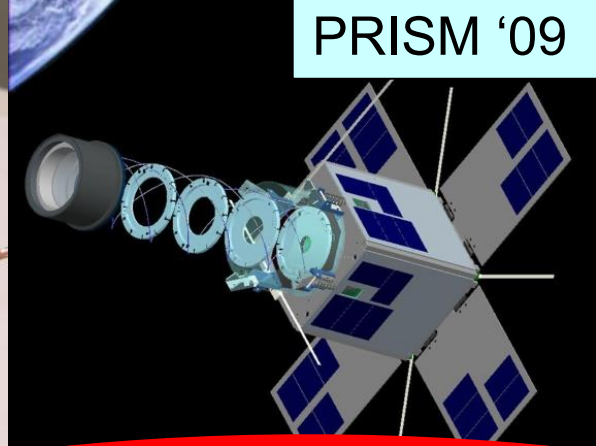


CubeSat



PRISM '09



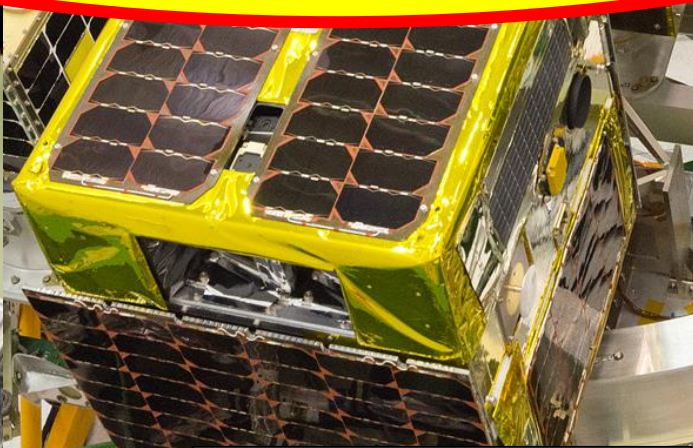
資料4-4

ISS放出

超小型衛星が拓く新しい宇宙開発利用
 ～高時間分解能、低価格、新規プレーヤ～
 東京大学 中須賀真一



Nano-JASMINE

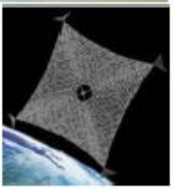
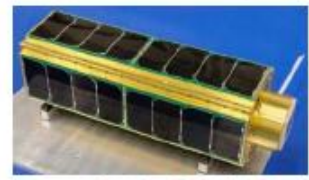
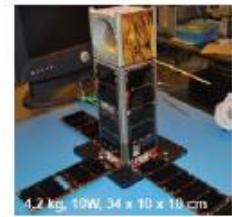
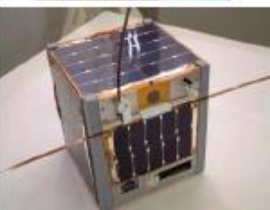
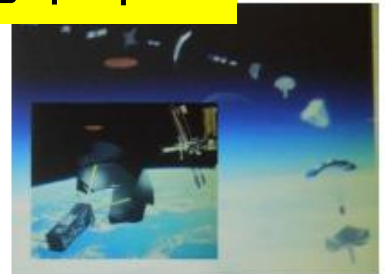
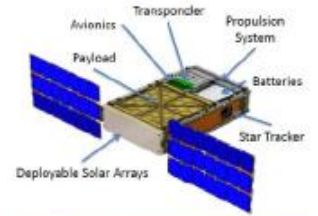
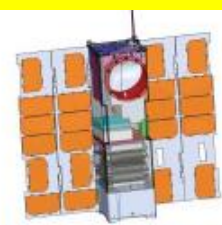


ほどよし3, 4号



地球写真

世界で起こった100kgまでの衛星による宇宙開発革命！



教育衛星(大学・高校)
OPUSAT (1U: 1kg)
XI-IV (1U: 1kg)

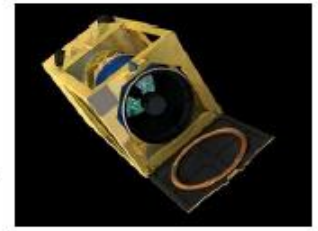
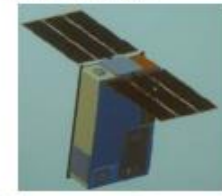
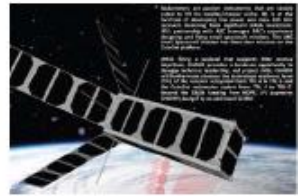
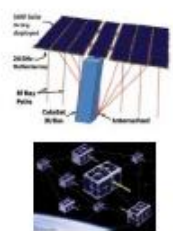
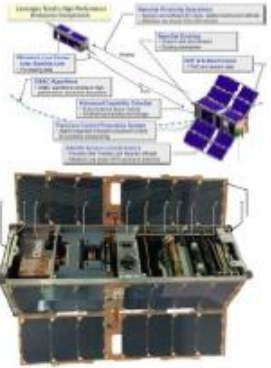
リモートセンシング
AeroCube(1.5U: 2kg)
Dove, Flock (3U: 4kg)

宇宙望遠鏡
AAReST

気象観測
MiRaTA (3U)
MicroMAS (3U)

バイオ実験衛星
BioSentinel計画案(6U)
SPORESAT (3U: 5.5kg)

Re-entry De-Orbit
再突入回収 (3U)
Sunjammer



ランデブー
ドッキング衛星
INSPIRE (3U)

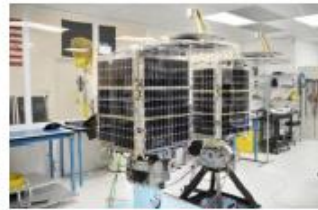
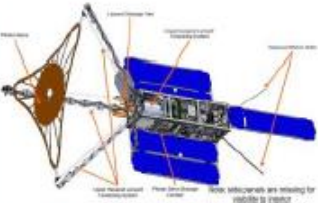
通信衛星(低速・高速・戦域)
高速通信・ISARA (3U)
低速通信・AISAT-1 (6kg)

サイエンス衛星
RACE (3U)
FS-7 (3U)

大気汚染観測衛星
(可視・近赤外)
NEMO-AM (15kg)

探査
LWaDi (6U)
CAT (3U)

高分解能光学
SCOUT (50kg)
Skysat (120kg)



