



世界で起こった100kgまでの衛星による宇宙開発革命!

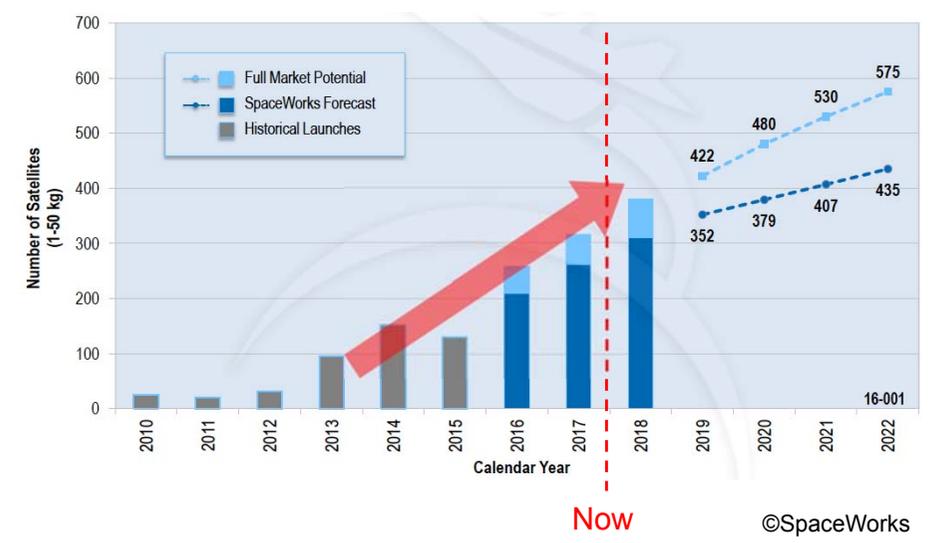
教育衛星 (大学・高校) OPUSAT (1U: 1kg) XI-IV (1U: 1kg)	リモートセンシング AeroCube (1.5U: 2kg) Dove, Flock (3U: 4kg)	宇宙望遠鏡 AAReST	気象観測 MiRaTA (3U) MicroMAS (3U)	バイオ実験衛星 BioSentinel計画案 (6U) SPORESAT (3U: 5.5kg)	Re-entry De-Orbit 再突入回収 (3U) Sunjammer
ランデブー / ドッキング衛星 INSPIRE (3U)	通信衛星 (低速・高速・戦域) 高速通信・ISARA (3U) 低速通信・AISSAT-1 (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



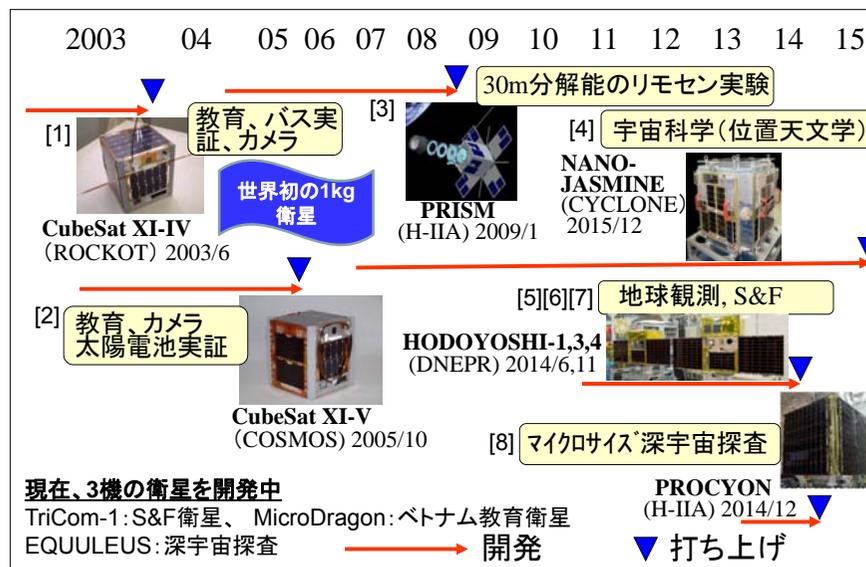
COSPAR Symposium('17.9 濟州島)での世界の超小型衛星状況(科学探査分野)

