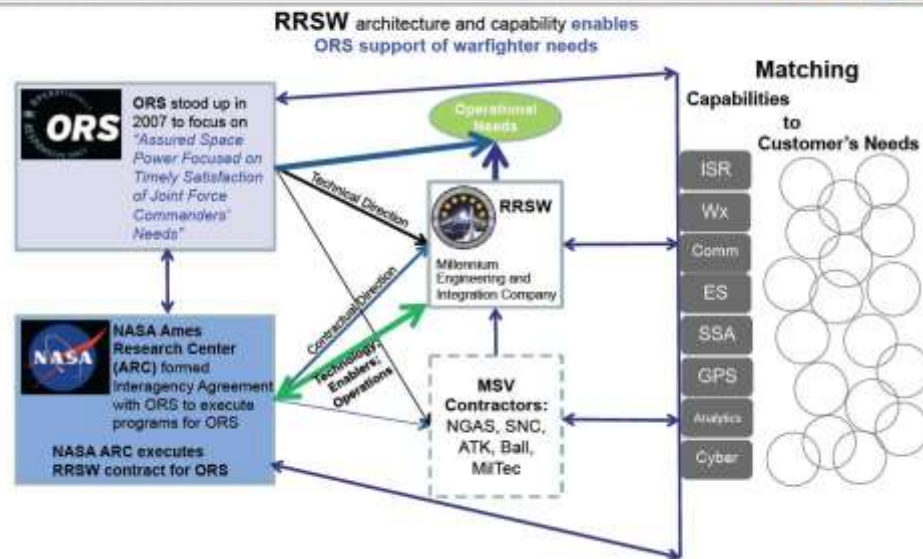
日本にはこれがほしい、……



### Technologies Leveraged (Cont'd)



## Acquisition / Administration






# 小型衛星製造技術次世代化(Northrop Grumman)


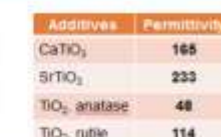
- 3Dプリンター(AM:Additive Manufacturing)の登場により、モノ作りが方法に多様性が生まれたと主張
  - ✓ 添加剤により材料を強化(耐熱、耐放射線)
  - ✓ AM造型時にエレクトロニクスを埋め込む
  - ✓ AMにより、より速く、より再現性が高くなること
  - ✓ AMは設計次第で可能性を引き出せること
- 内製技術の強化により、コスト削減と製造期間短縮
- これら技術をベースに次世代製造ラインを構築か？
- モノ作りの次世代化を着々と進めている

## Recent Advancements in Additive Manufacturing

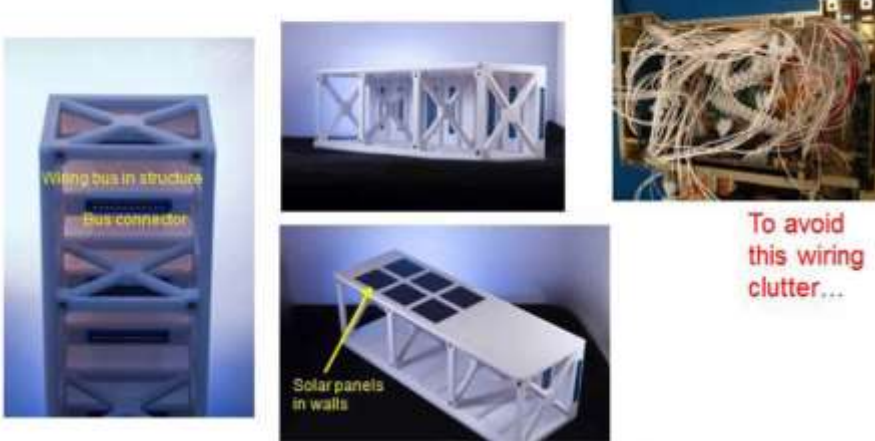
- AM machines becoming faster and more repeatable.
- Multifunctional machines – NGC/UTEP.
- More materials printable (>571 per Senvol).
- Material characterizations are occurring.
- Able to enhance materials with additives.
- Designers maximizing the potential of AM.
- Embedded electronics.



Additives	Permittivity
CaTiO <sub>3</sub>	165
BiTiO <sub>3</sub>	233
TiO <sub>2</sub> anatase	48
TiO <sub>2</sub> rutile	114
NaCl	5.9
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Permeability
Tungsten	Rad. Shield
Zeonex	Low Loss

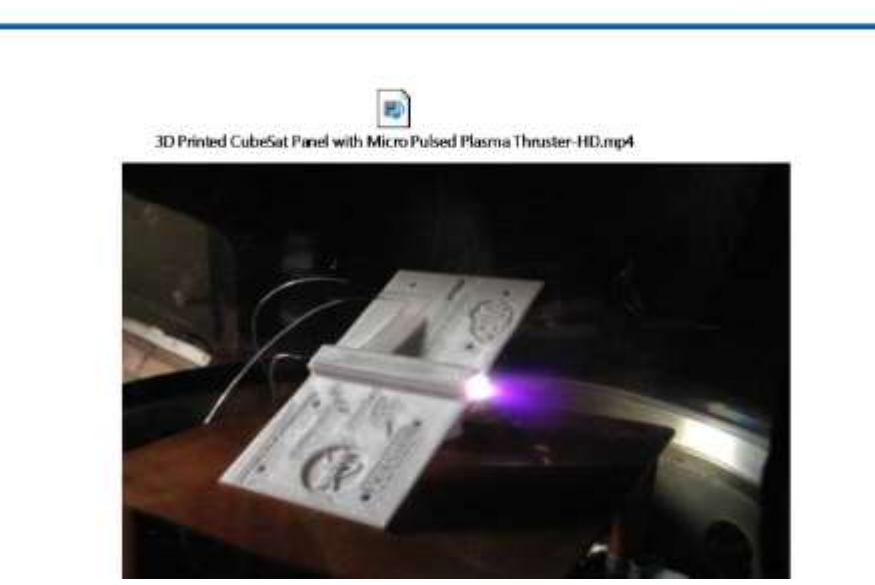


- Extruded thermoplastics and embedded wires and components.



Cubesat構体内部にコネクター&太陽電池埋め込み

## Embedded Components: Propulsion Devices



3Dプリンターで造型可能な材料の開発と電子基盤と一体成型

AMのCubesatに電気推進PPT搭載(電気回路埋込)

# 米国Planet社のDove衛星の概要

## ◆ Planet社による衛星DOVE(試験機)、Flock(実用型)開発

✓ 2013年7月,ファンドから\$13Million資金調達、12月にも\$52Mの資金調達、総額**\$65M資本(約65億円)**

## ◆ DOVE-1、-2(2013年4月打上@Antares、Soyuz-2)、DOVE-3,-4(2013年11月20日打上@Dnepr)

## ◆ 実用型衛星Flockは2014年1月に28機@Antares、6月に11機@Dnepr、7月に28機@Antares打上 **2018年までに300機以上が打上&軌道投入済(打上失敗は含まず)**

**ISS軌道寿命(450km)は10か月前後。高度600km軌道へも本格投入開始(再突入まで20年前後)**

## ◆ 主要諸元

✓ サイズ:3U、重量5.8kg

✓ 観測分解能4-6m

✓ 観測データダウンリンク速度:Xバンド

**120Mbps(チャンピオンで150Mbps)、自動運用**

## ◆ 口頭発表情報

➢ 衛星は5年寿命で設計(ISS放出は8か月で再突入)

➢ クリーンルームを使わない衛星製造

### Flight-Qualified Radio: Planet Labs

- UHF telemetry channel based on a CC1110
  - 4800 baud duplex, plus ranging
  - 401 MHz Space Operations band
- X-band primary downlink
  - 66 MHz licensed spectrum
  - DVB-S2 variable bit rate, up to 120 Mbps max
  - 3 W RF TX power into patch or helical
- Earth-exploration Satellite Service commercial license
  - Initial filing fee: \$450k
  - Annual fee: \$150k
  - Good for 15 years
  - 1 year licensing process with public comment period
  - \$5M bond required (to prevent spectrum squatting)



