

福井大学における超小型衛星の 開発について

福井大学 産学官連携本部
青柳 賢英

超小型衛星とは

JAXA 大型地球観測衛星

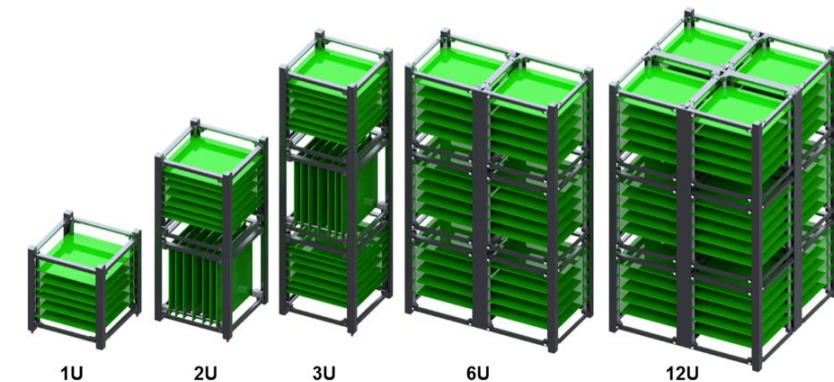


超小型衛星の例



呼び名		重量
大型衛星	Large-satellite	> 500kg
中型衛星		
小型衛星	Small-satellite	< 500kg
超小型衛星	Micro-satellite	< 100kg
	Nano-satellite	< 10kg
	Pico-satellite	< 1kg

CubeSat : 10cm立方を1Uとする超小型衛星



Source: Radius Space
www.radiuspace.com

超小型衛星とは

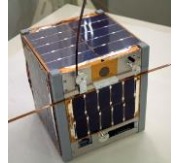
- ・ 1機数百億円の莫大なコスト
- ・ 5～10年の長期開発が必要
- ・ 失敗を許さない高信頼性設計
- ・ 顧客は国
- ・ 技術革新のスピードが乏しい



超小型衛星

- ・ 低コスト化，開発期間短縮
- ・ 新規技術を導入し，技術革新
- ・ 長寿命化を目指さず，世代交代を促す

- 2000 ～
 - ・ 大学における宇宙教育の一環
- 2008 ～
 - ・ 高度化・実用化へのステップアップ，大学の研究用途，新規デバイスの宇宙実証
- 2014 ～
 - ・ 超小型衛星の実用化が始まり，宇宙産業の一端を担っていく



XI-IV
(東京大学, 2003年打ち上げ)

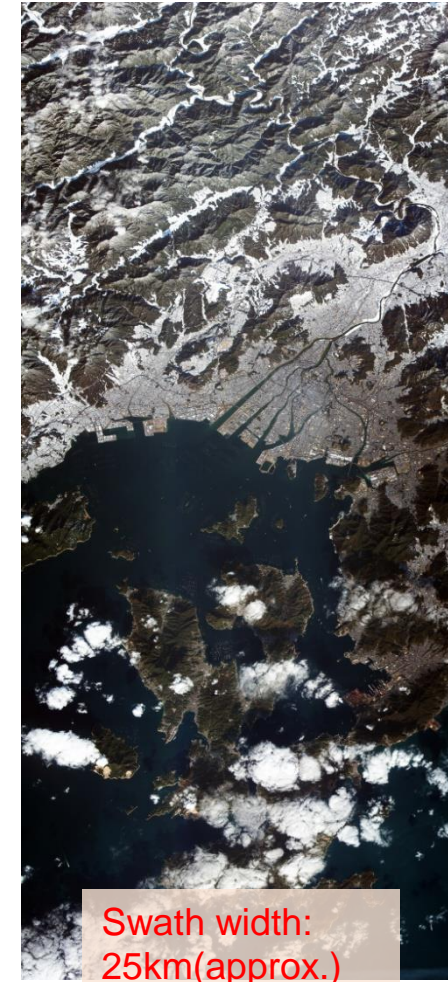
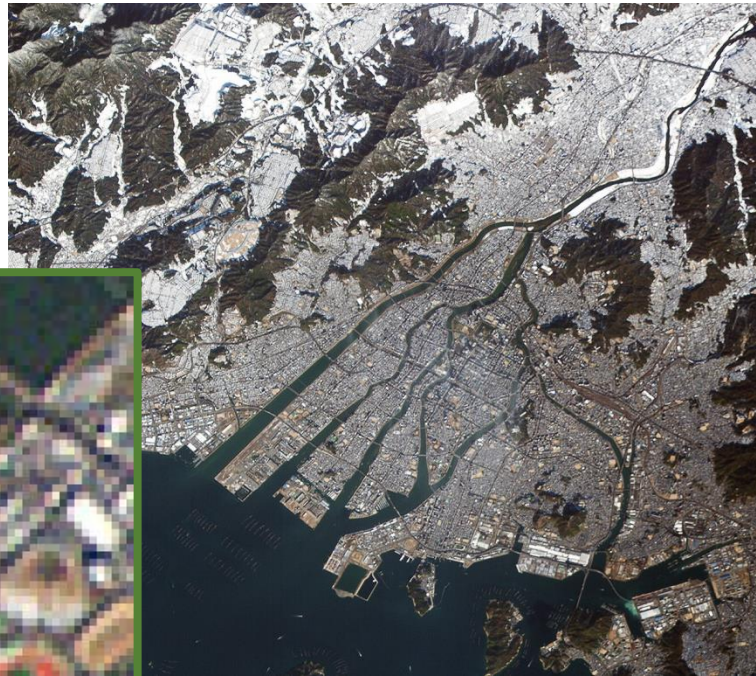


超小型衛星によるパラダイムシフト 国内衛星での高分解能撮影：ほどよし4号（2014年）



6.3m / pixel

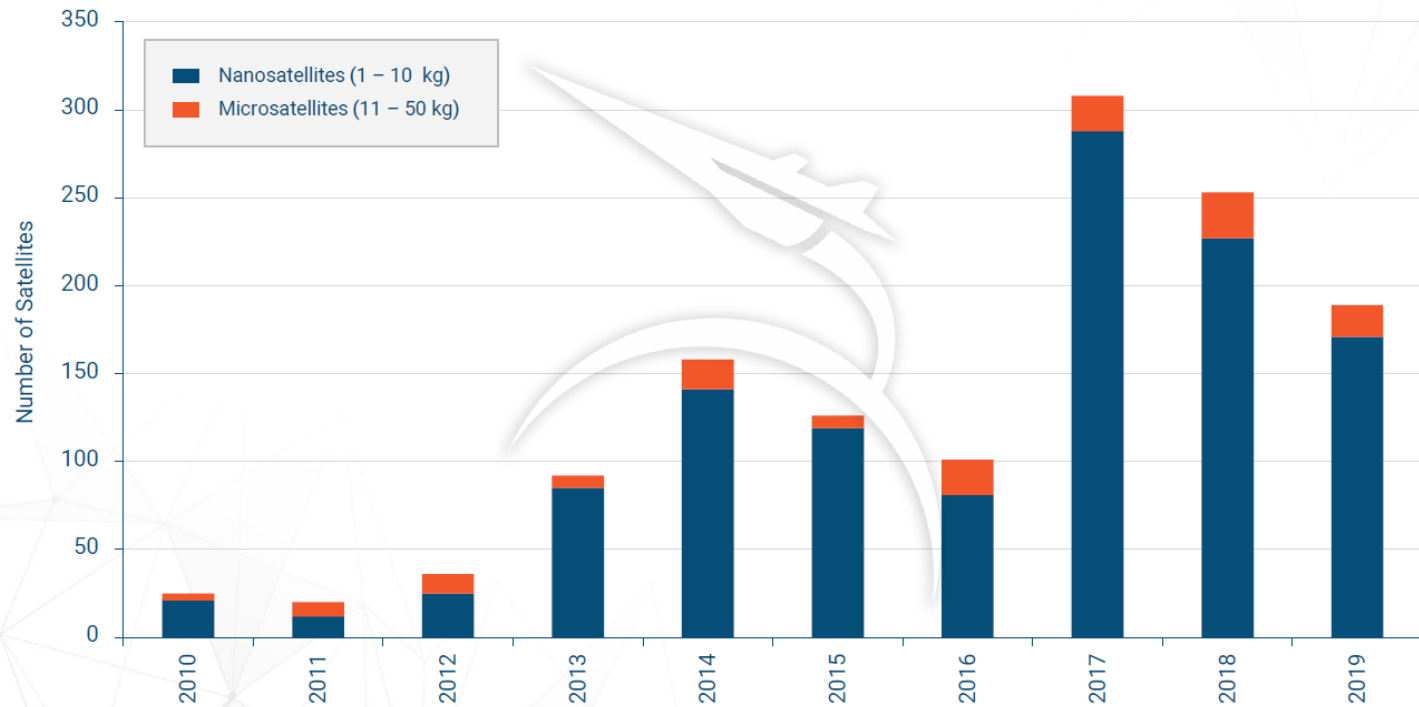
2014-12-19T01:20:34Z



Swath width:
25km(approx.)

