

アサーマルアポクロマティック光学系



地上局



40m  
GSD(赤外)



## 超小型衛星による 新しい宇宙開発利用への挑戦

東京大学 中須賀真一



ほどよし3, 4号



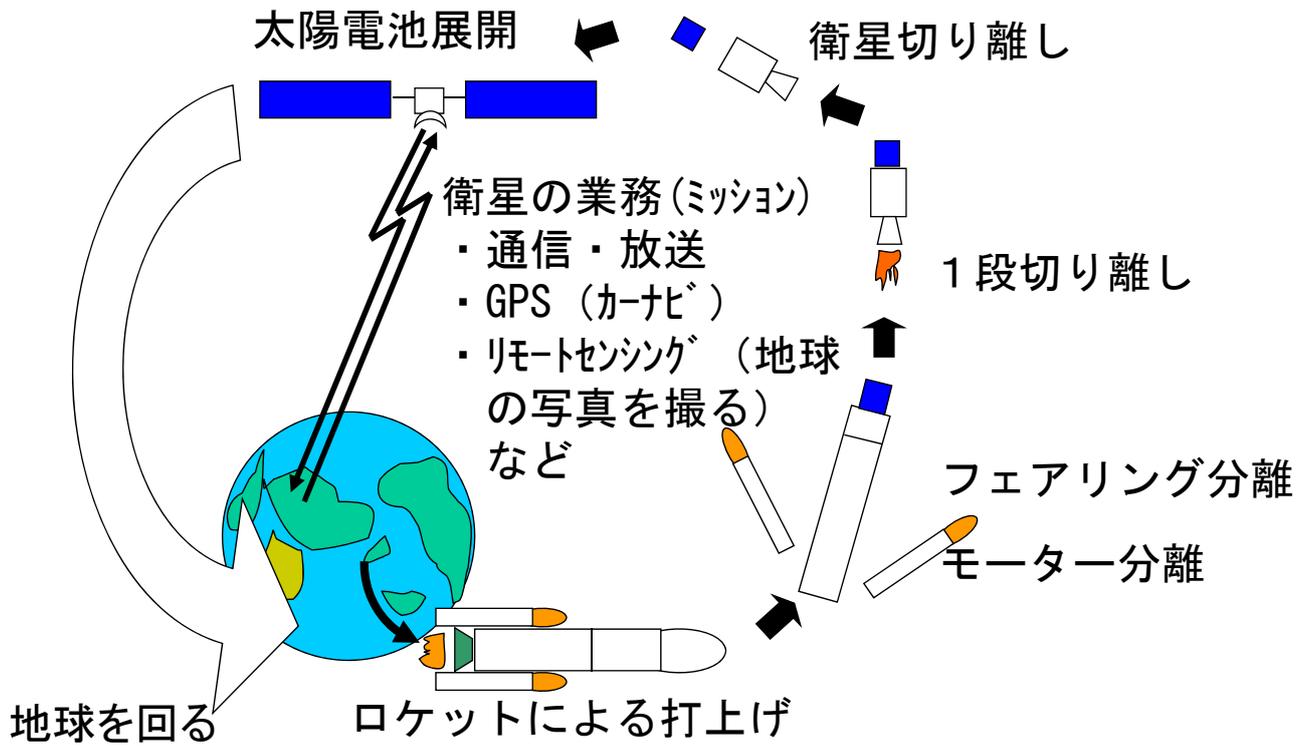
ほどよし1号

6mGSD



## 今日のお話

- 基礎編：ロケットと人工衛星
  - －ロケットと人工衛星の役割
  - －宇宙に人間が行く：アポロ、スペースシャトル、ISS
  - －我々の生活に入ってきた「宇宙」
- 応用編：超小型衛星による新しい宇宙開発
  - －東京大学での超小型衛星開発の経緯
  - －何ができるか？
  - －将来の展望



打上げから人工衛星切り離しまで

H-IIA,-IIB (46/47)



開発者

NASDA → JAXA → 三菱重工

運用機関

NASDA (1 - 5号機)  
JAXA (6、8、10 - 12号機)  
RSC (7、9号機)  
三菱重工 (13号機以降)

使用期間

2001年 - 現役

打ち上げ数

22回 (成功21回)

開発費用

1,532億円

打ち上げ費用

85 - 120億円

物理的特徴

段数

2段

総質量

289 t / 445 t (4基)

全長

53 m

直径

4 m

軌道投入能力

低軌道

10,000 kg / 15,000 kg (4基)

300 km / 30.4度

太陽同期軌道

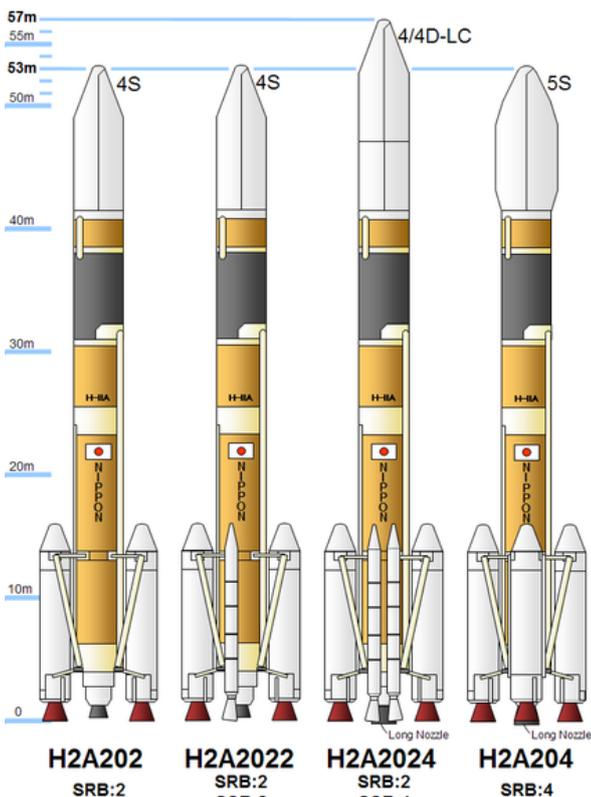
3,600 kg (夏) / 4,400 kg (夏以外)

800 km / 98.6度

静止移行軌道

4,000 kg / 6,000 kg (4基)

