

CanSat (1999~)

衛星開発の訓練

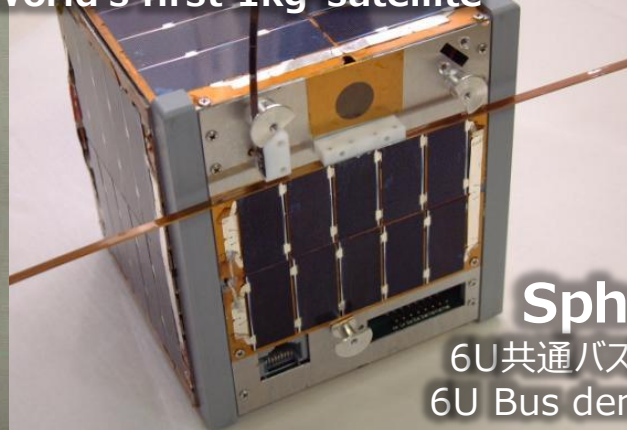
Training of satellite development



CubeSat (2003,2005)

世界最小10cm/1kgの超小型衛星バス開発

World's first 1kg-satellite



Sphere-1 EYE (2023)

6U共通バス実証 & 宇宙感動体験事業実証
6U Bus demo. & Space Entertainment



超小型衛星による探査の今後の展望と取り組みの方向性

船瀬 龍 (東京大学・JAXA)

PROCYON (2014)

深宇宙探査・小惑星フライバイ

Deep Space Exploration/Asteroid Flyby

World's first deep space micro-satellite



EQUULEUS (2022)

月ラグランジュ点探査

Lunar Lagrange-point Exploration



OPENS-0 (20XX)

土星圏探査

Saturn Exploration

これまで関わってきた主な(超小型)衛星・探査機ミッション

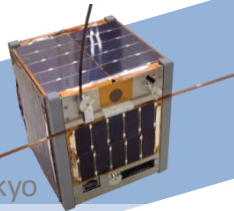
1) 2000~2007: 超小型衛星開発@東大

© Univ. of Tokyo



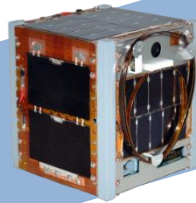
CanSat
(2002)

© Univ. of Tokyo



XI-IV (2003): 1kg
世界初のCubeSat

© Univ. of Tokyo



XI-V (2005): 1kg
Tech Demo.

2) 2007~2012:

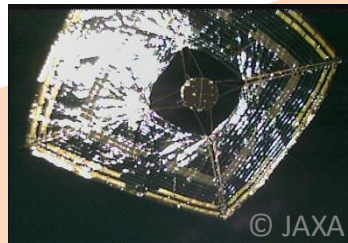
深宇宙探査ミッション @JAXA

© Akihiro Ikeshita



Hayabusa2 (2009-2012): 600kg
Asteroid sample return

© JAXA

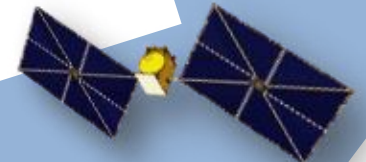


IKAROS (2007-2010): 315kg
世界初の惑星間航行ソーラーセイル
(宇宙ヨット)



© Akihiro Ikeshita

Hayabusa (2007-2010): 510kg
Asteroid sample return

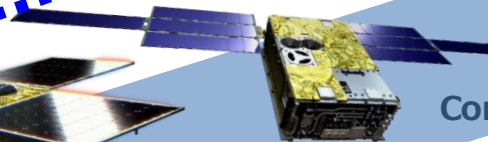


OPENS (20xx): ~200kg
世界初の小型衛星による
土星圏探査



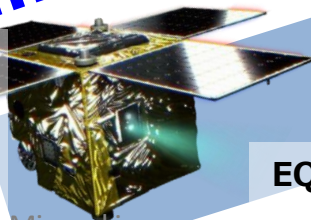
Comet Interceptor (2029): 35kg
世界初の長周期彗星探査

© Univ. of Tokyo



EQUULEUS(2022): 11kg

© Go Miyazaki



PROCYON(2014): 65kg

世界初のマイクロ衛星による深宇宙探査

3) 2012~

超小型 × 深宇宙探査

@東大&JAXA

超小型衛星の発展



低コスト、短期開発を生かした
多数機・高頻度な超小型衛星による探査の展開



リスクを許容して新しい挑戦を促進する好循環



深宇宙探査においても同様の効果を期待



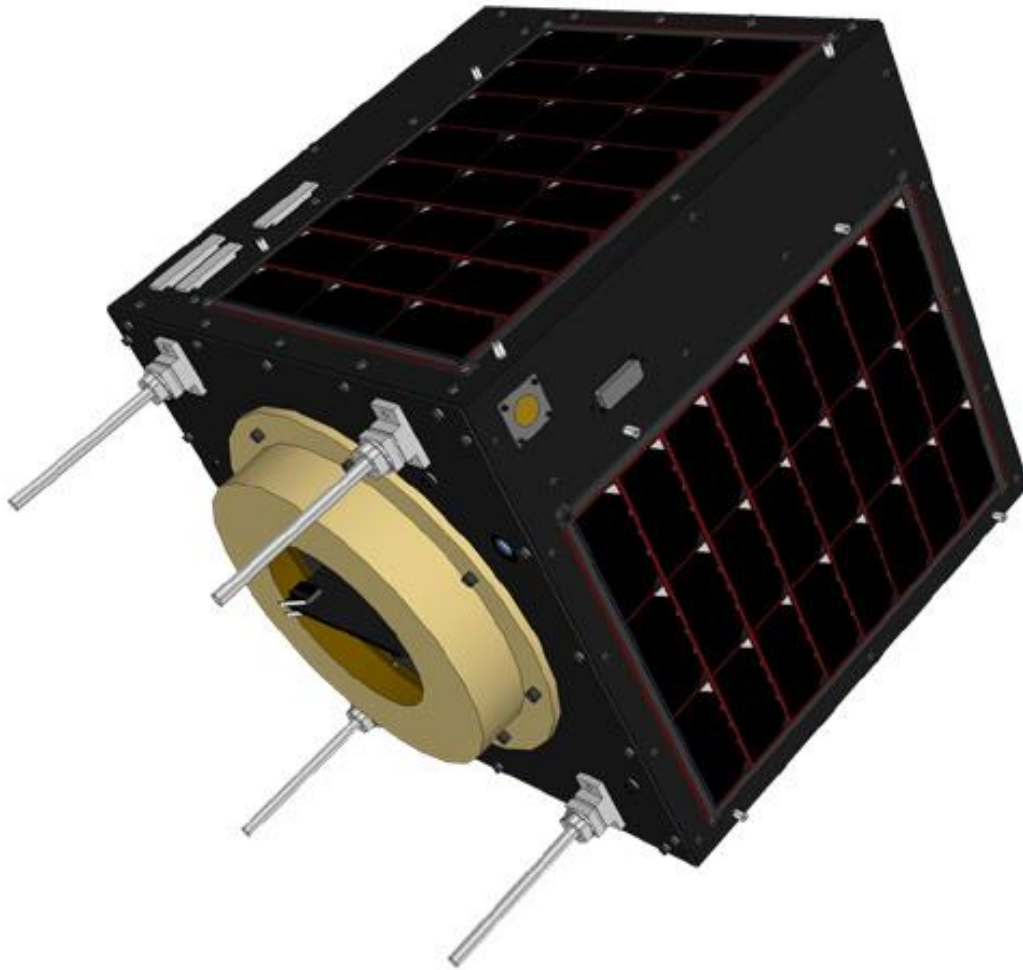
- ・超小型用コンポーネント企業
 - ・超小型衛星用ロケット企業
- などが多数存在

超小型衛星による太陽系探査への挑戦 ～これまでと今後～

第1ステップ

**深宇宙で探査活動ができる
超小型衛星技術の獲得**

UNITEC-1 (UNIssec Technological Experiment Carrier-1)



2010年,
金星探査機あかつき
小型ソーラー電力セイル実証機IKAROS
とともに金星遷移軌道へ打上げ.
深宇宙での通信実験等を実施
UNISECの複数の大学で共同開発

The First Interplanetary Full-scale Micro-Satellite **PROCYON** (2014)