重量100kg以下の超小型衛星では、
世界最高クラスの空間分解能(2014年)

超小型衛星によるパラダイムシフト 量産製造の時代へ



DelPozzo, S. and Williams, C. 2020 Nano/Microsatellite Market Forecast, 10th Edition, SpaceWorks Enterprises, Inc.

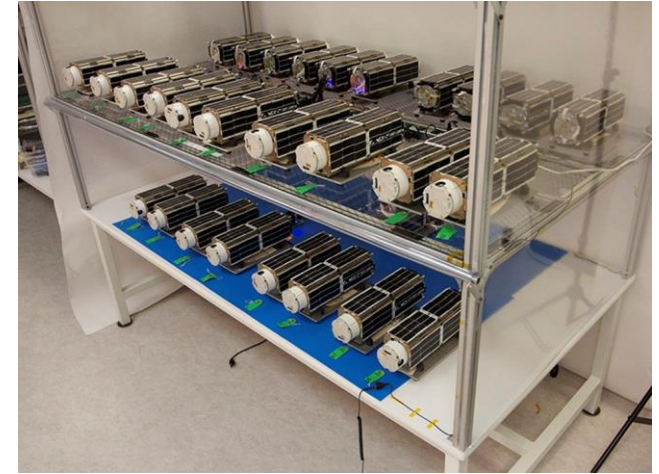


image credit: Planet labs



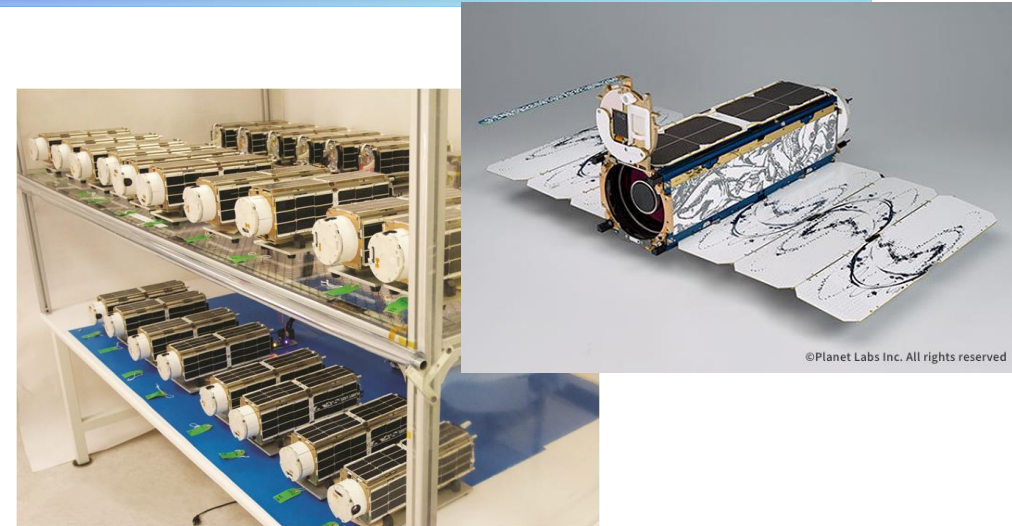
image credit: Spire Global

超小型衛星によるパラダイムシフト 国の宇宙開発から民間へ

- ◎ Planet labs: サンフランシスコ拠点ベンチャー
- ◎ 100機以上の超小型衛星群による地球観測により、24時間以内の再訪時間 (Revisit Time) を実現
- ◎ 3U-CubeSat, 5kg
- ◎ 分解能: 約3m ~ 5m, 画像サイズ: 22kmx14 km
- ◎ 4バンド(NIR含む),
- ◎ 地上局を全世界に数十地点に分散配置

機数	Revisit Time [Day]
20	28
30	15
50	2
150	1

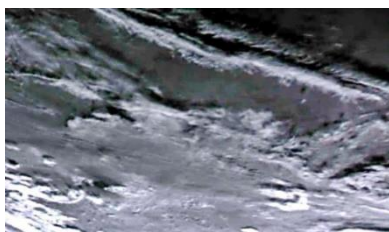
Planet社公表資料から抜粋 (緯度 40° の場合)



Niagara Falls (26 October 2015)
Image credit: Planet Labs

国内における超小型衛星の実用化を目指して

- ISAS/JAXAの観測ロケットSS-520による超小型衛星の軌道投入実験
- 国際商業市場において競争力のある超小型衛星の実現に向けて、民生技術を使用した低コスト実用衛星バスを開発する
- 2018年2月3日に軌道投入し、各ミッション運用にも成功
- 2018年8月22日に地球大気圏に再突入したものと推定し、運用終了



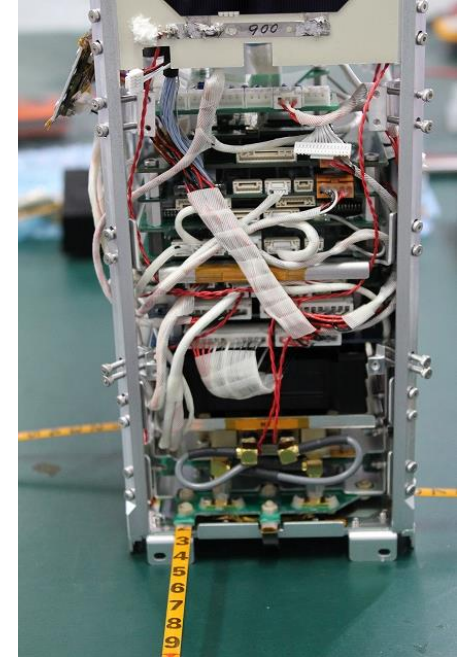
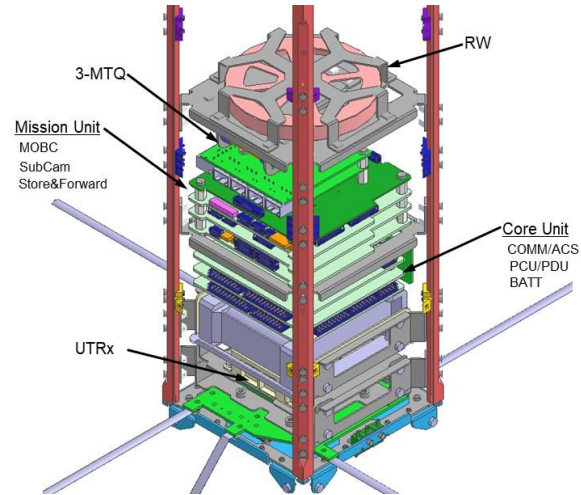
衛星名	TRICOM-1R (たすき, TASUKI)
軌道投入日時	2018/02/03 14:10:30
軌道	近地点高度 : 183 [km] 遠地点高度 : 2010 [km] 離心率 : 0.1222 軌道傾斜角 : 30.785 [deg] 昇交点赤経 : 260.877 [deg] 近地点引数 : 77.311 [deg] 平均近点離角 : 15.716 [deg]

寸法	116 × 116 × H346 mm ³
重量	3.2kg
姿勢制御	・ 姿勢センサ: 3軸地磁気センサ, 3軸MEMSジャイロ, 3軸高精度地磁気センサ, GNSS受信機 ・ アクチュエータ: 3軸磁気トルカ, デスパン用ホイール(1軸)
電源	ボディマウント4面 二次電池: Li-Ionバッテリー (2並2直, 5.8Ah)
通信	通信周波数: UHF帯 通信速度: コマンド: 1.2 kbps (GFSK), テレメトリ: 1.2kbps – 38.4kbps(GFSK)

TRICOM-1Rの結果

TRICOM-1Rの軌道上実験は成功したが、
以下の点で、汎用・量産性が低い衛星となった

- **ハーネスを多用した設計となっている**
 - ハーネ斯拉ーテイング等が複雑化
 - 組立に高度な専門性を必要とする
- **構造部品点数が多い**
 - 組立が複雑化
- **多様なCPUを使用**
 - 不具合が集中しない等の利点はあるが、開発環境が統一しづらく複雑化
- **構造インターフェースの規格化ができていない**
 - 観測ロケットでの打ち上げのため、構造様式への要求は低い、その反面、打ち上げ時の振動・衝撃等に対するため、CubeSat規格(1U: 100mm x 100mm x 100mm)よりも若干大きくなった (116x116x346mm³)