通信機の技術情報



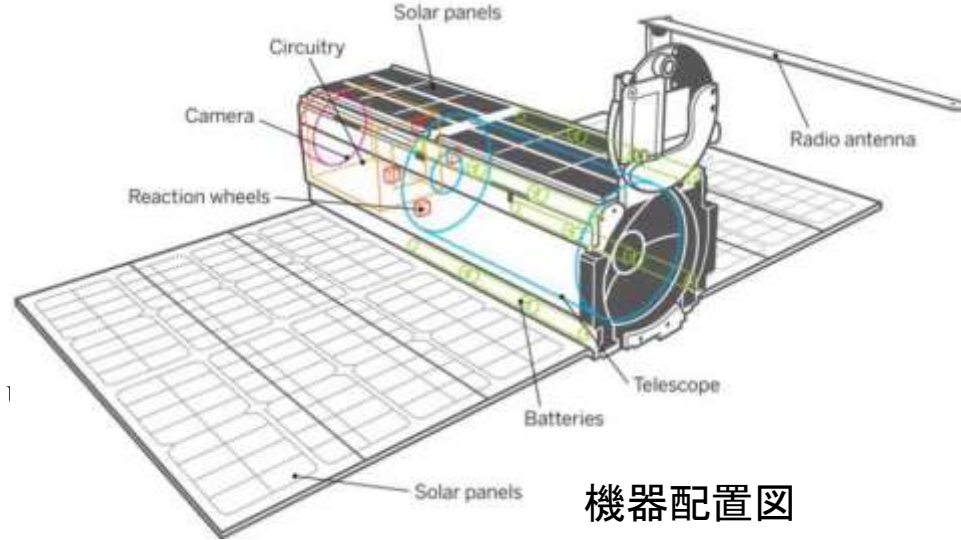
DOVE-1、-2



衛星作りのオープンソース化

# 米国Planet社衛星の機器配置 及び運用情報

- ✓ PlanetLabsの機器配置図が公表
- ✓ データダウンリンク容量は8分間で3.5GB
- ✓ 通信速度は平均62.5Mbps
- ✓ 搭載可能データ容量は500GB (45日分撮影量)



機器配置図



Xバンド通信機のデータダウンリンク容量及び通信速度



# York Space Systems (格安衛星バス)

- アメリカコロラド州にある宇宙ベンチャー
- 小型SAR衛星ICEYEのバス提供企業
- 衛星バスSシリーズ価格は6750万～約1億円
- 社員はGeoeye衛星を開発したGenerral Dynamics社のエンジニアが関与
- 2016年4月、BridgeSat Inc.,社と光通信衛星開発で合意(光通信ネットワーク衛星の製造)
- C&DHIはAAC Microtec (USAFとスウェーデン軍による共同開発実績。PnP衛星開発実績)
- 姿勢制御系はBCT社 (商用衛星PlanetiQ社の実績、RWはSinclair Interplanetaryから製造委託)
- XバンドとSバンド通信はフランスのSylinks社を使用 (ESAミッションPROVA-V、カナダNEMO-HD実績)
- 衛星の量産設備を構築中であると発表

PRICE LIST	
<b>S-Class:</b>	\$675K
<b>S/L5-Class:</b>	\$775K S-Class w/ Dedicated Payload Flight Computer Dedicated Payload Mass Memory Unit
<b>S/L52-Class:</b> <small>Two ST Heads</small>	\$875K S-Class w/ Dedicated Payload Flight Computer Dedicated Payload Mass Memory Unit Second Star Tracker (2 Heads Total)
<b>S/LX2-Class:</b> <small>Two ST Heads</small>	\$1.03M S-Class w/ Dedicated Payload Flight Computer Dedicated Payload Mass Memory Unit Second Star Tracker (2 Heads Total) X-Band High Rate Transmitter (50Mbps)

衛星バスの価格

AESV (ã-sev): S-CLASS	
Availability (Time to Payload Integration):	<1 day**
Launch:	ESPA & Dedicated Launch
Bus Mass:	65 kg
Attitude Control System:	3-Axis Stabilized (RWs & Torque Rods)
Beta Angle Range:	-90° to 90°
Altitude:	LEO
Orientation (Mission Ops Constraints):	None w/ SA Gimbal
Pointing Knowledge:	25 arcsec
Pointing Control:	25 arcsec
Slew Rate:	1.5 deg/sec
Standard Comm:	S-Band Up/Down Spaceflight & Atlas Networks Compatible
	Optional: Laser Comm Downlink (up to 1 Gbps) BridgeSat Compatible
Max Payload Mass:	85 kg (15" ESPA)
Mechanical Mount:	22.5" x 22.5", Flat Plate
Max Payload OAP:	100 W
Payload Thermal Interface:	10 to 23°C Thermal Sink Accepting up to 100W OAP

York Space Systems社の衛星バス仕様

**COMPONENT HERITAGE**

**COMMAND & DATA HANDLING | ELECTRICAL POWER**

- Flight Computer:** Heritage: MaxValier (2016), AFRL SPAARC-1 (2017), InnoSat (2018)
- Mass Memory w/ CCSD5:** Heritage: MaxValier (2016), AFRL SPAARC-1 (2017), InnoSat (2018)
- PSU:** Heritage: InnoSat (2018)

**ATTITUDE CONTROL SUBSYSTEM**

- ACS Solution (\$):** RWs, TQ, GPS, IMU; Heritage: Multiple Programs (2017)

**TELEMETRY, TRACKING & COMMAND**

- X-Band Txm & S-Band Rec'vr:** Heritage: PROBA-V, KENTBRIDGE 1, NEMO-HD (2017)

**STRUCTURE, BATTERY, & ARRAYS**

- CAID Industries Flight Structure:** Heritage: QuickBird, WorldView 1, 2 & 3
- Battery Cells, Sony Li-Ion:** Heritage: QuickBird, WorldView 1, 2 & 3
- Battery Structure, York S-Class**
- Solar Arrays, Triple Junction:** Heritage: GeoEye, 3035, & Numerous others

**YORK SPACE SYSTEMS**

York Space Systems社は実績ある部品採用



# 米国Astro Digital者(旧Aquila Space社)におけるCubesat部品のマイクロ衛星化転用例

- ✓ NASA-AMESスピンアウト企業であるAquila Spaceは、過去にDauria AerospaceへAIS衛星(6Uサイズ)を納入・打上した実績がある
- ✓ 次期光学衛星(マイクロ衛星サイズ)ではCubesat構成部品(GPS、飛行計算機、UHF通信機、電力供給装置、バッテリー)をボックスの中にアッセンブリーする方式を導入。
- ✓ Cubesat部品のマイクロ衛星転用方法を示したと言える。
- ✓ 「Cubesat衛星のサイズ限界説によるマイクロ衛星市場との差別化」という概念が無くなる可能性も

## Platform Upgrades: Corvus-HD

- Upgraded bus to be used for Corvus-HD, launching Q3 2016
- 16U, 20 kg platform
- Improved ACS accuracy and availability
- >200 Mbps data transfer with adaptive MODCOD
- Miniaturized Ka Transmitter assembly
- S-Band, UHF, and backup TT&C radios included
- Doubled battery capacity (96 Wh)



16Uサイズ(20kg)の光学衛星(動画撮像可能)

## Current Projects

- **Perseus-M**
  - Launched in June 2014
  - 2x 6U Automatic Identification System (AIS) CubeSat
  - Characterizing AIS payload performance
  - On-orbit test bed for future missions
- **Corvus-BC**
  - Launch Q1 2016
  - 4x 6U Earth observation CubeSat
  - Multispectral: Red, Green, NIR
  - 22 m ground resolution (GSD)
- **Corvus-HD**
  - Launch Q3 2016
  - 4x 16U Earth observation CubeSat
  - Multispectral: Red, Green, Blue, NIR, Red Edge
  - 2.5 m ground resolution (GSD)



4/23/15 Aquila spaces社の衛星計画(AIS,光学系ミッション)

## Example: Assembly Procedures

- Unambiguous assembly procedures
- Can be used without modification, or just as a reference for design methodology
- Language barrier-proof format