Developer

Univ. of Tokyo + JAXA

Development time

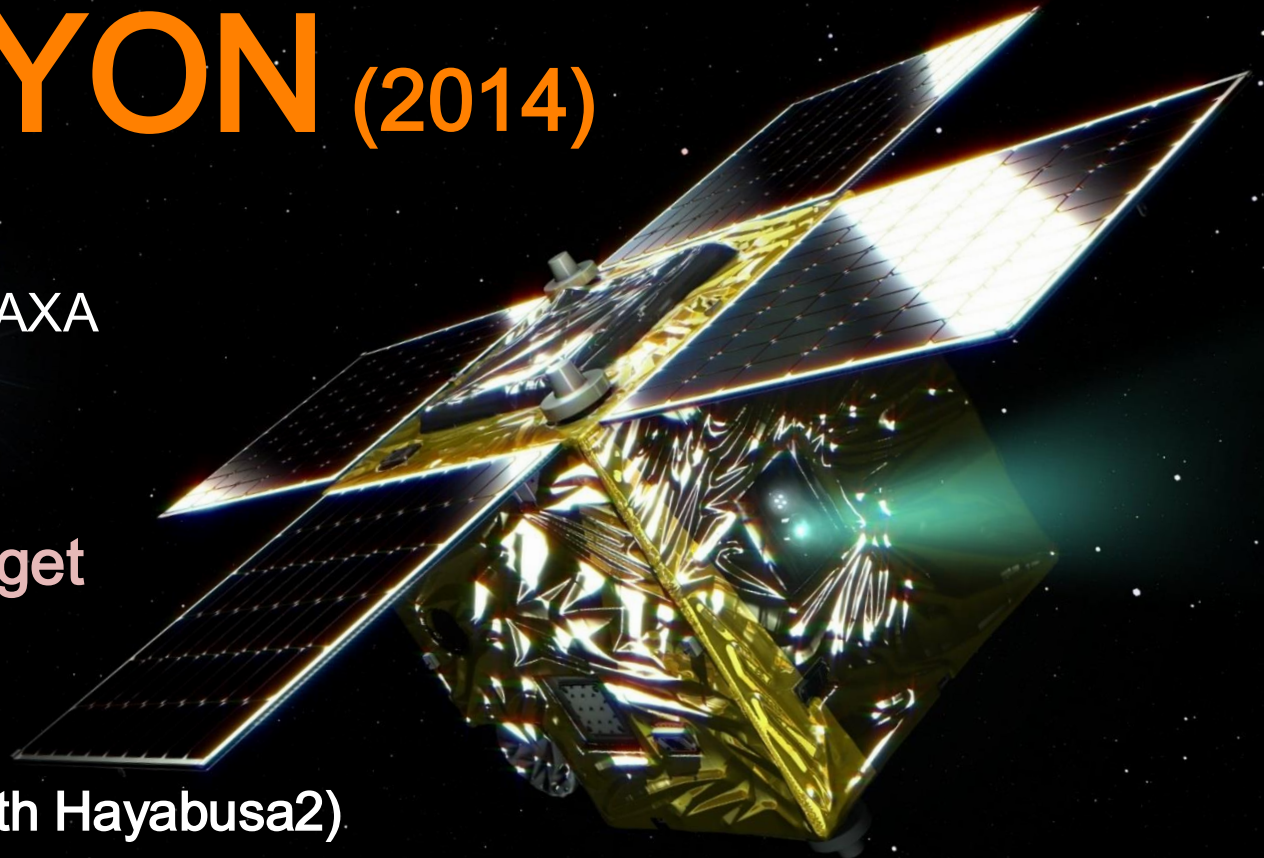
14 months

Development budget

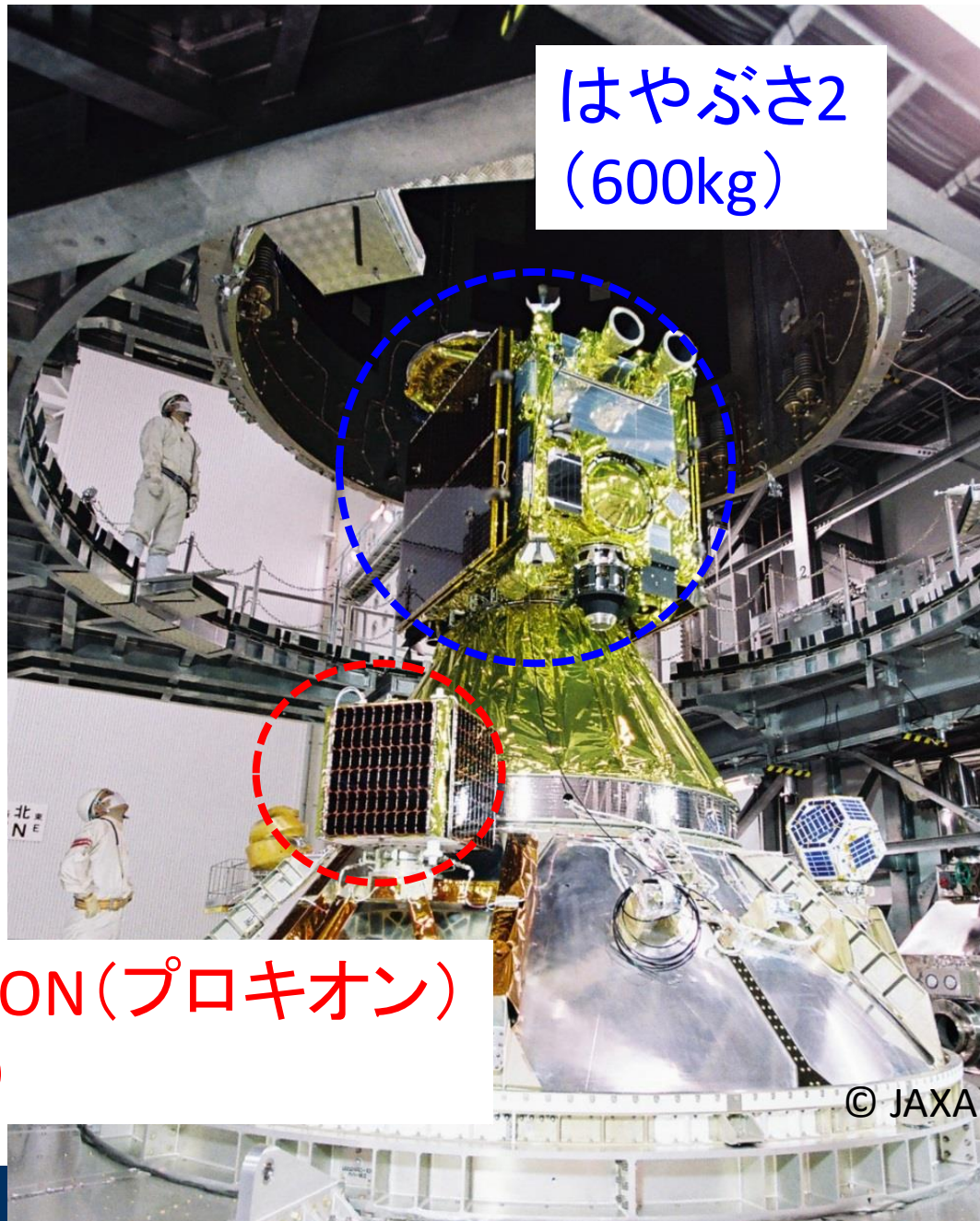
< 5 M\$

Launch date

Dec. 04, 2014 (with Hayabusa2)



はやぶさ2
(600kg)



PROCYON(プロキオン)
(65kg)

© JAXA

目標は思い切り高く、でも、足下もしっかり固める

PROCYONのミッション（東大・JAXA共同ミッション）

超小型（50kg級）で深宇宙探査ができるということを実証する

1. ノミナルミッション：

50kg級超小型深宇宙探査機バス技術実証

（電源・熱・姿勢・**通信・軌道決定・軌道制御**）

赤字：地球周回→深宇宙で新たに必要となる技術

2. アドバンスドミッション：

高度な深宇宙探査技術の実証

（高効率通信アンプ・高精度VLBI航法・小惑星フライバイ観測）

3. 科学観測：

ジオコロナ（地球コロナ）の撮像

超小型深宇宙探査機バス（基本機能）の実証

Thrusters (RCS)

Manufacturer: The University of Tokyo
Thrust: 22 mN

DDOR Tone Generator

Manufacturer: Digital Signal Technologies, inc.
Max. output power: +9 dBm (each tone)
Max. tone width: 86 MHz
Max. sweep width: 7.9 MHz



新しい深宇宙軌道決定手法の実証

並進+回転制御可能な超小型推進系

(1-100 s),
(1000 s) (-20 to +60°C)

