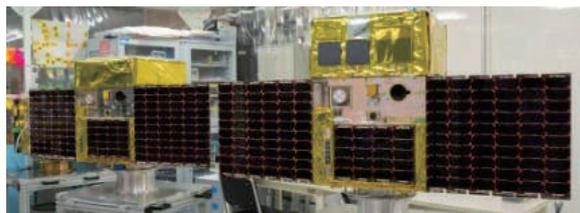
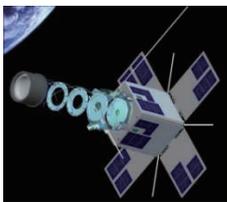




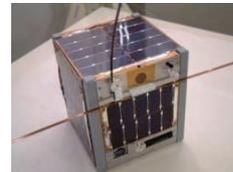
超小型衛星ってどんなサイズ？



マイクロサット: 20-100kg



ナノサット: 1-20kg



ピコサット: 1kg以下

“Lean Satellite” = simple, not luxury

日本の政府衛星

大型衛星

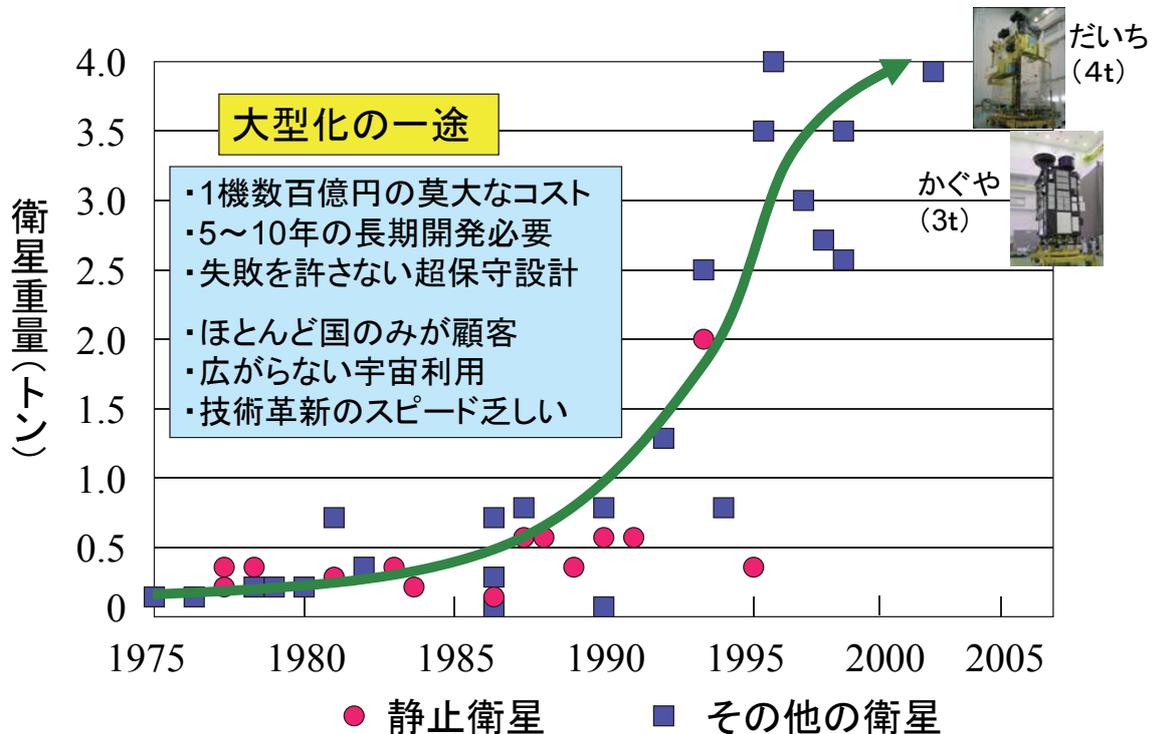
←ALOS-1:4ton Kaguya:3 ton→

中型衛星

ASNARO: 500kg Hayabusa: 510 kg



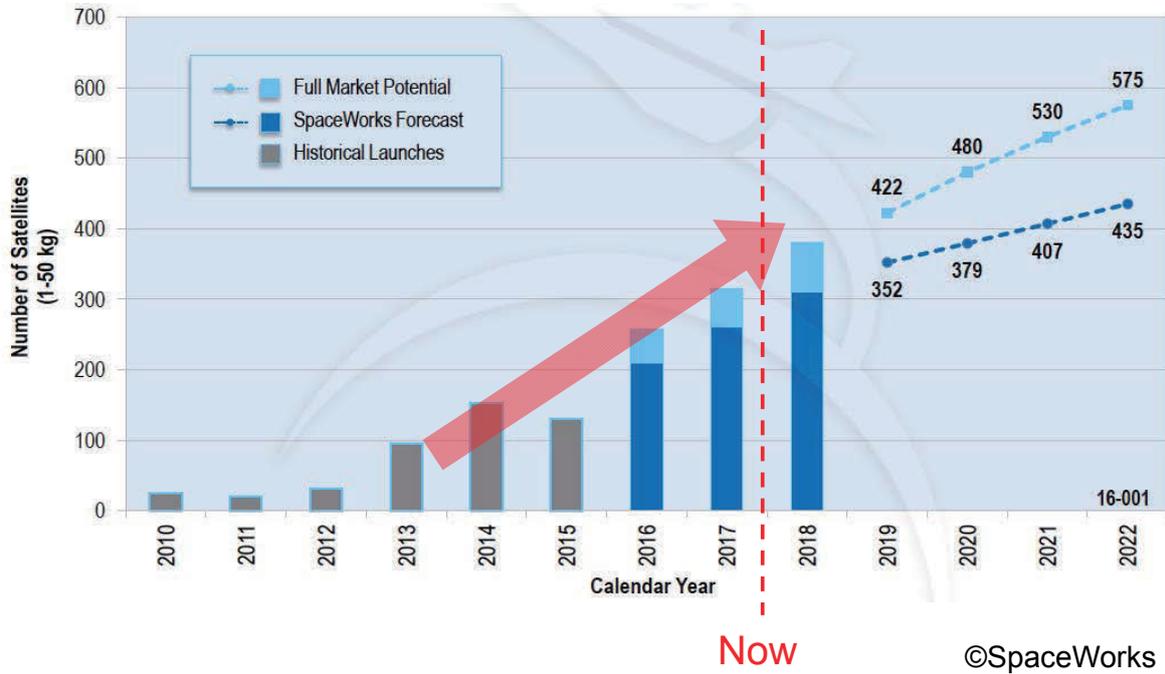
中・大型衛星中心の宇宙開発の課題



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

超小型衛星 (< 50kg) の数の拡大



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・AISSAT-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、一部、中大型の代替に

日本では:2003年革命:超小型衛星登場

東大のCubeSat(1kg世界最小衛星)世界に先駆けての成功(2003.6 & 2005.10)

- 大学レベルの予算での開発
- 開発期間:2年
- 民生品でも約14年半の寿命
- 地上局(屋上のアンテナ)・打上げ手段、周波数調整など自前で

秋葉原部品で



CubeSat XI-IV & XI-V

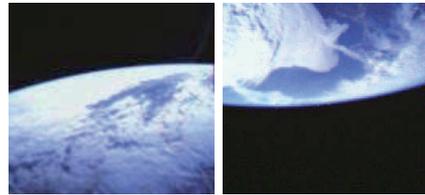


ロシアでの打ち上げ

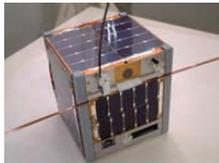
宇宙利用の「しきい」を下げる Breakthrough

- 多くの潜在ミッションが顕在化
- 宇宙産業の可能性
- 実践的教育への活用

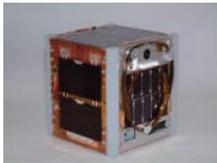
CubeSat による地球画像



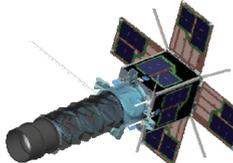
東京大学の超小型衛星プログラム(9機開発、7機打ち上げ)