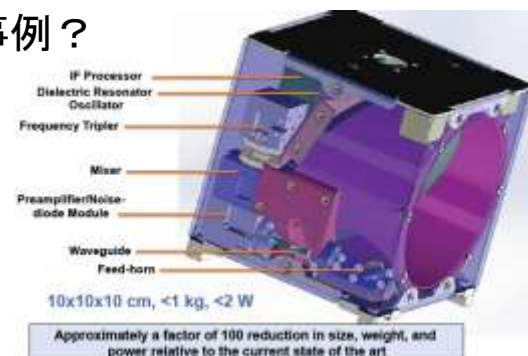


Cubesat部品のマイクロ衛星利用化

Cubesat部品をマイクロ衛星へ転用する動向  
先進ナノ衛星技術⇒マイクロ衛星の高機能化

# MITのCubesat技術をNOAA(米気象機関)が気象衛星として採用

- ✓ MIT開発のマイクロ波放射計搭載MicroMAS-1が宇宙実証成功(3Uサイズ)
- ✓ 観測チャンネル数を増加したMicroMAS-2が現在開発中(3Uサイズ)
- ✓ マイクロ波放射計に加え、GPS掩蔽観測機能を搭載したMiRaTA開発計画を2015年発表(3Uサイズ)
- ✓ 米海洋大気庁NOAAが、本技術をベースに実用気象衛星EON-MWとして採用(12Uサイズ)
  - ✓ 超小型衛星技術が実用衛星(気象ミッション)として採用された初事例?
- ✓ EON-MW衛星のスペック及び構成部品
  - ✓ 発生電力は60W、バッテリー容量216Whr、センサー(MIT)
  - ✓ Sバンドダウンリンク(L-3社)
  - ✓ スタートラッカST-16R(Sinclair社skybox skysat実績)
  - ✓ リアクションホイール(Millennium Space Systems社)
  - ✓ IMU-STIM300(センソノア社)
  - ✓ 飛行計算機・通信・電力制御アビオニクス(Andrews Space社)



## MicroMAS-1, MicroMAS-2, and MiRaTA

MicroMAS = Microsized Microwave Atmospheric Satellite  
MiRaTA = Microwave Radiometer Technology Acceleration

### MicroMAS-1

3U cubesat with 118-GHz radiometer

8 channels for temperature measurements

July 2014 launch, March 2015 release; validation of spacecraft systems; eventual transmitter failure



### MicroMAS-2

3U cubesat scanning radiometer with channels near 90, 118, 183, and 206 GHz

12 channels for moisture and temperature profiling and precipitation imaging

Two launches in 2016



### MiRaTA

3U cubesat with 60, 183, and 206 GHz radiometers and GPS radio occultation

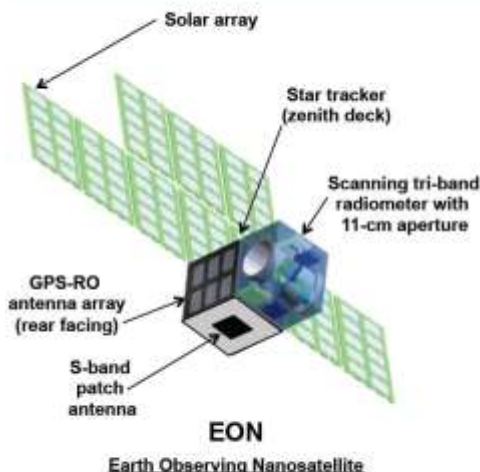
10 channels for temperature, moisture, and cloud ice measurements

Nov 2016 launch on JPSS-1



## Earth Observing Nanosatellite

MIT開発のマイクロ波放射計搭載センサー



- All the features of MicroMAS (wide swath) and MiRaTA (sensitivity)
- 12U cubesat (21x21x34 cm)
- Larger aperture (improved spatial resolution)
- 23/31 + 50-60/88 + 166/183 GHz  
22 ATMS-equivalent channels
- 2-3 year mission lifetime
- Data downlink using S-band

Cubed Reviews - 30  
WJ: 5/23/2015

LINCOLN LABORATORY  
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LINCOLN LABORATORY  
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

- 本ミッションは2014年にAviation Week誌にて“**Tomorrow's Engineering Leaders(明日のエンジニアリーダー)**”のうち、MicroMAS開発者が20人の1人として選ばれた。

(Cubesatで気象観測という、新たなチャレンジに対して大手雑誌が評価)



Full Screen

Raichelle Aniceto (center) accepted a trophy recognizing her selection as one of Aviation Week's "Tomorrow's Engineering Leaders." Presenting the award at the Aerospace and Defense Programs Conference in November are Wes Kramer (left), vice president for air and missile defense systems at Raytheon Missile Systems, and Greg Hamilton, president of Aviation Week, right.

Aviation Week



## Aviation Week's 2014 Twenty20s includes two with ties to MIT Lincoln Laboratory

Awards recognize promising work of young aerospace engineers.

Dorothy Ryan | Lincoln Laboratory  
December 10, 2014

Press Inquiries



RELATED

# 技術開発動向

(フォーメーションフライト  
ランデブー & ドッキング)



# 米Tyvak社(Calpolyベンチャー)の宇宙事業と技術開発

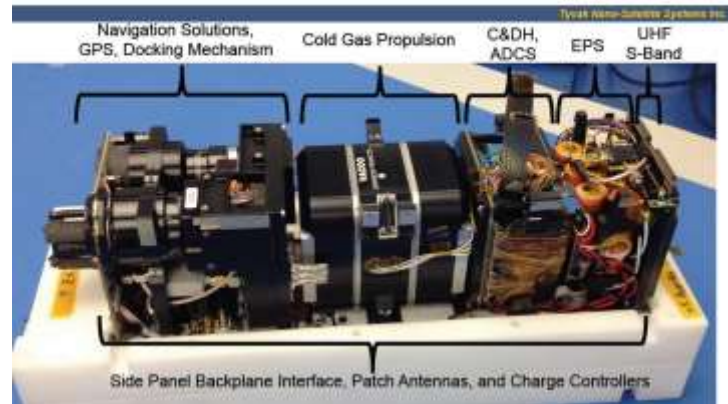
- ✓ CUBESAT部品の米国内外の販売事業
- ✓ 低コスト空中発射ロケットのアビオニクス開発
- ✓ Cubesat放出装置の開発(3Uサイズ超軽量化・6Uサイズ放出装置)
- ✓ ロケット搭載支援事業(顧客衛星の受取—充電/燃料充填—LVS搭載)
- ✓ JPL火星探査Cubesat、MarCOのインテグレーション
- ✓ ランデブー・ドッキングcubesatであるCPOD開発
- ✓ 1m展開型アンテナの開発(SBIR予算)
- ✓ Cubesat打上保険事業を開始(欧州保険会社AONと提携)
- ✓ イタリアへの事業展開: Terran Orbital Corp
- ✓ Cubesatだけでなく、50kgや100kgクラスの衛星も開発着手



火星探査フライバイCubesatのMarCO

## CPOD Configuration

4x Radios      5x Linux Computers      4x Deployables  
6x Antennas      3x Microcontrollers      6x Imagers



Side Panel Backplane Interface, Patch Antennas, and Charge Controllers

## CPOD Air Table Testing (Video)

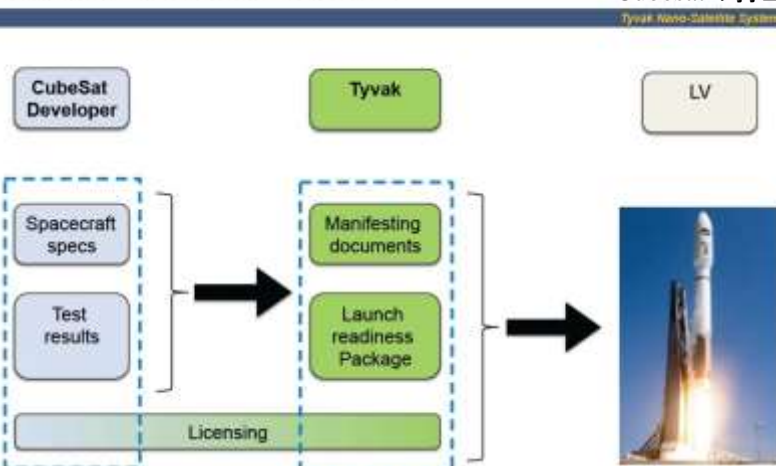


ランデブードッキングCubesat (CPOD)

## Launch and Satellite Insurance

- We offer insurance services on major U.S. and International Launch Vehicles
  - Competitive rates and favorable payment terms
  - Simple and efficient process and contract
- Any satellite from the smallest CubeSat to a SmallSat in the 10's of kg can get insurance
  - Comprehensive package for reducing financial risk and providing piece of mind
  - Can cover the full cost of the launch, typically the largest single expensive in a small satellite budget
  - Can cover the full cost of replacing the satellite, including COTS subsystems

Cubesatの打上保険事業



Tyvak社の打上支援事業(搭載支援+ライセンス+保険)