Ion Thruster

Manufacturer: The University of Tokyo
Thrust: 300 μ N
Specific impulse: 1000 s
Propellant: Xenon

X-band Transponder

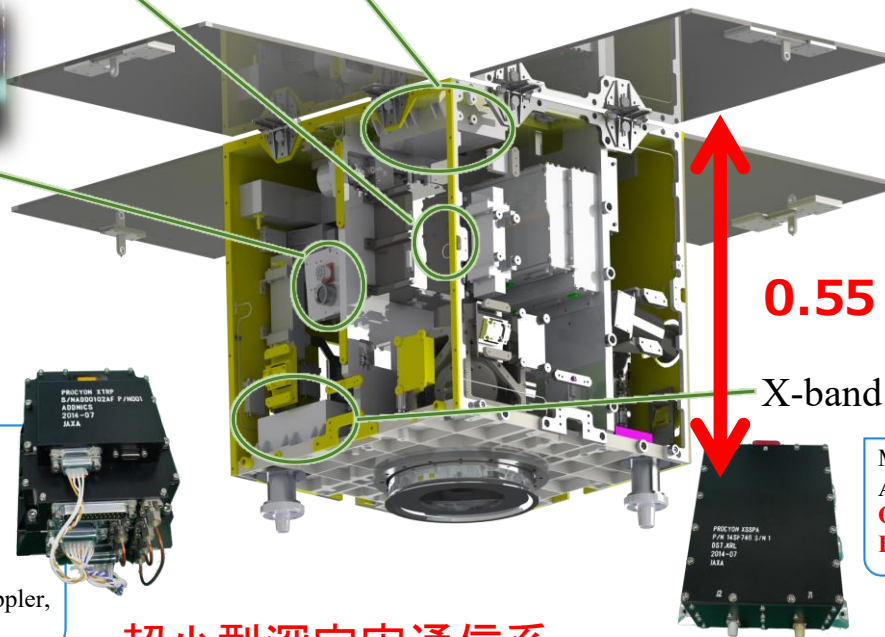
Manufacturer: Addnics corp.
Max. output power: +17 dBm (tunable)
Receiving level: -150 to -50 dBm
Coherent ratio: 749/880
Modulation: PCM/PSK/PM,
two-way Range & two-way Doppler,
DDOR ($\pm 0.5F_0$, $\pm 2F_0$)



超小型深宇宙通信系

RF Output > 15W (はや2同等)

Efficiency > 32.7% (世界最高)



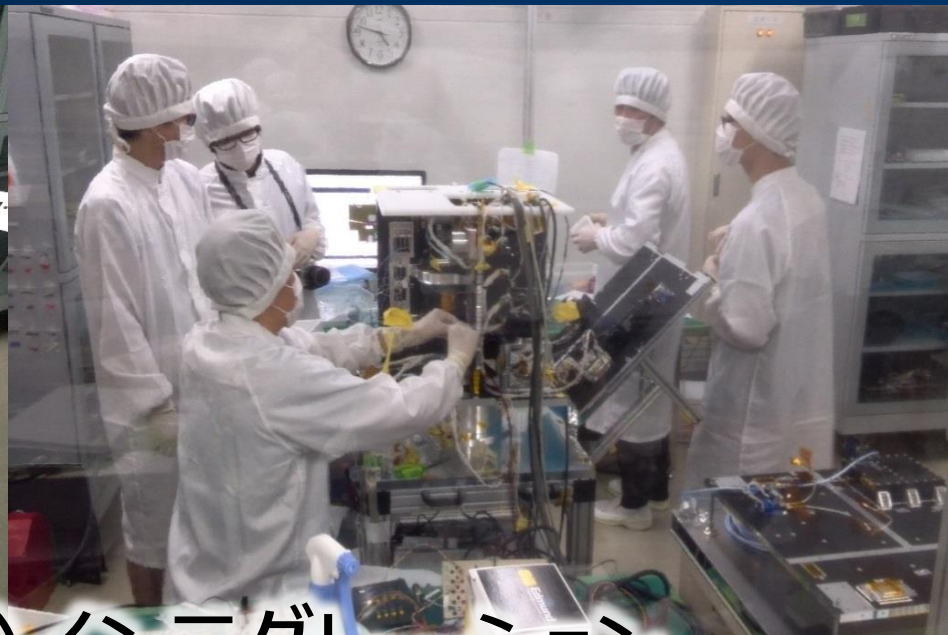
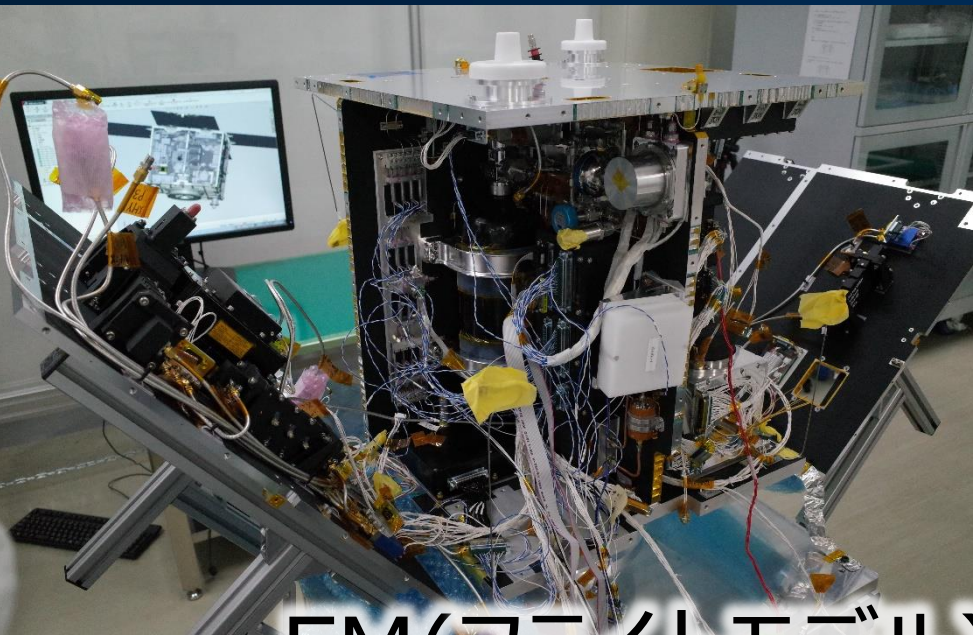
S/C size: 55cm
S/C mass: 65kg

0.55 m

X-band Solid State Power Amplifier

Manufacturer: Digital Signal Technologies, inc.
Amplification device: GaN HEMT
Output power: 41.85 $\pm$ 0.15 dBm
Efficiency: > 32.7 % (Max. 35.1 %) (-20 to +60°C)