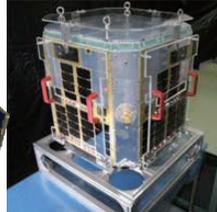
世界初の1kg衛星 成功 XI-IV(2003)



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

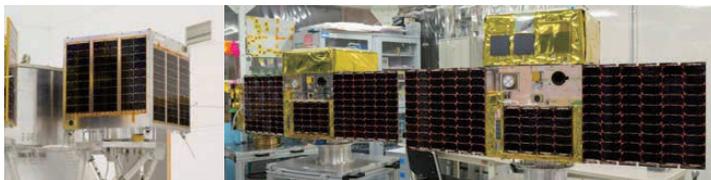
- ・宇宙工学・プロジェクトマネジメント教育題材
- ・従来にない新しい宇宙利用・ユーザの開拓
 - 地球観測・宇宙科学
 - 教育・エンタメ
 - 多数の衛星の連携運用
 - 実験・実証

- ・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 (千葉)

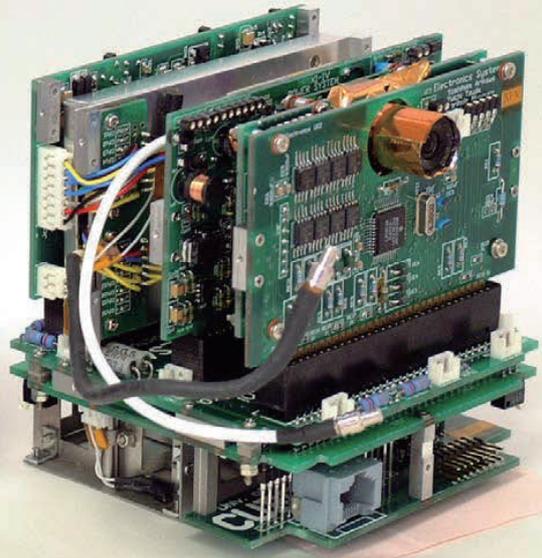
広域画像 (スリランカ)



University of Tokyo's CubeSat Project "XI"

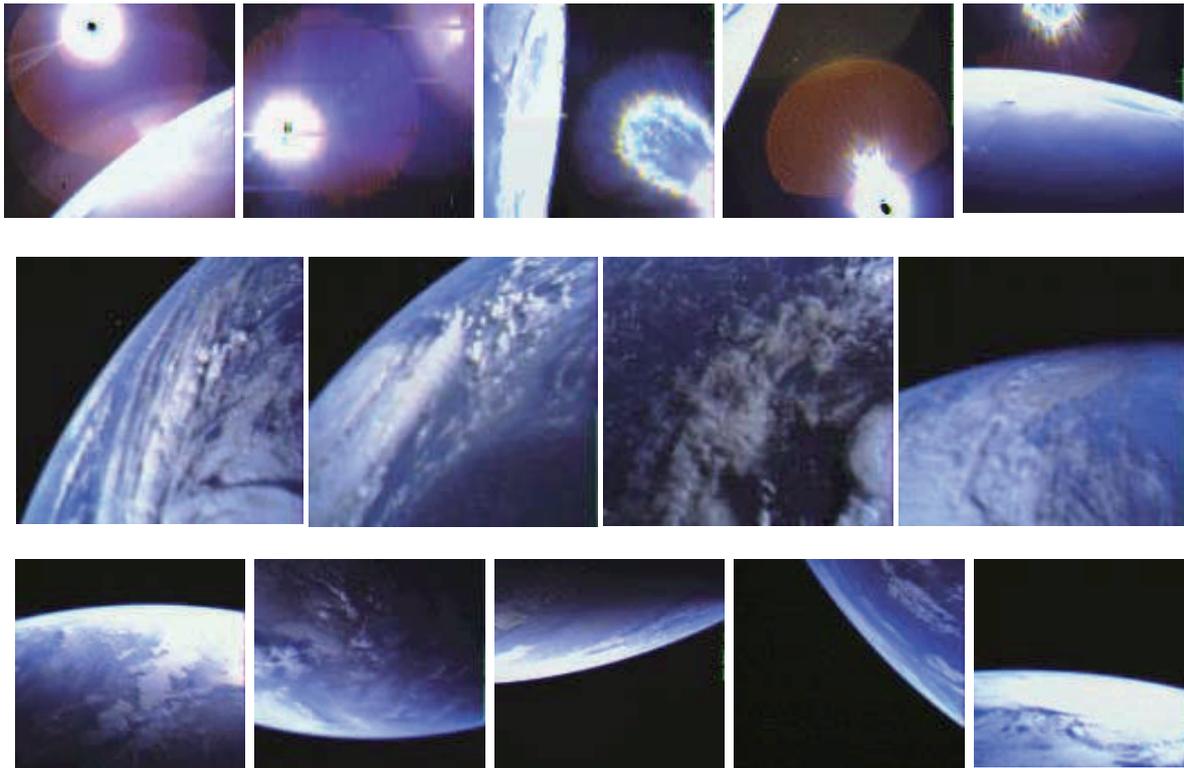


XI-IV(サイフォー) “CubeSat”
2003.6.30打ち上げ



XI-V(サイファイブ)
2005.10.27打ち上げ

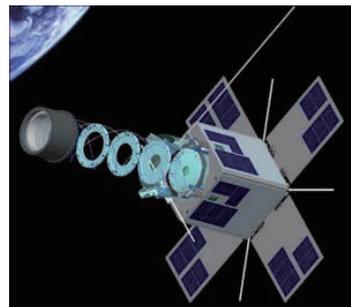
500枚以上の写真を送ってきてくれた！



リモセン衛星PRISM「ひとみ」

○サイズ: 8 kg 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



2009/1/23 H-IIAによる相乗り打上げ成功。現在も動作中

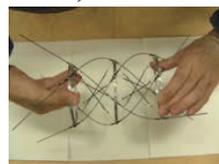


- 伸展式・屈折光学系による高分解能化
- OBC、バス、通信系、制御系高性能化
- 超小型衛星実用化に向けた標準バス

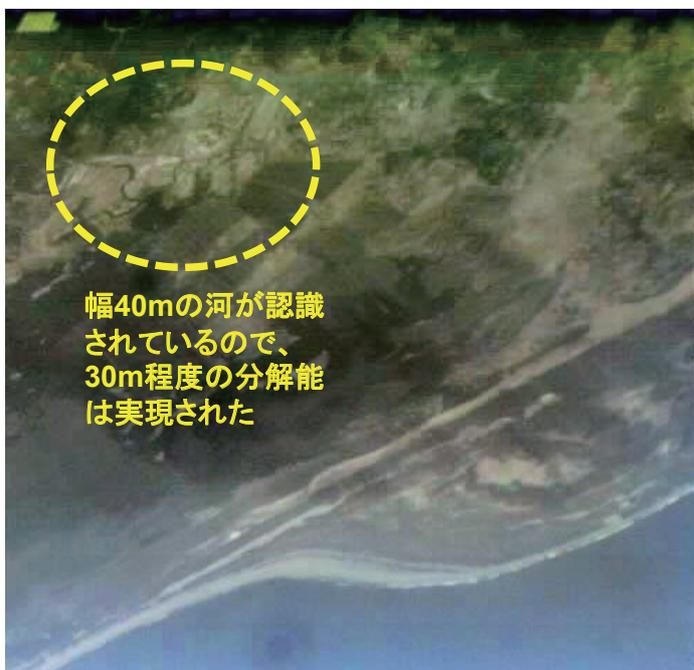
1, 伸展前



2, 伸展中



3, 伸展完了!!