1.2kg

Cubesat放出装置

# 米Tyvak社ランデブードッキングCubesat概要

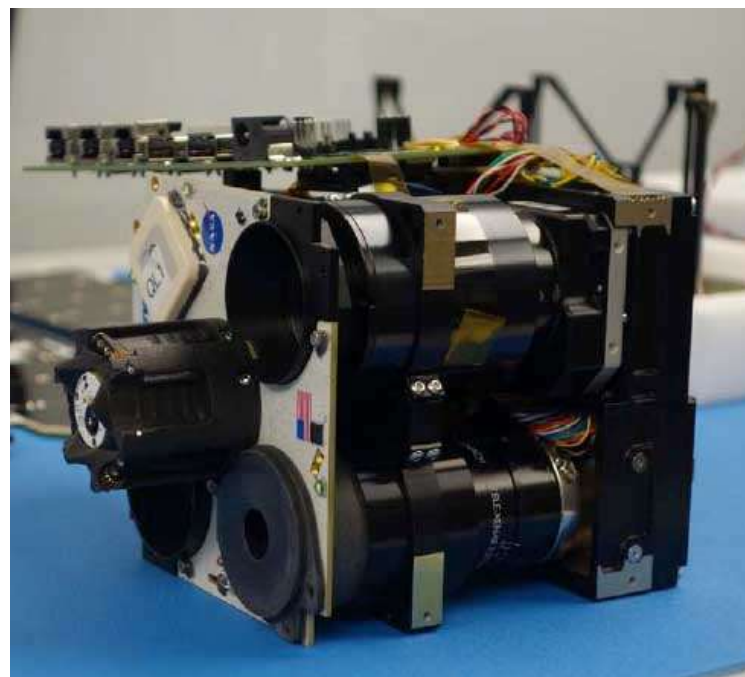
## CPOD Performance Summary

2018年打上予定

Tyvak Nano-Satellite Systems Inc.



Capability	Specification	Comments
Average Power Generated	-17W to 30W OAP	Polar Sun-Sync
Average Load	-15W	Fully Active
Pointing Accuracy	<0.15 degrees	Star Trackers available under all mission scenarios
Mission Data Downlink	-60MB / day	UHF and S-Band
Delta-V	-30 m/s	Cold Gas
Total Mass	5.990kg	Wet Mass (13% Margin)



## Endeavor Vehicle: C&DH and ADCS 1/2U Solution

Tyvak Nano-Satellite Systems Inc.

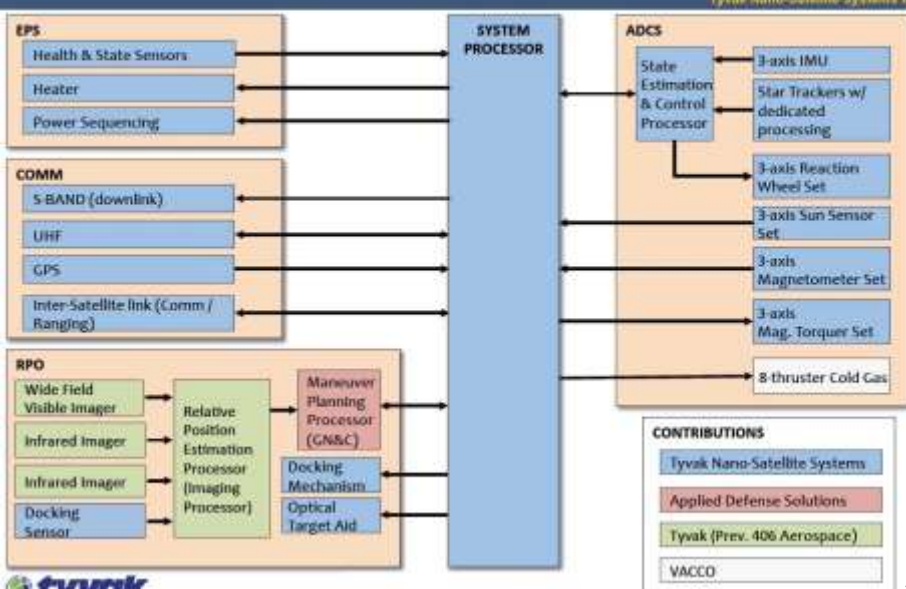
- **C&DH Linux Processor**
  - Arm9 @ 400Mhz
- **ADCS Linux Processor**
  - Arm Cortex-A8 @ 800Mhz
- **Reaction Wheels (x3)**
  - 10mn-m-s; 3mN-m; 10000 RPM Max
- **Star Trackers (x2) and IMU**
  - Pitch/Yaw/Roll 10/10/80" 1σ
- **Magnetorquers (x3)**
  - 0.1 A-m<sup>2</sup> in all axis



\*Baffles Not Shown 5

## Space Vehicle Architecture

Tyvak Nano-Satellite Systems Inc.





- NASA-GSFCでは、太陽コロナ観測のため、FF太陽観測衛星を開発中
- 技術実証と開発リスク低減のため、Cubesatを使用した実証機を計画
- 開発コスト・サイエンスニーズ・技術のトレードオフからCubesat利用に目を向けるNASA-GSFC



## Demonstration on CubeSats

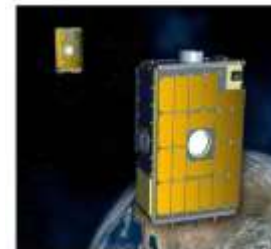


### • Purpose:

- Low-cost, low-risk
- Demonstrate novel GN&C techniques
- Science on CubeSats

### • Development Path

- Tech Demo (VTDM, CANYVAL-X)
- **Science Demo (TBD)**
- Full Scale Mission (TBD)



Virtual Telescope Demonstration Mission (VTDM)



CubeSat Astronomy by NASA and Yonsei using Virtual Telescope Alignment - Experiment (CANYVAL-X)

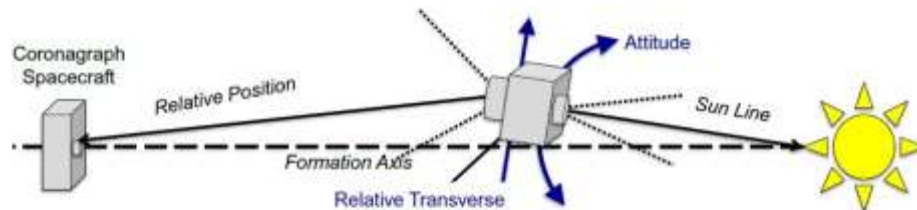


## How Do We Measure the Formation Axis?



### Solar Formation Alignment Camera (S-FAC)

Single instrument to measure relative position wrt formation axis (i.e., inertial line of sight)



S-FAC Focal Plane

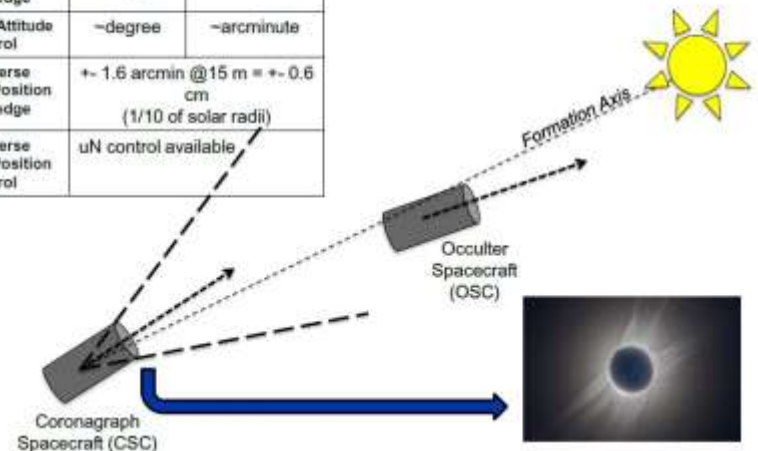
### S-FAC Algorithm objective:

- Move dot (CSC) towards x (target)
- Move x to center of focal plane
- Difference in dot and x represent transverse position errors off formation axis

## Formation Alignment Requirements



	Coronagraph Spacecraft (CSC)	Occulter Spacecraft (OSC)
Absolute Attitude Knowledge	0.5 degrees	1 arcminute
Absolute Attitude Control	~degree	~arcminute
Transverse Relative Position Knowledge	± 1.6 arcmin @ 15 m = ± 0.6 cm (1/10 of solar radii)	
Transverse Relative Position Control	uN control available	



- ◆ INSPIREミッション
- ◆ はやぶさ“ミネルバ”を引き合いに出し、開発方針発表
- ◆ NASA-JPL、CalPoly、MIT、UCLAなどが参加
- ◆ フォーメーション飛行、リンク通信実験
- ◆ 深宇宙探査技術の確立(=ミネルバの機能向上版)
  - ✓ 宇宙望遠鏡への応用も将来想定
  - ✓ 将来の大型化へ向けて、技術的課題の抽出と実験の意味合い



## Design Overview

### CubeSat Overview:

Volume: 3U (10x10x30cm)