250 km x 36,226 km / 28.5度

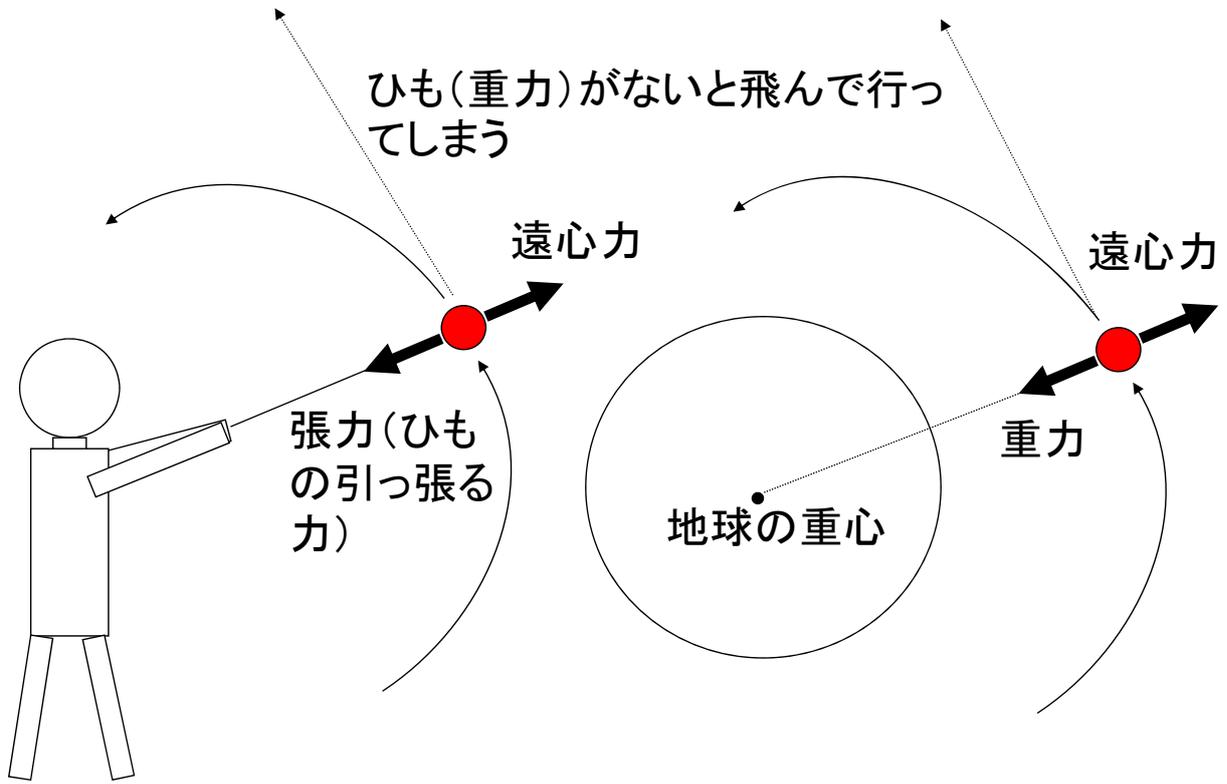


# EPSIRON (4/4)

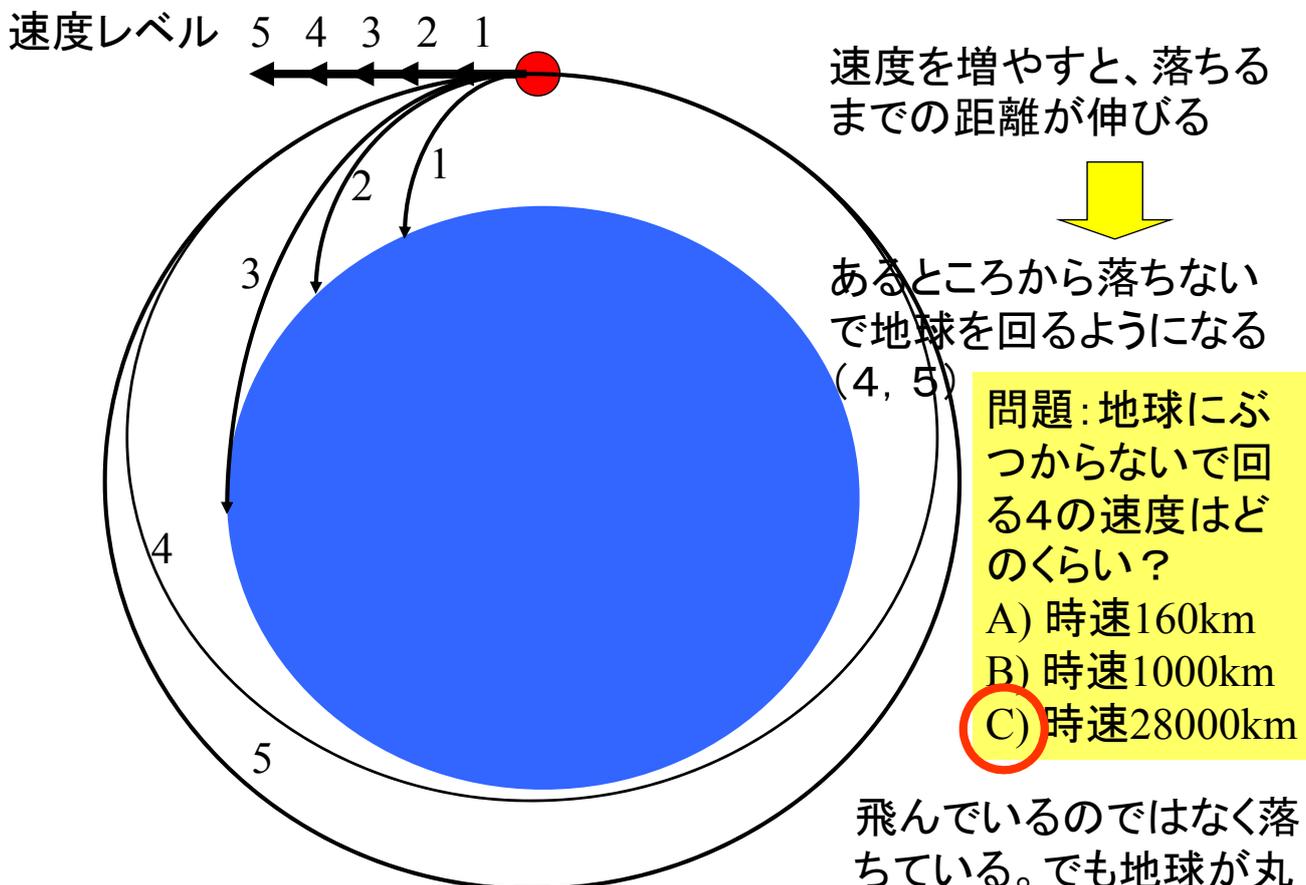


開発費用	205億円(目標)
打ち上げ費用	E-X: 53億円(1号機) E-X: 38億円(4号機以降) E-I: 30億円以下(目標)
原型	SRB-A, M-Vロケット
公式ページ	JAXA イプシロンロケット
物理的特徴	
段数	3段(基本型) 4段(オプション)
ブースター	なし
総質量	90.8t
全長	24.4 m
直径	2.6 m
軌道投入能力	
低軌道	1,200 kg 250 km × 500 km
太陽同期軌道	450 kg 500 km × 500 km 内之浦から打ち上げた場合