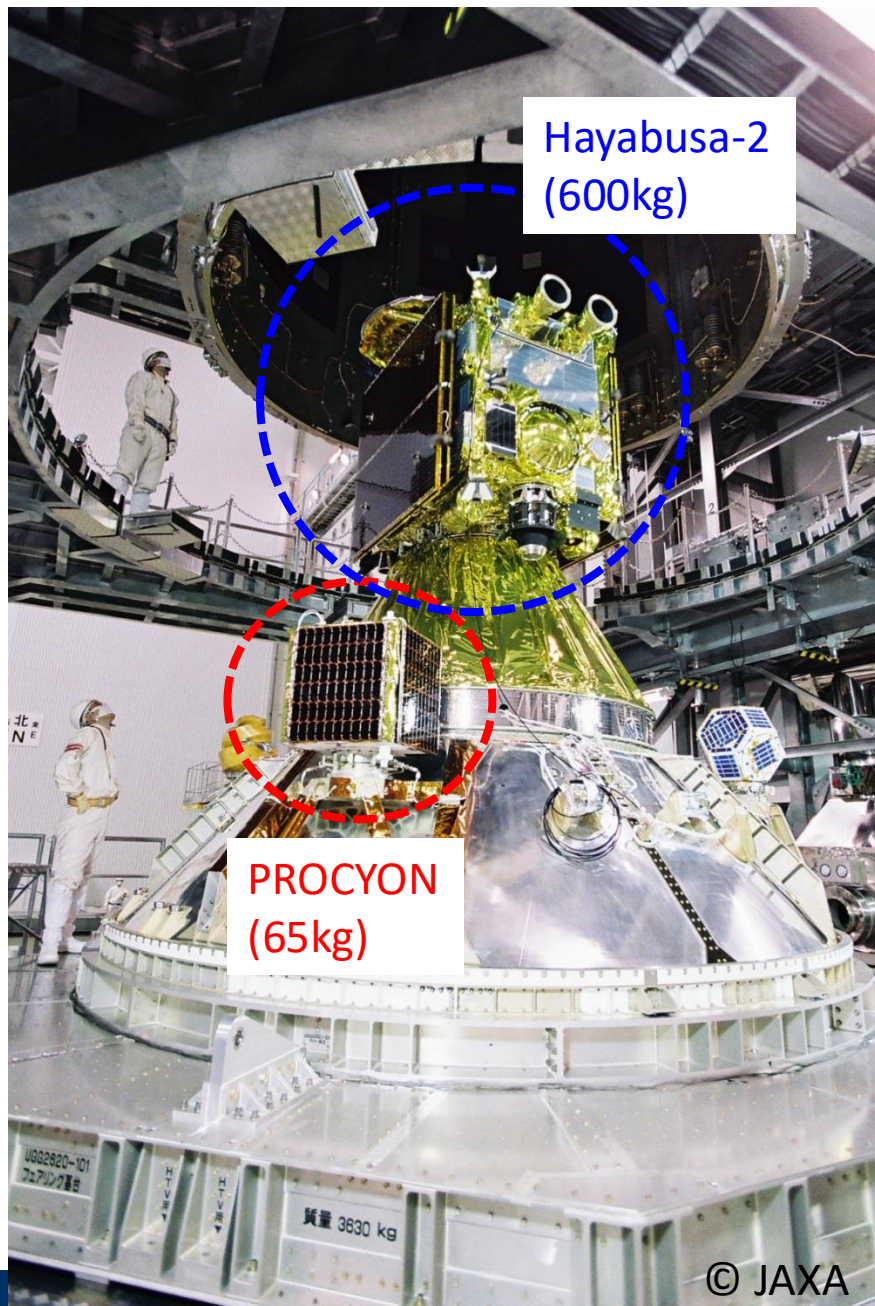




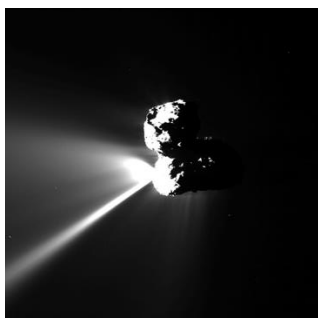
FM(フライトモデル)インテグレーション



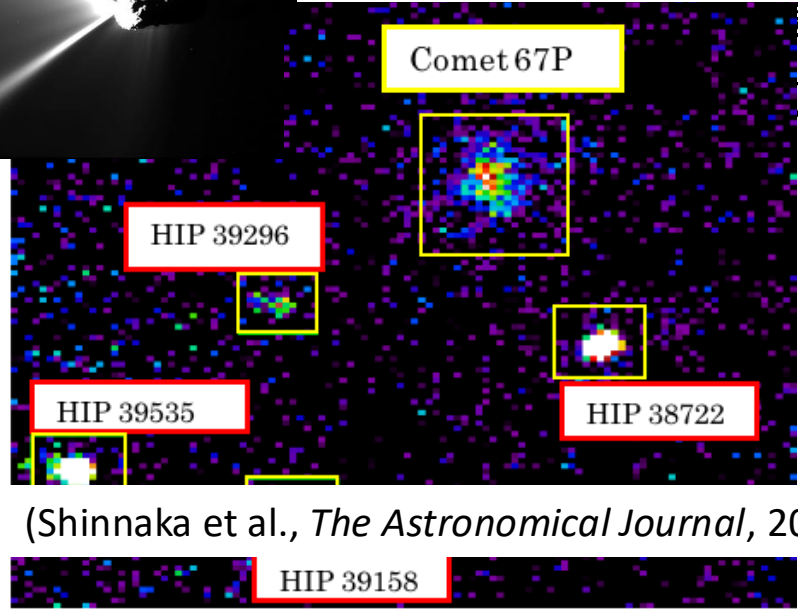
小惑星探査機はやぶさ2との相乗り打ち上げ(2014年12月)



PROCYONの成果の意義

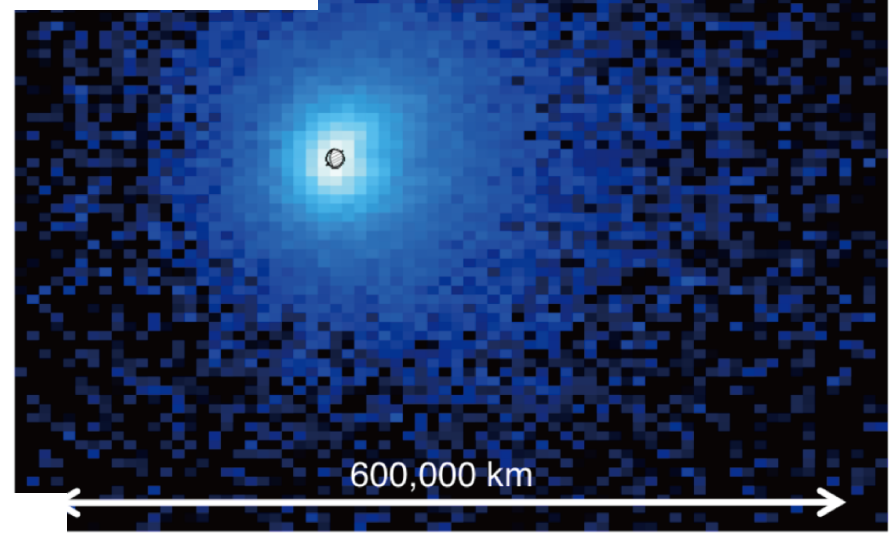


(2015/09/13, Rosettaの滞在中の彗星の水素ガス分布の撮像に成功)



(Shinnaka et al., *The Astronomical Journal*, 2017)

1500万km先の宇宙から
地球水素大気の撮像に成功



✓[最重要] 50~100kg以下の低コスト・小型軽量な深宇宙探査手段の獲得

– 世界初・世界最小の50kg級深宇宙探査機の実現

開発チームの集合写真

(打ち上げロケットへ探査機を引き渡す前日に撮影)



PROCYON



中島先生@JAXA
(当時大学院生)

稲守先生@名大
(当時助教)

五十里先生(当時大学院生)