- アメリカ政府の超小型衛星への投資、発展すごい！
 - CubeSatもハイエンド(3U、5kgで2億円~5億円)
 - 気象、地球・大気観測、宇宙天気、宇宙科学、深宇宙探査など、できるものはどんどんCubeSat化
 - バスだけでなく、超小型のセンサーが多数できつつある
 - NASA+大学、ベンチャーの組み合わせ多数
 - 標準化、規格化によってやがては安価な世界を期待
- ヨーロッパはとてもHesitate
 - メリットが見出し得ていない。大学・ベンチャーも育てていない。打ち上げ支援もない。教育目的から脱していない
- 日本はCubeSatは今一、マイクロサットでは世界トップ
 - 東大が健闘。数は多いが成果問題。打ち上げ支援大きい



東京大学の超小型衛星

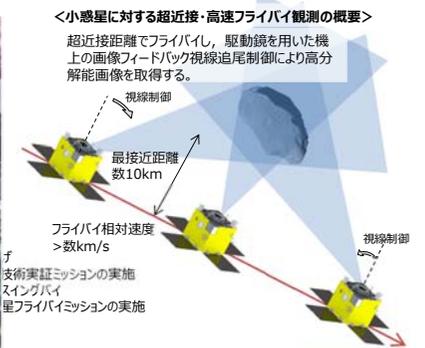
8 衛星開発済み、7機打上げ済み、3機開発中



世界初の超小型深宇宙探査機「PROCYON」(58kg)

(PROximate OBject CLOSE flyby with OPtical NAVigation)

2014.12 打ち上げ(H-IIA、はやぶさ2と相乗り)



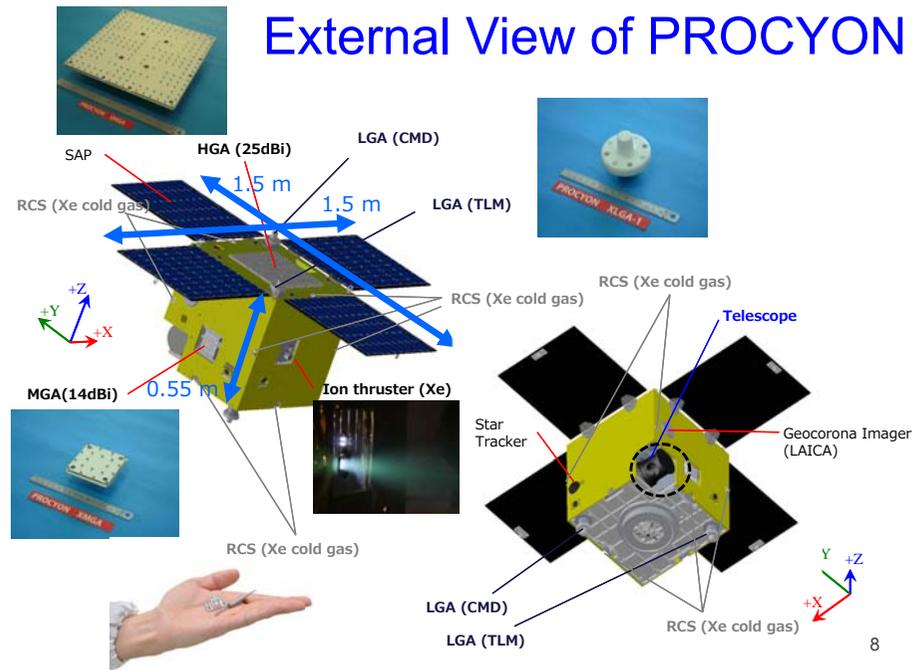
2. 深宇宙探査技術の実証

- (アドバンスなミッション：加対象ミッション)
- 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
- 深宇宙での超長基線電波干渉法による航法
- 小惑星に対する電波・光学複合フライバイ航法
- 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

- ジオコナ (地球コロナ) 撮像

External View of PROCYON



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

2015/11/08 @ 11,000,000 km away

2015/11/16 @ 8,000,000 km away

2015/11/18 @ 6,800,000 km away

2015/11/23 @ 5,200,000 km away

2015/11/29 @ 3,300,000 km away

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GaN(>30%)を使ったSSPA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
EQUilibrium Lunar Libration