## 人工衛星の基礎



人工衛星の飛ぶ原理-1

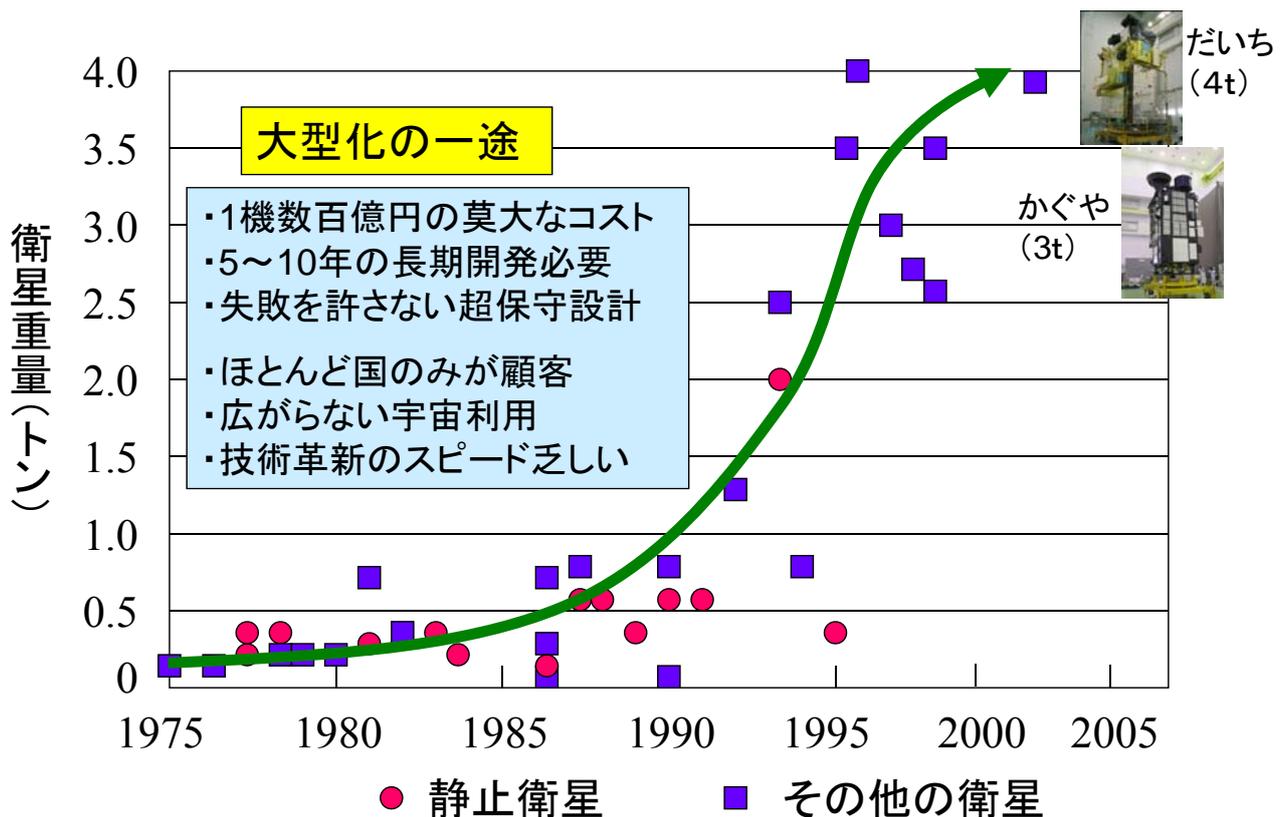


人工衛星の飛ぶ原理-2

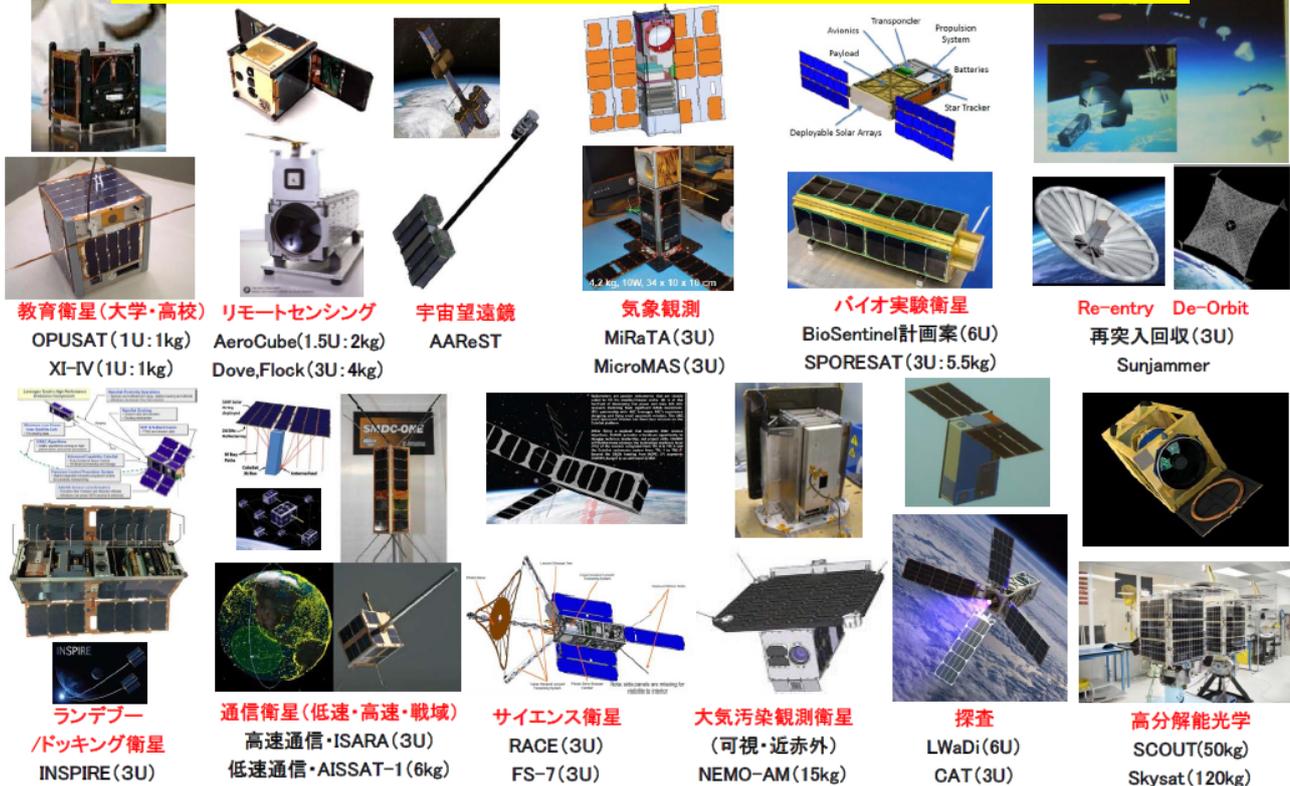
# 中大型衛星の問題点

とても小さな人工衛星って  
できないのだろうか？

## 中・大型衛星中心の宇宙開発の課題



# 100kgまでの衛星が世界を変えつつある！



主として大学・ベンチャーがプレーヤー。ビジネス化のため民間ファンドが投資  
アメリカなどは国も大型投資でいっせいに技術開発し、一部は中大型の代替に

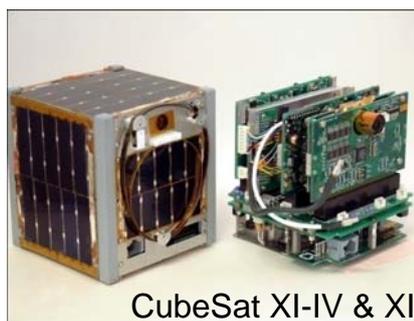
## 新潮流: 超小型衛星による“Game Change”

- **超低コスト (>200M\$ → <5M\$)**
  - これまでにない新しいビジネス・利用法を生む
  - 新規宇宙プレーヤー参入 (企業, 県, 研究所, 新興国)
  - 教育ツールにも利用できる
  - 挑戦的ミッション・実験可能に (失敗の許容度増える)
- **短期のライフサイクル (5年以上 → 1-2年以下)**
  - 大学学生が研究室内で1サイクルを経験できる
  - 繰り返しが可能 (プロジェクトではなくプログラム化可能)
  - 投資回収までの時間が短期化 (ビジネスには有効)
- **衛星システムがシンプルで透明 (部品点数少ない)**
  - 設計、運用、トラブルシュートがしやすい
  - 開発メンバーは全体を見ながらサブシステムに集中

# 2003年 東大の超小型衛星が道を拓いた

東大のCubeSat(1kg世界最小衛星)世界に先駆けての打上げ運用成功(2003.6.30)

- 大学レベルの予算での開発
- 開発期間:2年 部品費:300万円
- 民生品でも15年半以上の寿命
- 地上局での運用、周波数取得、ロケット調達まで自前で実施
- より高機能の10kg級衛星の開発も(CUTE-1.7、PRISM、NJ)



CubeSat XI-IV & XI-V

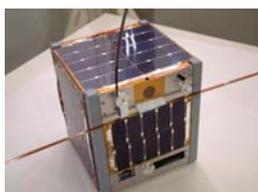


ロシアでの打ち上げ



1~50kg級衛星:教育目的からスタートし、実用(地球観測、宇宙科学)に向けて各大学で開発が進む

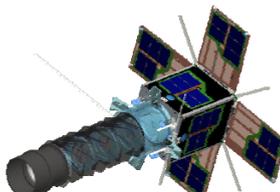
## 東京大学の超小型衛星プログラム(9機打ち上げ,5機待ち)



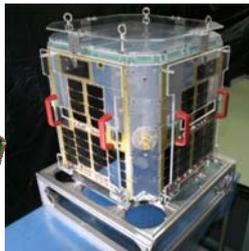
世界初の1kg衛星 成功 XI-IV(2003)



新規技術の宇宙 実証XI-V(2005)



8kgで30m分解能 PRISM(2009)



最先端の宇宙科学 Nano-JASMINE (打上げ待ち)



世界初の超小型 深宇宙探査機 PROCYON(2014)

- ・宇宙・工学の教育目的からスタート
- ・実験をしながら、だんだん高機能に
- ・2010年「ほどよしプロジェクト」で 実用化、ビジネス化に挑戦

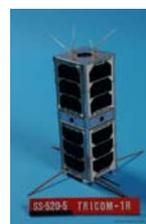
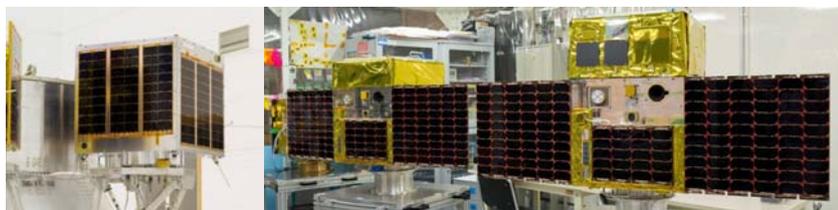


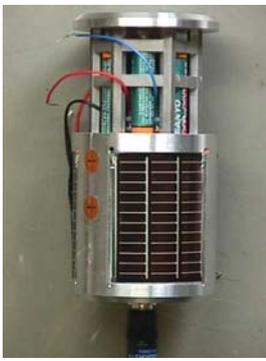
- ・宇宙科学・探査、地球観測
- ・ベンチャー会社でビジネスへ
- ・外国への衛星の教育支援
- ・企業・県の衛星開発支援

60kg級の6m分解能リモセン衛星(3億円、2年で開発) ほどよし1号 ほどよし3号および4号(2014年打上げ)

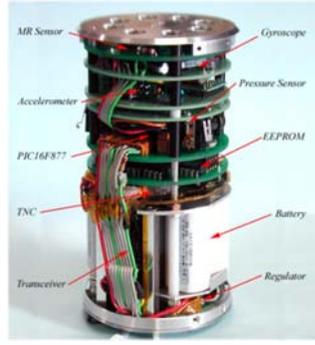
TRICOM-1R 通信(2018)

MicroDragon 海外教育支援





登竜門:訓練の場  
CanSats 1999-現在



2001年～ カムバック・コンペティション



## 2016年のARLISS (9/10-13) 第18回大会

### ○参加大学数

12 Universities  
from Japan  
1 from Korea  
1 from Egypt  
2 from USA

### ○打ち上げロケット数

約40基



東大航空宇宙学科3年生のチームが優勝。記録は目標点まで 3.8 m



2017年 東大3年生のチームが1回目1.34m の記録  
GPS精度(3m)まではGPSで最後は画像航法で。  
しかし逆光で画像処理できず、待ったが時間切れ。



しかし、2回目に  
目標点到達(0m)  
優勝！  
(2位も東大)

## 20回記念大会 開会式 (September 10, 2018)



# 2018年はフライバックで挑戦



900mの距離だったが、最優秀技術賞を獲得

## *University of Tokyo's CubeSat Project "XI"*



XI-IV(サイフォー) “CubeSat” XI-V(サイファイブ)  
2003.6.30打ち上げ 2005.10.27打ち上げ

# 宇宙の環境は地上とどう違う？

## ■ 真空環境

蒸発、焼き付き(cold welding)、潤滑、放電、  
素材の変化、熱の集中、等

## ■ 放射線環境

電子部品の誤動作、破壊、太陽電池劣化

## ■ 熱環境

高温—低温、熱衝撃、温度勾配、等

## ■ 打上げ環境

加速度荷重、振動、音響、衝撃、等

## ■ 長距離通信

500km以上の通信、トラッキング、ドップラーシフト

- ・秋葉原の民生部品。宇宙で動作することを確実に検証して使う。
- ・システムで強くする技術の重要性(リソースの制約⇒機能冗長)

## 打上げ: MOM (Multiple Orbit Mission)



### 打上げ

日時: 2003 6/30  
23:15:26 (JST)  
場所: Plesetsk  
軌道: 830km SSO

### ROCKOT



### Launch Vehicle Provider



**Eurockot**



other satellites

60kg級



### Separation System Developer



**CalPoly**



### CubeSat Developer



**Stanford Univ.**



**U of Toronto**



**Aalborg Univ**

**Denmark T.**



### CubeSat & Separation System Developer

● **U of Tokyo**



● **Tokyo Inst. Tech.**



上段ロケットBREEZE-KM  
により8個の衛星を順次分離

## 世界初の機内持ち込み衛星 !!



成田空港にて(現在の准教授 船瀬先生の学生時代)

## 世界初の1kg打ち上げ 2003年6月30日 ロシア プレセツク



# 衛星捕捉第一報

6/30(月)

23:15 ROCKOT打上げ(日本時間)

7/1(火)