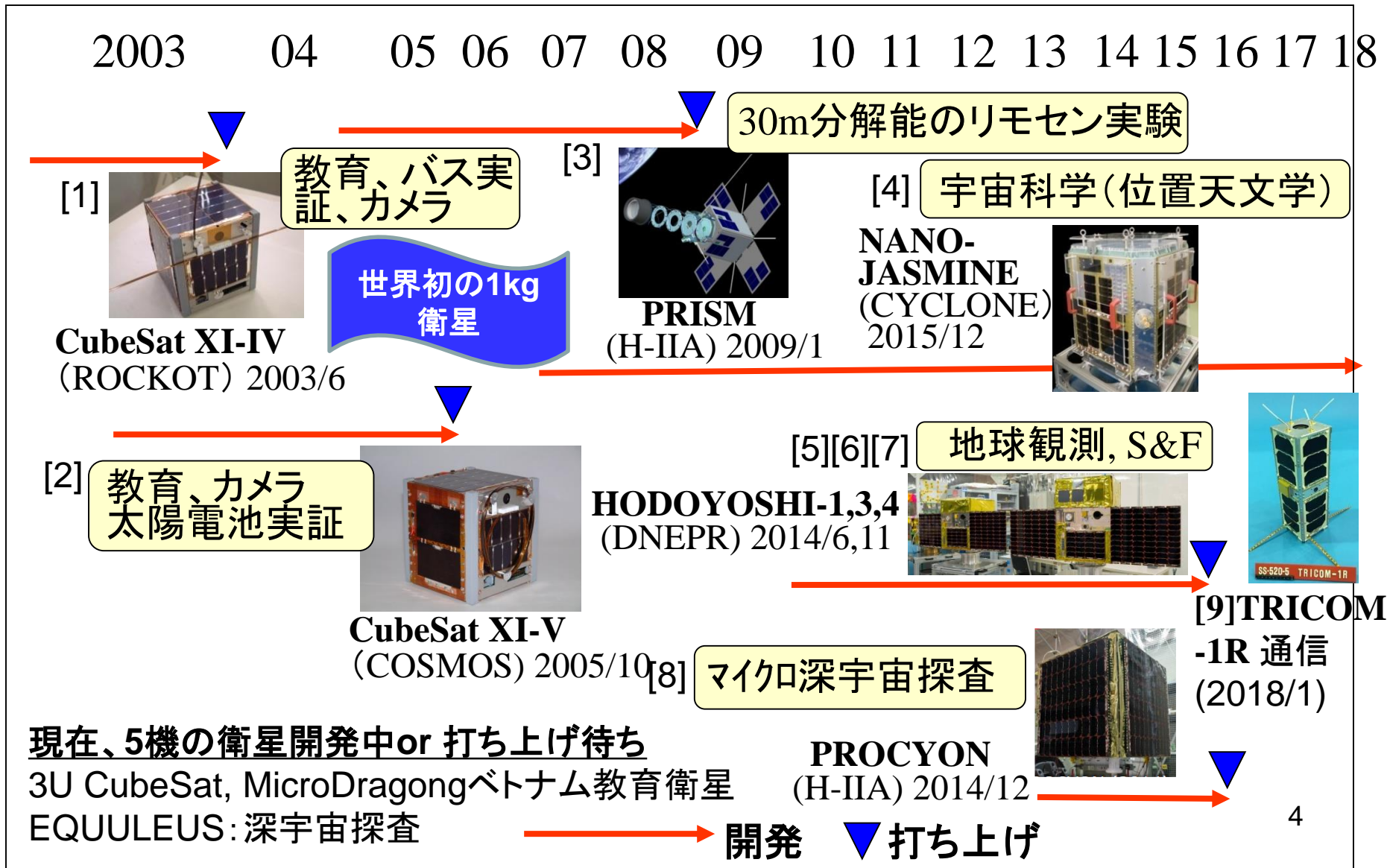
主として大学・ベンチャーがプレーヤー。ビジネス化のためファンドが投資
アメリカなどは国も大型投資でいっせいに技術開発し、中大型の代替に

超小型衛星による“Game Change”

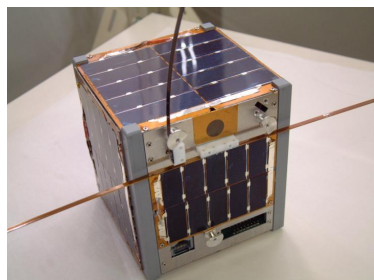
- 超低コスト (200億円以上 → 数千万～5億円以下)
 - これまでにない新しいビジネス・利用法を生む
 - 新規宇宙プレーヤー参入 (企業, 県、研究所、新興国)
 - 教育ツールにも利用できる
 - 挑戦的ミッション・実験可能に (失敗の許容度増える)
- 短期のライフサイクル (5年以上 → 1～2年以下)
 - 大学学生が研究室内で1サイクルを経験できる
 - 繰り返しが可能 (プロジェクトではなくプログラム化可能)
 - 投資回収までの時間が短期化 (ビジネスには有効)
- 衛星システムがシンプルで透明 (部品点数少ない)
 - 設計、運用、トラブルシュートがしやすい
 - 開発メンバーは全体を見ながらサブシステムに集中

東京大学の超小型衛星

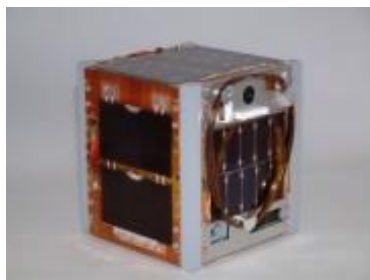
10衛星開発済み、8機打上げ済み、4機開発中



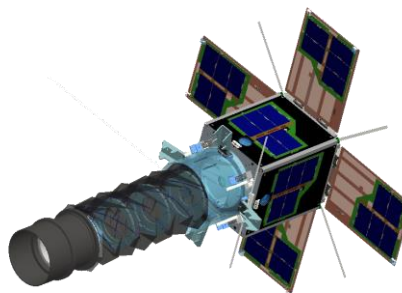
東京大学の超小型衛星プログラム(8機打ち上げ,6機待ち)



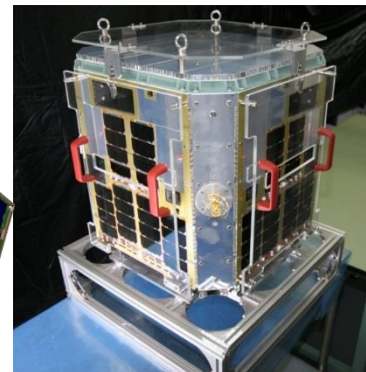
世界初の1kg衛星
成功 XI-IV(2003)



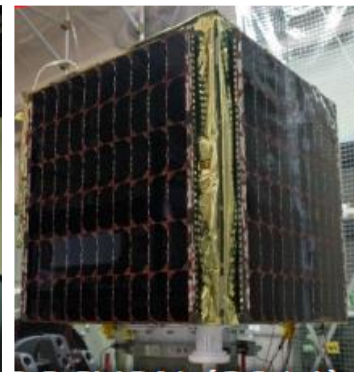
新規技術の宇宙
実証 XI-V(2005)



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)

超低コスト・短期開発の超小型衛星

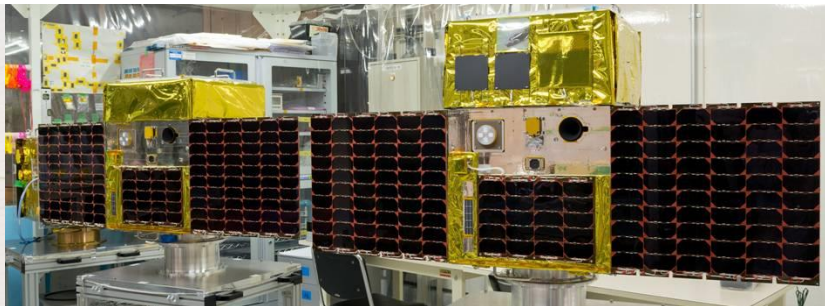
- ・宇宙工学・プロジェクトマネジメント教育題材
- ・従来にない新しい宇宙利用・ユーザの開拓
 - 地球観測・宇宙科学
 - 教育・エンタメ
 - 多数の衛星の連携運用
 - 実験・実証



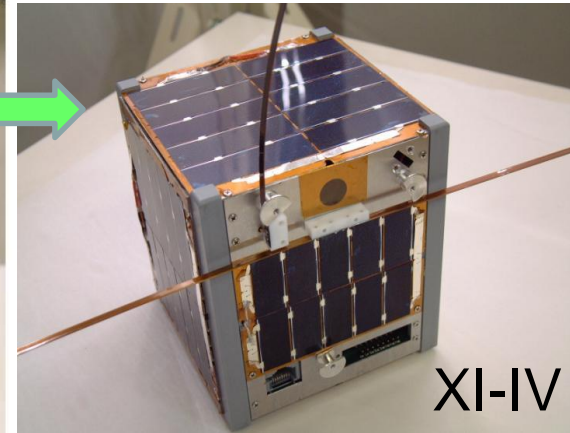
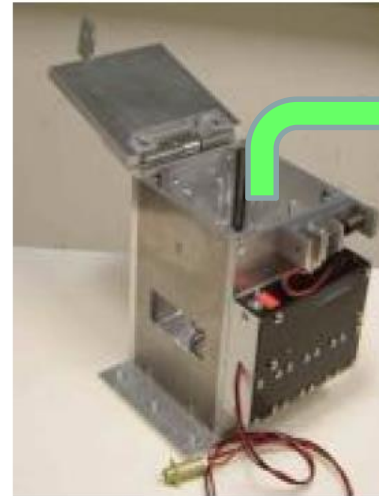
- ・宇宙科学探査の低コスト実現
- ・外国の最初の衛星の教育支援
- ・企業・県・個人等の「マイ衛星」
- ・安全・安心への貢献(インフラ)