船瀬

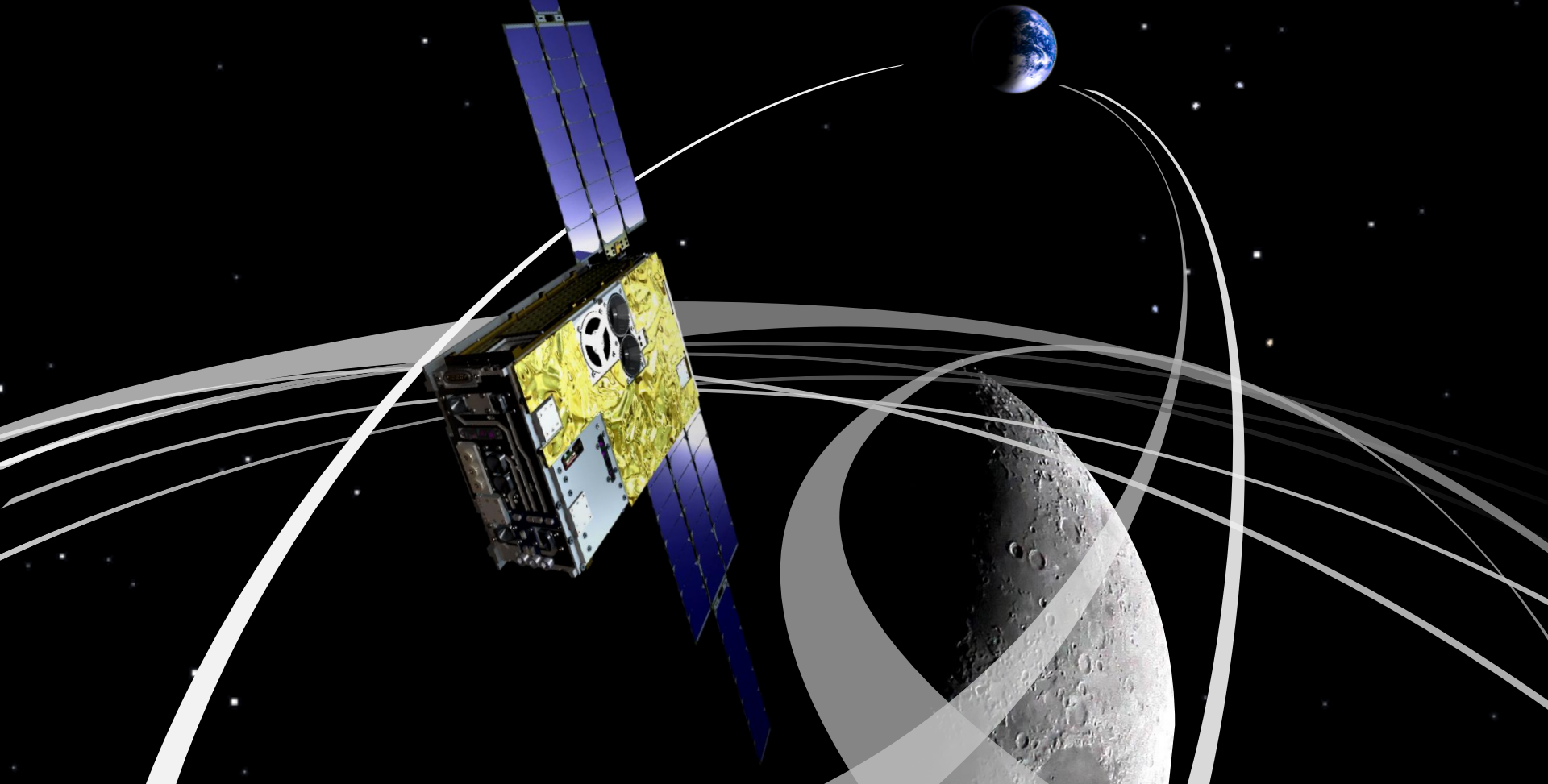
第2ステップ

**さらなる小型化への挑戦（2016年～）
（50kg級⇒10kg級 CubeSat）
＋深宇宙でのマヌーバビリティの獲得**

EQUULEUS

To be The first CubeSat to **Lunar Lagrange point**

(EQUULEUS = EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft)

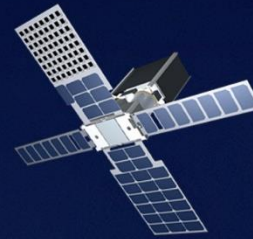




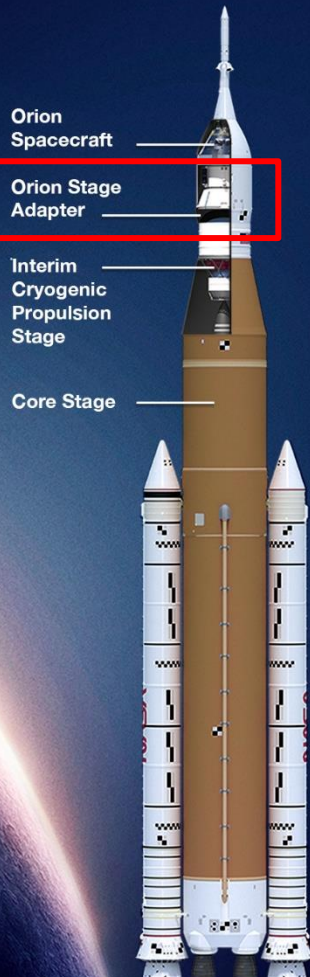
2022年, NASAが開発した深宇宙探査用大型有人ロケット
「SLS(Space Launch System)」の試験飛行にCubeSatが相乗りして月へ

ARTEMIS I

SMALL SATELLITES + BIG SCIENCE

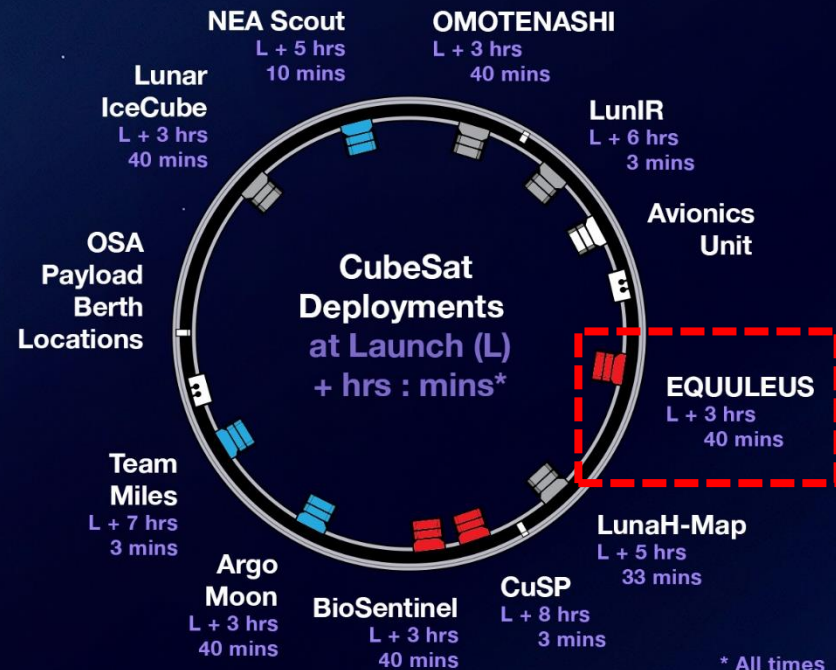


Ten **CubeSats**, or small satellites, in the **Orion stage adapter (OSA)** will ride along to deep space. These high-risk, high-reward CubeSats will be deployed at strategic times based on mission requirements.



CubeSats

- OMOTENASHI
- Lunar IceCube
- EQUULEUS
- ArgoMoon
- BioSentinel
- NEA Scout
- LunaH-Map
- LunIR
- Team Miles
- CuSP



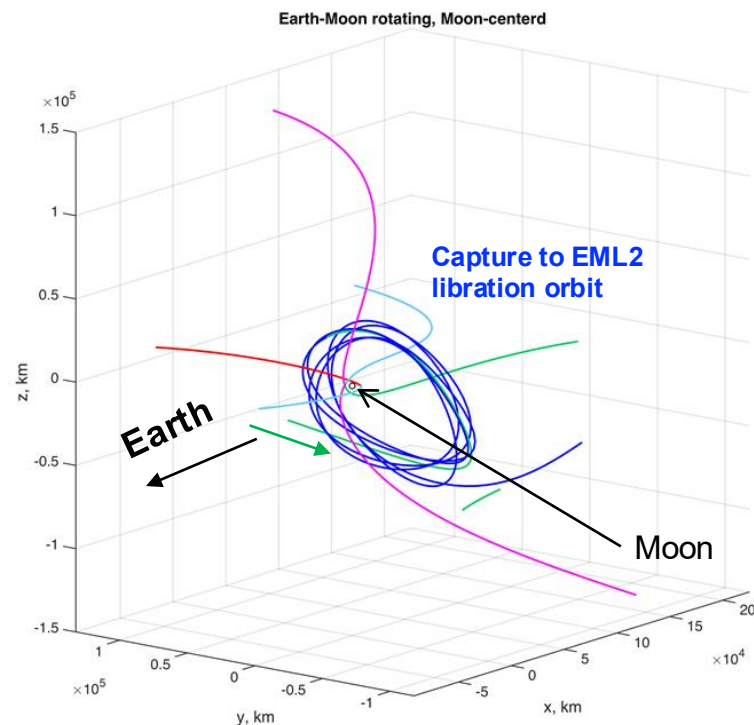
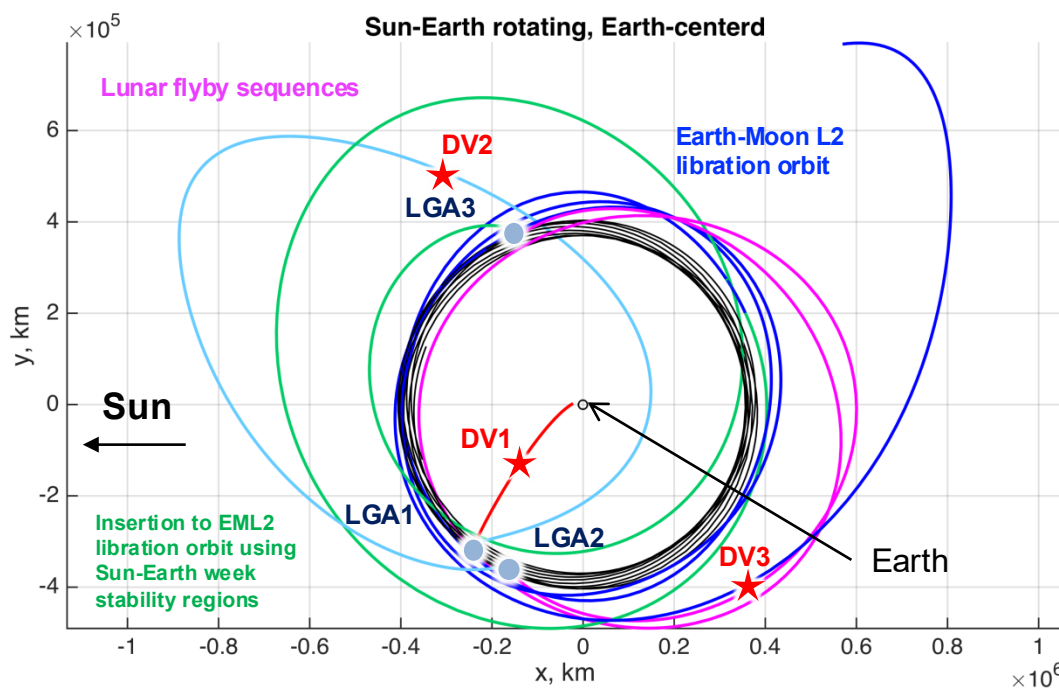
* All times approximate