0:46 衛星放出

3:00 ヨーロッパよりCW捕捉の報

4:36 菅平局がCW受信  
直後に本郷もCW受信

6:18 FMアップリンクに対しダウン  
リンク受信



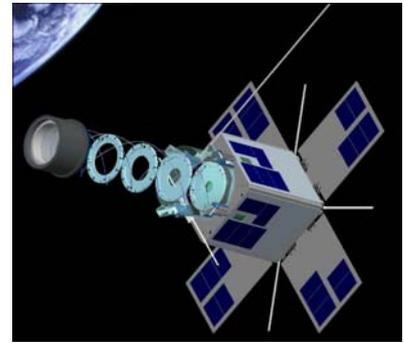
700枚以上の写真を送ってきてくれた！



# 3号機リモセン衛星 "PRISM"

○サイズ: 8.5kg 20cm × 20cm × 40cm

打上げ年	衛星名	分解能 [m]	重量 [kg]
1999	UoSat-12	10 (pan) 32 (color)	312
2002	AlSat	32	90
2005	TopSat	2.5	110
2009.1.23	PRISM	20~30	8

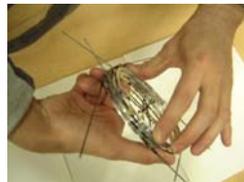


1/23 H-IIAによる相乗り  
打上げ成功。初期運用中

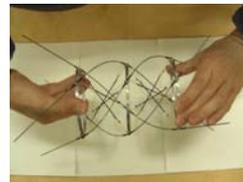


- 伸展式・屈折光学系による高分解能化
- OBC、バス、通信系、制御系高性能化
- 超小型衛星実用化に向けた標準バス

1, 伸展前



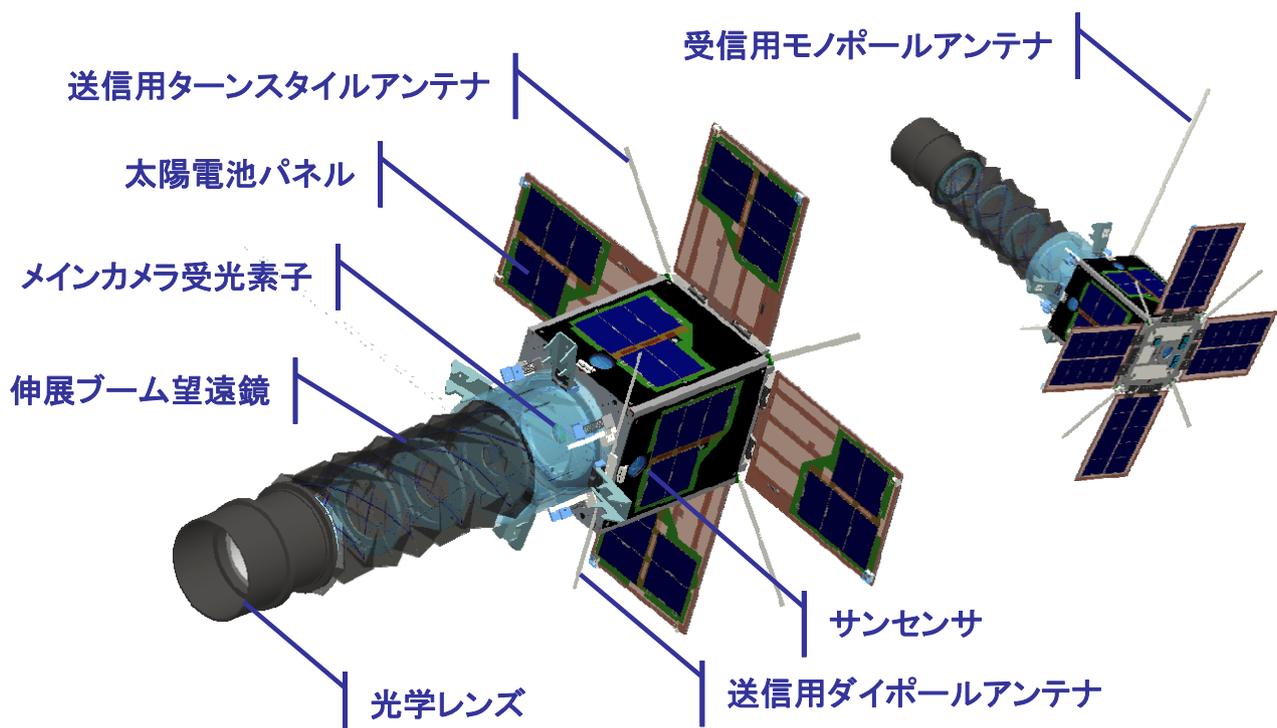
2, 伸展中



3, 伸展完了!!

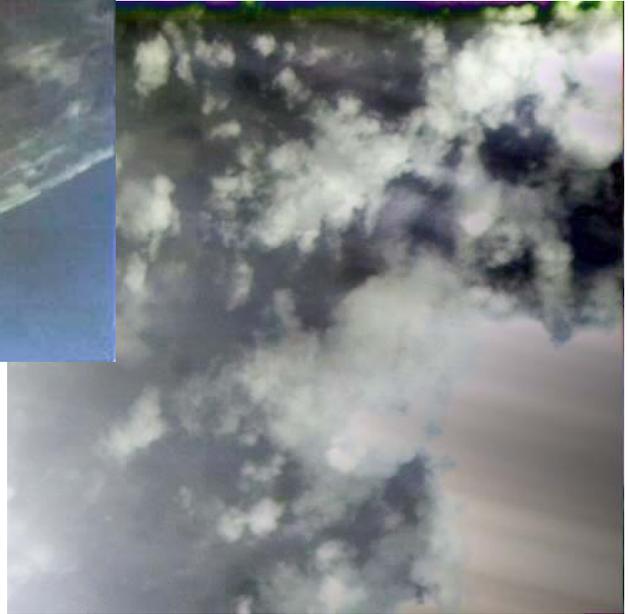


## PRISM外観





2009. 4. 17  
メキシコ海岸線



## Nano-JASMINE

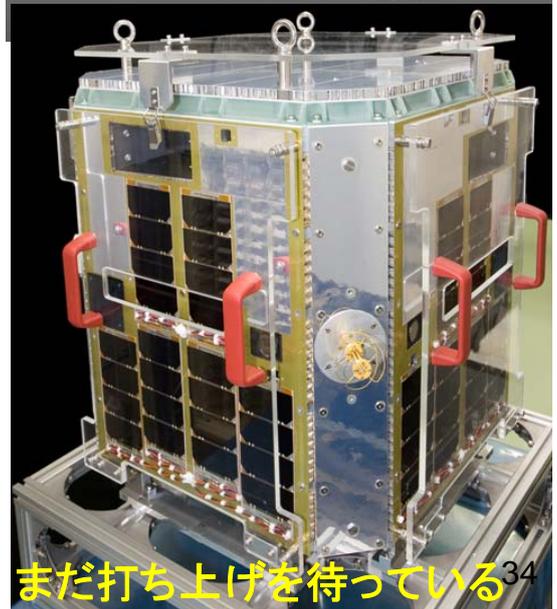
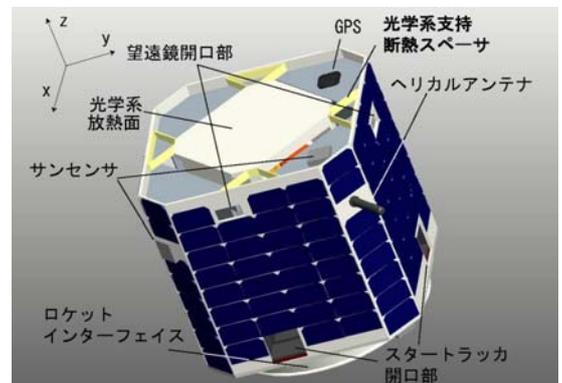
国立天文台と共同の宇宙科学衛星(「位置天文」ミッション)

衛星サイズ 50[cm立方]  
質量 35[kg](本体)

姿勢制御 3軸安定方式  
通信速度 S帯 100[kbps]  
ミッションライフ 2[年]

89年のHIPPARCOS衛星レベルの性能

- 高精度姿勢安定化(1秒角レベル)
- 高精度温度安定化(0.1Kレベル)
- FPGAベースの高機能情報系
- 通信系の高速化(9.6→100kbps)
- 科学衛星用の高機能標準バス