幅40mの河が認識されているので、30m程度の分解能は実現された

2009. 4. 17
メキシコ海岸線

8.5kgの衛星で
30m分解能は当時
としては世界最高

2009. 3月
雲画像

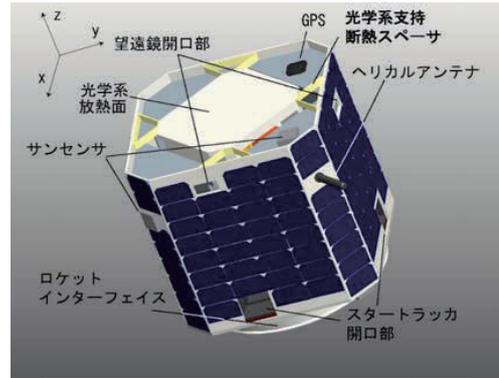


4号機Nano-JASMINE

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)

世界最高レベルの宇宙科学を38kgの衛星で目指す

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

高コストの時には現れなかった潜在需要

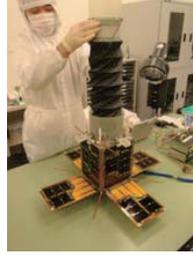
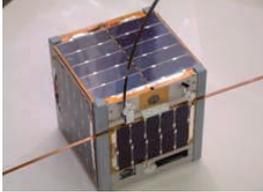
すでに
開発

- -----
- -----
- 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!

超小型衛星実用化へ:「ほどよしプロジェクト」 2010~2014



- ・教育・工学実験が目的:失敗しても勉強
- ・S/N比、通信能力など実用に耐えられない
- ・試行錯誤的開発方法(時に時間かかる)
- ・様々な用途に応える標準化なし。一品生産

30~1000m分解能
10 kbps



- ・実用レベルの性能・信頼性
- ・高性能で小型の機器開発
- ・システムティックな開発手法(こうやれば確実にできる)
- ・衛星機器・ソフト等の標準化(様々な用途に対応)

でも、「高コスト・長期開発」にならない手法を追求



2.5~200m分解能
100 Mbps

ほどよし信頼性工学 (Reasonably Reliable Systems Engineering) (#1)

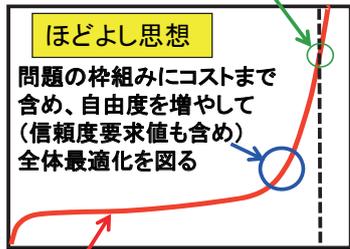
「信頼度設計等の問題設定の枠を広げ、増えた自由度も利用して全体最適を目指す」

超小型衛星への適用 → 宇宙、他分野応用目指す

高い信頼度・性能要求(点線)が外から与えられると、超高コストになる

従来の宇宙開発

コスト・工数



信頼度要求が増えるとコスト・信頼度・性能工数は増える関係

設計戦略例

温度変化の影響を受けにくい光学系(アサーナル・アポクロマティック)



1)衛星の信頼性に真に影響を与えるファクタの見極め

- システム信頼度=設計信頼度 × 設計通りに動作する信頼度 (従来はこれだけ) (これの大小を見積もる手法構築)
- 設計通りに動作する信頼度の指標として、システムの複雑さを表す「コンテキスト数(各機器が動作する環境のパラエティ数)」を導入
- コンテキスト数が伝播し、場合の数が爆発するとシステムは複雑化 ⇒ 設計・製造・試験エラーが急増

2)真の信頼性を高められる設計手法の探究

- 「コンテキスト数を少なくする、その伝播を断ち切る」設計戦術の導出
 - リセット(power off-on)
 - 熱が構造に影響しない設計
 - 姿勢によらない太陽発電確保
 - Under Voltage Control(バッテリー)
 - 最少節点数の熱設計
 - 軌道上システム再構成能力,等

3)開発プロセスにおける信頼性維持手法の探究

- (「プロセスアプローチ」)
- 開発資源(人的含む)全体を見ての最適配分の検討:目的を明確化
 - デザインレビュー会
 - 文書管理
 - 試験の最少化
- 外部企業とインターフェースを切った契約は自由度を妨げてしまう
 - 同一の開発チームとして協働 (SSTL, SpaceX等の成功例)
 - 顧客とも共同で目標性能・信頼度設定(自由度が増える)
- 個々のプロジェクトではなく継続したプログラムレベルでの信頼性管理
 - メインCPUの裏で次世代CPUの試験
 - 標準化で実績数を稼ぐ

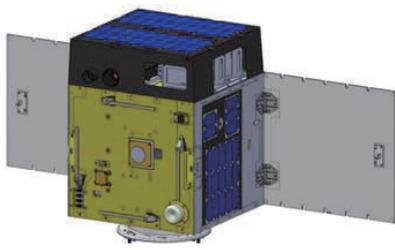
衛星コスト・サイズ比較とコスト低減の要因

	衛星開発コスト	衛星重量	地上分解能(GSD)
• SKY-Sat	30億円/機	120kg	約1m
• ASNARO	60億円/機	450kg	約50cm
• RapidEye	7億円/機	150kg	6.5m
• Hodoyoshi-4	3億円/機	60kg	6m

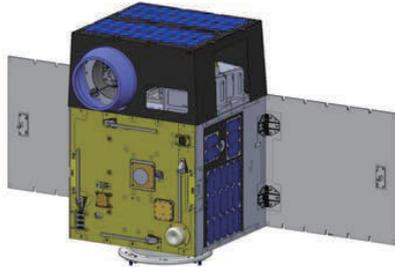
- 部品・機器: 1.2億 人件費: 1.4億 試験費等: 0.3億
- 宇宙価格でないサプライチェーン構築 (5億⇒1.2億)
- ほどよし設計・開発 (設計方法論 + 無駄な試験やレビューの廃止で工数削減: 14人⇒7人、4年⇒2年)
- 低コスト試験設備と最小限の試験 (2億⇒0.3億)