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)

6m分解能画像 TRICOM-1R
 (千葉) 通信(2018)



2003年 世界初1kg衛星打ち上げの教育効果



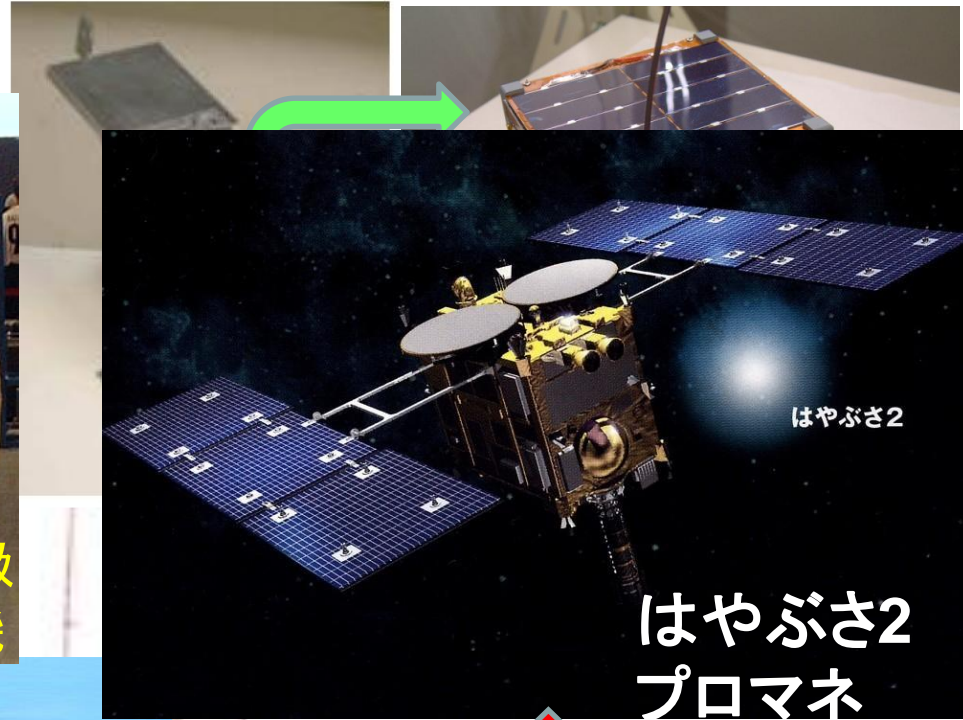
世界初1kg衛星打ち上げ教育効果



アクセルスペース社長

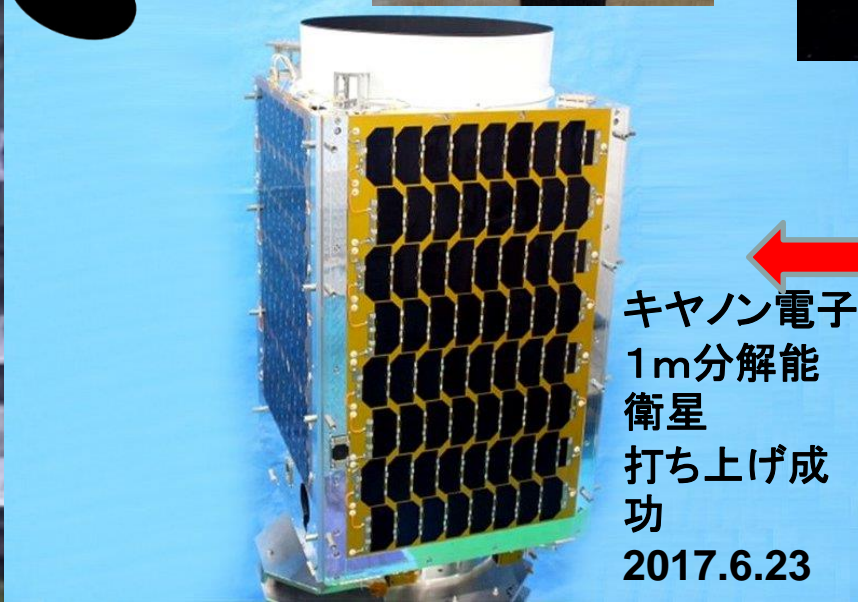


世界初50kg級
深宇宙探査機



はやぶさ2

はやぶさ2
プロマネ



キヤノン電子
1m分解能
衛星
打ち上げ成
功
2017.6.23



4号機Nano-JASMINE

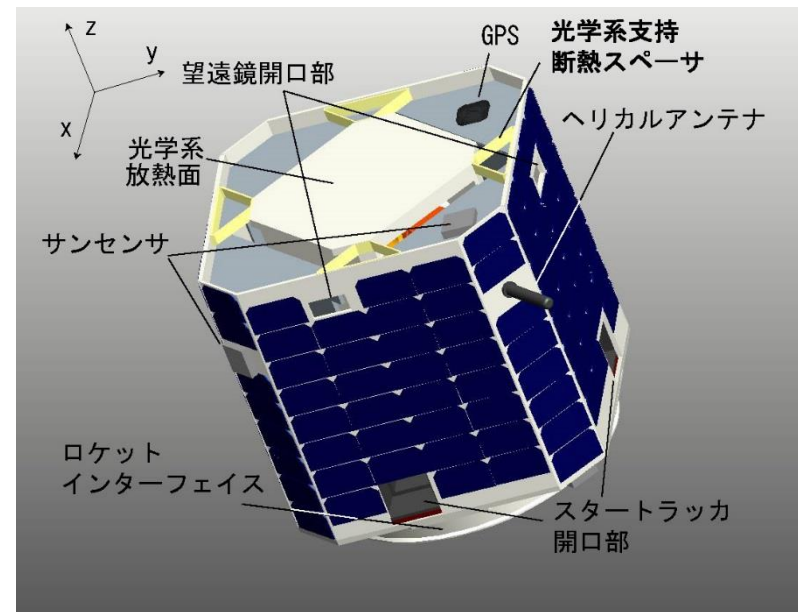
国立天文台と共同の宇宙科学衛星(「位置天文」ミッション)