Mission Key

- Lunar Science
- Technology Demonstration
- Radiation

地球・月圏で効率的に飛行する軌道制御技術の実証

月の重力アシスト（スイングバイ）を利用することで、**約6ヶ月の飛行期間**はかかるが、**10m/s程度の小さな ΔV** でEML2（ラグランジュ点）へ飛行することが可能になる。



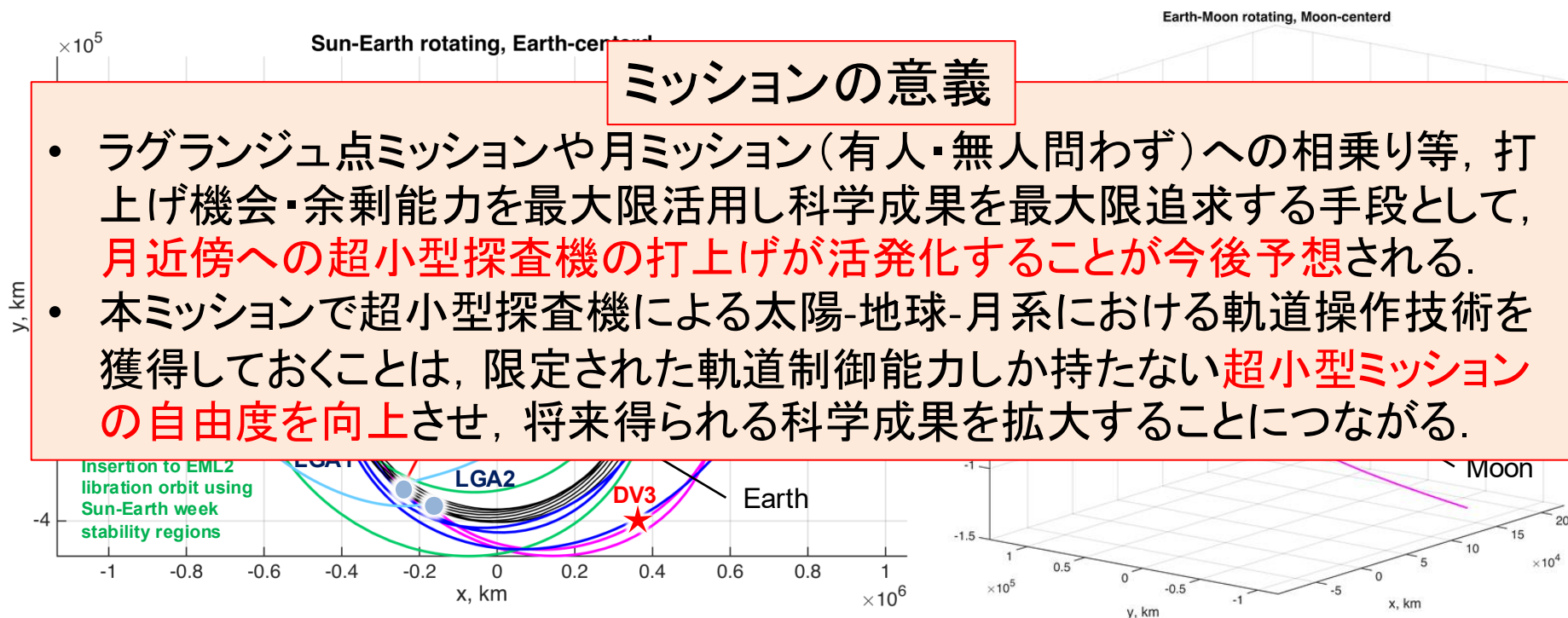
*LGA: Lunar Gravity Assist, EML2: Earth-Moon L2 point

地球・月圏で効率的に飛行する軌道制御技術の実証

月の重力アシスト（スイングバイ）を利用することで、**約6ヶ月の飛行期間**はかかるが、**10m/s程度の小さな ΔV** でEML2（ラグランジュ点）へ飛行することが可能になる。

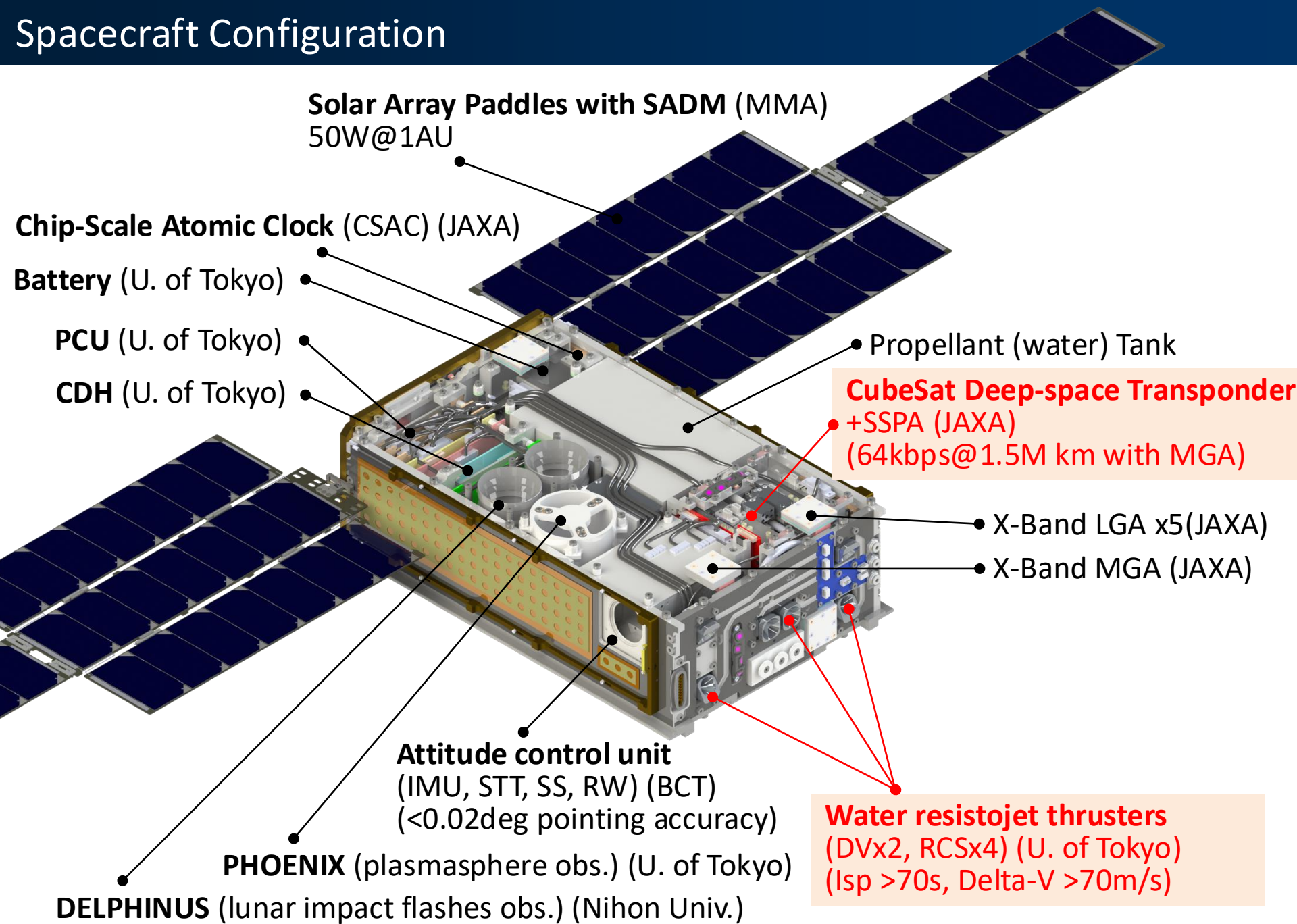
ミッションの意義

- ・ ラグランジュ点ミッションや月ミッション（有人・無人問わず）への相乗り等、打上げ機会・余剰能力を最大限活用し科学成果を最大限追求する手段として、**月近傍への超小型探査機の打上げが活発化することが今後予想される。**
- ・ 本ミッションで超小型探査機による太陽-地球-月系における軌道操作技術を獲得しておくことは、限定された軌道制御能力しか持たない**超小型ミッションの自由度を向上**させ、将来得られる科学成果を拡大することにつながる。