Sun-Earth rotating, Earth-centered

Lunar flyby sequences

Earth-Moon L2 libration orbit

Insertion to EML2 libration orbit using Sun-Earth week stability regions

10cm, 20cm, 30cm

Mission to Earth Moon Lagrange Point

Intelligent Space Systems Laboratory, 2016/08/01

EQUULEUS Spacecraft Overview

Space Science Missions

Solar Array Paddles

Sun Sensor

Extra Ultra Violet Plasma Imager

Lunar Impact Flash Camera

Thrusters

Star Tracker

Low Gain Antenna

Solar Array Panel (Before deployed)

20cm

10cm

30cm

6U size = 6 x CubeSat

DELPHINUS(DLP)
Lunar Impact Flash Observation

PHOENIX
Extreme Ultra-Violet Camera to Observe Plasmasphere

6Uのサイズに如何に詰め込むか!
(推進系、通信系+アンテナ、姿勢制御系----)

Inside of EQUULEUS

Solar Array Paddles with gimbal

Ultra-stable Oscillator

Propellant (water) Tank

Transponder

X-Band MGA

X-Band LGA

Water resistojet thrusters

Attitude control unit

PHOENIX (plasma-sphere observation)

DELPHINUS (lunar impact flashes observation)

X-Band LGA

Battery

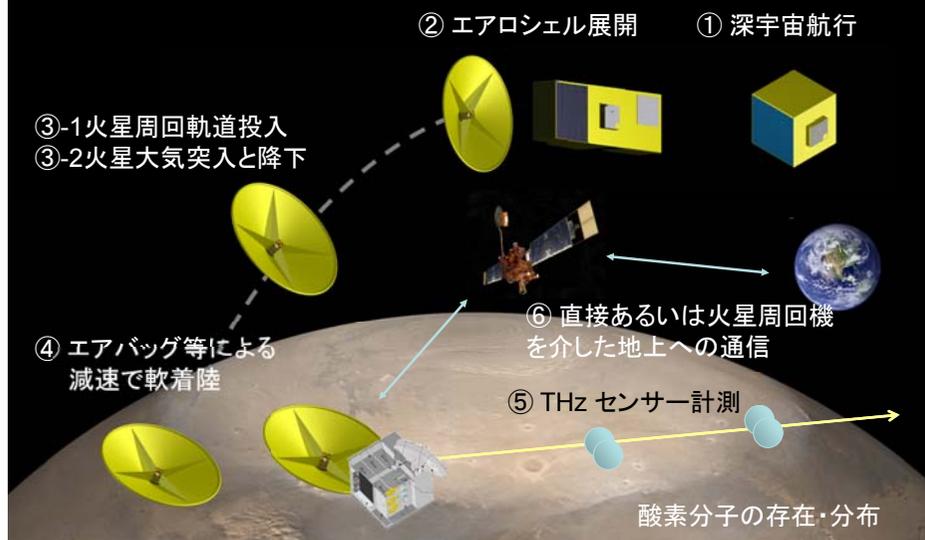
CDH & EPS

20cm

30cm

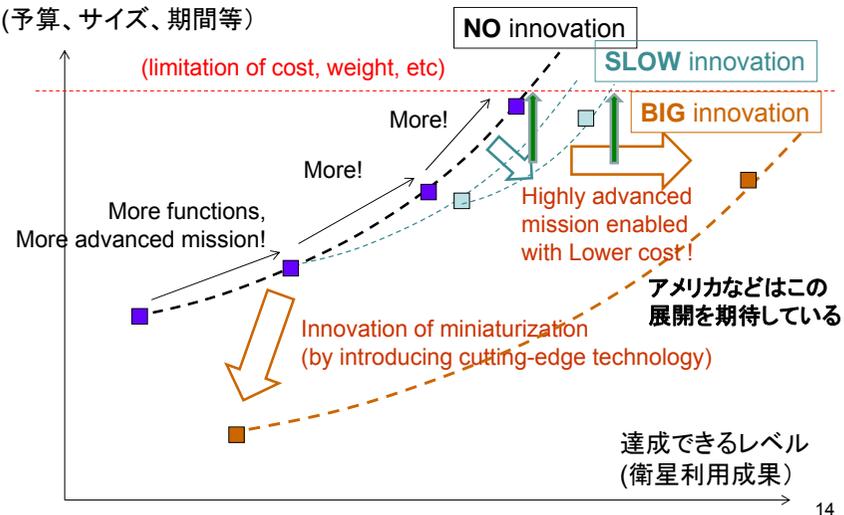
マイクロ火星探査計画(オービター+ランダー)