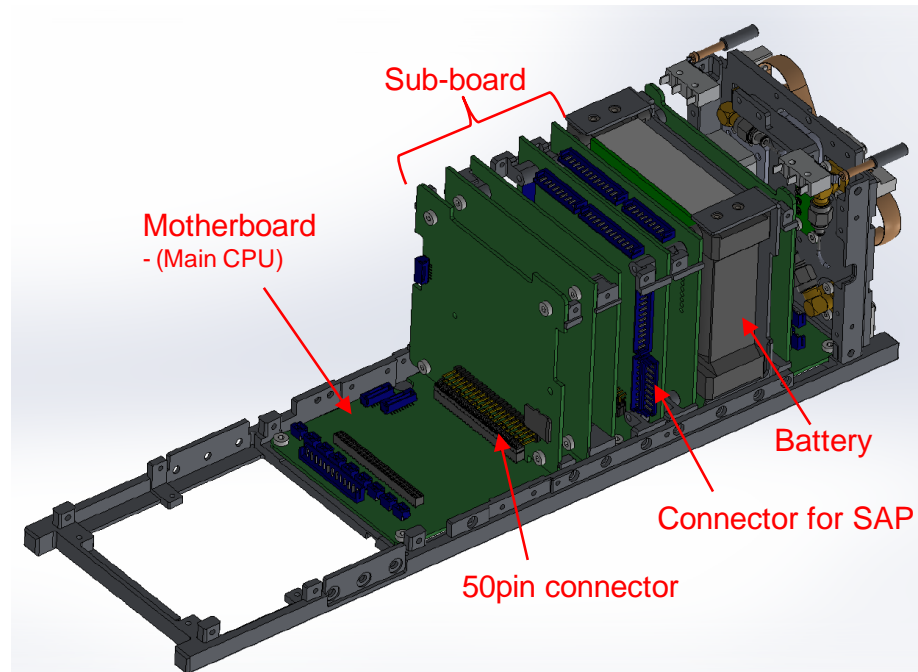
汎用・量産性の向上を目指したCubeSat コンセプト

TRICOM-1, RのLessons learnedを基に汎用・量産性を向上させた3U-CubeSatを設計

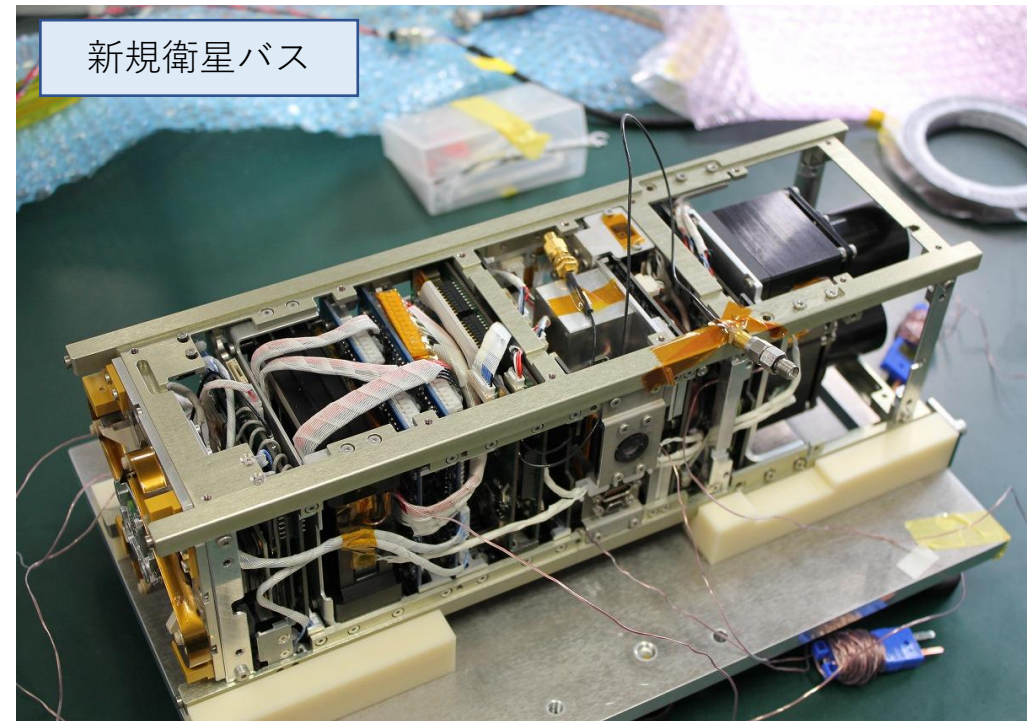
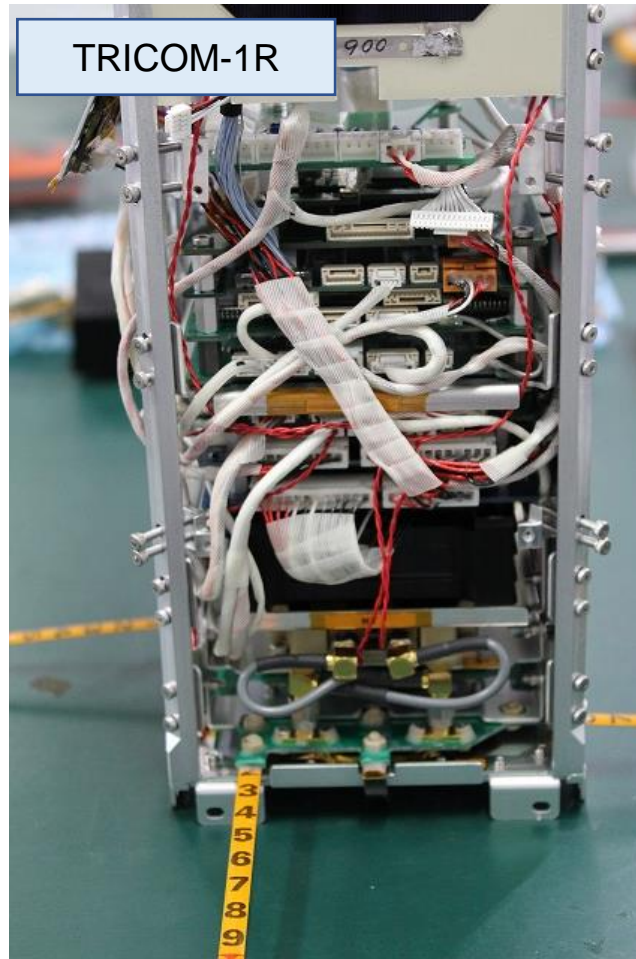
- 組み立てやすいハードウェア
- 扱いやすいソフトウェア
- インタフェースの規格化
- 量産を考慮した開発体制

汎用・量産性の向上を目指したCubeSat マザーボード・サブ基板化

- **PC用マザーボード**を参考にして、2Uサイズに収まる長方形サイズのマザーボードを設計（メインCPU搭載）⇒ ハーネスレス構造を目指す
- 電源制御基板(PCU), ADCS基板などをサブ基板として、マザーボードに挿入（耐振動性のためにボルト固定）
- 電気インターフェースは、50pinコネクタを使用
- バッテリー，太陽電池パネルとはハーネス接続（← 今後の対応課題）



汎用・量産性の向上を目指したCubeSat マザーボード・サブ基板化



量産を考慮した開発体制

- 量産性を検討するうえでは、大学(研究機関)のみの知見・技術だけではなく、製造企業とも連携し開発を進めることが重要
- 衛星の研究開発は同型機を複数開発する機会はあまり無いため、量産を視野に入れる場合は民生製造企業の知見等は非常に重要である
- 宇宙技術は高い専門性が要求されるが、超小型衛星開発分野では大学がその閾値を下げた。大学が培った超小型衛星の開発経験を製造企業に技術トランスファーする

福井県・福井県工業技術センター及び福井県内の製造企業と共同開発

大学：コンセプト設計，ソフトウェア，試験

福井県企業：詳細設計，組立，解析，試験



福井県・東京大学との超小型衛星共同研究記者発表(福井県HPより抜粋)

福井県での超小型衛星の製造

- 福井県では「県民衛星開発プロジェクト」が進行
- 技術習得のため東京大学にて講義及びハンズオントレーニングを受けている。
- TRICOM-1, -1R開発時にインテグレーション・一部環境試験に参加し，衛星開発に関する技術習得