衛星サイズ 50[cm立方]
質量 38[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



XI-IVの成功後、多くの機関・企業が衛星開発の相談に

中・大型衛星ではなくとも、宇宙でやれることはたくさんある

すでに
開発

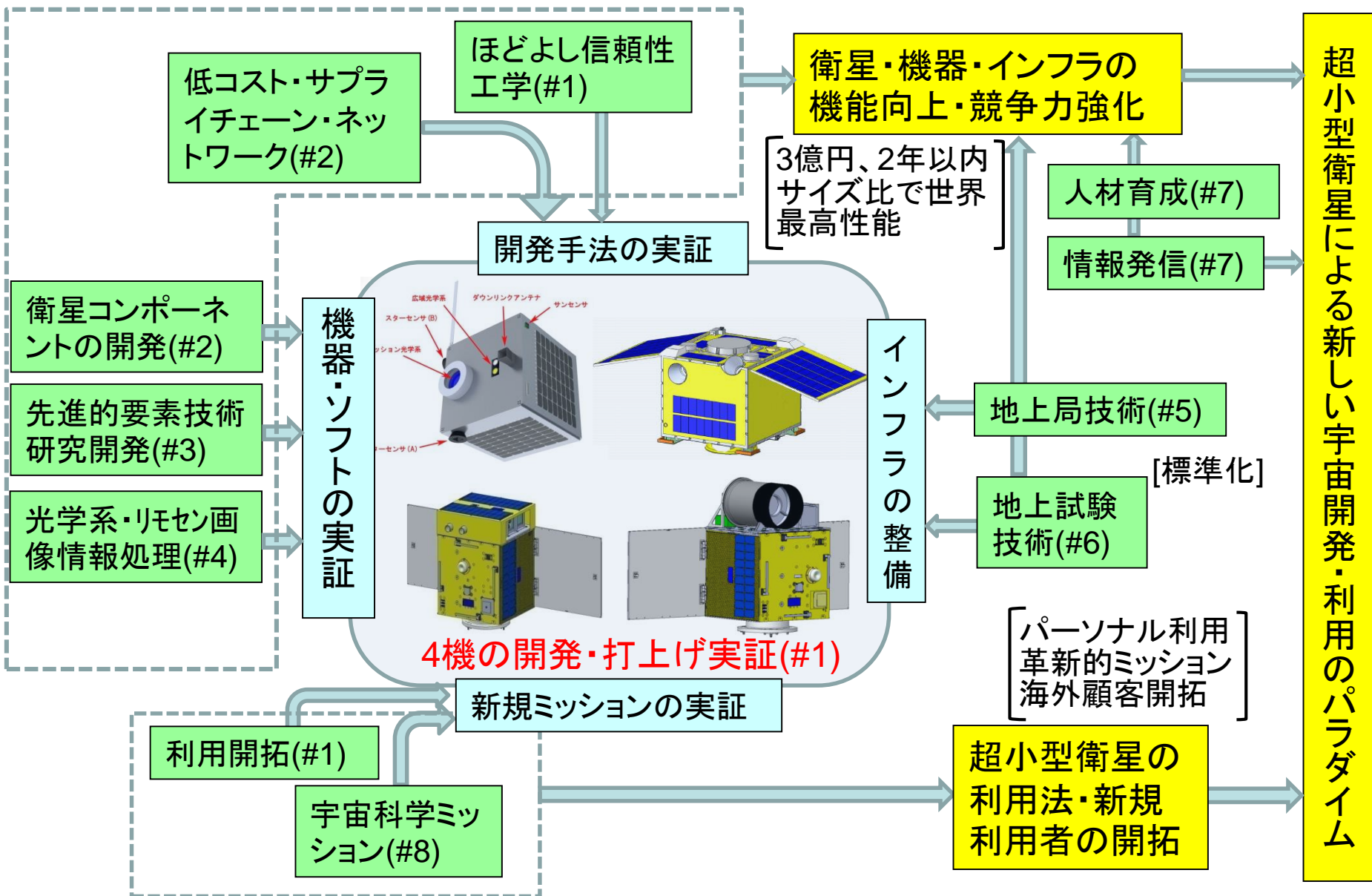
高コストの時には現れなかった潜在需要

- -----
- -----
- 教育関連会社(画像等を宇宙の教材に)
- -----
- 地方公共団体(衛星作り自体が青少年の理科教育に。災害時の空からの画像、通信機能欲しい)
- -----
- 機器メーカー(会社製品の宇宙利用で宣伝にしたい)
- アマチュア天文家(自分達で専用に使える宇宙天文台)
- 気象予報会社(独自のコンテンツ欲しい) (→WNI衛星)
- 宇宙機関・企業(技術の早期実証と若手の技術訓練)(→XI-V)
- 宇宙科学者(観測機器の実証、簡易型の宇宙観測に)(→NJ)



コンピュータにおけるダウンサイジング、パソコン化による利用爆発の波を宇宙に!

ほどよしプロジェクト(2010-2014)の全体像



Target: 50kg class satellite to be developed within \$3M and 2 years



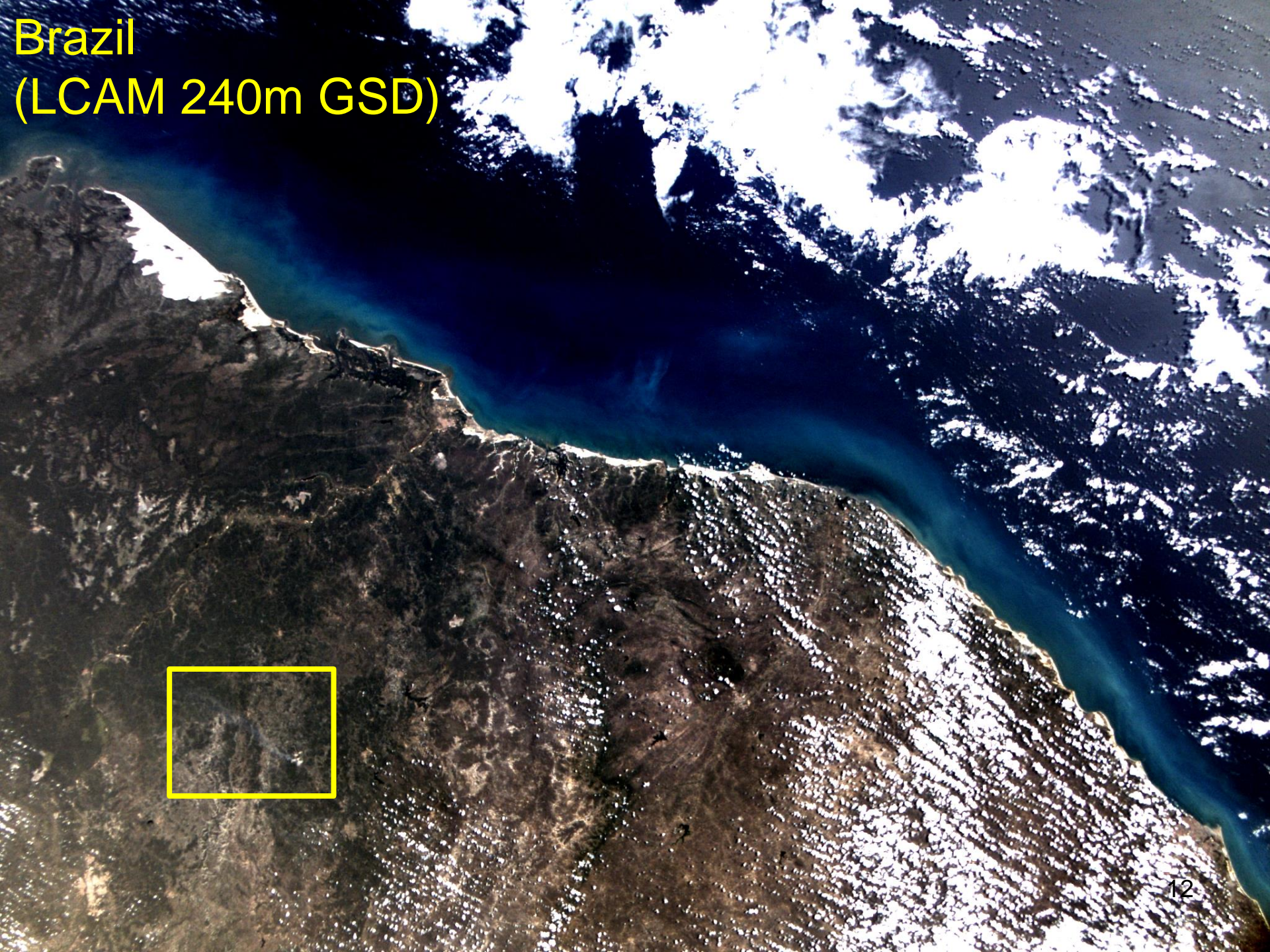
Size: 50x50x80cm 60kg Downlink: 10Mbps Power: max 100W average 50W