衛星開発現況 ～ほどよし3,4号～

ほどよし3号



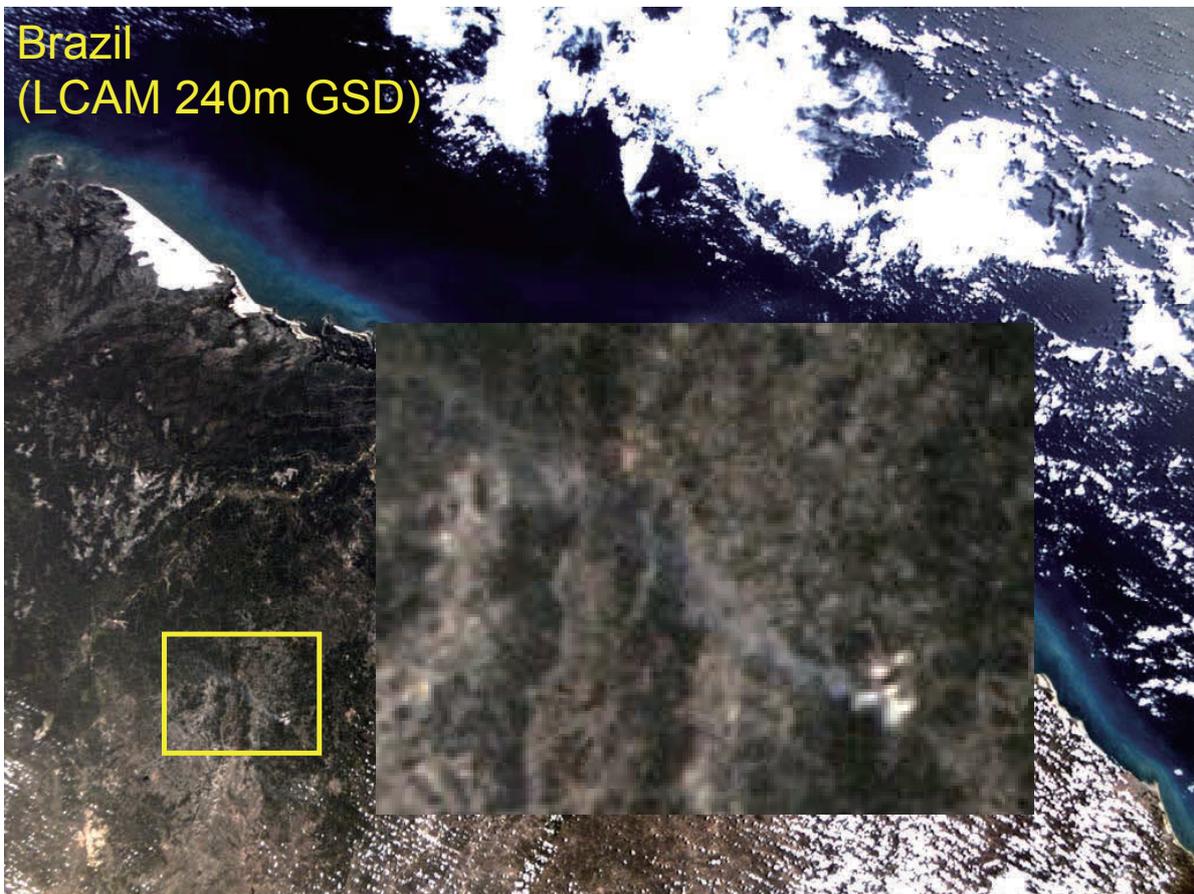
ほどよし4号



バス機器、構造、ソフト等の標準化を追求

	ほどよし3号	ほどよし4号
寸法	0.5×0.5×H0.65m	0.5×0.6×H0.7m
重量	60kg	66kg
運用軌道	高度約600km 円軌道 太陽同期、降交点地方時10時～11時	
姿勢制御	地球指向3軸制御	
電力	太陽電池: 2翼固定パドル+ホールドイマウント5面。 発生電力: 最大約100W 消費電力: 観測時平均: 約50W 28V非安定バス。一部5Vバスも供給 蓄電: 5.8AHリチウムイオンバッテリー	
通信	テレメトリ・コマンド: Sバンド コマンド: 4 kbps、テレメトリ: 4/32/64 kbps ミッションデータリンク: Xバンド10Mbps (4号機は100Mbpsも実験)	
軌道制御	デオビット用 H ₂ Oスラスタ	実験・デオビット用 イオンエンジン
ミッション	中分解能光学カメラ GSD: 40mと240m	高分解能光学カメラ GSD 6m級 機器実証 高速X帯送信機 イオンエンジン
	Store & Forward, 機器搭載スペース 2機のヘテロ・コンステレーション	

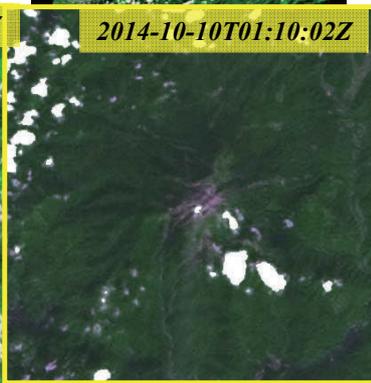
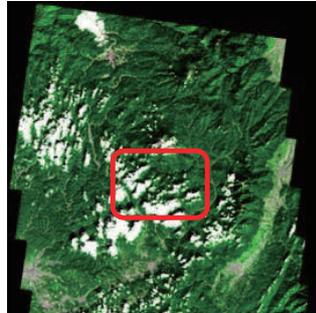
2014年6月20日にDNEPRロケットで打上げ成功



MCAM:災害監視への利用

広島土砂災害後の観測

- 広島・安佐南区を中心とする土砂災害警戒区域・特別警戒区域
- 2014年8月から土砂崩れ後の様子をモニタするために定期的に撮像を行った。晴天画像取得は10月19日から。
- 災害直後は雲に阻まれ撮像失敗、後日取得に成功



御嶽山噴火後の観測

- 2014年9月27日に噴火した御嶽山
- 噴火直後の観測には間に合わず、その後も雲に遮られたが、10月10日に初観測
- 噴火前後の纏まったデータ取得はできなかったが、定期観測ポイントに設定し、観測を続けている
- 国内でのその他の噴火危険箇所等も定期観測ポイントに設定

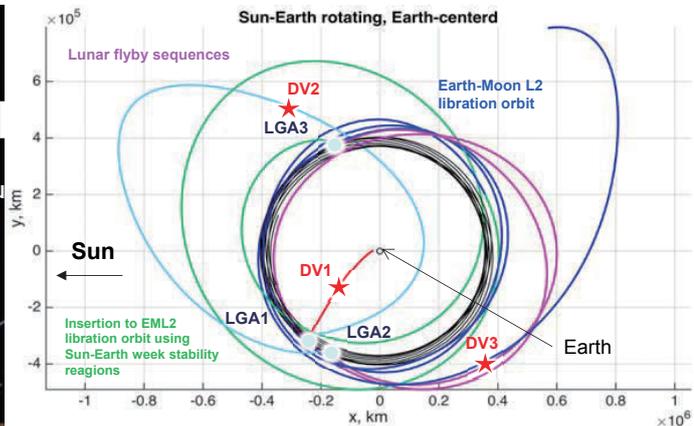
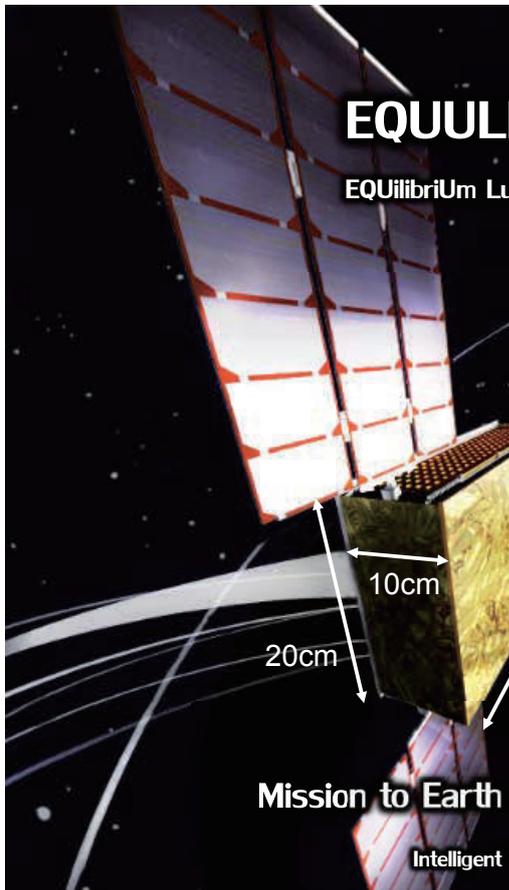
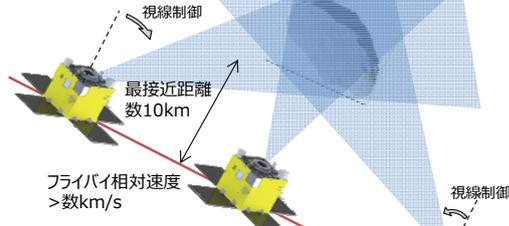