セーレン株式会社：

量産化対応に向けた**電気系**，**全体システム**，**環境試験**等も担当

鯖江精機株式会社：

構体製造・**組み立て**・**機械環境試験**を担当

春江電子株式会社：

構造体設計と振動解析・**シミュレーション**等を担当

山田技研株式会社：

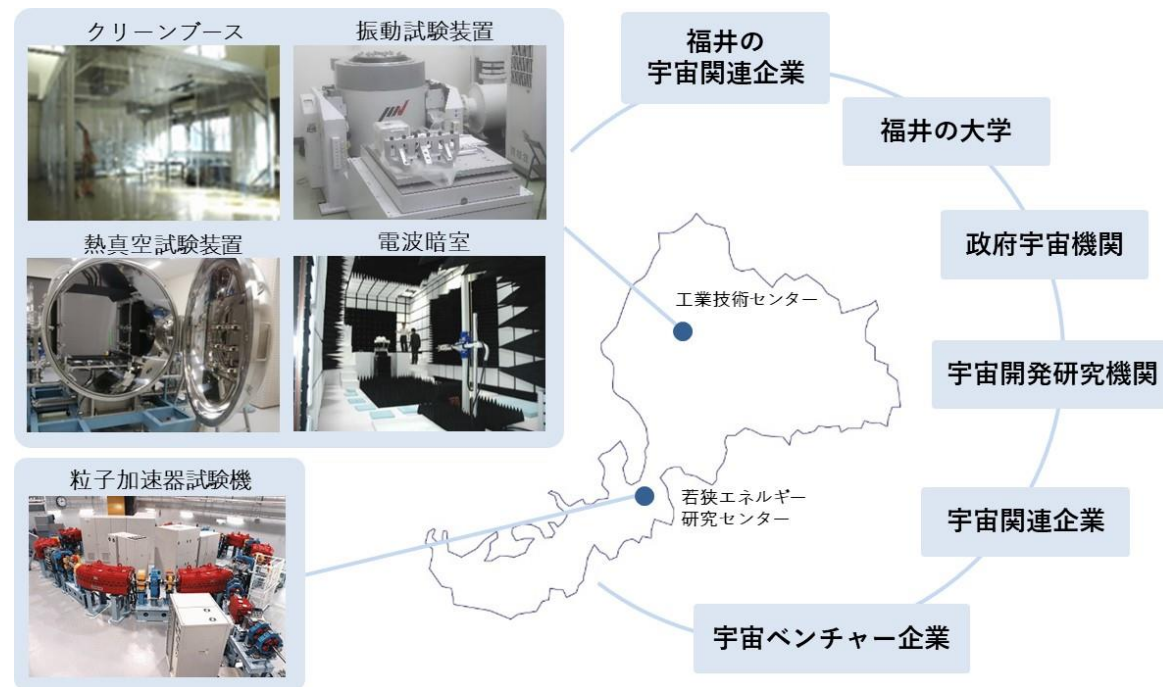
IoTセンシングや機械構造など独自の要素技術を有しており，**S&Fアンテナ**及び**展開機構**を担当

福井県工業技術センター：

振動試験，熱真空試験や電波暗室等の環境試験の使用機会提供

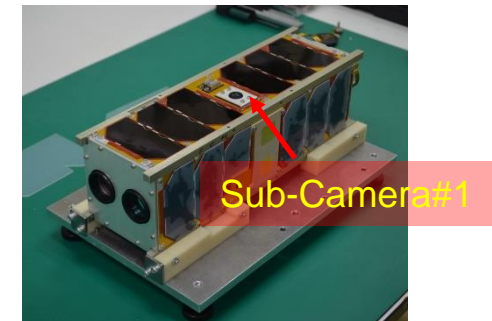
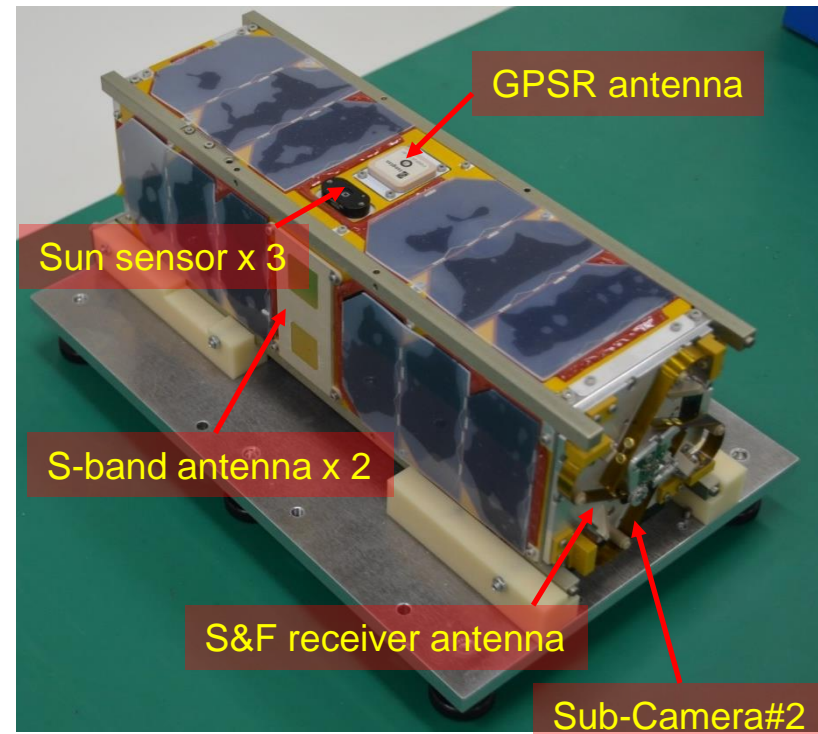
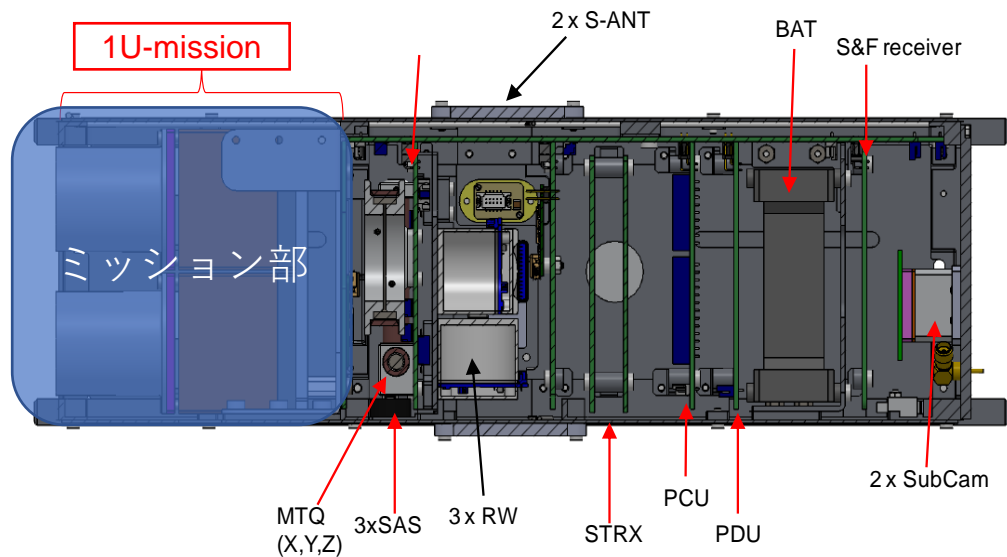
若狭湾エネルギー研究センター：