Mass: 4.0 kg

### Power Generation:

3 Axis Stabilized: 20 W

Tumbling: 13 W

Data Rate: 62-256000 bps

### Software:

Developed in-house (protos)

### I&T:

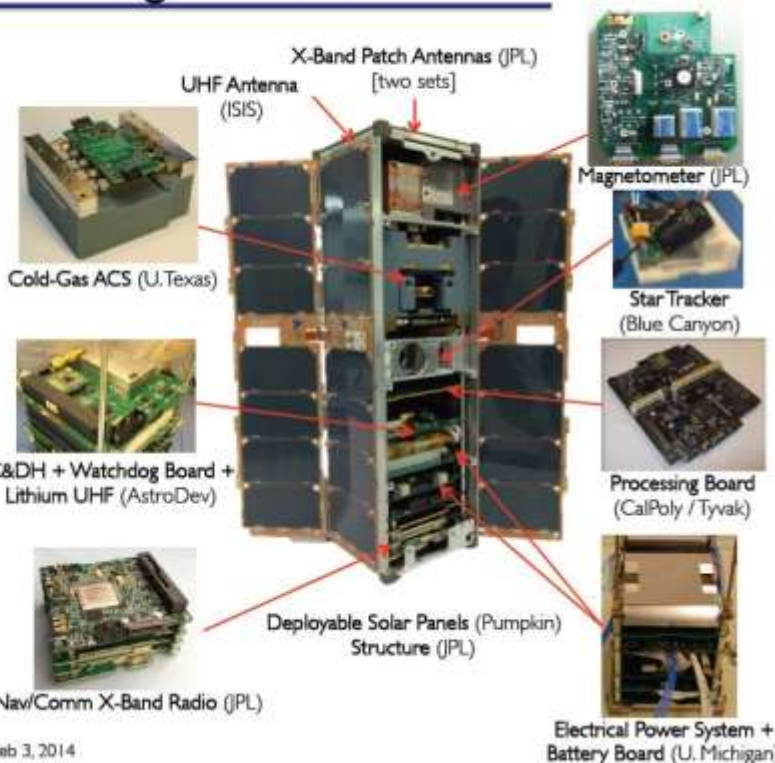
In-house S/C I&T, external environmental testing, NASA CLI P-Pod/Launch Integration

### Operations:

Primary: DSN

Secondary (Receive only): DSS-28 (GAVRT), & Secondary Stations, ex: Peach Mountain

S/C components provide the basis for future high-capability, lower-cost-risk missions beyond Earth expanding and provide NASA leadership in an emergent domain



End-to-End Detumble Demonstration  
Formation Flight Lab - JPL, Apr 2014



Detumble Algorithm, Gyro, and Attitude Control Demonstration



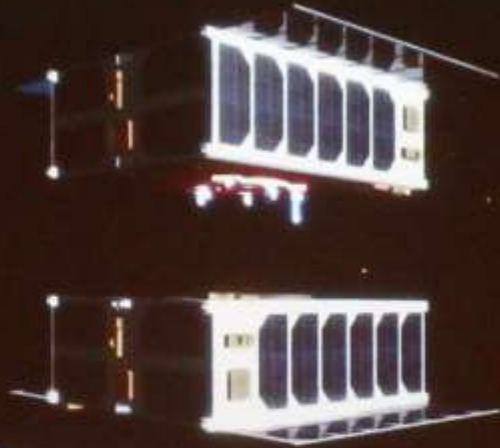
AstroDev CDH System with onboard MEMS gyro  
JPL Flight Software – Joshua Schoolcraft and Thomas Werne  
JPL ACS Algorithm – Dr. Eric Gustafson  
U. Texas Cold-Gas Thruster System – Travis Imken and Dr. Glenn Lightsey


\*Model is from Mechanical Fit Check on Feb 3, 2014



# 欧州ランデブードッキング Cubesat (RACE)

- ◆ 欧州でもランデブードッキングミッションを計画中。ミッション名はRACE (RENDEZVOUS AUTONOMOUS CUBESATS EXPERIMENT)
- ◆ 米国のCPOD (3Uサイズ)とは違い、6Uサイズで実施予定。打ち上げは2021年の予定(当初の計画は2020年だったが、開発遅れの模様)
- ◆ 2018年8月の報道で、システムアッセンブリー企業はGOMSPACE社



Rendezvous Autonomous Cubesats Experiment (RACE) 

**System demo of:**

- Rendezvous & docking
- Target close fly-around

**Enabling Tech demo (TRL4):**

- 6 DoF propulsion
- RelNav sensors (vis, GNSS)
- autonomous GNC
- docking mechanism

**Future application:**

- autonomous on-orbit assembly of large structures using building blocks


**Mission concept:**

- two 6U CubeSats
- joined together in 12U POD for launch
- joint commissioning and separation in orbit
- series of docking and fly around trajectories
- testbed for different GNC algorithms

**Phase A/B started with GomSpace, GMV, Almatech, Micos**

**PDR Q4 2019  
Launch Q4 2021**

RACE will open up the path to completely new space system architectures based on aggregation that are not feasible or cost-effective today due to launcher fairing constraints



# 欧州によるCubesatの電波天文FF

- OLFAR: Orbiting low Frequency Antennas for Radio Astronomy
- 参加チーム構成
  - フランス: LESIA, CNRS-Observatoire de Paris
  - オランダ: Radboud University Nijmegen、TU Delft
  - スウェーデン: IRFU
- 超低周波を観測域とする電波天文ミッションを計画コンセプト

## Very Low Frequency Radioastronomy Identified Science opportunities

- LF sky mapping + monitoring : radio galaxies, large scale structures (clusters with radio halos, cosmological filaments, ...), including polarization, down to a few MHz
- Cosmology : pathfinder measurements of the red-shifted HI line that originates from before the formation of the first stars (dark ages, recombination)

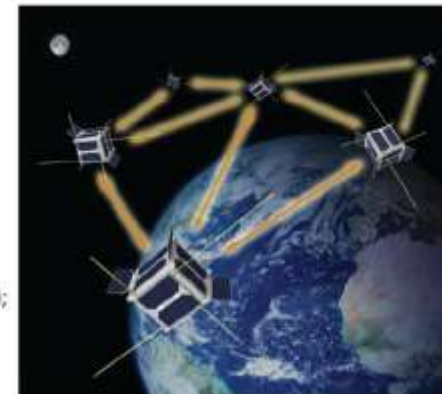


- Interaction of ultra-high energy cosmic rays and neutrinos with the lunar surface
- Low-frequency radio bursts from the Sun, from 1.5 Rs to ~1 AU : Type II & III, CME, ...  
Space weather
  - Passive: through scintillation and Faraday rotation
  - Active: through radar scattering
- Auroral emissions from the giant planets' magnetospheres in our solar system: rotation periods, modulations by satellites & SW, MS dynamics, seasonal effects, ...  
First opportunity in decades to study Uranus and Neptune
- Detection of pulsars down to VLF, with implications for interstellar radio propagation : LF cutoff of temporal broadening in 1/f<sup>4.4</sup> ?  
→ largest scale of turbulence in ISS ? limit of transient observations ?
- The unknown ...

## OLFAR

*Teams involved: NL + many other interested*

- OLFAR: Orbiting low Frequency Antennas for Radio Astronomy
- Science objectives:
  - «Dark Ages» (cosmology < 10MHz, redshift ~100, EoR [Epoch of Recombination])
  - Sun-Earth (space weather), Planets (outer planets: Uranus...)
  - In situ measurements (Thermal Noise).
- Technology objectives:
  - Passive formation flying (swarm configuration); inter-satellite distance < 100 km
  - Inter-satellite communication with GSM, shared computing power (distributed computing)
  - Radio antennas: 3 electric dipoles axes (6 x 5 m); frequency range: 30 kHz-30 MHz
- Schedule: 2020 ?  
Orbitography: lunar orbit (or L4-L5 Earth Lagrange Points)