世界初の超小型深宇宙探査機「PROCYON」(58kg) (PROximate OBJEct CLOSE flYby with OPTIcal NAVIgation) 2014.12 打上げ(H-IIA、はやぶさ2と相乗り)



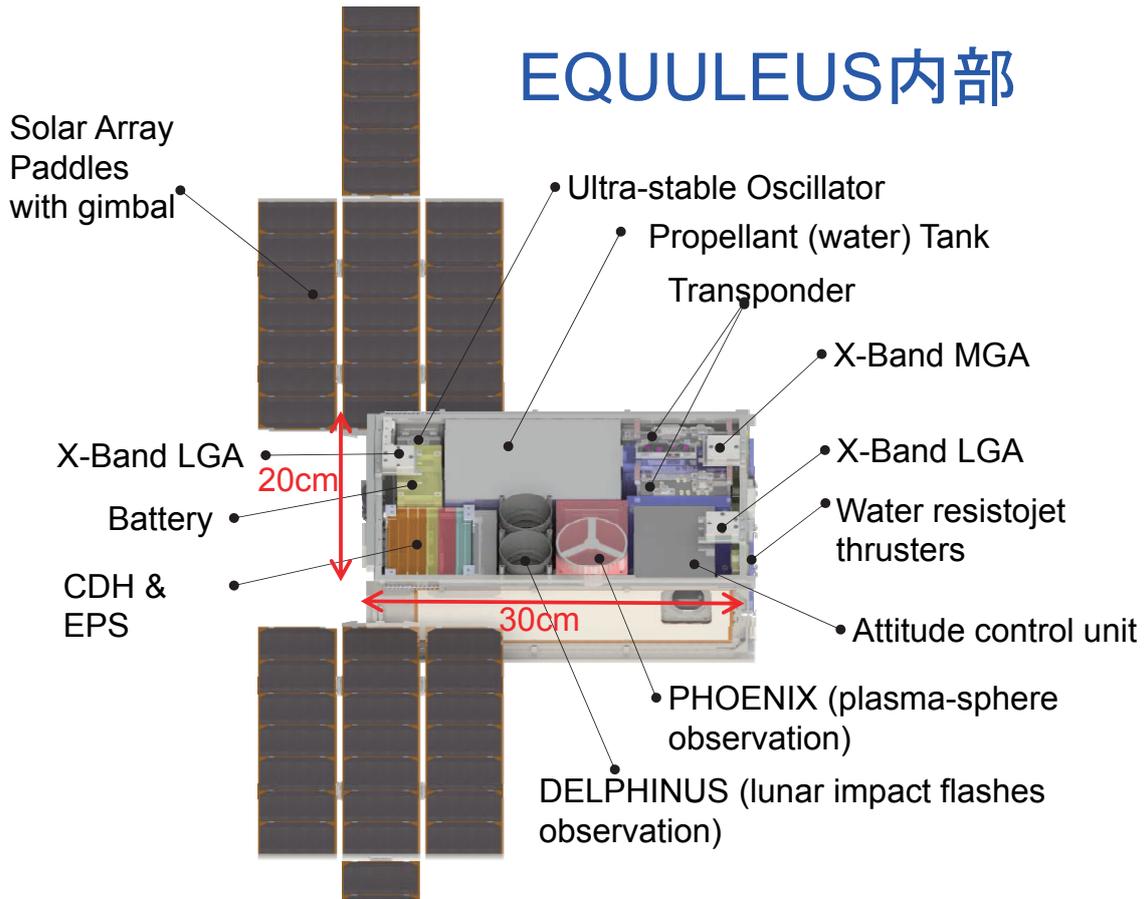
<小惑星に対する超近接・高速フライバイ観測の概要>

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。



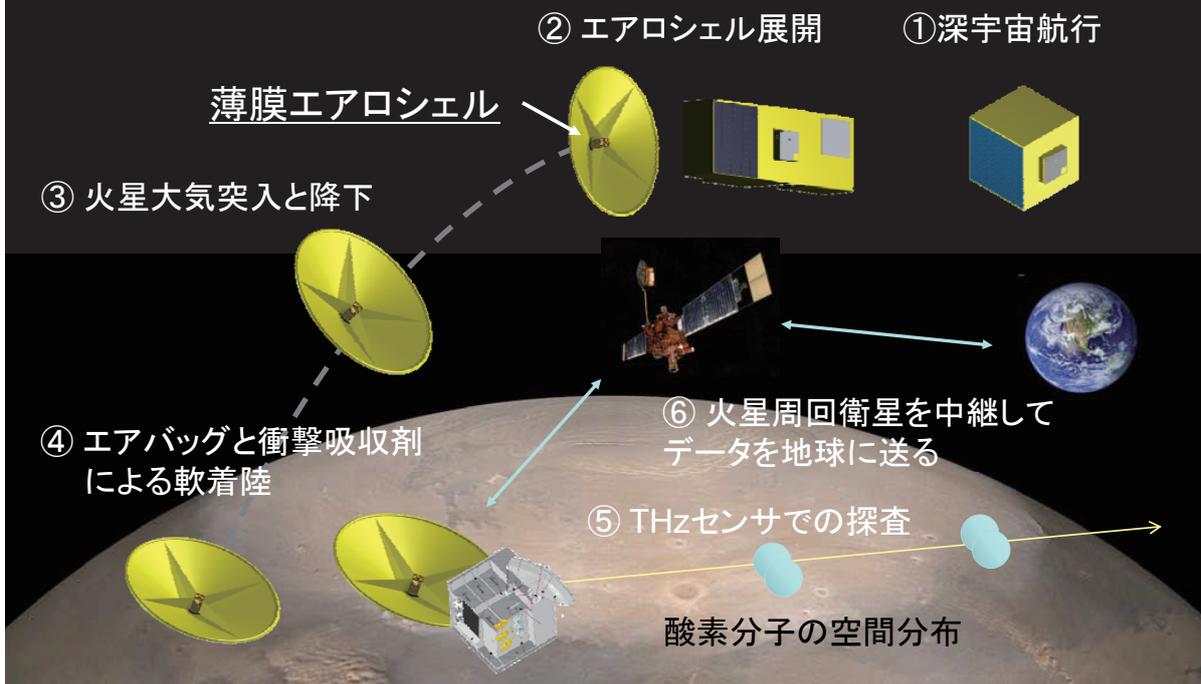
Mission to Earth Moon Lagrange Point

Intelligent Space Systems Laboratory, 2016/08/01

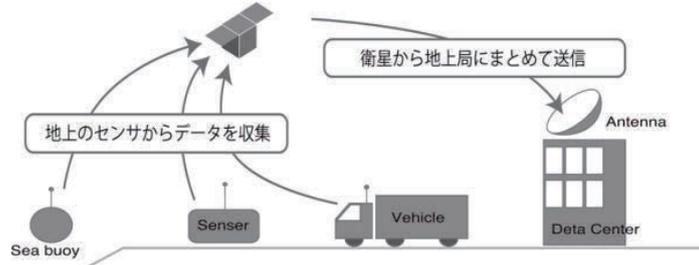


超小型衛星による(日本初の)火星着陸計画

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年7月打ち上げ予定



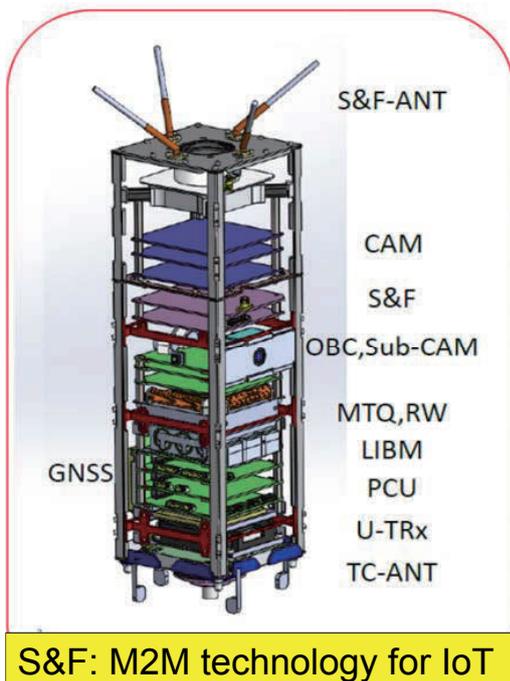
S&F: 地上からの情報を集める耳



- 地上や海上、車などに置いたセンサーが地上で何らかのものを計測し、そのデータを衛星が集めて、地上局にダウンリンクする方式
- 「地上で何を計測するか」がカギ
 - 水質、水位、土壌、環境(CO2、ガス等)、車の移動履歴(渋滞が分かる)、船の航路(海流がわかる)、地面の移動(地震予知)、など
 - 携帯電話の通らないところ、危険地域など優位性高い

3U CubeSat “TriCom-1R”

- 地上からの弱電波の受信機を搭載 -



Items	Values	Miscellaneous
Size	10x10x30cm	3U size
Weight	< 3kg	
OBC	"Bocchan"board	Internal made
Power (average)	4W	AZUR GaAs cell
Battery	Li-Ion 41 wh	LIBM