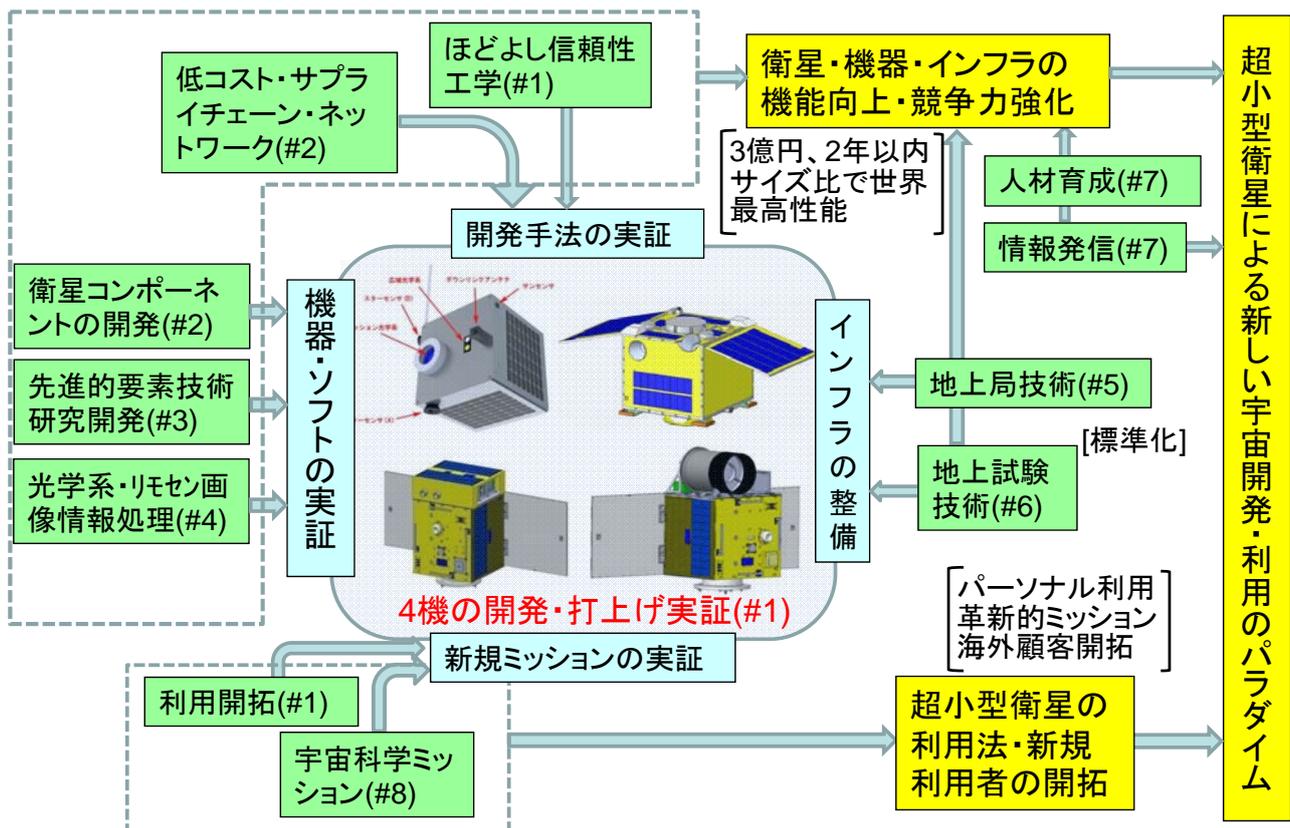
問題:なぜ、地上ではなく地球周りの軌道から星を観測すると良いのでしょうか？

A)星に少しでも近いから

**B)地球の空気に邪魔されないで観測ができるから**

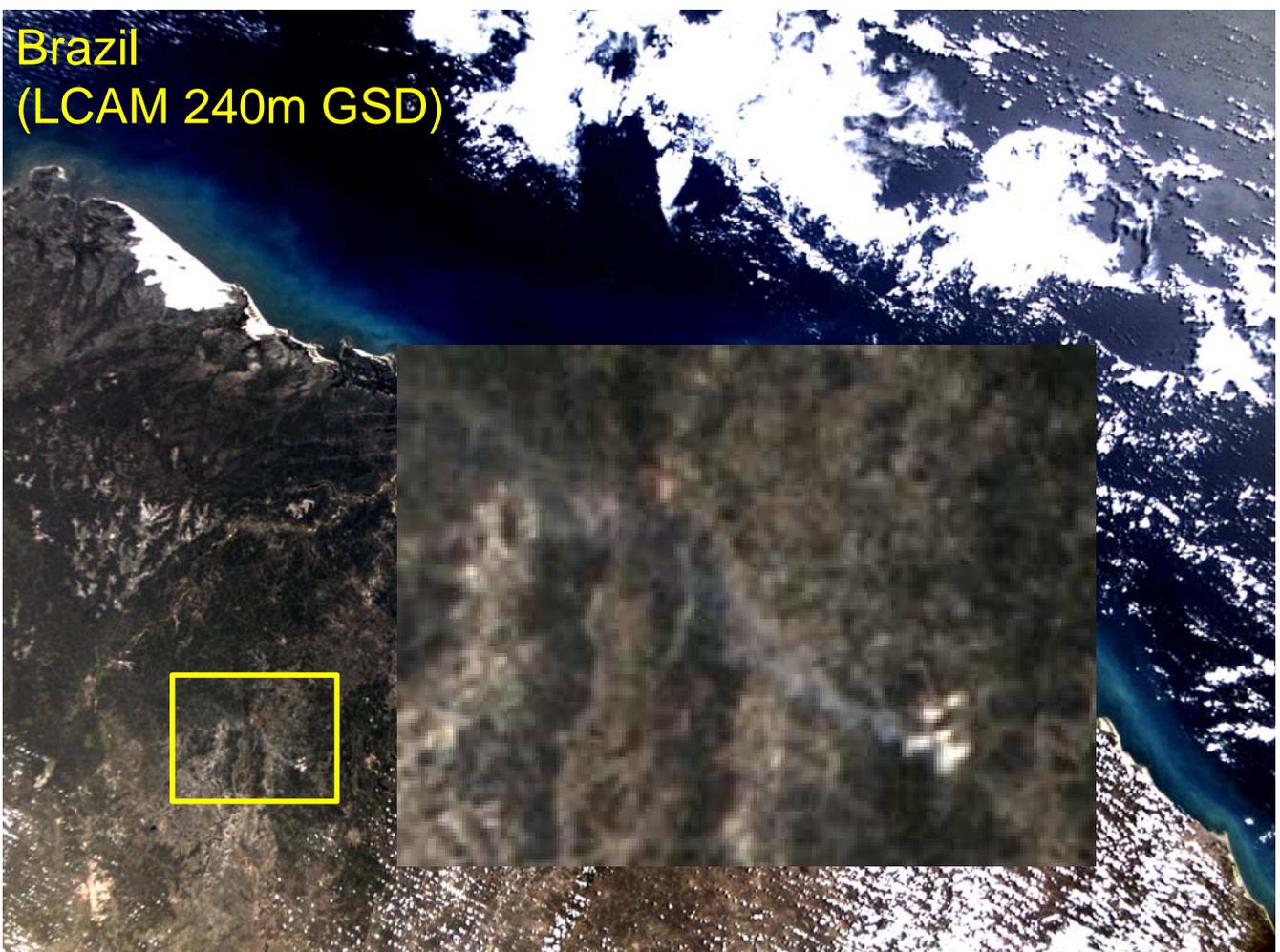
C)周りが暗いから

## ほどよしプロジェクトの全体像

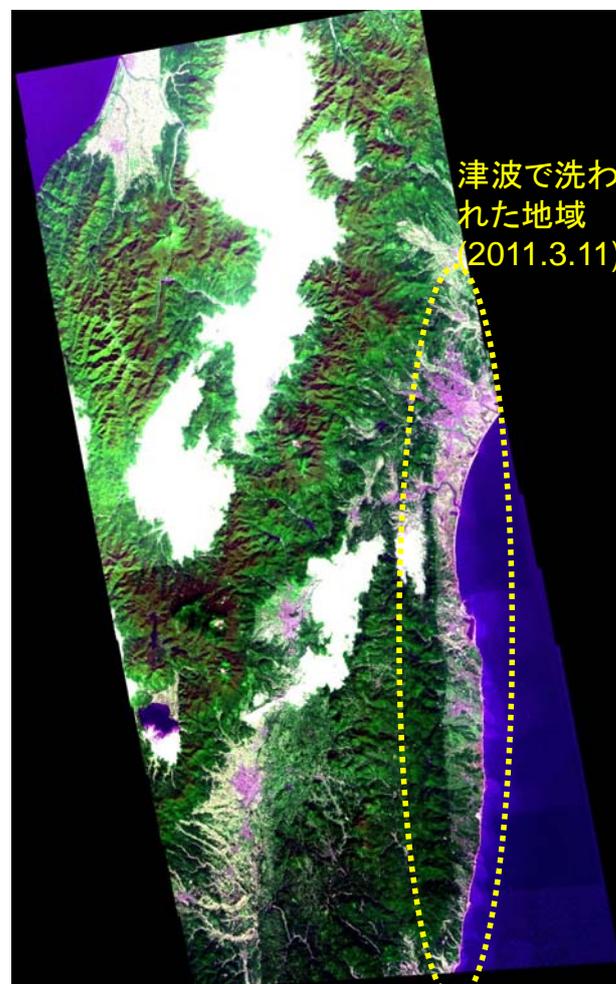
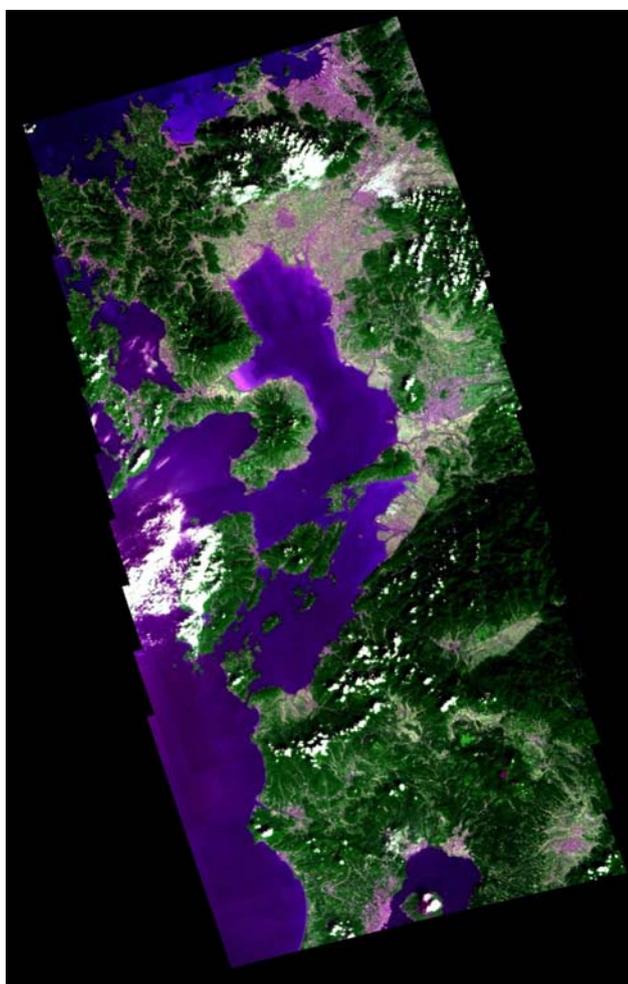
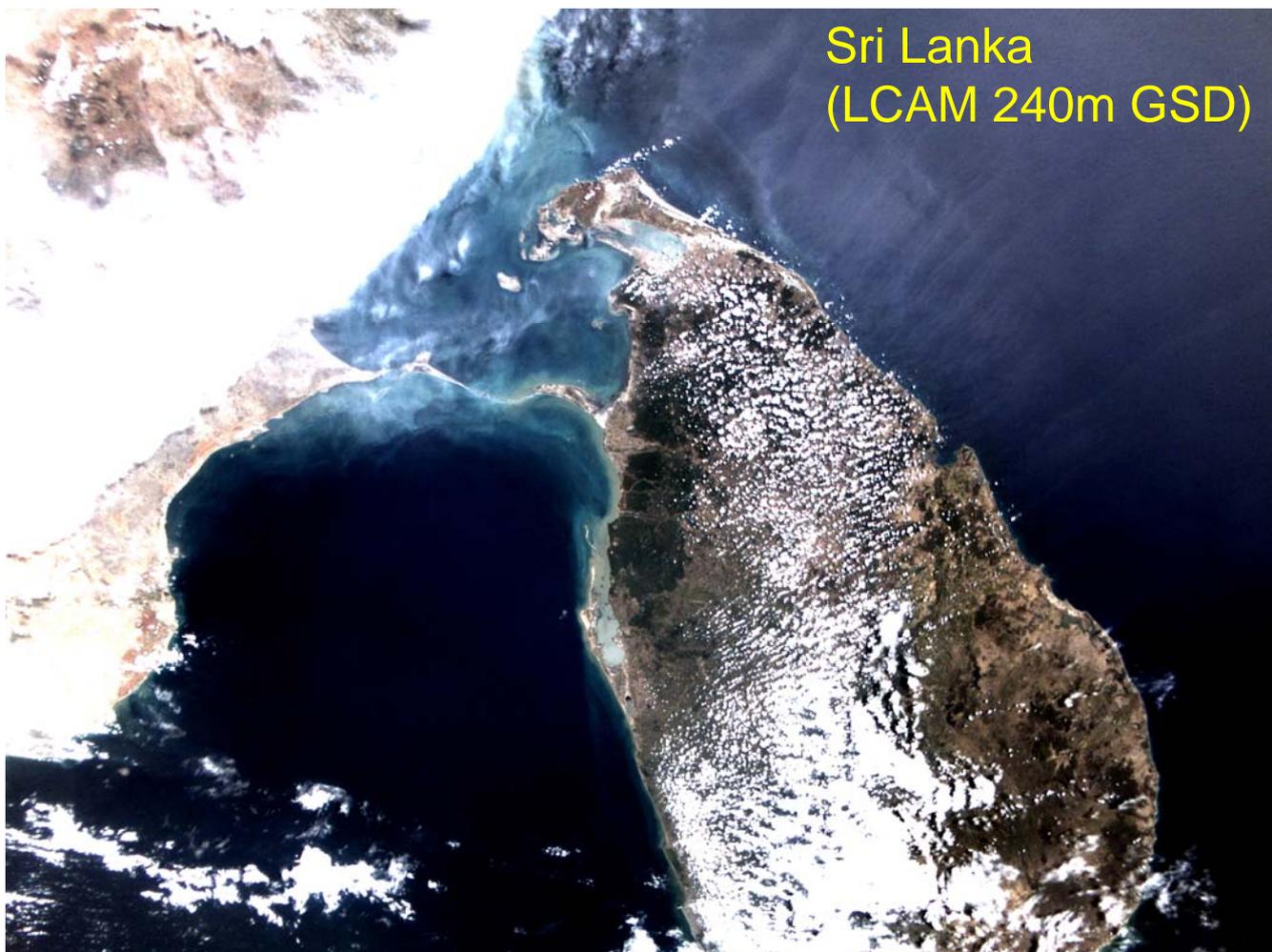




完成したほどよし3号(左)および4号のフライトモデル(FM)



Brazil  
(LCAM 240m GSD)





千葉九十九里  
(6m GSD)



ドバイ (6.7mGSD)



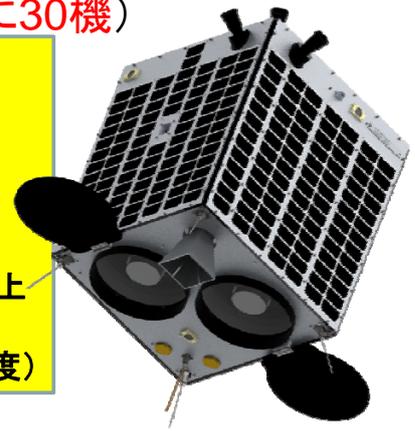
アカロア(ニュージーランド)

ほどよし1号 AXELSPACE提供

## ベンチャー会社AXELSPACEの近況

- GRUS(2018年1機打上げ、2022年までに30機)

地上分解能	パナクロマティック: 2.5m マルチスペクトル: 5.0m