インフレーターブル Aeroshellsによる周回軌道投入と大気突入



超小型衛星でイノベーションを目指す道

必要リソース
(予算、サイズ、期間等)



ほどよしプロジェクトのその後

世界トップ水準の超小型衛星(50kgクラス)を低コスト(3億円以下)、短期間(2年以内)で開発・運用できる土台を構築し、世界に先駆けてその効果的な利用を開拓すること

1. 超小型衛星に適した「ほどよし信頼性工学」や試験手法を含めた開発プロセスの構築(サブテーマ1, 6)
2. 開発を支える国内のサプライチェーンネットワークの構築と人材育成(サブテーマ2, 7)
3. サイズ比の性能が世界レベルの要素機器や先進的地上局の研究開発(サブテーマ3, 4, 5)
4. 従来にない新しい宇宙利用法と利用コミュニティを開拓し、衛星開発・利用産業につなげる(サブテーマ1, 8)

技術開発等の成果を搭載した「ほどよし1, 3, 4号機」が2014年打ち上げられ軌道上実証が進み、「実用化元年」。政府の認識も進む。2017年は次のステップである「超小型衛星ビジネス化元年」





企業開発した機器・要素技術リスト(#1,2,3)

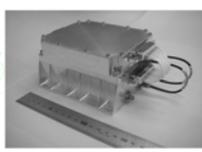
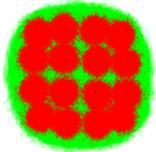
- 放射線に強い超小型高性能オンボード計算機 7台すでに打ち上げ
- 再利用可能・開発容易なソフトウェアアーキテクチャ 4衛星+博士論文に“C2A”
- 2.5~200m分解能の小型高性能光学系(カメラ) 2.5mまで技術獲得
 - 50kg級衛星搭載用としては世界最高性能(2.5m)
 - 高精度光学系の標準化: 2.5m~5mは共通設計
- ミッション系の高速データ処理装置
- 高速(最大500Mbps)省消費電力Xバンド送信機 510Mbpsまで成功
- ストア&フォワード微弱電波受信機 20mW改造型がTriCOM-1Rで実証予定
- 超小型電気推進器(イオンエンジン) PROCYON深宇宙機で利用
- 超小型姿勢制御用機器 放射線でやられ、強化。MDGで実証
 - 光ファイバジャイロ、リアクションホイール 20台軌道上実証済み
- デブリ化防止機構(膜展開方式)、など
 - ほぼすべての機器が国内で手に入る状況に
 - 低コストを維持し、販売し続けられるサプライチェーン実現



開発技術例1:省電力500MbpsのXバンド送信機

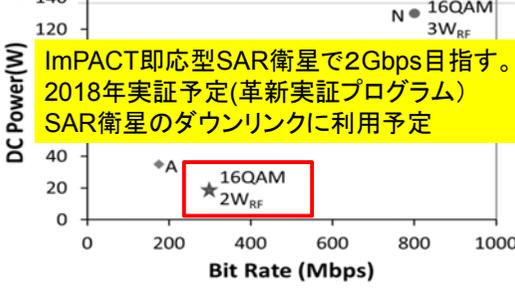
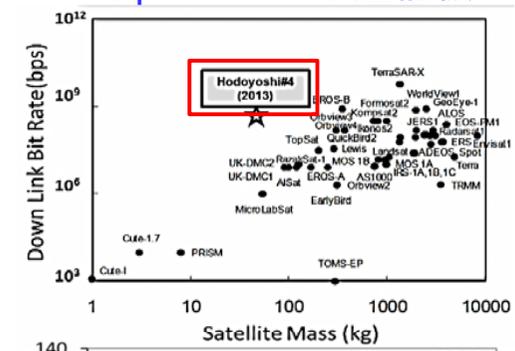
・大型衛星並みの300 Mbpsを超える高速で観測データをダウンリンクできる、省電力な小型送信機と地上受信システムを宇宙科学研究所と共同開発