Downlink (H/K&data)	W 1.2kbps	460MHz AFSK "U-TRx"
Uplink(H/K)	50W 9600bps	401MHz
Attitude	Simple 3 axis	B-dot law only
RF Receiver	20mW RF power from ground	920MHz no license required
Actuators	magnet torquer despun wheel	"MTQ" "RW"
Camera	GSD 314 m VGA @180km	"CAM"
Sub-Camera	GSD 67 m @600km	Five "Sub-CAM"

S&F: M2M technology for IoT

S&F用弱電波受信機(20mW級)

Item	Specification
bit rate	100 bps, maximum 8 channels in parallel
Transmission duration	< 300 sec
Transmission power from ground	20 mW
Frequency band	920 MHz (no license of usage is required if using 20mW power)



SS520-4
2017年
1月15日
8:33 am

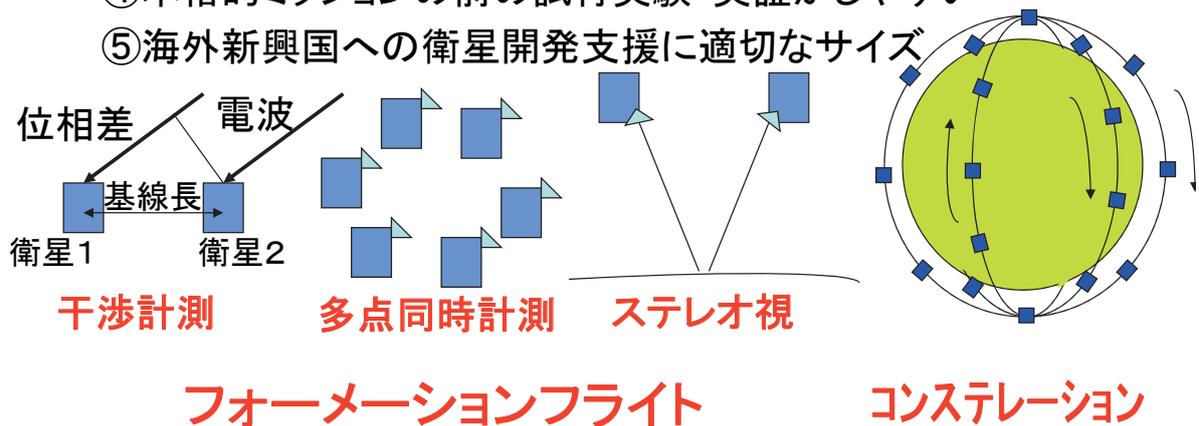


2018年
2月に
SS520-5
で再チャレンジ!

超小型衛星における 産官学連携

超小型衛星が得意なこと

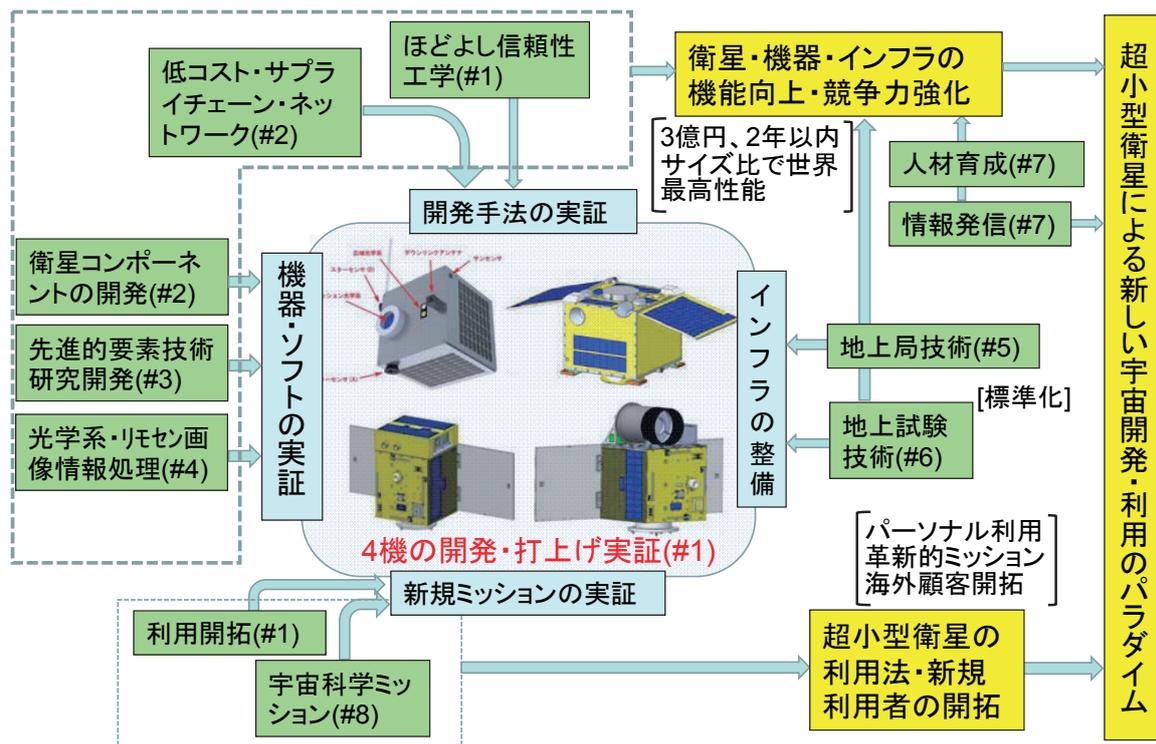
- コスト(<3億)、開発期間(<2年)の爆発的な低下により、「しきい」を根本的に下げる。
 - ①地球規模で衛星を分散配置し頻繁に見る(コンステレーション)
 - ②そばを飛ぶ複数機による共同ミッション(フォーメーションフライト)
 - ③パーソナル衛星、マイ衛星の概念(パソコンと同様の革命)
 - ④本格的ミッションの前の試行実験・実証がしやすい
 - ⑤海外新興国への衛星開発支援に適切なサイズ