バンド	パナクロマティック: 450-900nm マルチスペクトル 青: 450-505nm 緑: 515-585nm 赤: 620-685nm レッドエッジ: 705-745nm 近赤外: 770-900nm
	刈り幅 57km以上 再帰日数: 1日 (オフナディア40度)



- WNISAT-1Rの打上げ(2017年)



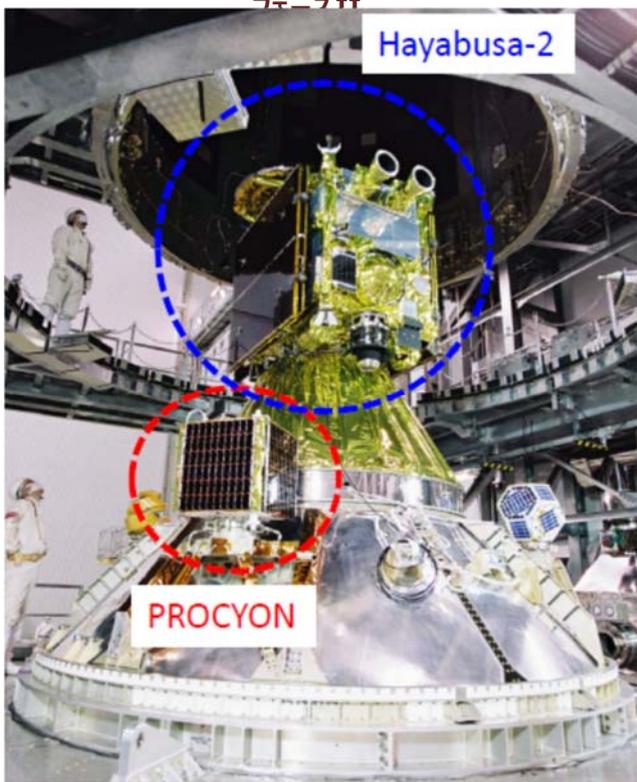
海水光学観測  
GNSS-R基礎実験  
光通信実験

カメラ台数	4台(各バンド独立)
観測波長	パナクロ1: 450-650nm 緑: 535-607nm 赤: 620-680nm 近赤外: 695-1005nm
画素数	2048 × 2048
ビット深度	12 bit
地表分解能	400m (近赤外/赤) 4 200m (緑/パナクロ)

# 世界初の超小型深宇宙探査機「PROCYON」(58kg)

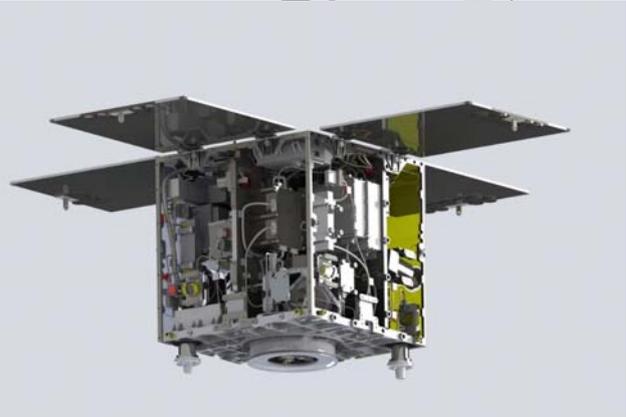
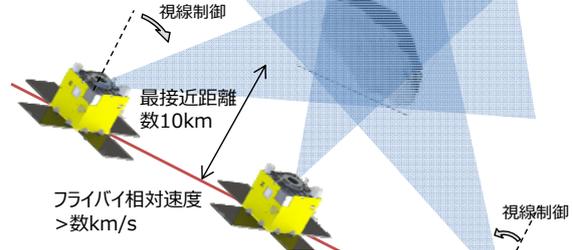
(PRoximate Object Close flYby with Optical Navigation)

2014.12 打上げ(H-IIA、はやぶさ2と相乗り)