プロトン・重イオン照射によるシングルイベント耐性の評価



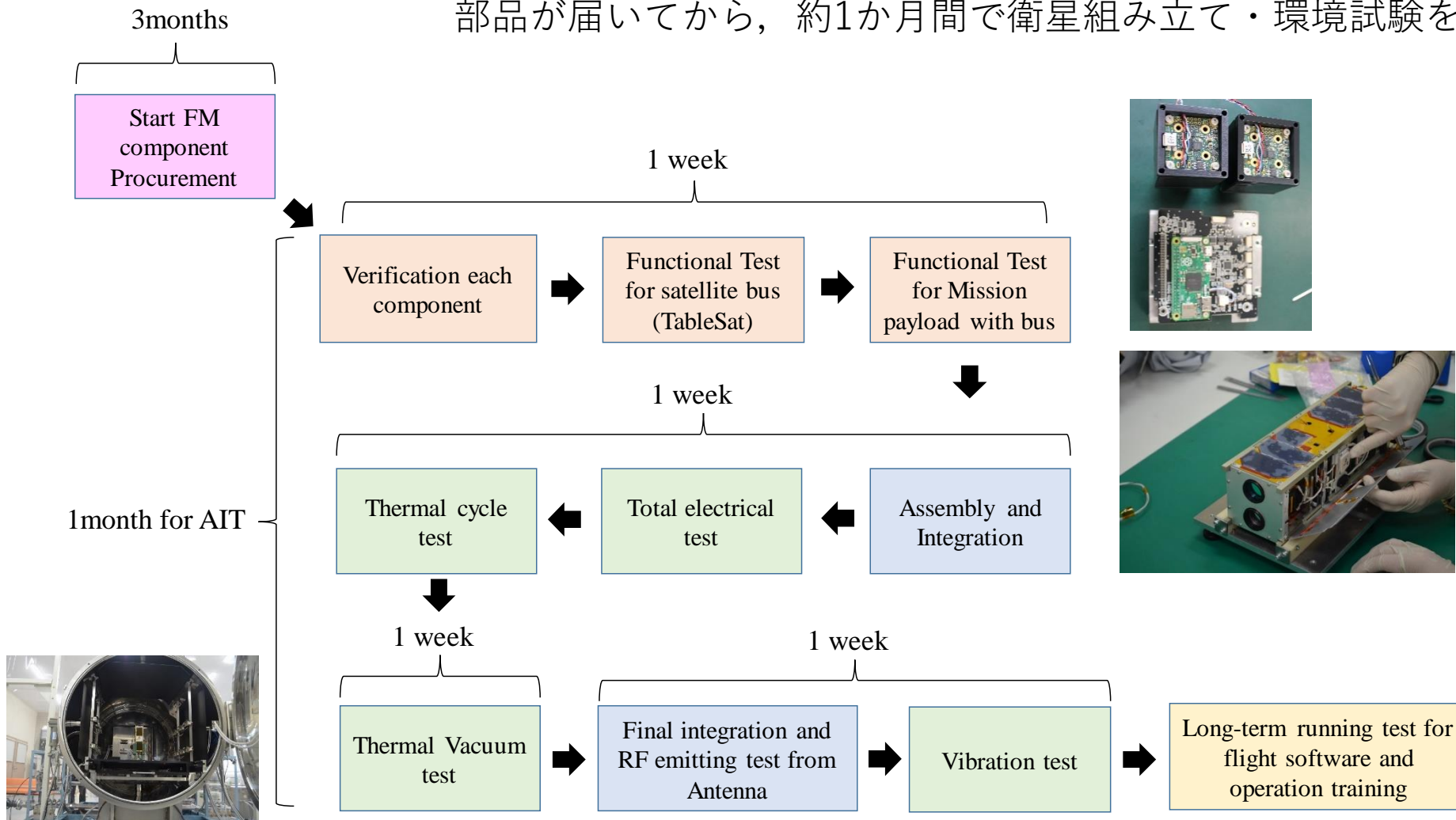
3U-CubeSat用 標準衛星バスの開発

- 衛星の基本機能+サブミッション（カメラ等）を2Uサイズに収めた標準衛星バスを開発
 - TC2 Standard satellite bus (TRICOM-2標準衛星バス)**
- 1U(10cmx10cmx10cm, 1kg以下)はミッション機器を入れられる構造にしており、「観測機器」・「実験機器」を搭載可能

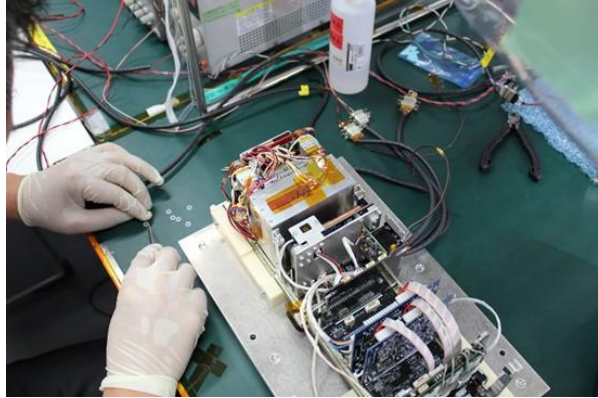


3U-CubeSat用 標準衛星バスの開発 AIT (Assembly, Integration and Test) プロセス

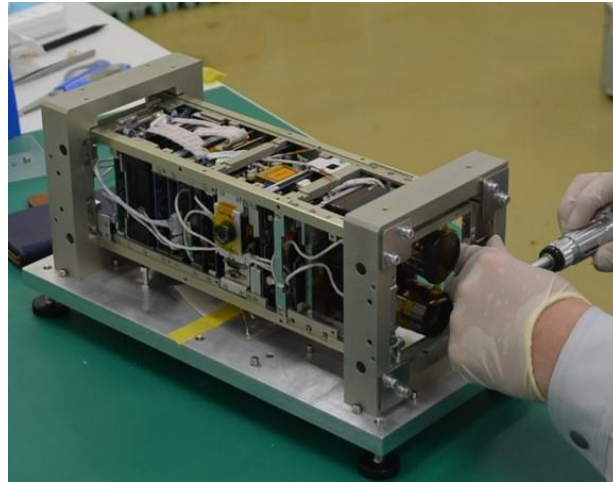
部品が届いてから、約1か月間で衛星組み立て・環境試験を完了



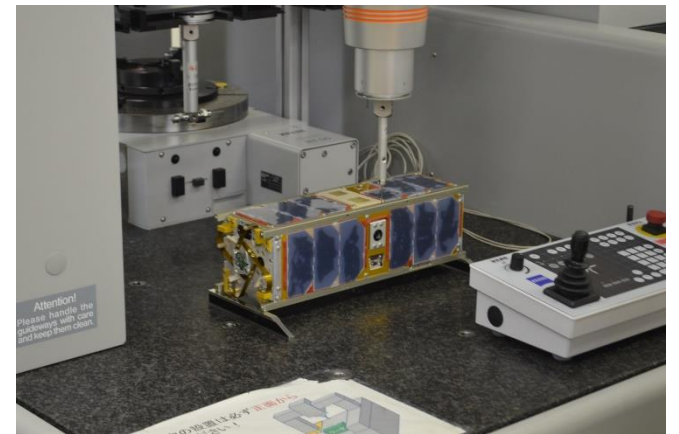
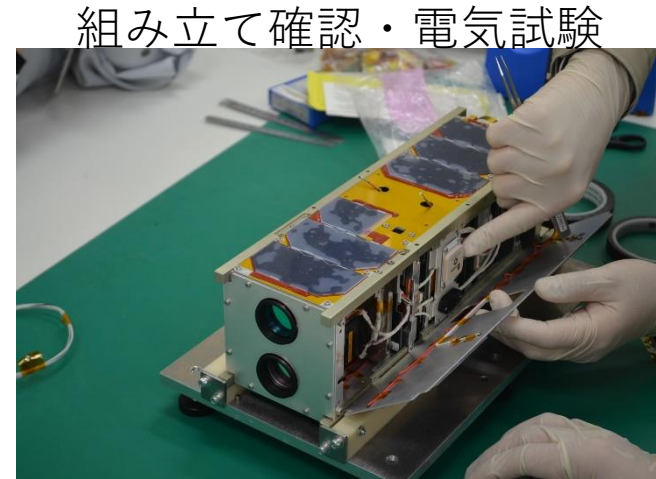
3U-CubeSat用 標準衛星バスの開発 AIT (Assembly, Integration and Test) プロセス



機能(電気)試験



組み立て



組立精度確認

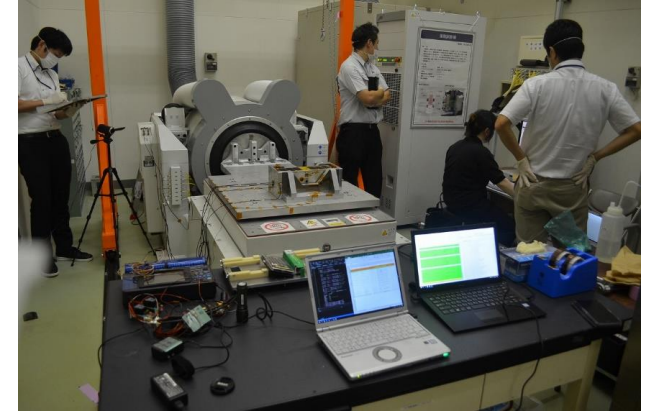
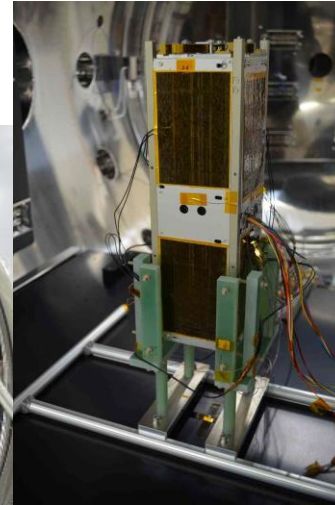
3U-CubeSat用 標準衛星バスの開発 AIT (Assembly, Integration and Test) プロセス