Attitude Control Capability:

- Stability 0.08 deg/s (Roll, Pitch) 0.8 deg/s (Yaw)
- Pointing accuracy 0.2 deg 2 deg
- Determination accuracy 0.0048 deg 0.048 deg

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)¹¹

Brazil
(LCAM 240m GSD)





Chiba
(6m GSD)

Dubai (6.7mGSD)



AXELSPACEによる光学コンステレーション

- GRUS (2018年1機打上げ、2022年までに30機)

地上分
解能

パンクロマティック: 2.5m
マルチスペクトル: 5.0m

バンド

パンクロマティック: 450-900nm
マルチスペクトル

青: 450-505nm

緑: 515-585nm

赤: 620-685nm

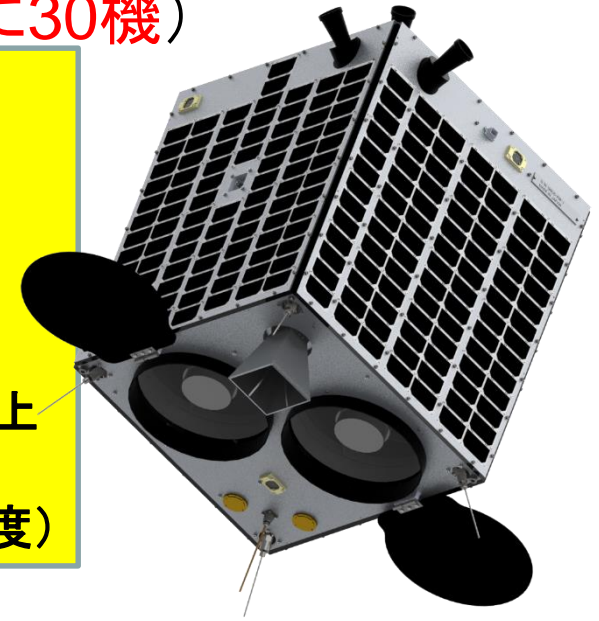
レッドエッジ: 705-745nm

近赤外: 770-900nm

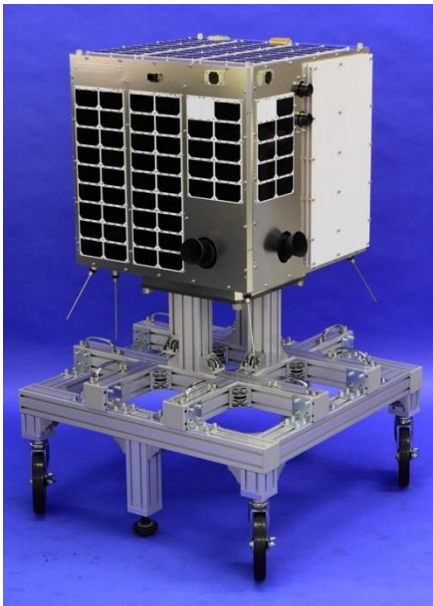
刈り幅 57km以上

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

パンクロ¹: 450-650nm

緑: 535-607nm

赤: 620-680nm

近赤外: 695-1005nm

画素数

2048 × 2048

ビット深度

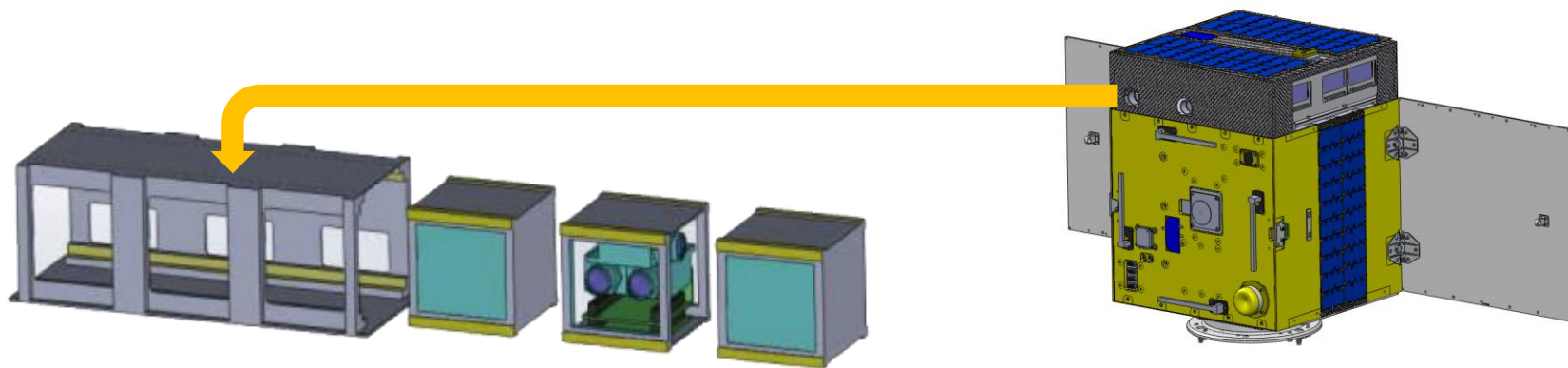
12 bit

地表分解能

400m (近赤外/赤)⁵

200m (緑/パンクロ)

搭載機器スペース (Hosted Payload)



- ほどよし3, 4号で4個のスペース(10cm立方)を用意
- 公募により2個は決定: 民間企業との共同利用実験(ビジネス試行実験)を計画中
- 多くの潜在ユーザー・利用法開拓済み(将来の顧客候補)
 - 自社製品の打ち上げによる宣伝(「宇宙で動作する品質」)
 - 記念品の打ち上げビジネス
 - 工学実験(宇宙環境利用)、宇宙観測機器搭載による宇宙科学
 - 宇宙アウトリーチへの活用、他
- オプションとして ①地球背景にそのグッズの写真を撮る ②定期的にそのグッズの写真を撮る ③情報をやりとりする、等