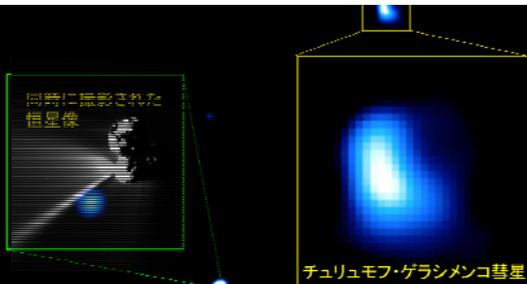


## <小惑星に対する超近接・高速フライバイ観測の概要>

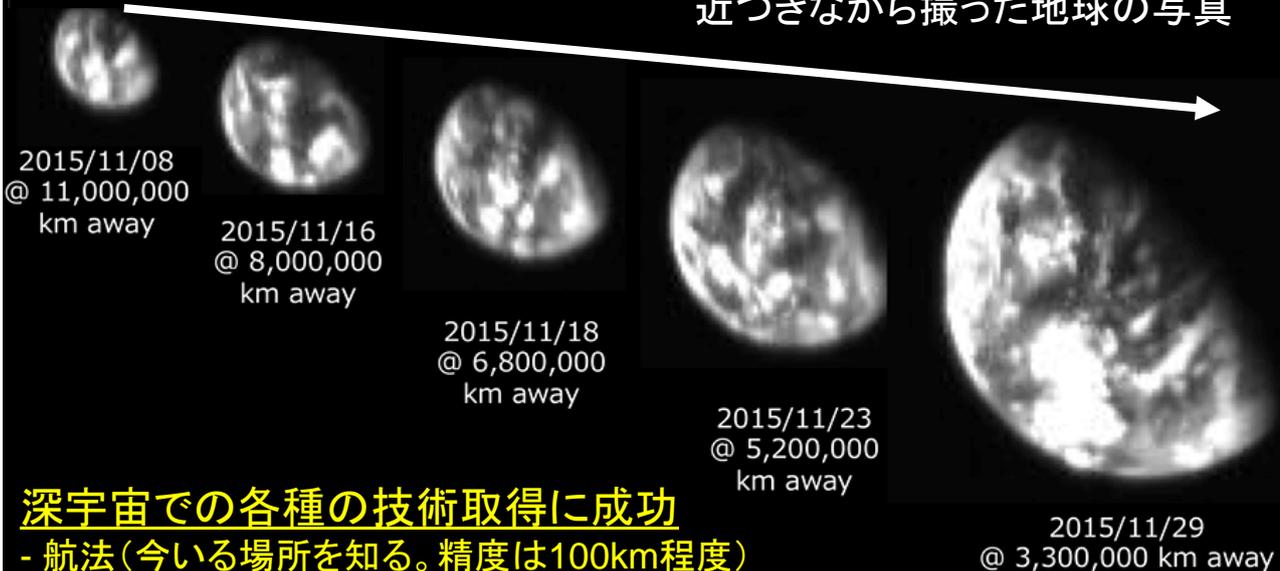
超近接距離でフライバイし、駆動鏡を用いた機上の画像フィードバック視線追尾制御により高分解能画像を取得する。



## 67P/Churyumov-Gerasimenko (チュルモフ・ゲラシメンコ彗星) からの水素放出の撮影に成功 (2015年9月13日)



1年後、地球にもどってきたときに、近づきながら撮った地球の写真



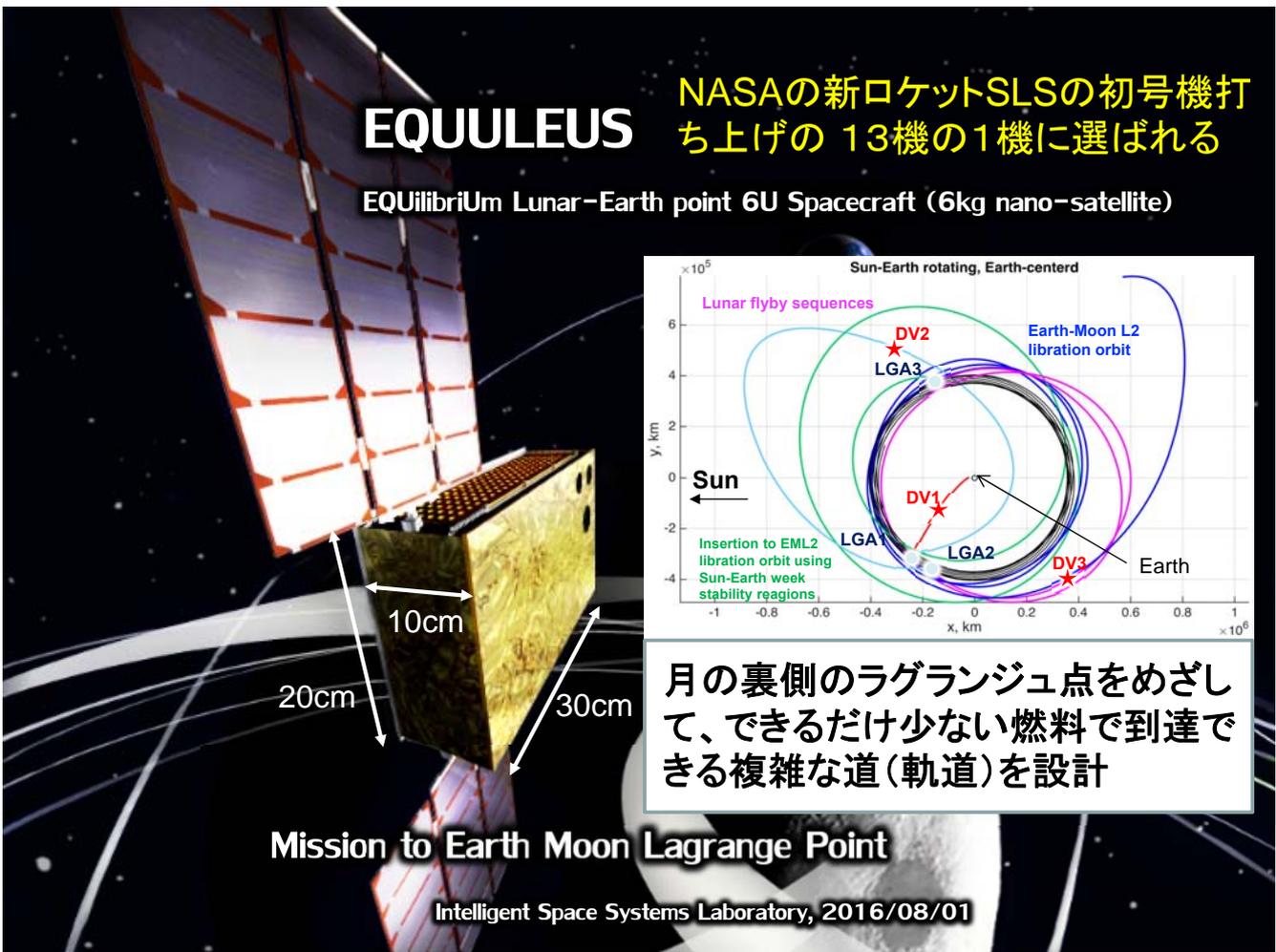
## 深宇宙での各種の技術取得に成功

- 航法(今いる場所を知る。精度は100km程度)
- 非常に長距離の通信(60,000,000kmから窒化ガリウムを使ったアンプにより)
- 姿勢制御(磁気を使えない深宇宙での制御:安定度0.01度以上)

# EQUULEUS

NASAの新ロケットSLSの初号機打ち上げの13機の1機に選ばれる

EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft (6kg nano-satellite)



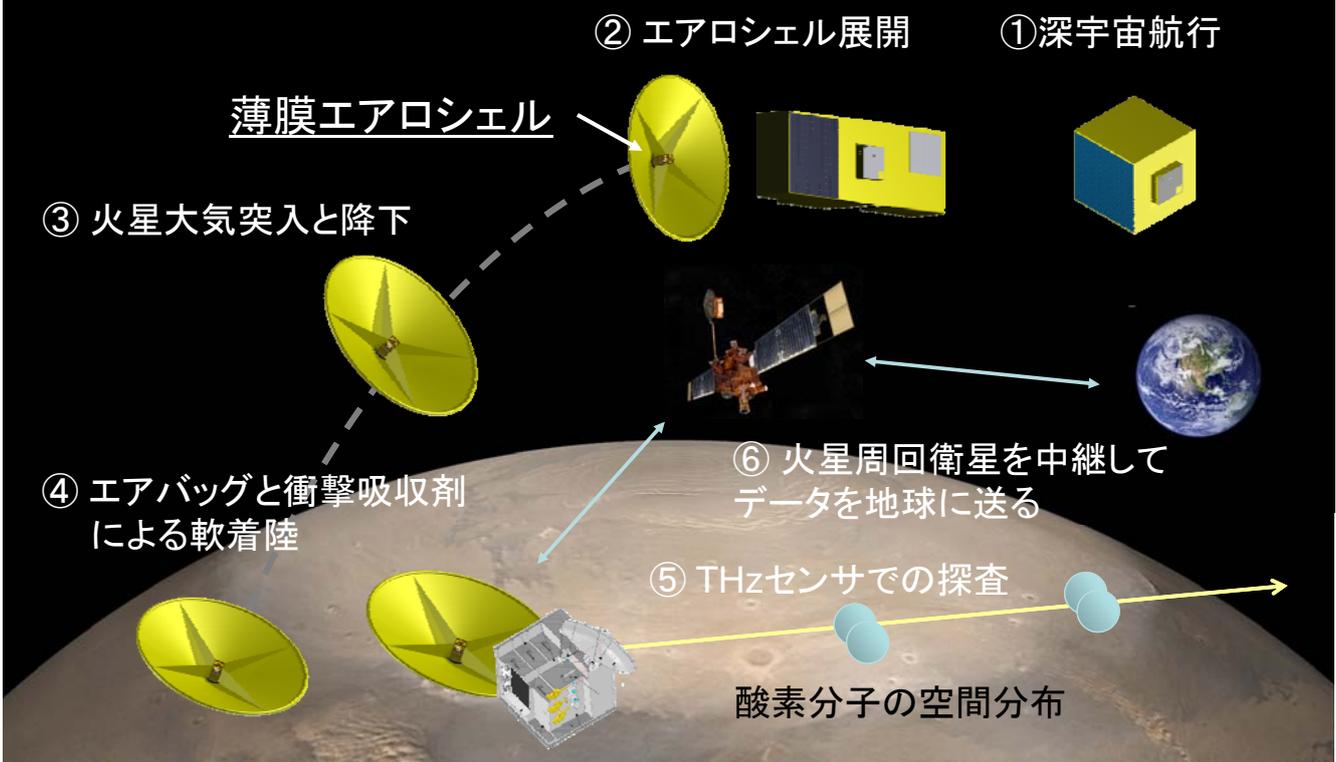
月の裏側のラグランジュ点をめざして、できるだけ少ない燃料で到達できる複雑な道(軌道)を設計