# 技術開発動向 (光通信関連)



# 米AerospaceCorpの「光通信衛星開発」と「地上局自動運用システム開発(汎用ソフト利用)」

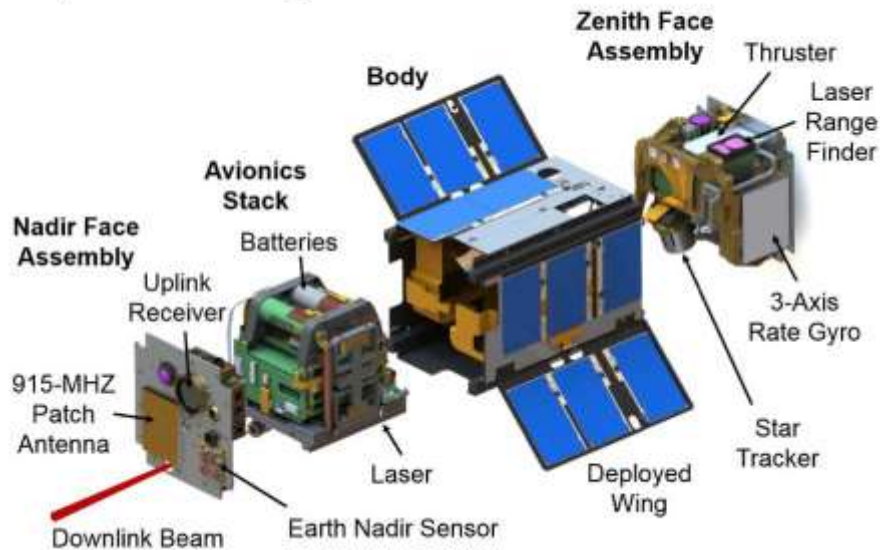
## <光通信衛星>

- ✓ 米政府研究機関AerospaceCorpでは、衛星と地上間をレーザー通信するAerocube-OCSDを開発中
- ✓ 打上は2015年後半であり、2016年には2号機が打上予定
- ✓ 衛星—地上間通信では地上側30cm直径レシーバーでは50Mbps、80cm直径レシーバーでは200Mbps
- ✓ 衛星間による光ネットワーク通信衛星網も計画中

## <衛星コンステレーションの自動化開発: 汎用ソフトで構築>

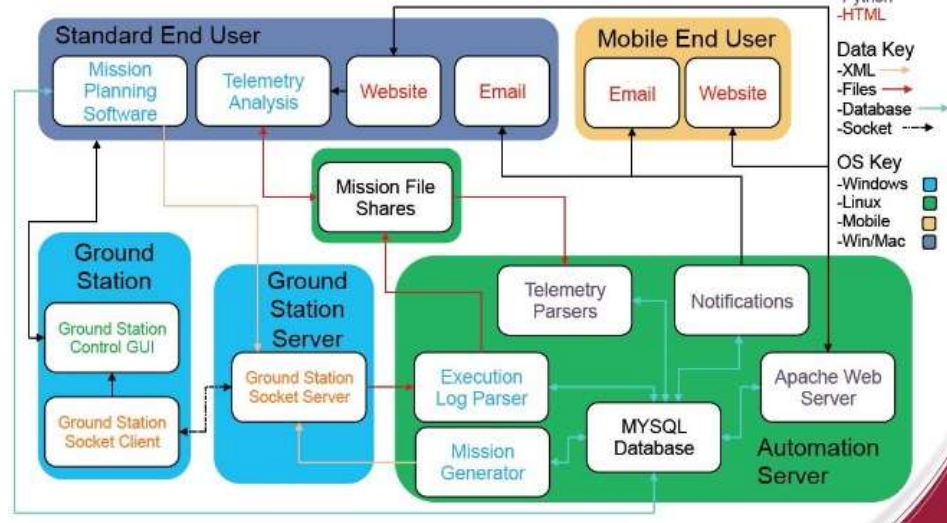
- ✓ 人工衛星の自律運用には、衛星側の自律化の一方で地上側も自動化する必要がある。
- ✓ この運用システムを既存の汎用ソフトやプログラミング言語であるMATLAB、C++、VB6、Python、HTMLを使用し、データフォーマットも汎用でやり取りし、起動OSも従来のWINDOS、LINUX、WIM/MAC、Mobileで利用できる運用システムを開発。軌道上衛星で実証済み
- ✓ 従来は専用システムで構築されてきたが、汎用システムでも稼動可能であることを証明。

Exploded rendering of OCSD



光通信Cubesat開発(OCSD)

Constellation Automation  
Detailed Architecture



汎用ソフト・汎用言語による自律運用型地上局の開発(低コスト化)

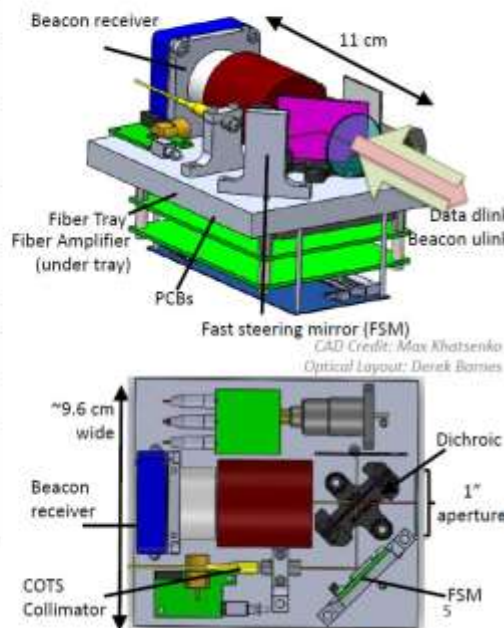
## Cubesatサイズの光通信装置の開発(MIT)

- ✓ 地球観測データ等のデータダウンリンク速度向上のため、光通信技術が注目されている
- ✓ MITやAerospaceCorp社では、Cubesatサイズに搭載可能な光通信装置を開発中。
- ✓ MITは衛星搭載側と地上ターミナルを同時に開発中。
- ✓ 現在は10~100Mbpsだが、将来はGbpsクラスを目標としている。

## NODE Space Terminal Overview



Scope	CubeSat Low-Cost Payload
Architecture	Direct detection MOPA COTS telecom parts (1550 nm)
Downlink data rates	10 Mbps (amateur telescope) 100 Mbps (OCTL)
Power	0.2 W (transmit power), 15 W (consumed power)
Beamwidth	1.3 mrad (half power)
Modulation	PPM
Coding	RS(255,239)
Mass, volume	1.0 kg, 1 U
Control architecture	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bus coarse pointing (&lt;0.5°)</li> <li>FSM fine steering (+/- 2.5°)</li> <li>Beacon receiver (976 nm) for pointing knowledge (20 arcsec)</li> </ul>



## SmallSat\* Lasercom Missions



### SmallSat Lasercom Tech. Demos



### Missions that Advance Supporting Tech.



**Related: UAV lasercom:**  
Facebook Aquila<sup>[17]</sup>  
Optical crosslinks between aircraft

Google Loon<sup>[18]</sup>  
155 Mbps crosslink,  
balloon lasercom system

## NODE Ground Terminal Overview



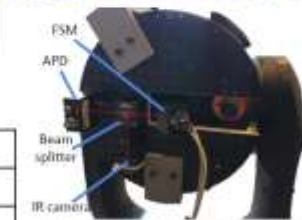
### Downlink with NODE amateur telescope:

Data rate	10 - 50 Mbps
Rx Diameter	30 cm
Detector	Direct detection w/ COTS Voxtel APD
Receiver electronics	Custom data acquisition system
Pointing	COTS IR camera and star tracker <sup>[19]</sup> FSM to keep spot on APD (no AO)
Uplink beacon	OCTL beacon <sup>[20]</sup>



### Downlink with JPL OCTL telescope:

Data rate	50 - 100 Mbps
Rx Diameter	1 m
Rx electronics	NODE electronics (APD & custom electronics)
Uplink beacon	976 nm, 10 W tx power, 1 mrad beam



[19] Poorn, Piyang, Kuldewi Rosing, and Ken Lubin. "Satellite Tracking System using Amateur Telescope and Star Camera for Portable Optical Ground Station" (2018).