・230Mbpsの通信実験が実証できた。今後、320Mbpsの通信実験を予定している。



左) ほどよし4号衛星から送信され、宇宙研3.8mアンテナで受信された230Mbps(100Mpsps), 16QAMコンステレーション。

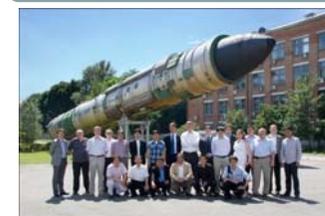
右) 1.3kg 120×120×73 20W



ImPACT即応型SAR衛星で2Gbps目指す。2018年実証予定(革新実証プログラム) SAR衛星のダウンリンクに利用予定

インフラの整備も完了し実利用中(#1,5,6)

打ち上げロケットの機会獲得



地上局・運用管制局

- H-IIA
 - Epsilon
 - DNEPR
 - ROCKET
 - PSLV
 - Space-X
- C/Xバンドパラボラ、UHF/Sバンド通信装置整備
 - 九州大学(2.4m)、大樹町(3.8m)アンテナ
 - 地上局をネットワーク化・運用手法の整備



地上局アレンジ会社設立(倉原)

地上試験施設

九工大・早大に地上試験拠点化

国際標準化(ISO)

One Stop試験設備

新たな試験手法の開発

国際標準取得間際に



破砕・リーク試験 シングルイベント試験 国際標準化ワークショップ

アクティブ・フェイズド・アレイ・アンテナを用いた 地上受信アンテナ (#5)

アクティブ・フェイズド・アレイ・アンテナ地上受信アンテナ

- ・世界初のAFA地上局
- ・無人での安全運用
- ・メンテナンスフリー

電子式地上局アンテナ会社設立(賀谷)

8アンテナ素子・アレイの基板

アンテナ・ビーム制御

0度 30度 60度 90度

宇宙科学ミッション応用 (#8)

ほどよし
2号

2018年エプシロン打上げ
決定(革新実証プログラム)

TriTel – 3D Dosimeter
(Hungary)

○衛星
50cm立方
55kgサイズ

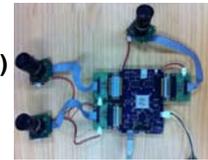
High Precision
Telescope- HPT
(Taiwan/Vietnam)

Meteor counter
- DOTCam
(Taiwan(NCKU))



Ocean Observation Camera - OOC
(Tohoku University)

Tunable Filter
(Hokkaido Univ)

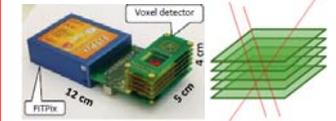


Multi-color
Tunable
Filter (100
バンド)
FM完成、
H-IIAでの
打上げ待ち

Camera
Instruments



TIMEPIX – Particle counter
(Czech)



SDTM – MEMS Magnetometer
(Sweden)



Store&Forward: 地上からの情報を集める耳

地上のセンサからデータを収集

衛星から地上局にまとめて送信

Sea buoy, Sensor, Vehicle, Data Center, Antenna

- ・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
- ・世界中で同じ方式でデータ収集可能。地上インフラによらない。
 - 水質、水位、土壌、環境(CO2、ガス等)等のセンサ、車の移動履歴(渋滞が分かる)、船の航路(海流がわかる)、GPSと組み合わせて地面の移動(地震予知)、等
 - 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” - Weak signal receiver from ground -

S&F-ANT

CAM

S&F

OBC, Sub-CAM

MTQ, RW

LIBM

PCU

U-TRx

TC-ANT

GNSS

S&F: M2M technology for IoT

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"



SS520-4

2017年
1月15日
8:33 am
内之浦で
打ち上げ

ロケットは
1段で終了

でも衛星は
動作確認

ほどよしPJ発の国際貢献・連携(#7)