Mission to Earth Moon Lagrange Point

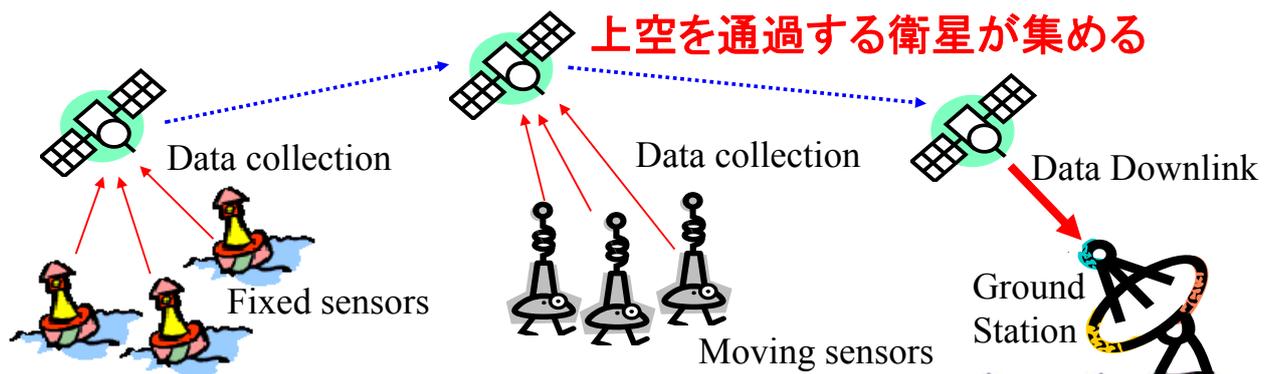
Intelligent Space Systems Laboratory, 2016/08/01

## 超小型衛星による(日本初の)火星着陸計画

総務省NICTとの連携により、70-100kgのランダーを火星に送りこむ検討開始。予算待ち。2022-2024年打ち上げ目指す



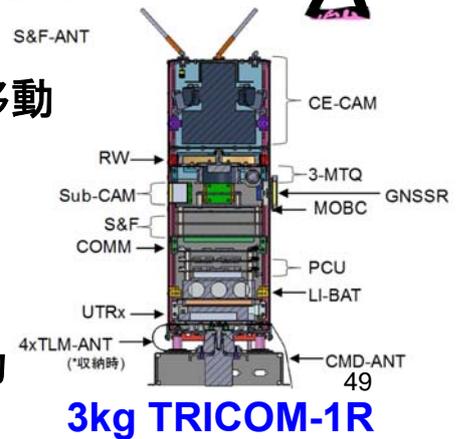
# “Store & Forward” 地上からの情報取得



応用先: 災害監視、水位・水質監視、地面の移動の監視、PH、土壌水分量、など

課題: 如何に小さい電力で送信できるか?

300bpsにすることで8~100mWでの送信成功



“Modified SS-520”

観測ロケット改造型 SS-520-4 で打ち上げたが.. (2017/1)



2018/2/3 再挑戦で SS-520-5 打ち上げ成功 「たすき」に



Transform Africa Summit  
(2018年5月)にて



Rwandaと3UのCubeSat開発連携協定(2019年8月ISS放出予定)

[News from Africa \(09/05/2018\)](#)

Smart Africa, Rwanda Sign Deal With Tokyo University For Satellite Technology



## 海外への教育支援:世界中とネットワーク構築

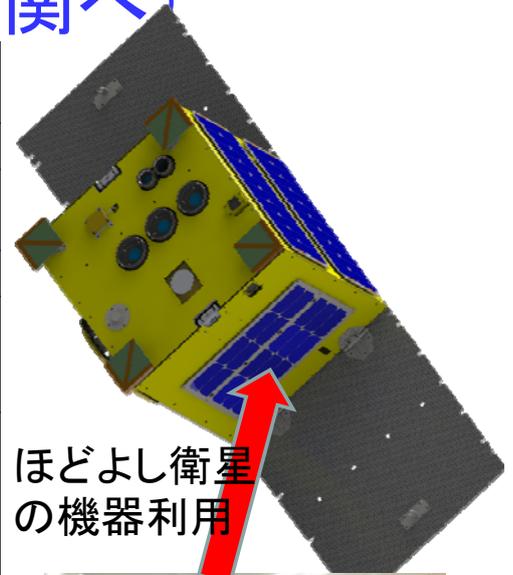
例:2013年11月の第5回超小型衛星シンポでは47カ国260名の参加

- CanSatの教え方の教育(CLTP:通算25カ国から70名以上教育)
- UNISEC-GLOBAL(国際的な大学連携組織)を運営
- 衛星開発のてほどき:ベトナム、ルワンダ、タイ、カザフスタン等
- 衛星のアイデアコンテストなど世界規模で開催



# 衛星開発教育支援衛星 “MicroDragon” (ベトナム宇宙機関へ)

Size	approx. 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m (stowed) approx. 1.4 m (SAP deloployed)
Mass	approx. 50 kg
Orbit (Planned)	SSO 500 km LTDN 9:30
ADCS	Three-axis Earth Pointing
EPS	Solar Cells 2x Solar Array Paddles (SAPs) + 5x Body Mount Cells
	Generation 100 W (max) Consumption 50 W (avg) Bus Voltage 28V (unreg) + 5V (reg) Battery 5.8AH Li-ion
COM	S-band 4kbps (CMD) S-band 4/32/64kbps (TLM) X-band 10Mbps (Mission)

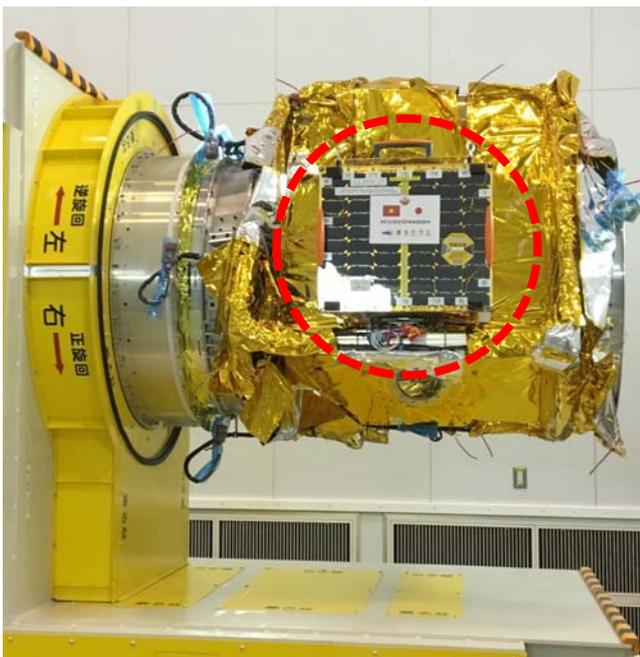


ほどよし衛星  
の機器利用



ミッション: カメラでベトナム海岸域を観測

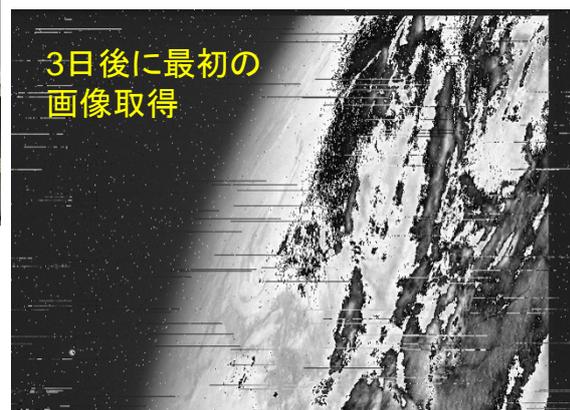
## MicroDragon 打上げ運用成功 (1/18)



イプシロンロケットに  
7機小型衛星搭載



内之浦宇宙空間  
観測所から打上げ



3日後に最初の  
画像取得

問題：人間は将来、宇宙とどんな関係になるのでしょうか？  
(複数選択可能)

- 1) 宇宙をもっと利用するようになる
- 2) 宇宙の謎を解明する研究を進める
- 3) 自分で宇宙に出ていき、宇宙に住むようになる

## 超小型衛星が未来を変える！

- 「しきい」の徹底的な低下により、「宇宙で何かをやろうと考える人の数を100倍にしよう」
  - 宇宙の開放：「宇宙は特別なものではない！」
  - 多くのベンチャー会社登場：「国」から「民」へシフト
- 宇宙が本当の意味での産業化するチャンス
  - 数が出る世界(100~1000のオーダーの衛星数)
  - 国際連携・競争、グローバルマーケット
- 宇宙を利用する「アイデア」が勝負
  - リアルタイム性の高い情報収集を多数衛星で
  - ビッグデータ、IoTの一部として宇宙を利用
- 大型衛星でできること以外はすべて超小型で！