Image credits: Clements (above), Boring (below)

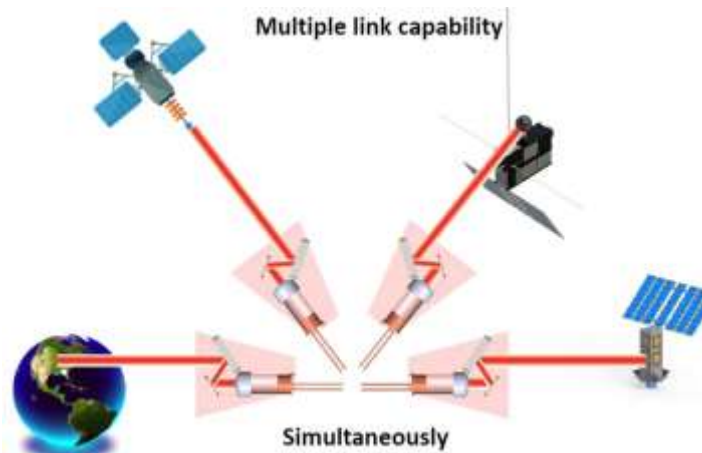


# NASA JPLの無指向性光通信

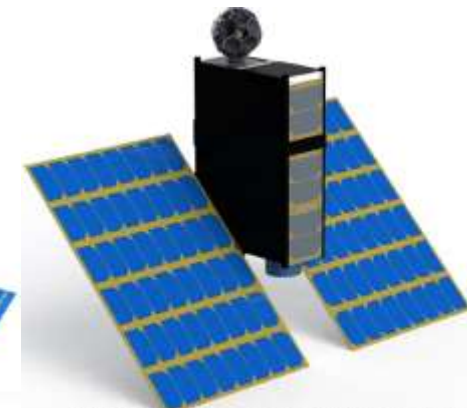
- ✓ 2018年4月、NASA-JPLは第3世代ともいえる、無指向型光通信装置の開発計画を発表
- ✓ 6U Cubesatへ搭載。光通信端末そのものは1Uサイズ(直径4in: 10cm)で収納式
- ✓ 機器名はISOC(Inter-Satellite Omnidirectional Optical Communicator)
- ✓ 1つのISOC望遠鏡が24度の範囲であればMEMSミラーが作動し、送信可能。
- ✓ iSATcon(地球周回66機)ミッション案、RePAR(変更可能なフェーズドアレイレーダ)ミッション案など検討中



無指向型光通信ネットワーク構想



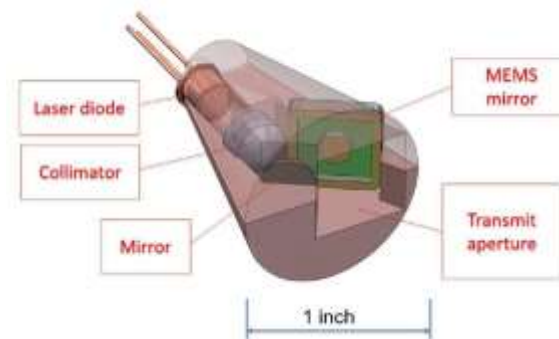
マルチリンクを目標とするコンセプト



CubeSat design we are pursuing for technology demonstration of ISOC communicator

実証は6UサイズのCubesat

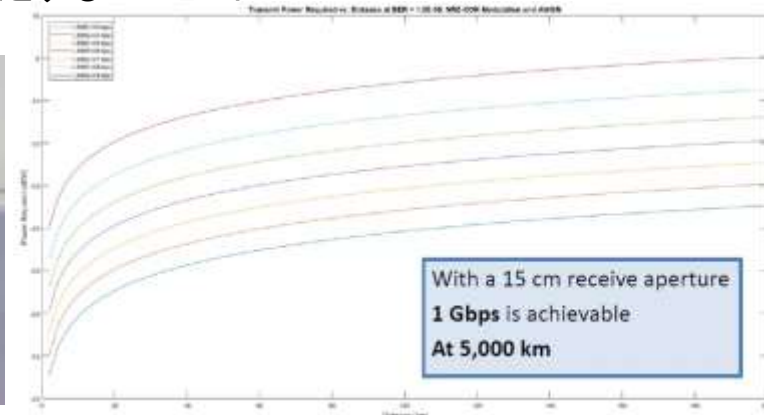
ISOC Transmit Telescope



無指向型送信(ISOC)望遠鏡



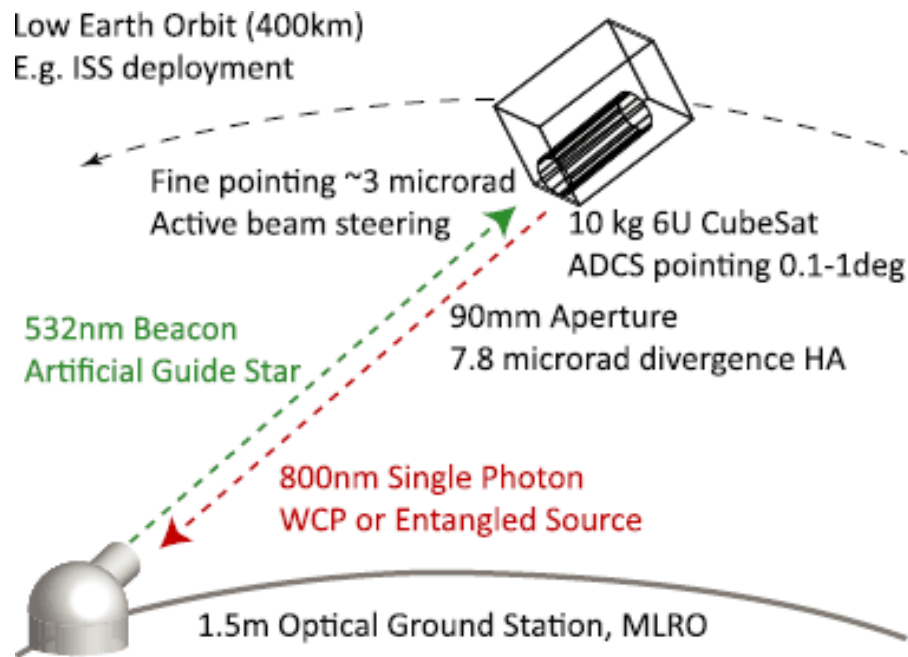
通信装置の開発



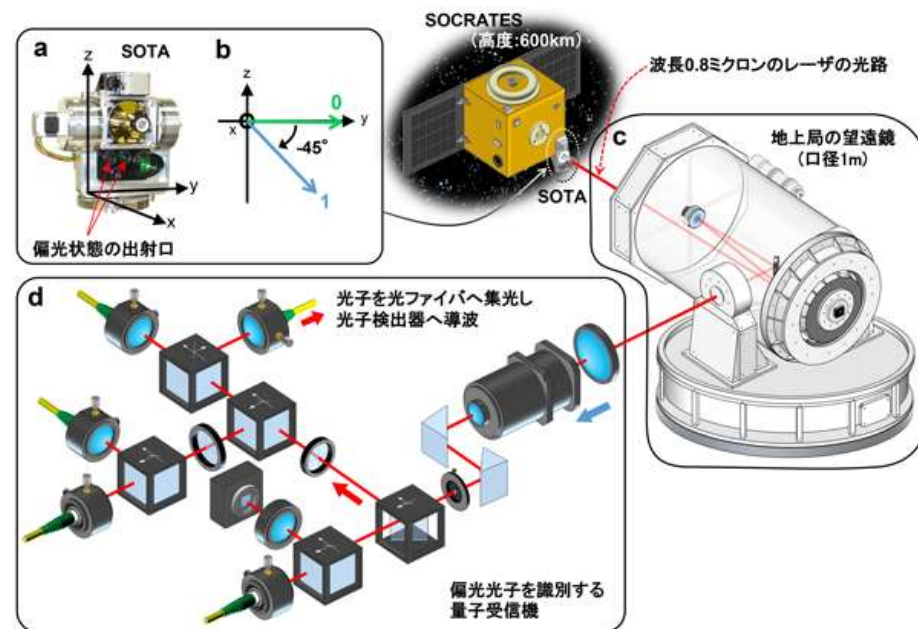
5000kmの距離で1Gbpsの通信速度

# 量子暗号通信Cubesat

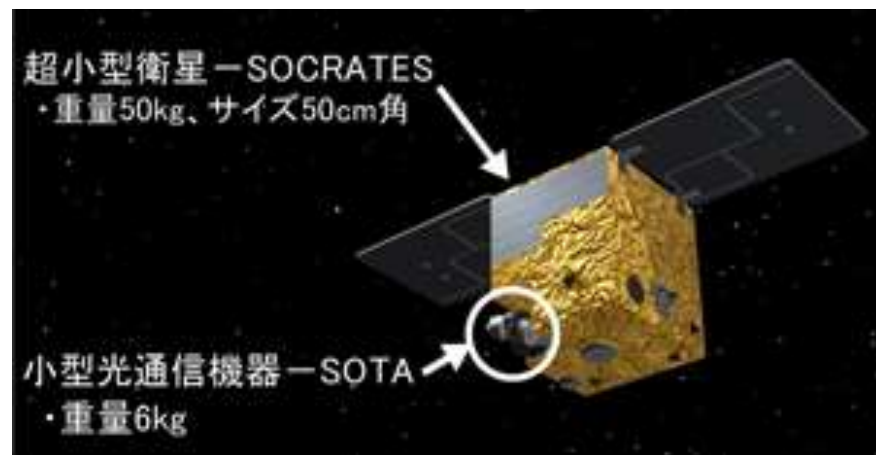
- ✓ 日本、欧州、中国でも光通信 & 量子暗号通信を目的にした超小型衛星が開発中
  - ◆ 日本、NICT (SOCRATESミッション)
  - ◆ 中国科学技術大学 (USTC)
  - ◆ ウィーン大学
  - ◆ イギリス、University of Strathclyde
- ✓ 通信の高速化、暗号化という技術課題に小型衛星で実証を進める各国