Inside of 10cm Cubic Space

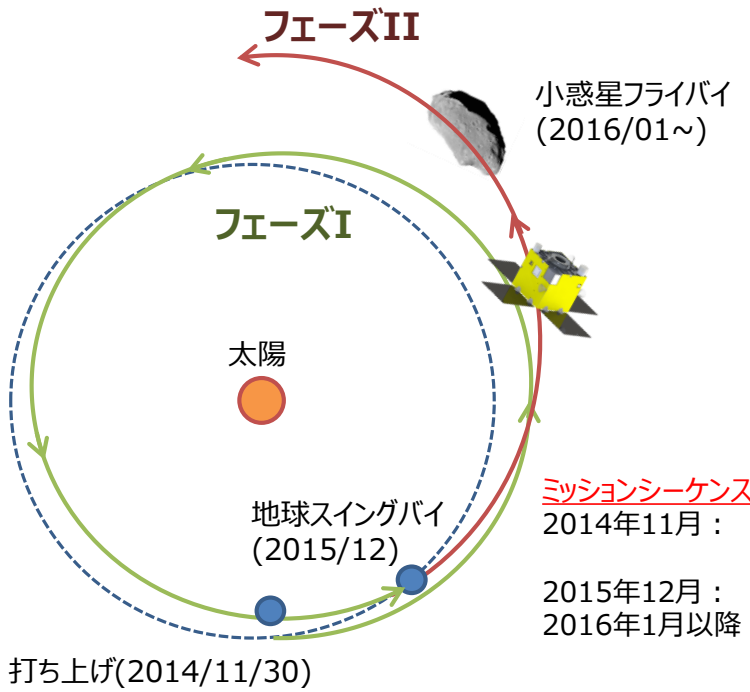
HELLO KITTY
40TH
ANNIVERSARY

← This message can be
uplinked

“Moving Earth” as seen
through the window

20 second
video clip is
downlinked
and sent to
Sanrio

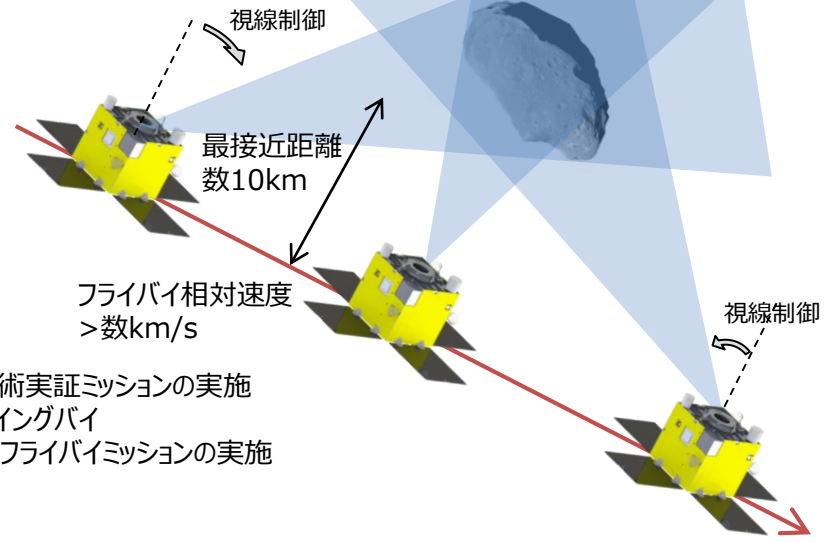
世界初の超小型深宇宙探査機「PROCYON」(58kg) (PRoximate Object Close flYby with Optical Navigation) 2014.12 打上げ(H-IIA、はやぶさ2と相乗り)



ミッションシーケンス
 2014年11月： 打上げ
 各種技術実証ミッションの実施
 2015年12月： 地球スイングバイ
 2016年1月以降： 小惑星フライバイミッションの実施

<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。



1. 50kg級超小型深宇宙探査機バス技術実証 (ノミナルミッション)

- a. 深宇宙での発電・熱制御・姿勢制御・通信・軌道決定
- b. 超小型電気推進系による深宇宙での軌道操作

2. 深宇宙探査技術の実証

- (アドバンストなミッション：加点对象ミッション)
- c. 窒化ガリウムを用いた高効率X帯パワーアンプによる通信
- d. 深宇宙での超長基線電波干渉法による航法
- e. 小惑星に対する電波・光学複合フライバイ航法
- f. 視線追尾制御による小惑星の超近接・高速フライバイ観測

3. サイエンス観測

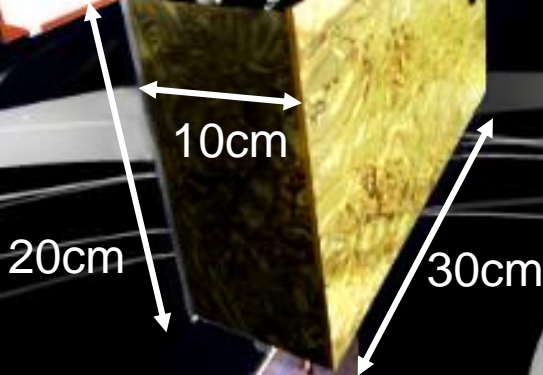
- g. ジオコロナ (地球コロナ) 撮像

EQUULEUS

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

2020年、国際公募の13機の6U
CubeSatのうちの1機としてNASA
SLS初号機で打ち上げ

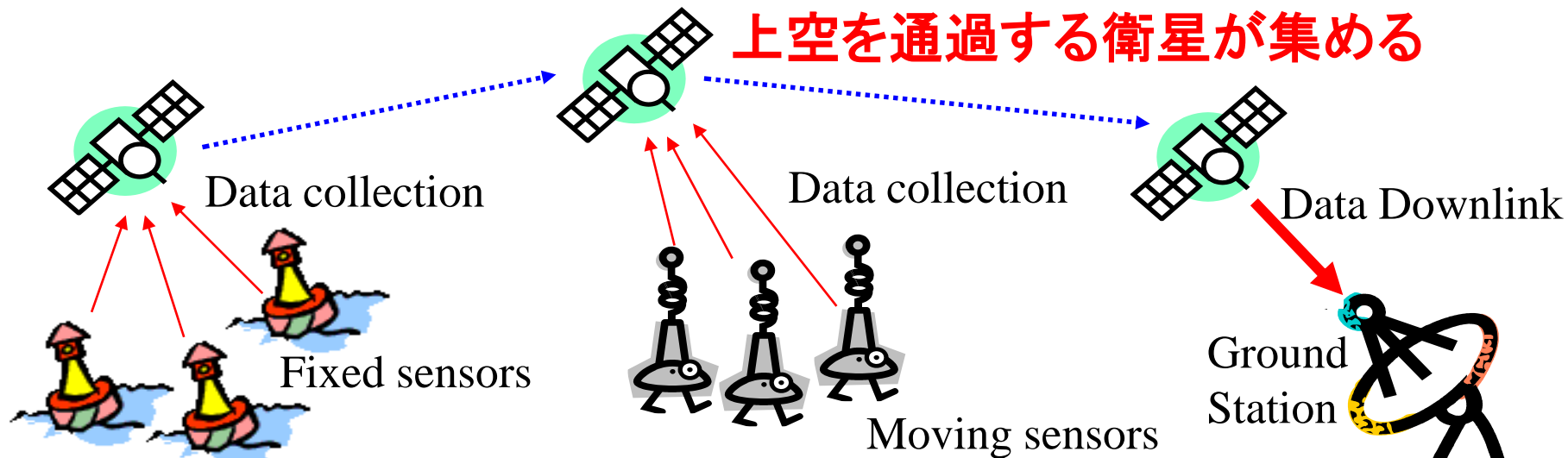
目標は将来の宇宙港
地球・月の第2ラグランジュ点



Mission to Earth Moon Lagrange Point

Intelligent Space Systems Laboratory, 2016/08/01

“Store & Forward” 地上からの情報取得



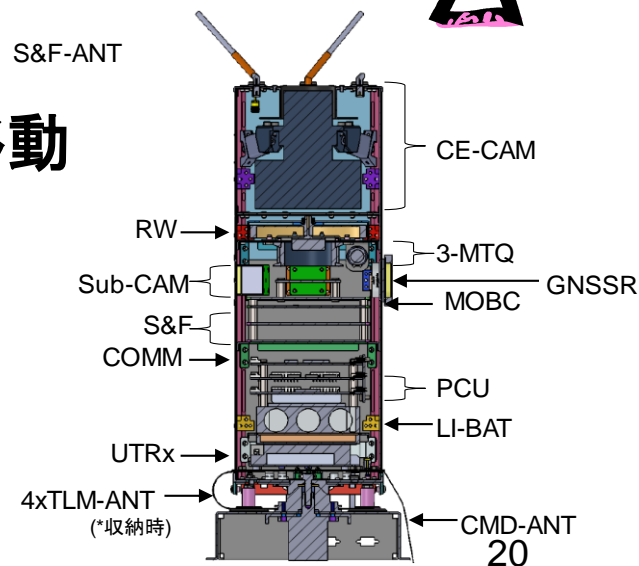
応用先: 災害監視、水位・水質監視、地面の移動の監視、PH、土壌水分量、など

課題: 如何に小さい電力で送信できるか?