*LGA: Lunar Gravity Assist, EML2: Earth-Moon L2 point

Spacecraft Configuration



Solar Array Paddles with SADM (MMA)
50W@1AU

Chip-Scale Atomic Clock (CSAC) (JAXA)

Battery (U. of Tokyo)

PCU (U. of Tokyo)

CDH (U. of Tokyo)

Propellant (water) Tank

**CubeSat Deep-space Transponder
+SSPA (JAXA)**
(64kbps@1.5M km with MGA)

X-Band LGA x5(JAXA)

X-Band MGA (JAXA)

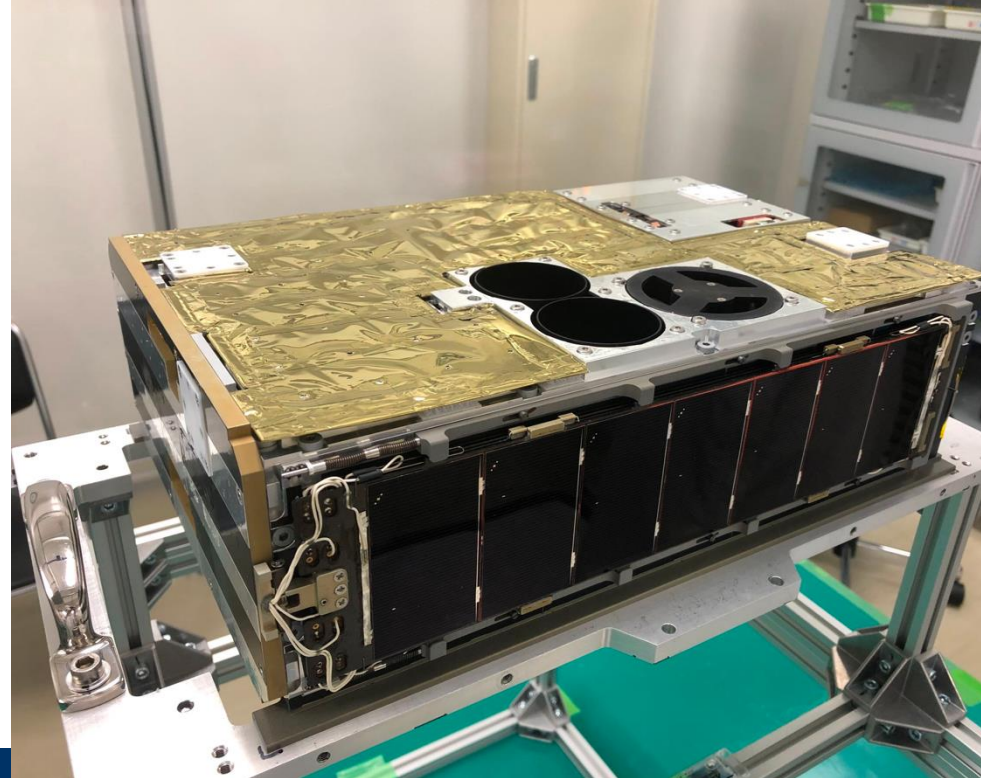
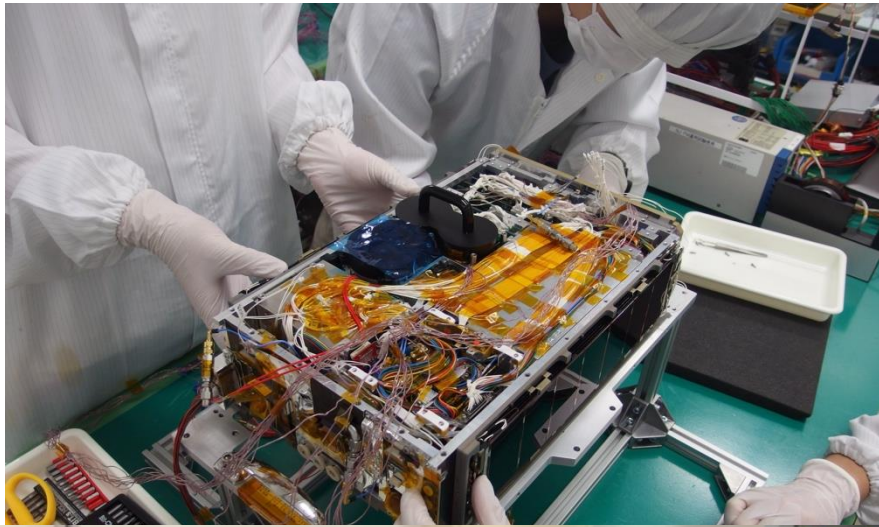
Attitude control unit
(IMU, STT, SS, RW) (BCT)
($<0.02^\circ$ pointing accuracy)

Water resistojet thrusters
(DVx2, RCSx4) (U. of Tokyo)
(Isp >70 s, Delta-V >70 m/s)

PHOENIX (plasmasphere obs.) (U. of Tokyo)

DELPHINUS (lunar impact flashes obs.) (Nihon Univ.)