超小型衛星における 産官学連携の方向性

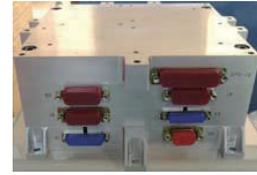
- 衛星を何に使うか(上流)から衛星開発,運用,データ利用(下流)までのさまざまなフェーズ
 - ミッションアイデアの創生と衛星への落とし込み
 - 衛星のコンポーネントや部品
 - 衛星開発・地上試験
 - 衛星の打ち上げ
 - 衛星の運用
 - データ利用と社会への適用
- **大学、企業連携、ベンチャー会社立ち上げ等**を適材適所に実施し、政府はスポンサー・顧客に

ほどよしプロジェクト:研究開発の全体像



開発した機器・要素技術の例

- 放射線に強い超小型高性能オンボード計算機
 - 再利用可能・開発容易なソフトウェアアーキテクチャ
 - 2.5~200m分解能の小型高性能光学系(カメラ)
 - 50kg級衛星搭載用としては世界最高性能(2.5m)
 - 高精度光学系の標準化: 2.5m~5mは共通設計
 - ミッション系の高速データ処理装置
 - 高速(>500Mbps)少消費電力Xバンド送信機
 - ストア&フォワード微弱電波受信機
 - 超小型電気推進器(イオンエンジン)
 - 超小型姿勢制御用機器
 - 光ファイバジャイロ、リアクションホイール、磁気トルカー
 - デブリ化防止機構(膜展開方式)、など
- 177社サプライチェーンで、機器が国内で手に入る
- 宇宙をやっていない企業に「宇宙を教え」、低価格を実現



JPLのCubeSatイニシアティブ



<https://www.jpl.nasa.gov/cubesat/info.php>

Technology	Selva* and Krejci, 2012	Freeman 2017	Justification
Atmospheric Chemistry Instruments	Problematic	Feasible	PICASSO, IR sounders
Atmos Temp and Humidity Sounders	Feasible	Feasible	
Cloud Profile and rain radars	Infeasible	Feasible	JPL RainCube Demo
Earth Radiation Budget radiometers	Feasible	Feasible	SERB, RAVAN
Gravity Instruments	Feasible	Feasible	Need a demo mission
Hi-res Optical Imagers	Infeasible	Feasible	Planetlabs
Imaging microwave radars	Infeasible	Feasible	Ka-Band 12U design
Imaging multi-spectral radiometers (Vis/IR)	Problematic	Feasible	AstroDigital
Imaging multi-spectral radiometers (μ Wave)	Problematic	Feasible	TEMPEST,
Lidars	Infeasible	Feasible	DIAL laser occultation
Lightning Imagers	Feasible	Feasible	
Magnetic Fields	Feasible	Feasible	
Multiple direction	Feasible	Feasible	
Ocean color inst	Feasible	Feasible	
Precision orbit	Feasible	Feasible	CanX-4 and -5
Radar altimeters	Infeasible	Feasible	Bistatic LEO-GEO
Scatterometers	Infeasible	Feasible	GPS refl. (CyGNSS)

・CubeSat導入により「やらざるを得ない小型化」により小型化できなかったものが小型化できるようになる
 ・アメリカ政府の継続的資金投入は脅威！



ベンチャーの活用: ほどよし1号



Mission: Earth Remote Sensing (6.7m GSD, 4 bands: RGB & NIR)
Developer: AXELSPACE, University of Tokyo, NESTRA
Launch: DNEPR launch on November 6, 2014

Size	about 50 [cm-cubic]
Weight	60 [kg]
OBC	FPGA
Communication	UHF, X (10-20 Mbps)
Average power	50 W
Attitude control	3-axis stabilization with STT, SAS, Magnetometer, Gyros, RW, Magnetic torquers
- stability	0.1 deg/sec
- pointing accuracy	5 arcmin
- determination	10 arcsec
Optical sensor:	15kg, 6.7m GSD (500km alt.)
- Focal length	740mm (F# 7)
- Swath	27.8 x max 179km (500km alt.)
- Bands(SNR)	B(57), G(74), R(80), NIR



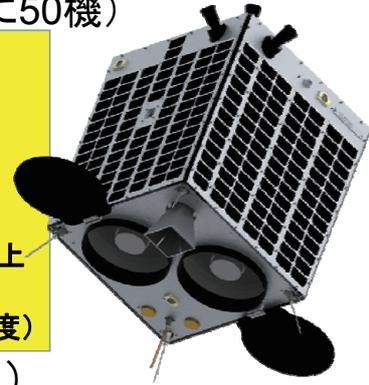
Optical Camera (6.7m@500km) developed by Genesia Corporation



ベンチャー会社AXELSPACEの近況

- GRUS (2018年3機打上げ、2022年までに50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の打上げ成功 (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) 200m (緑/パナクロ)

SAR衛星開発のImPACTプロジェクト

災害等の緊急時対応に高い効果を発揮するオンデマンド即時観測

解決すべき社会的課題等

自然災害の発生等の緊急対応をするためには、周辺領域を含めた状況の把握が必要であるが、現在は情報収集が十分であるとは言いがたい。国民の安全をより確かなものとするために、**雨天・強風・夜間**でも、自然災害等の**緊急対応時に、被災地周辺領域を含めた**状況を速やかに把握可能とすることが必要である。