温度サイクル試験



熱真空試験



振動試験

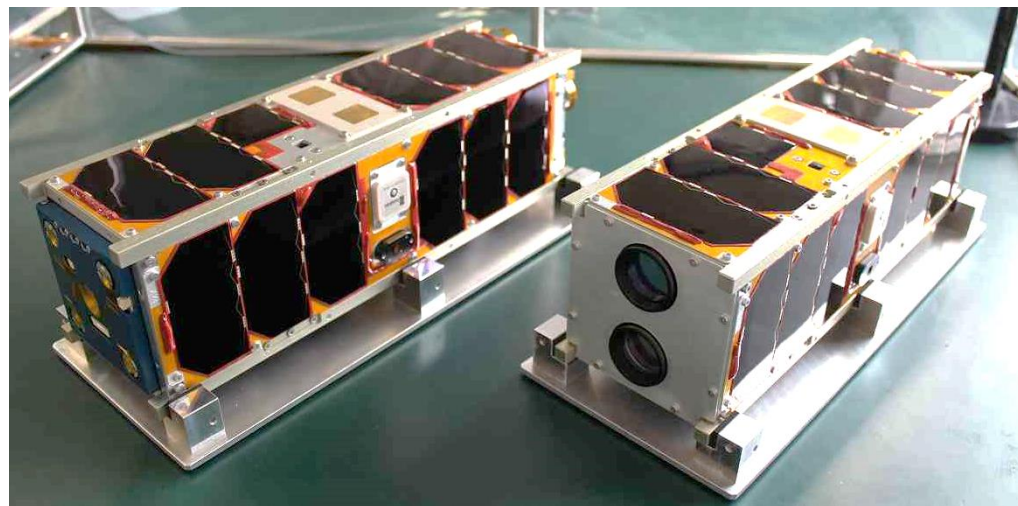
TC2標準衛星バスを用いたCubeSat

RWASAT-1

- ルワンダ共和国向けの衛星。アフリカを中心とするルワンダの観測。ルワンダへのキャパシティビルディングを目的
- スペースエッジラボ株式会社

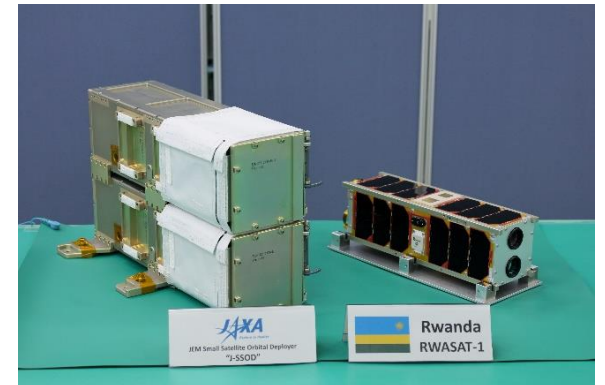
AQT-D (AQua Thruster Demonstration)

- CubeSatでの水ジェットスラスタの実証実験
- 東京大学 小泉研究室



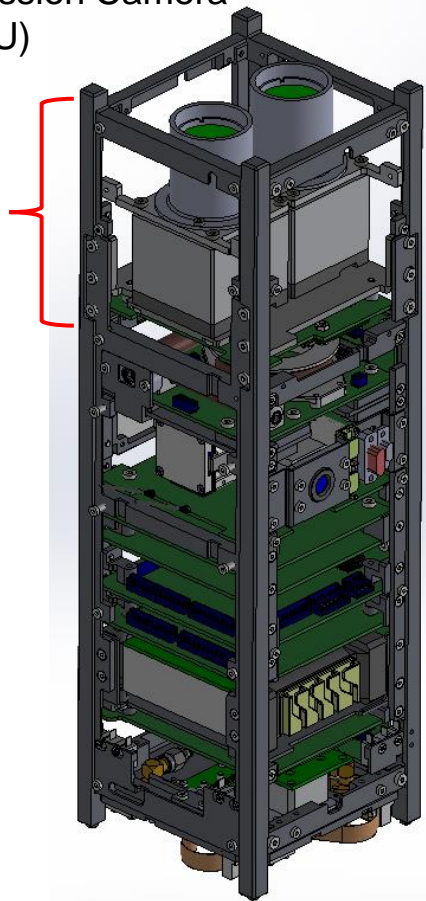
ルワンダ衛星「RWASAT-1」の開発

- 株式会社スペースエッジラボ，東京大学ではルワンダとともに，超小型衛星の開発を行い，実利用に活用し，これらアフリカ地域の発展に国際貢献する計画を進めている
- 衛星製造は日本で実施．ルワンダのエンジニア等が来日して衛星関連の勉強をし，次衛星「RWASAT-2」につなげる計画



RWASAT-1のミッション: 地球観測

Mission Camera (1U)

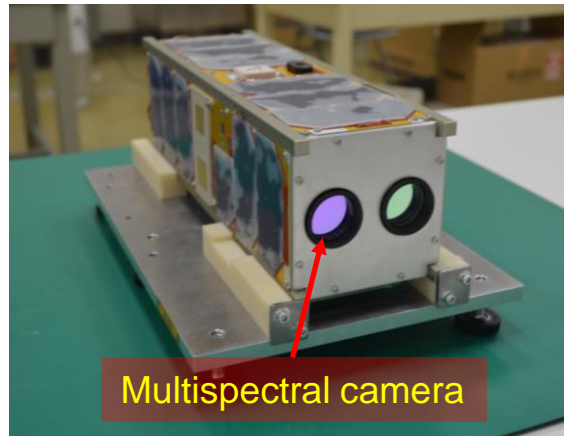


Processing unit (Raspberry Pi Zero)



Cam #1
Lens with
Multi band-pass filter

Cam #2

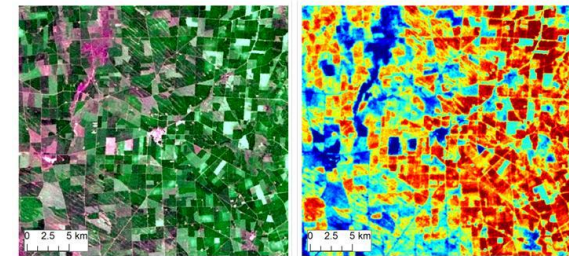


Multispectral camera

- ルワンダチームからのミッションアイデア提供
- ルワンダを中心とするアフリカ地域の農地観測等に使用
- マルチスペクトルカメラ
 - GSD: 20m
 - 観測幅: 45km (視野角: 6.4deg)
 - 6 band : 2 x 3band

Band	Wavelength	Cam#
1	B: 457nm	Cam#1
2	G1: 530nm	Cam#1
3	G2: 560nm	Cam#2
4	R1: 628nm	Cam#1
5	R2: 670nm	Cam#2
6	IR: 910nm	Cam#2

NDVI map by Hodoyoshi-3

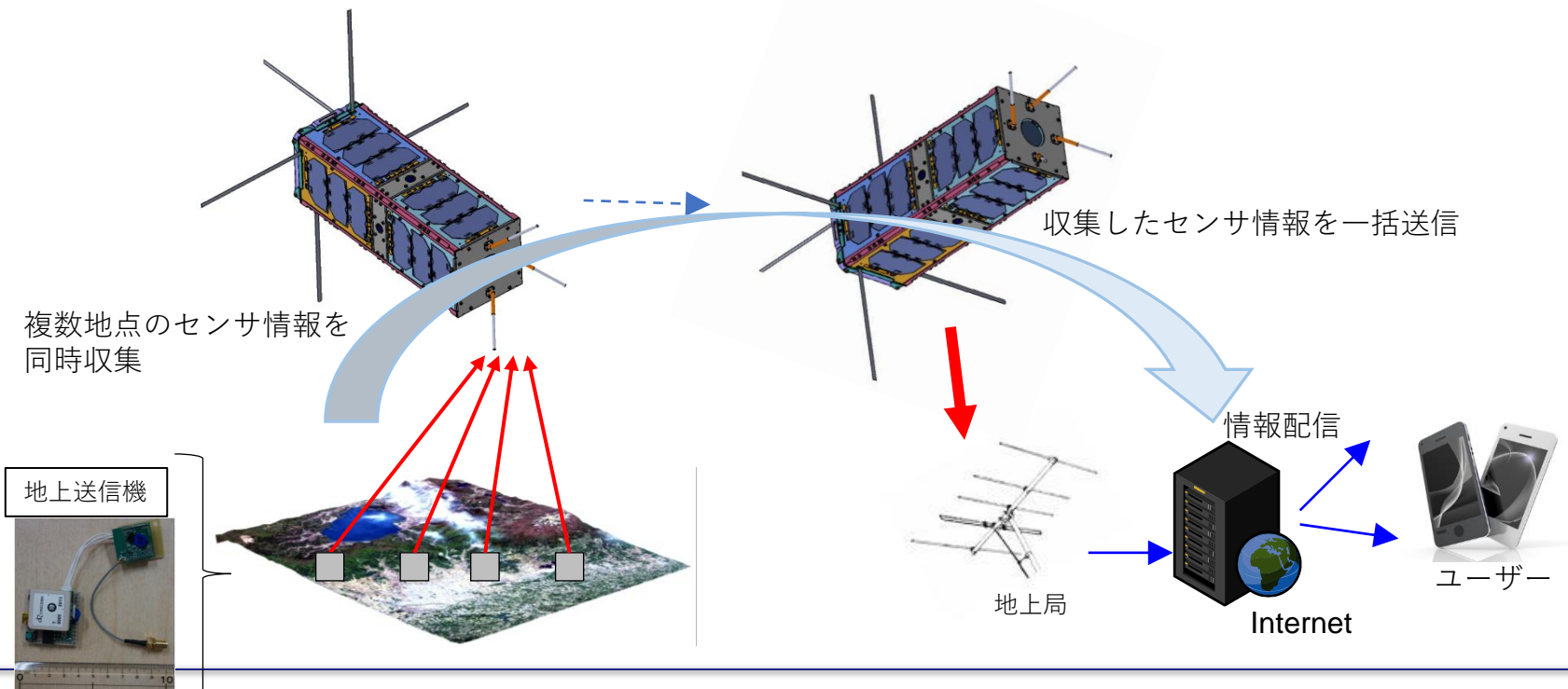


R:G:B = R: IR: G

NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)