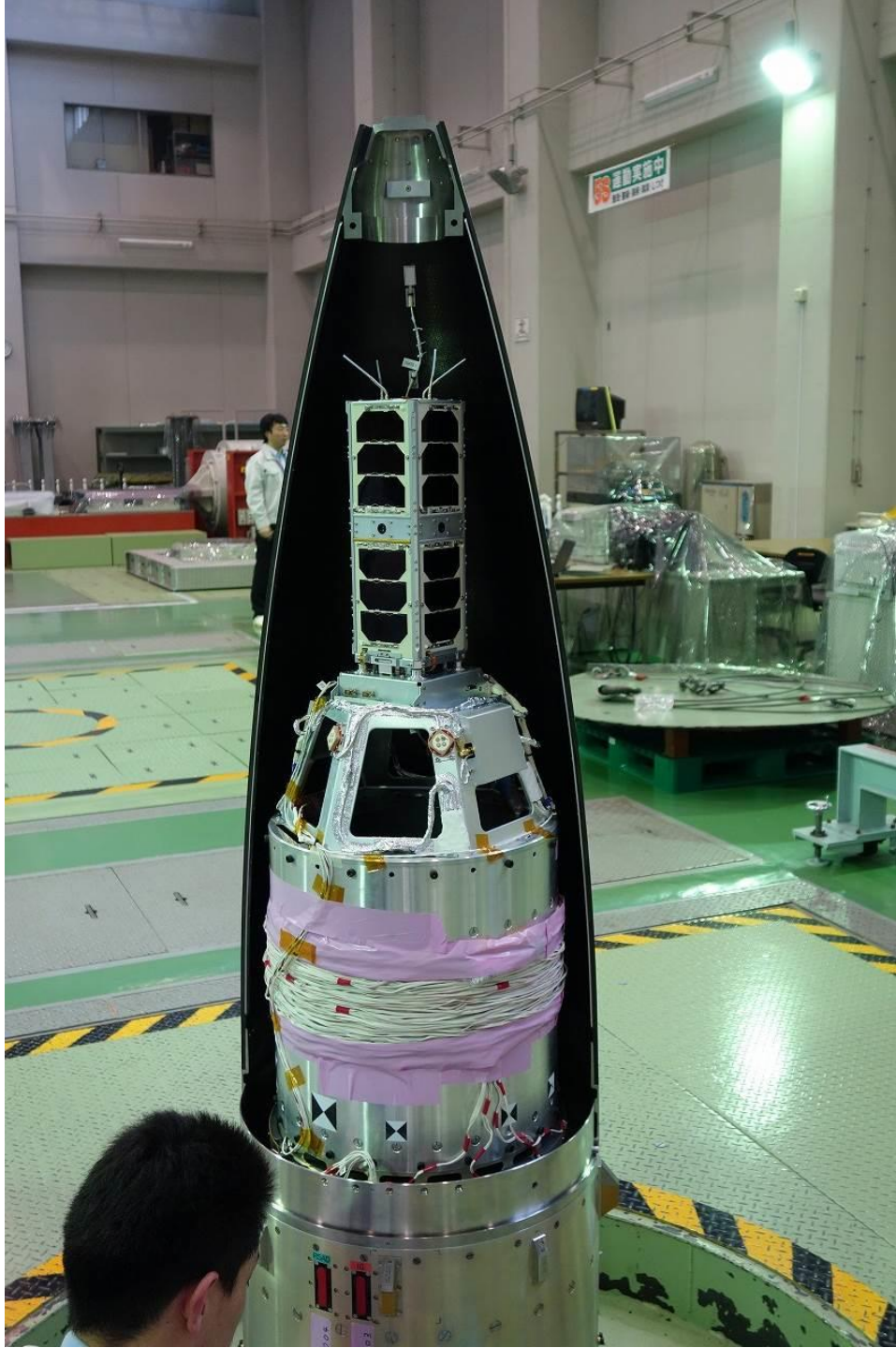


300bpsにすることで8mWでの送信成功
(ルワンダなど複数国で成功)

S&F-ANT



3kg TRICOM-1R



“Modified
SS-520”

観測ロケット
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



東京大学開発の3Uの
CubeSat



2019年6月のISSへの打ち上げをめざし、ルワンダと共同開発契約を結ぶ(Smart Africa 会議にて、2018年5月)

News from Africa (09/05/2018)

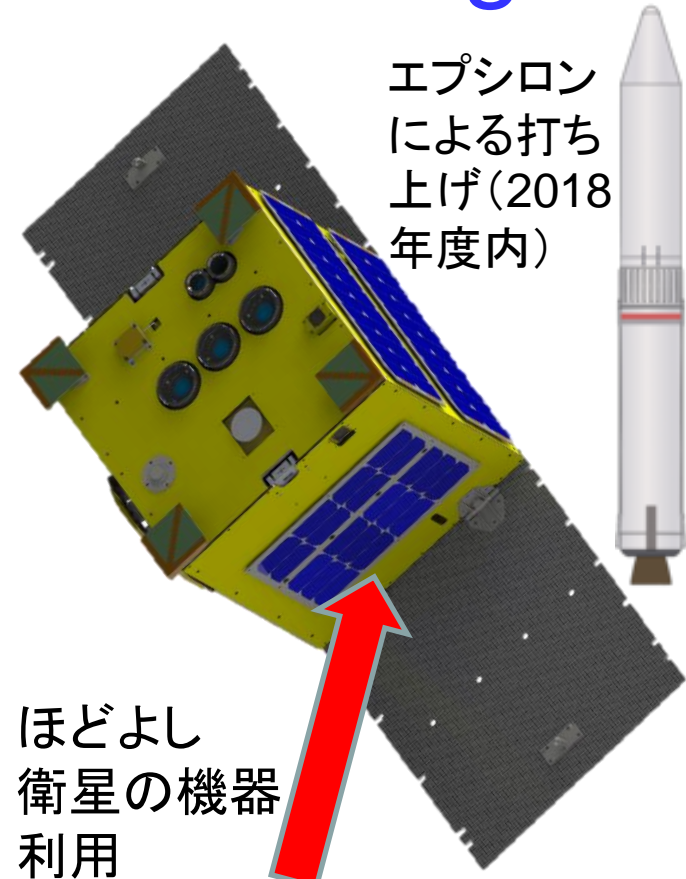
Smart Africa, Rwanda Sign Deal With Tokyo University For Satellite Technology

Taarifa
We Give You The Facts, You Connect The Dots

ベトナム宇宙センター向け“MicroDragon”

サイズ	約 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m (打ち上げ時) 約 1.4 m (パドル展開後の最大寸法)
質量	約 50 kg
投入軌道	太陽同期軌道 高度 500 km 降交点地方時 9:30
姿勢制御	三軸地球指向
太陽電池	太陽電池パドル2枚 5箇所にボディーマウントセル 三重接合GaAsセル(効率30%)
電源系	太陽電池での発電 100 W (最大) 消費電力 50 W (平均) バス電圧 28V (非安定) + 5V (安定) バッテリー 5.8 AH リチウムイオン電池
通信系	Sバンド 4kbps (アップリンク) Sバンド 4/32/64kbps (ダウンリンク) Xバンド 10Mbps (データダウンリンク)

ベトナム国立衛星センター(VNSC)の若手研究員36名を5大学の修士課程で受け入れ、東大が衛星作りを教育しつつ開発した衛星。ベトナムの海外の観測がメインミッション。



大学連携 “UNISEC-Global” 活動

39カ国がUNISEC(日本で成功)活動に興味を持つ
South Africa/Angola/Namibia, Egypt, Ghana, Kenya,
Nigeria, Tunisia, Bangladesh, Korea, Mongolia, the
Philippines, Singapore, Taiwan, Thailand, Turkey,
Australia, Indonesia, Saudi Arabia, Canada, USA,
Guatemala, Mexico, Peru, Brazil, Bulgaria, Italy, Samara
(Russia), Switzerland, Germany, Slovenia, Lithuania,
Germany and Japan.