プロジェクト	ほどよし成果	2014.4以降の展開
カンサット・リーダートレーニングプログラム(CLTP)	4回にわたり実施。 24か国から41名の参加者	CLTP5を北大で実施(2014.8) 文：CLTP8まで開催(2017夏) スト・キット)作成・各国で教育
ミッションアイディアコンテスト(MIC)	1st: 62件(24カ国)(2011) 2nd: 74件(29カ国)(2012) 33か国 Regional Coordinator	MIC4最終審査会ブルガリアにて開催、デブリ除去コンテストも(2016.10) 2014.4以降の展開 中須賀が編集長引き継いで実施中
スペーススタミジャーナル	4回のカンファレンスを開催し、5号(9編)まで発行。	UNISEC Local Chapter相次ぐ(Turkey, Tunisia, Egypt, Nigeria, Cameroon, Lithuania, Mexico, Peru, Bulgaria, Italy, Samara (Russia), Switzerland, Germany, Slovenia, Lithuania, and Japan)
学術発信・コミュニティ形成(大学のコミュニティとしてのUNISECの活動の国際化)	UNISECのような宇宙工学を学ぶ国際的な大学連合設立を海外に提案。2013年11月にUNISEC-GLOBALの設立宣言(31か国)112名の参加を得た第UNISEC世界大会にて)	UNISEC-GLOBAL 15 Local Chapter 12月にローマで第五回会合 国連のPermanent Observerに型衛星分野ではリーダーシップ
超小型衛星シンポジウム	5回のシンポジウム 第5回47か国	6回: ISTS神戸にて、7回トルコ(2016.10) 8回: ISTS松山(2017.6)、9回キャンベラ(2018)

“UNISEC-Global” 活動

39カ国がUNISEC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, and Japan.



16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Permanent Observerのポジションを獲得(2017.6)

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

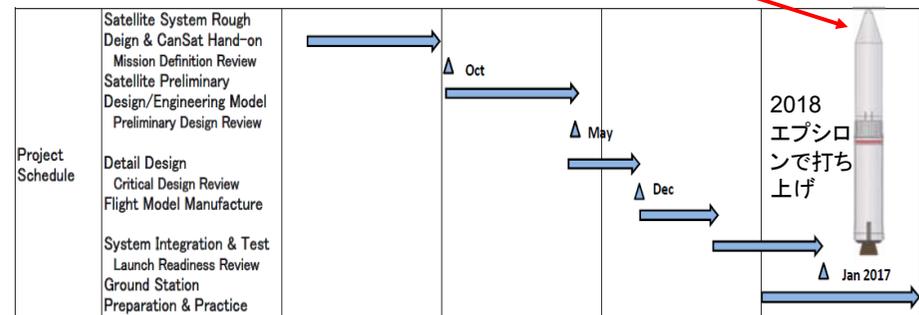
“MicroDragon” プロジェクト (ベトナムの技術者の教育をかねた 50kg級地球観測衛星)

- VNSCの36名の技術者を5大学で教育(修士課程)
- 共同で1衛星を開発(MDG)
- ミッション: ベトナムの海岸の複数バンドによる観測



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



教育支援とあわせた衛星開発のノウハウと実績を獲得・候補国多数(フィリピン、カザフ、タイ、チリ)

海外展開において大学レベルの連携は効果的

- 衛星作りを勉強したい新興国は多数
- 研究/教育レベルでまず大学がつながり、そこで信頼を勝ち取って、連携の展開(ビジネス化等)を目指す。
 - 共同研究・教育した学生が現地で中心的に動くのが重要
 - マーケットサーベイやアンケートも大学だとしやすい
 - その国の重要人物や地域の企業につないでくれる
 - その人材はやがては国の宇宙の中核に
 - ただ大学は零細企業なので継続して資金を入れてくれる仕組みが必要→継続できる体制・仕組みを構築中
- UNISECや東大の海外ネットワークは重要
 - UNISEC-GLOBALは40カ国程度と連携。日本は「長」

まとめ

- 超小型衛星(<100kg)によるGame Change
 - 何でもできるわけでない、できるのであれば、超小型衛星でやるべし。
 - このサイズで技術が伸びれば、やがて中大型並に
- 衛星バスはやがてはコモディティ化
 - 勝負はミッションとそれを実現するセンサー等技術
 - 利用のアイデア、データへの付加価値が決め手
- 大学から始まる国際連携発展への期待大
 - 大学レベルでの教育支援: Variety, Step-upが重要
- 超小型衛星ビジネス「萌芽期」
 - ここ数年で大きな構図が見えてくる