RWASAT-1のミッション: Store & Forward

- **特定小電力**($< 20\text{mW}$, 920MHz帯)によるS&Fを実証
 - **免許申請が不要**のため、より簡便に機器の設置・運用が可能
 - 無線機の数を増やし易いため、**複数地点のセンサ情報の同時収集**が容易になる
- IoT (Internet of Things)機器への利用に向けた**低電力小型無線モジュール**を使用
 - 世界に先駆けた未軌道上実証の最新型デバイスによる技術実証

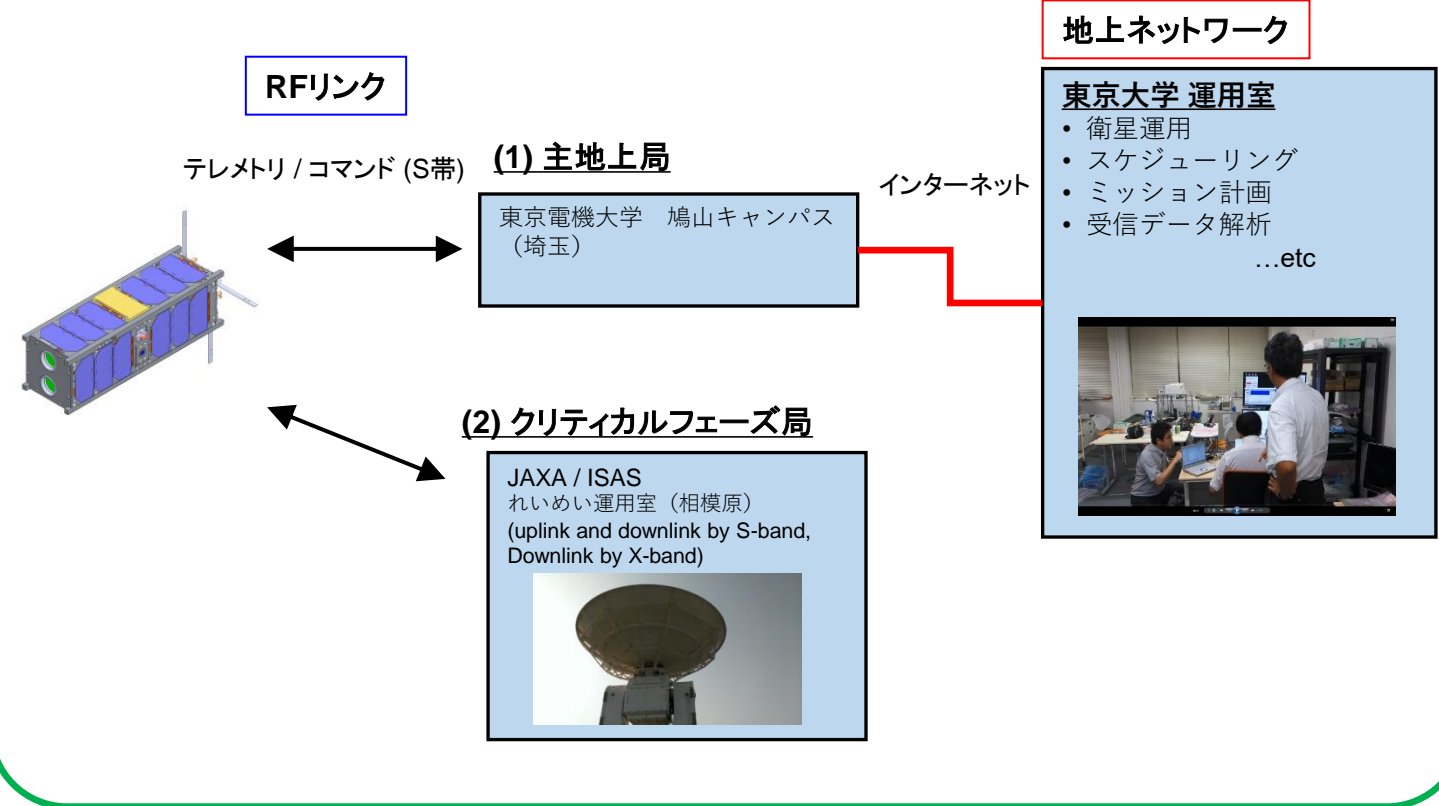


RWASAT-1の放出と軌道上結果

衛星	RWASAT-1
軌道投入日時	2019/11/20 08:55:13 (UTC)
軌道 (放出時点)	近地点高度 : 414 [km] 遠地点高度 : 421 [km] 離心率 : 0.0005036 軌道傾斜角 : 51.652 [deg] 昇交点赤経 : 306.9535 [deg] 近地点引数 : 350.3677 [deg] 平均近点角 : 222.158 [deg]

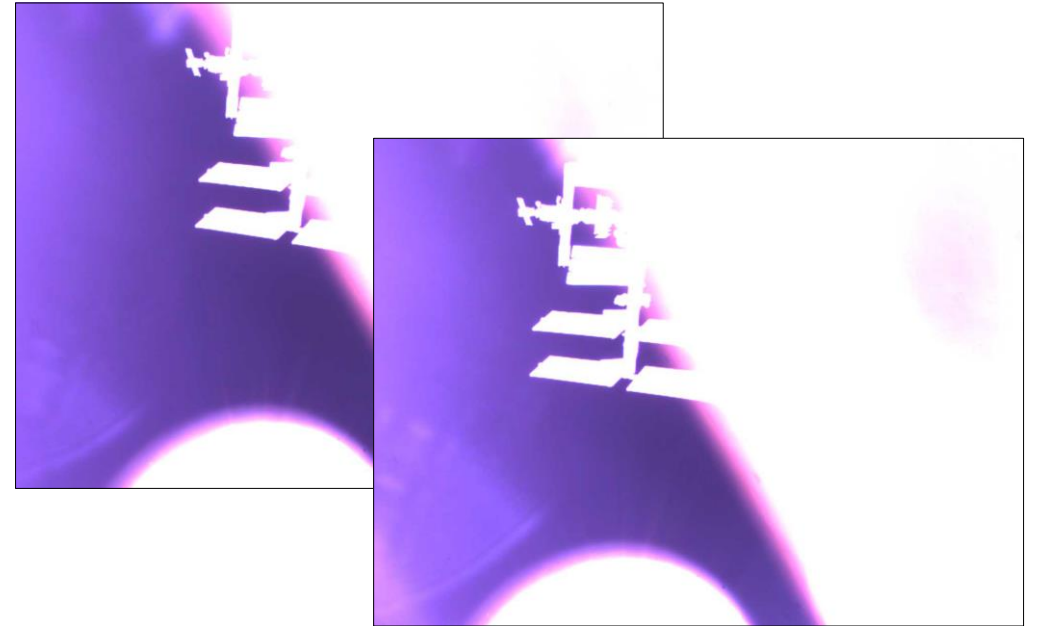
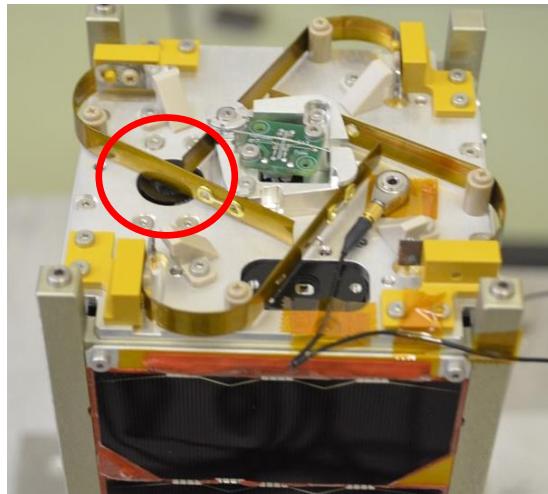