15のUNISEC—xxx(Local Chapter) ができる

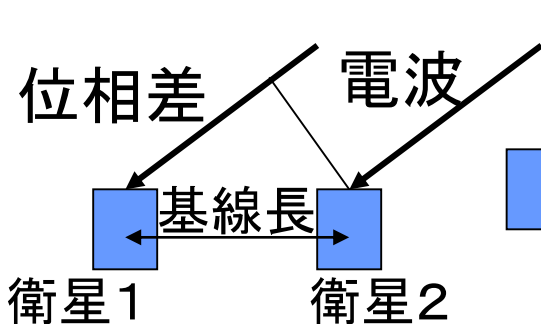
- 技術・経験の交流
- 大きなビジネスの広がり可能性

国連のObserverのポジションを
獲得(2017.6)

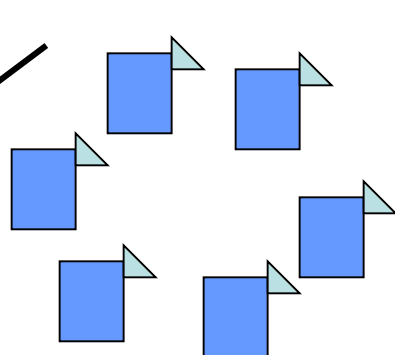
<http://unisec-global.org/>

超小型衛星で何ができるか？

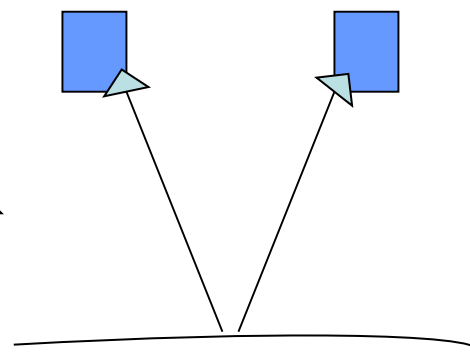
- コスト(<3億)、開発期間(<2年)の爆発的な低下により、「しきい」を根本的に下げる。
 - ①地球規模で衛星を分散配置し頻繁に見る(コンステレーション)
 - ②そばを飛ぶ複数機による共同ミッション(フォーメーションフライト)
 - ③パーソナル衛星、マイ衛星の概念(パソコンと同様の革命)
 - ④本格的ミッションの前の試行実験・実証がしやすい
 - ⑤海外新興国への衛星開発支援に適切なサイズ



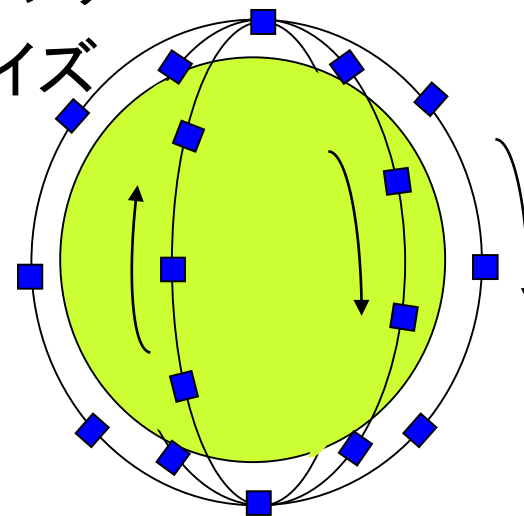
干渉計測



多点同時計測



ステレオ視



フォーメーションフライト

コンステレーション²⁵

政府内：衛星の防災利用の議論から

- 衛星の防災利用では、特に即応性が不足。
- 発災後72時間（生死の境目）までの、探索のための情報だけでなく、**初動のための5時間**の情報取得が大事
 - 被災地の全体像を知って人を送るための基礎情報
 - どんな分解能でも使い道はある
 - これ以降は、現地に人が入るので、情報が取れる
 - 燃え広がる火災などはさらに即応観測(10分)が必要
- 「打ち上げた衛星を利用する」ではなく、どんな衛星が役立つかの議論が必要

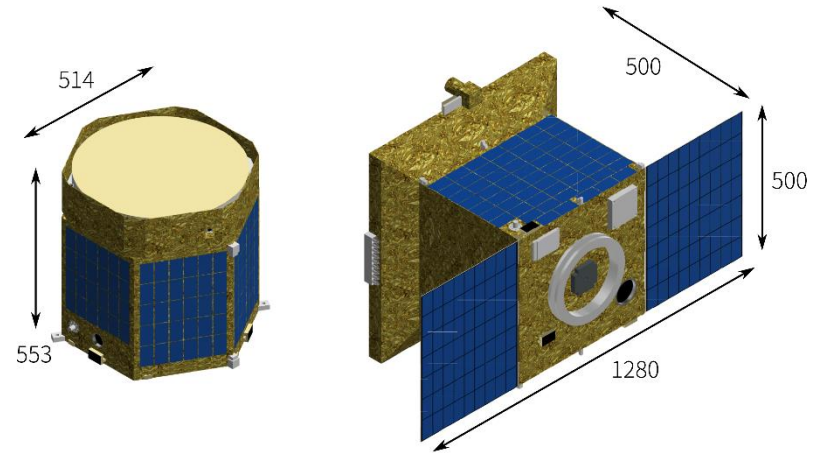
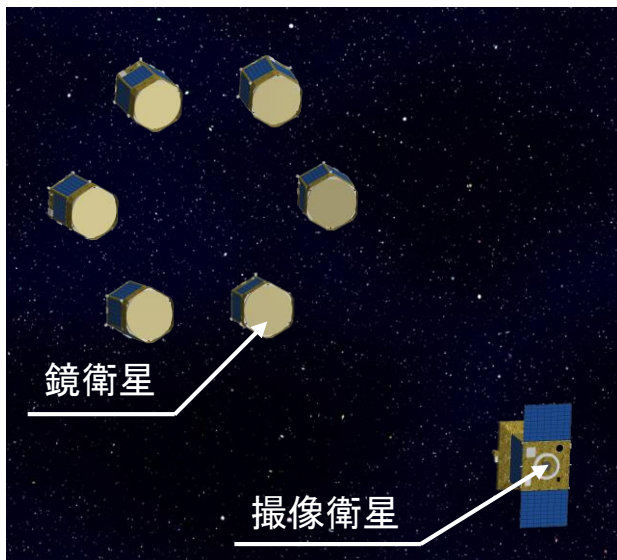
超高時間分解能の静止リモセン

1. 全世界は見られないが、必要とする箇所を順にスキャンするのに要する時間の間隔(10分なども可能)で繰り返し観測可能(極めて高い時間分解能)
2. 地上との通信リンクが常に取れているので、撮れた画像を遅れなく地上に伝送可能
3. 地上が相対的に移動しない(低軌道衛星だと8km/sで移動するのに対し)ことから長い露光時間によりS/N比をあげやすい

空間分解能悪化をどう解消するかが鍵

静止合成開口望遠鏡（東京大学研究中）

ミラー衛星：46kg 撮像衛星：43kg



	単位	夏期	冬期
GSD	m	30	60
視野	km×km	1,000 × 1,000	2,000 × 2,000
基準観測波長	μm	4 (赤外線)	4 (赤外線)
撮像画素ピッチ	μm	18	18
焦点距離	m	21.5	10.7
合成開口直径	m	5.82	2.91
相对位置制御精度	nm	400	400
相对姿勢制御精度	μrad	0.42	0.84