災害状況把握のリクエストから
即時に衛星打上げ・観測を実施



光学カメラでは実現不可能な
全天候対応・昼夜問わない観測が可能

オンデマンド即時観測 が可能な 合成開口レーダ 衛星システム

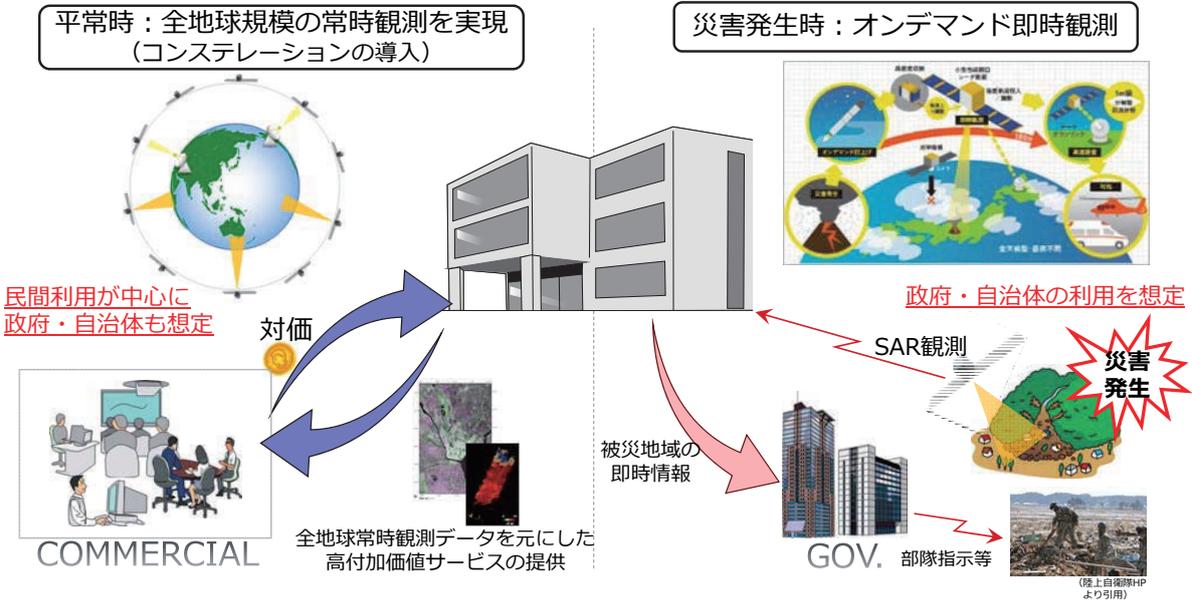


ImPACT終了後の出口構想



大学と強く連携した利用企業、開発企業を準備中

全地球規模の常時観測システムとオンデマンド観測と組合わせた利用



- ▶ 平常時は全地球規模の常時観測データを民間利用することにより出口戦略を強化
- ▶ 事業主体は民間として、官民双方を顧客としたビジネス化を志向

人工知能分野の取り込みで利用拡大

- リモセンの画像とそのとき地上はどうだったか (Ground Truth) の関係が学習できる
 - これまでリモセンの経験者・専門化が要った
 - 自動的な相関関係の抽出が可能に
 - 鉱脈 vs. 広域の地形情報・詳細な土質(ハイパ)情報
 - 収穫予測 vs. 農地の時期ごとの観測データ
 - ある作物に適した土地 vs. ハイパのデータ, etc.
- 何が必要か？
 - どんな情報がお金になるか、とそれに(多少なりとも)関係したデータはどんなものか、の知識(最重要！)
 - IT技術(学習エンジンなど)と扱える人
 - Free(or低価格)のリモセンデータ、計算ツール

海外への教育衛星開発が新しい市場に (MIC:33, CLTP: 25 カ国) 合計約50カ国との連携

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



- ベトナム技術者36名受け入れで50kg衛星開発中(ほどよしバス適用、ODA)
- カザフスタン、チリ、フィリピン、タイ、ルワンダ等と相談中、留学生希望多数

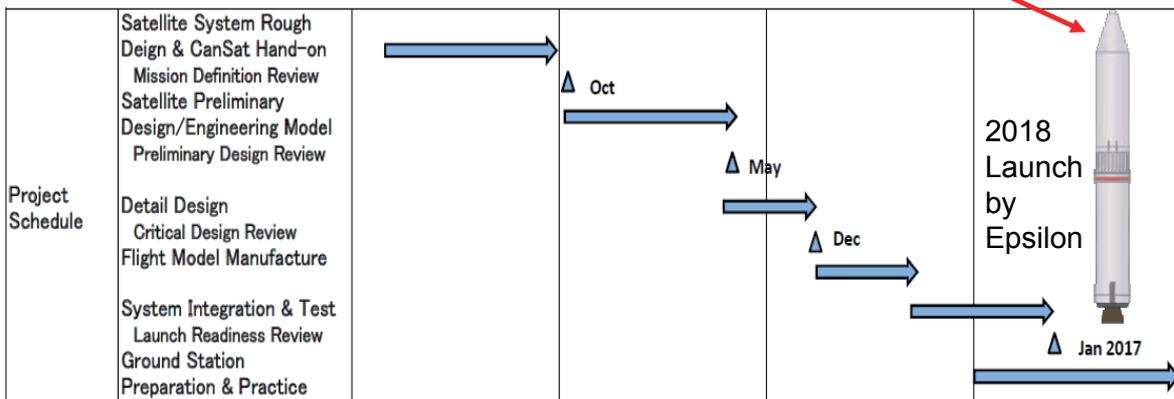
“MicroDragon” プロジェクト 教育支援の50kg衛星開発中

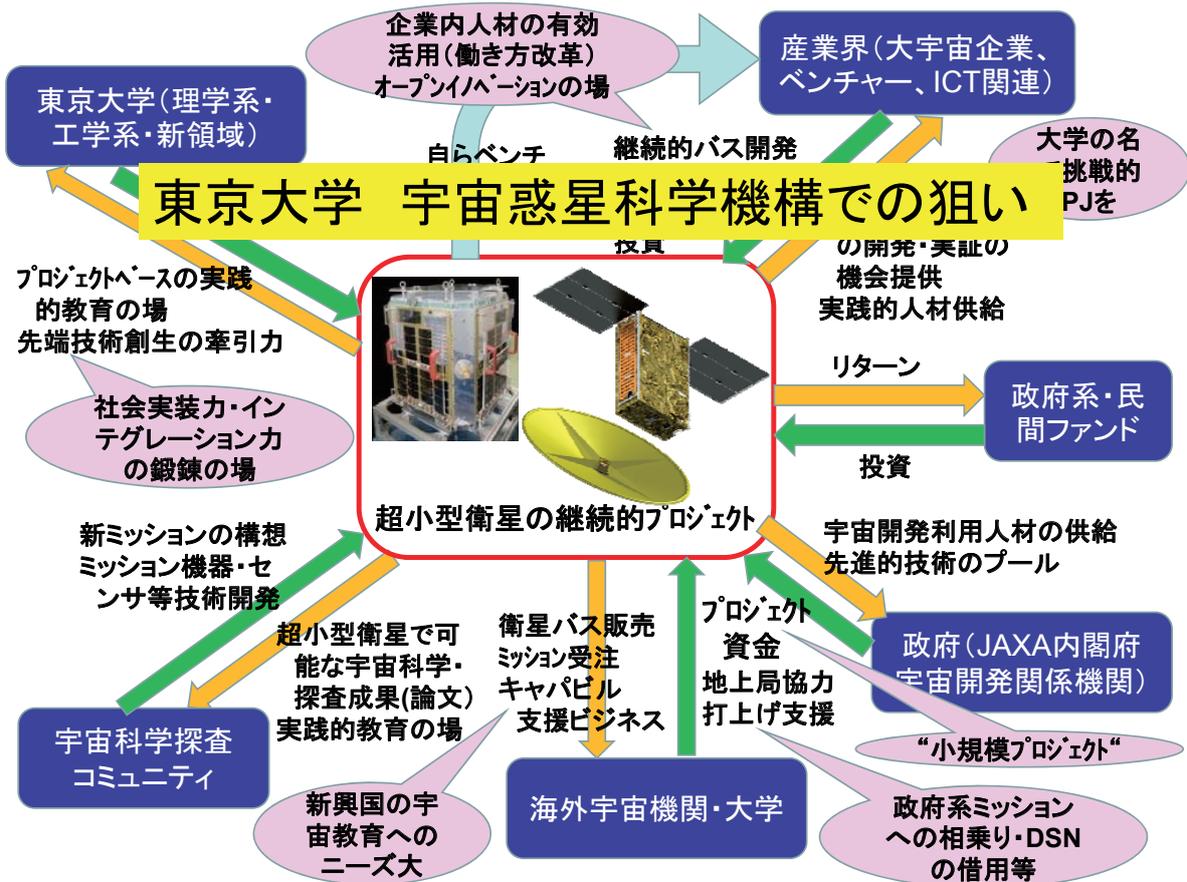
- 36名の技術者が5大学に分かれて修士課程で勉強しながら衛星開発



The University of TOKYO

1st Academic Year	2nd Academic Year	3rd Academic Year	4th Academic Year
2013/10-2014/9	2014/10-2015/9	2015/10-2016/9	2016/10-2017/9





超小型衛星を核としたエコシステム

- JAXA・政府の役割
 - 打ち上げ機会 (ISS放出、ピギーなど)、各種の法整備
 - 技術の戦略的で継続的な開発 (NASA-JPLの戦略参照)
 - アンカーテナンシー (定常的なサービス購入)
- 産業界の役割
 - 低コストサプライチェーンの維持 (数が必要だが可能！)
 - 経験者は技術・利用に関するベンチャーのメンターに
- 大学の役割
 - 技術や利用のアイデアを創出・延ばす
 - 人材育成 (技術・利用・データ処理、国際連携、商売---)
 - 国際ネットワークによる海外連携の最初の入り口
 - 実際に衛星を作り、宇宙実証・利用・ビジネスを進める：
→ベンチャーを創出し、民間資金を呼び込む！