6U Cubesatサイズのコンセプト



NICT 6U量子暗号通信機の開発



2017年小型衛星で世界初の量子暗号通信に成功



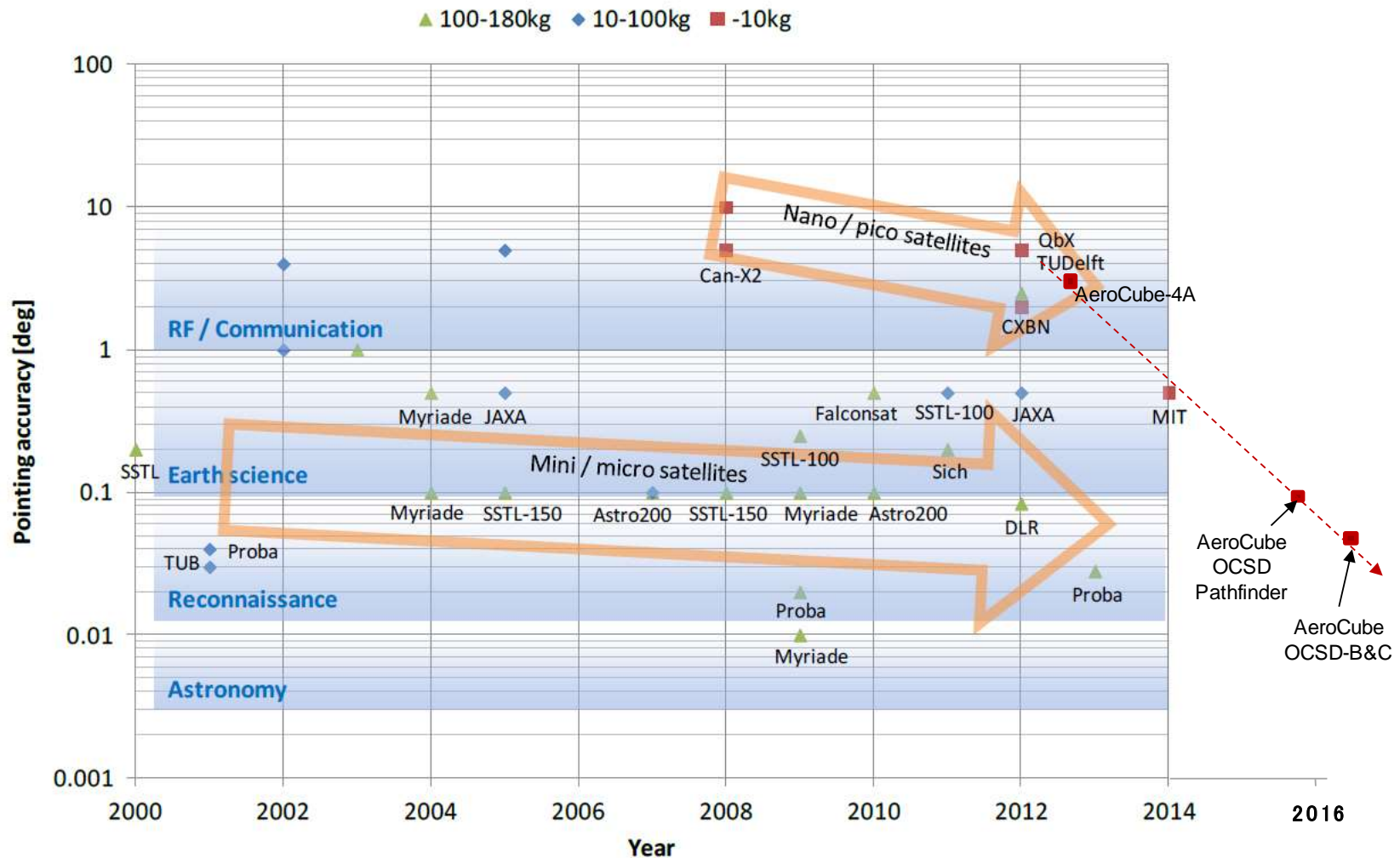




# 世界の超小型衛星の姿勢制御精度動向 (NASA)

## Small Satellite Pointing Accuracy

# Small Satellite Pointing Accuracy



***From: “Small Spacecraft Technology: State of the Art,” by C. Frost, E. Agasid, et al., p.61, NASA Technical Report TP-2014-216648/REV1, NASA-Ames Research Center, 2014***

## 小型・超小型衛星の姿勢制御技術は向上中

# 技術開発動向 (通信系)

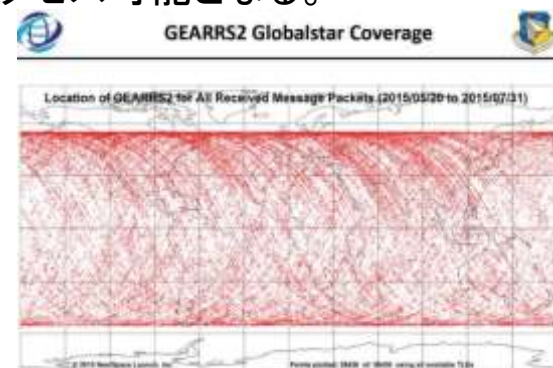
## 地上局を使用しない衛星運用システムEyeSTAR、Linkstar(周波数調整不要の通信機)

- ✓ 衛星運用者にとって、通信周波数の割り当ては非常に大きな課題とされている。
- ✓ この問題を解消するため、アメリカ空軍では大学Cubesatへ“**周回通信衛星GlobalStarへ通信端末**”を開発、搭載させ、**地上局なしでもCubesatを運用できる技術**を開発していた。
- ✓ 本システムは**EyeStar、Linkstarの名称**で販売され、衛星運用者が地上局設置なしに、通信料を支払えばほぼ24時間、インターネット回線とGlobalstar衛星を通じて自衛星へアクセス可能となる。
- ✓ 料金

◆ Linkstarは衛星ステータス受信は年間3,500ドル  
 コマンド送信機能追加で年間20,000ドル

◆ Eyetarは従量課金制であり、通信容量によって料金変動

- ✓ 1000機分のCubesat通信枠が販売可能であり、聞き取りでは大学や宇宙機関から多くを受注済



### SAT Duplex Transceiver Product



- Up to 7000 baud data rate
- Data and Command Control
- TCP-IP software with ARM processor
- Handshaking protocol
- Active patch antenna (6 cm)
- 1 Watt ERP
- 3.3 & 5 V, 5W input power
- Size 6.1 X 11.9 X 11.9 cm
- CAD, ICD, Support, FCC License

NSL  
 NearSpace Launch Inc.  
 Technology Service Education

Commercial Products  
 See NSL Booth 104

#### 1. EyeStar Radios: Globalstar Simplex and Duplex

1. 3 launches in 15 months (Space X-ELaNa 5, Orbital-ISS, Atlas)
2. Reliability: 5 for 5 simplex, 2 for 2 duplex all worked well
3. Delivery: 10 universities, NASA, NSF, AF, Industry

#### 2. F-Bus Series (F1-F6): Fast, Fighter, Functional

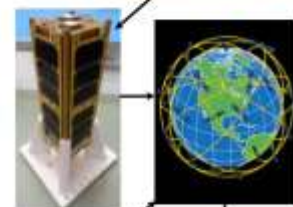
1. 2-3 Month Delivery of Satellite Bus
2. Robust Structure, EPS, Solar, Li-Poly Battery, Comm., 3A-Mag, EMI shield, Isothermal, Optical bench plate
3. Nanoracks-ISS, P-POD launch, FCC, Safety, & Doc.
4. Flight Heritage: GEARRS 1, GEARRS2

#### 3. Operational Data Ground Segment

1. Anywhere Anytime, 24/7 coverage, near real time
2. Fully functional with University, Government, and Industry Use
3. Graphics display software and command software
4. Multi-Sat. Standardized time-ordered Data base

#### 4. Other Services:

1. Sensors, High Altitude Balloons, EyePod Globalstar Radios, (Over 370 Launches with 99% success)



中継衛星型の通信機(地上アンテナ局不要の通信機)

Eyestar通信機の衛星搭載の実績