衛星運用体制



ミッション評価 サブカメラ

- 放出から2分30秒後にMZ面から撮影(可視カメラ)
- 露光時間は5段階(10ms, 5ms, 1ms, 0.5ms)
- 10msの画像のみISSが視野内に入った。(露光時間が長く白飛び画像になってしまった)
- 撮影シーケンスはOBCのInitialモード遷移において実行
 - OBC起動
 - SubCam (Raspberry Pi) ON
 - 撮影コマンド発行 (5回)
 - SubCamからミッションデータレコーダに転送
 - SubCam OFF



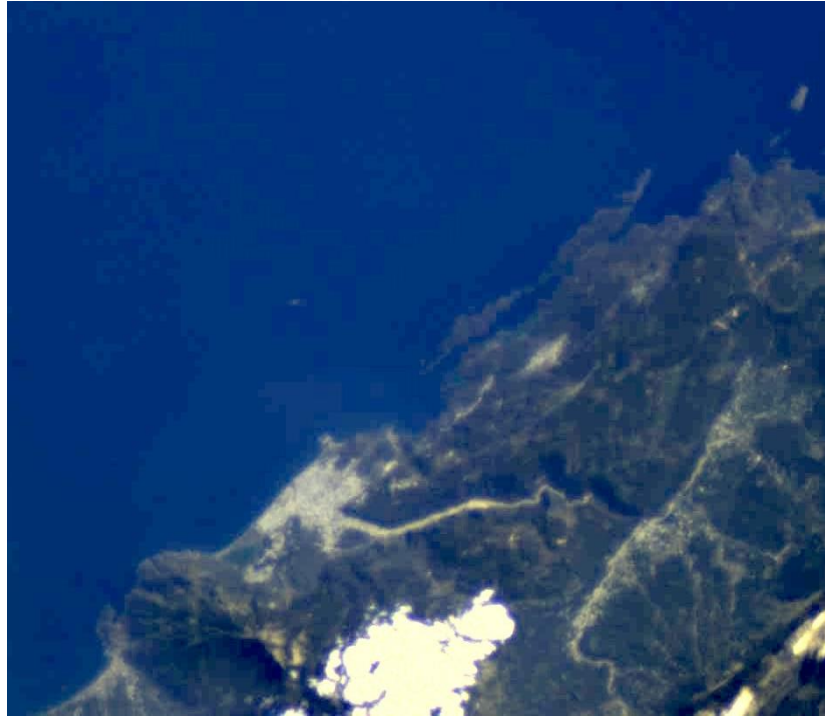
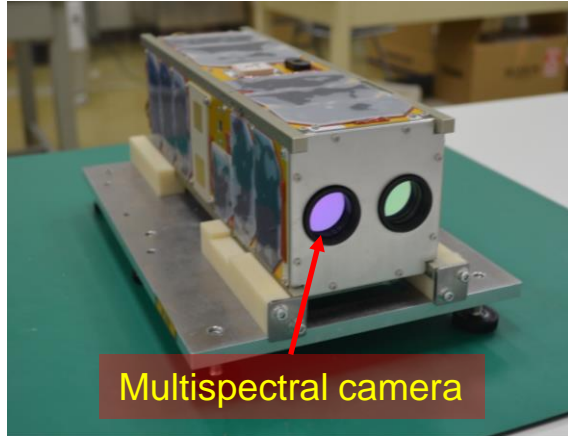
2019/11/20 17:57(JST) 露光時間10ms, SubCam(VisCam)
*画像のサイズ: 1280x960ピクセル

放出後即時撮影に成功

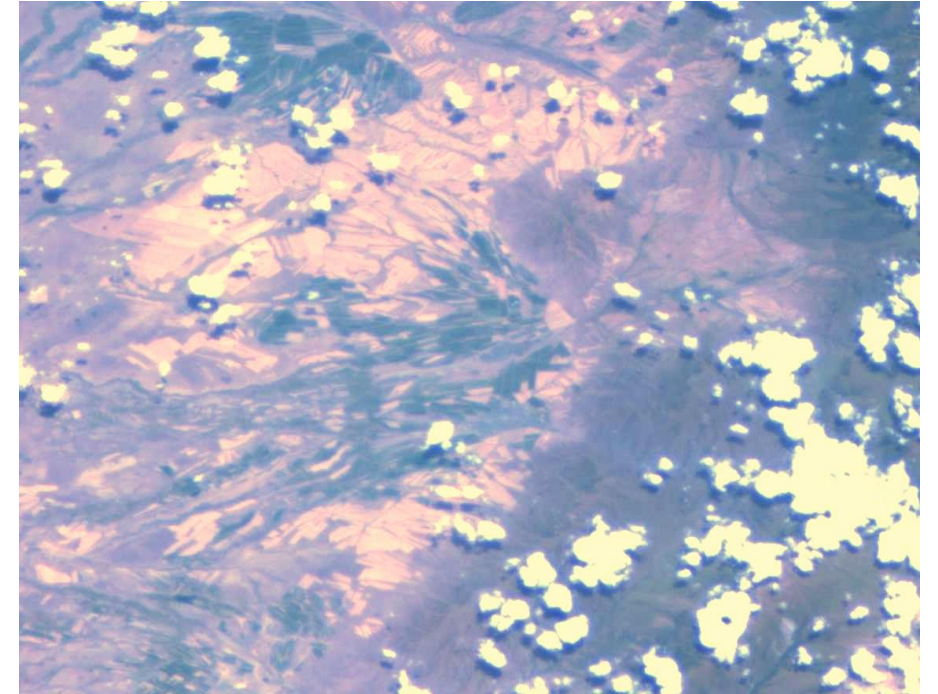
Raspberry Pi Zero + USBカメラの軌道上動作、
撮影に成功

*これ以降は、姿勢制御確立を優先させたため、画像取得は無し

RWASAT-1 ミッション結果



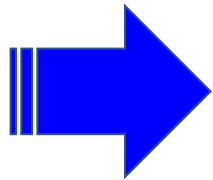
トルコ, 2020/04/14 22:50(JST)



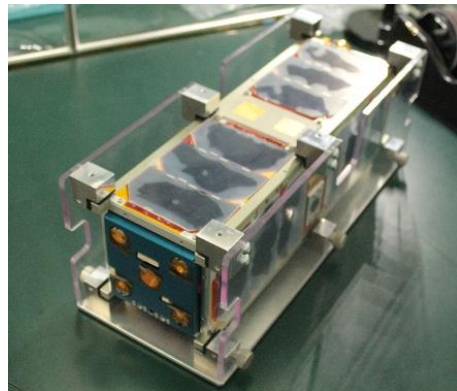
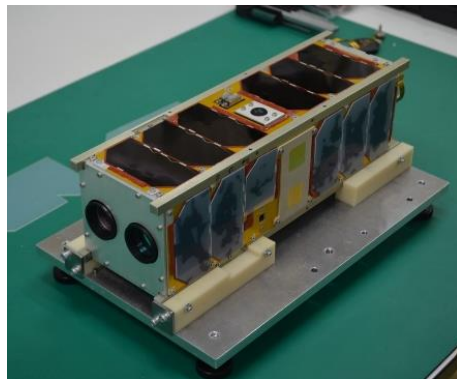
中国, 2020/8/5 16:45(JST)

- アフリカは(意外にも)雲が多く、快晴で撮影できることが少なかったため、他地域も撮影
- ルワンダでの衛星運用の教育を予定していたが、新型コロナウイルス拡大により海外渡航(両方)が難しくなったため断念.

TC2標準衛星バスの今後の展開

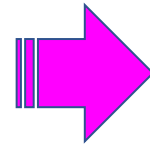


TC2衛星バス (第1世代)

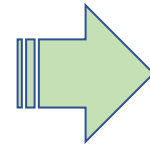


特殊なミッションを持った衛星

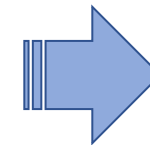
TC2衛星バス (第2世代)



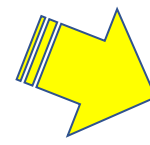
RWASAT-2



宇宙発展途上国への教育衛星



企業・大学の新規技術実証衛星



TC2衛星バス (第3世代)



2020年, 福井大学を拠点とした衛星開発をスタート

- 来年打ち上げ予定のマルチミッションCubeSatを開発中
- 組立は, 福井大学 オープンR&Dファシリティで, 県内企業と共に実施中
- 多くの福井県内企業が宇宙産業に進出できるように, 人工衛星設計のレクチャーや実習も開始



御静聴ありがとうございました