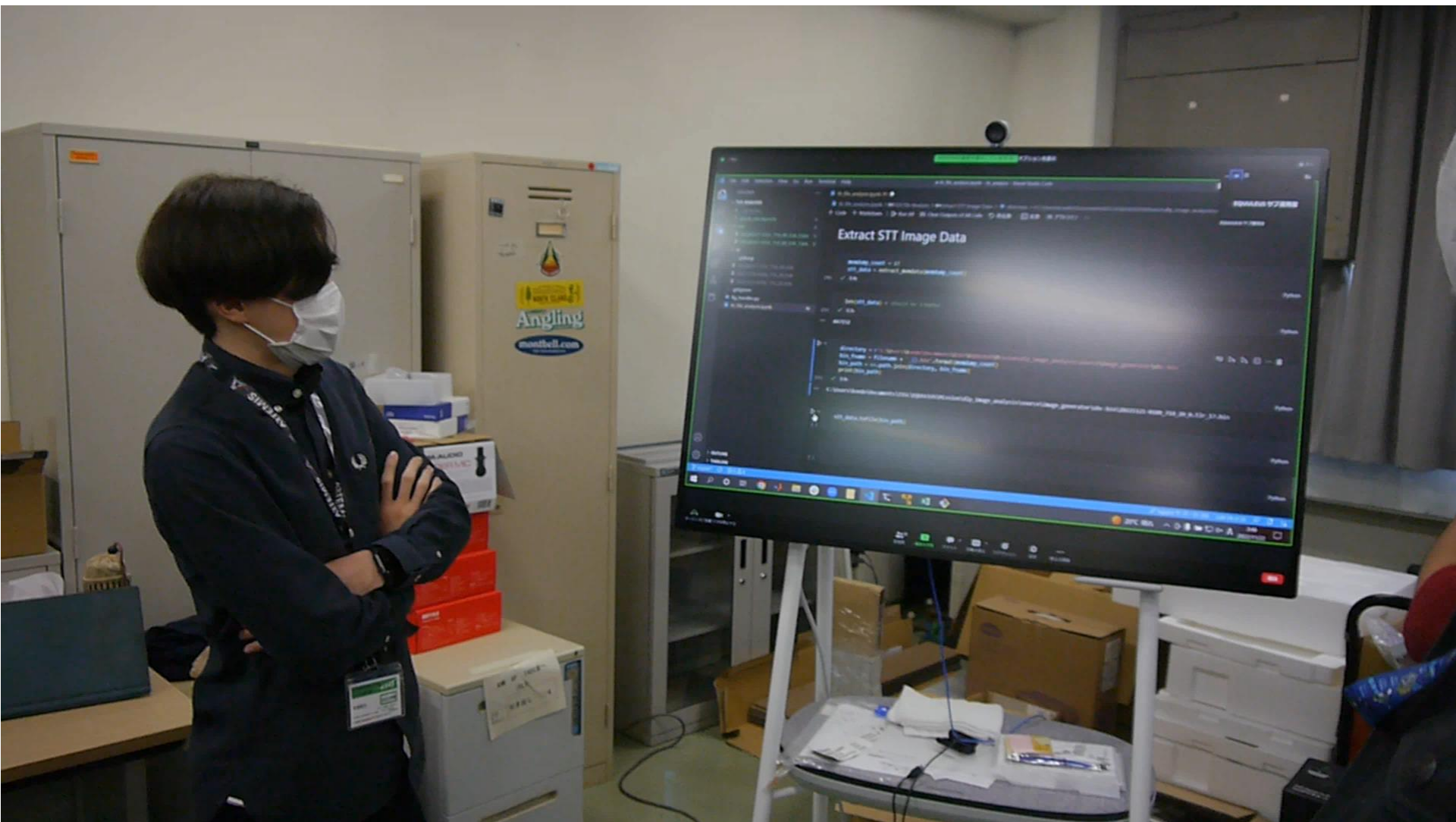
Flight model development



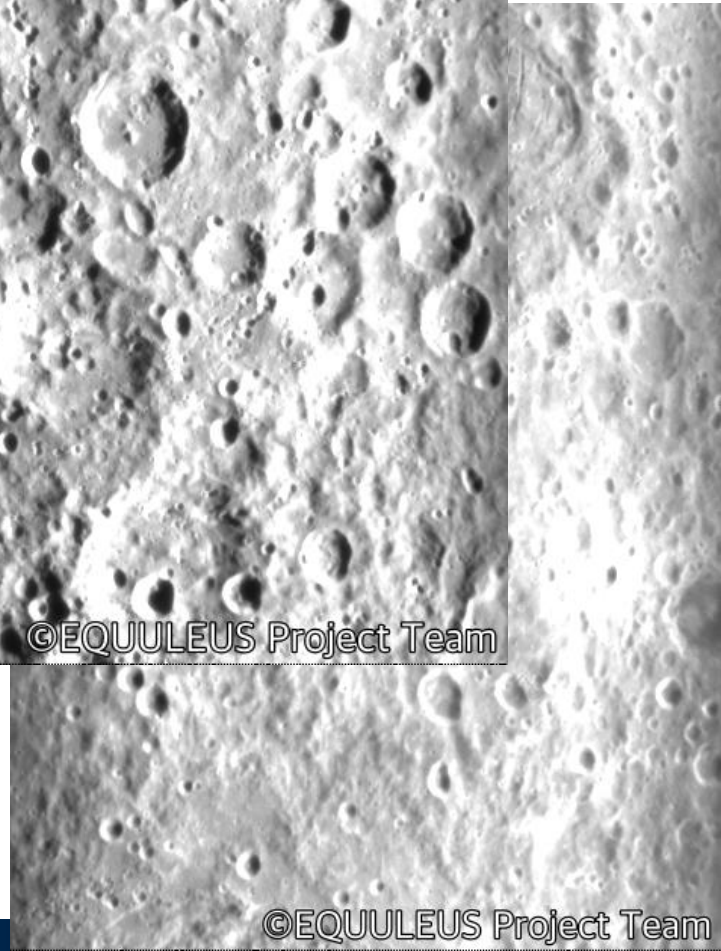
2022年11月16日，打ち上げ！



月フライバイ時に月撮像に成功！

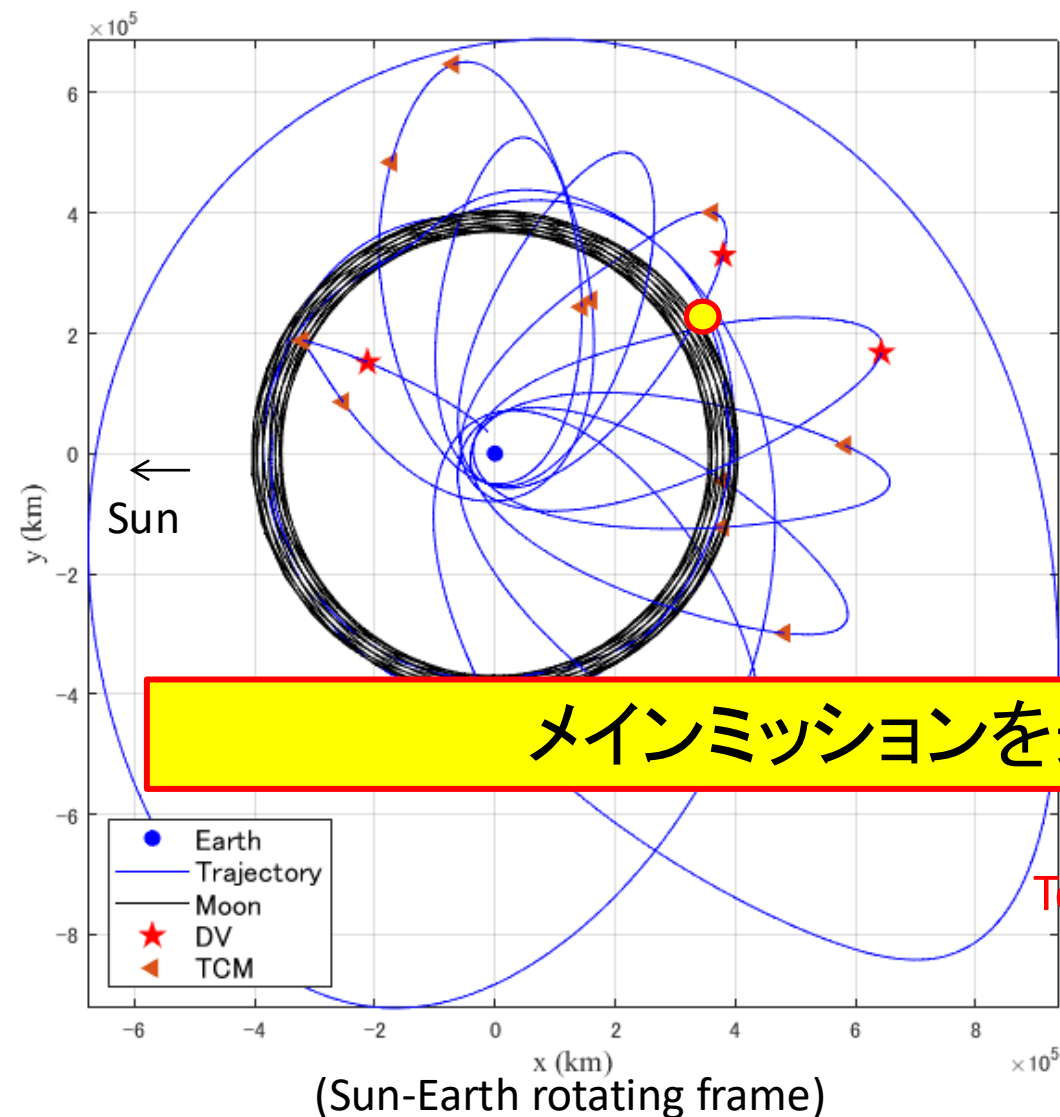


月フライバイ中の最接近時付近に月裏面の昼夜境界の撮像に成功



軌道制御実験結果

2023年4月27日までに3回のDV運用, 11回のTCM運用に成功. 精度 <cm/s
(これ以降大きな軌道変換運用(DV運用)なしでEML2へ到達できる軌道への遷移を完了)



Event	Date and time (UTC)
DV1	2022/11/17 23:14
TCM1	2022/11/20 1:45
TCM2	2022/11/23 0:30
TCM3	2022/11/27 16:30
TCM4	2022/12/9 19:30
TCM5	2022/12/15 21:00
TCM6	2022/12/23 20:45
DV2	2023/2/3 18:30
TCM7	2023/2/7 18:30
DV3	2023/2/27 16:30
TCM8	2023/3/16 15:30
TCM9	2023/3/30 15:30
	2023/4/13 11:30
	2023/4/27 14:00

メインミッションを達成！

Total Delta-V executed: approx. 18 m/s

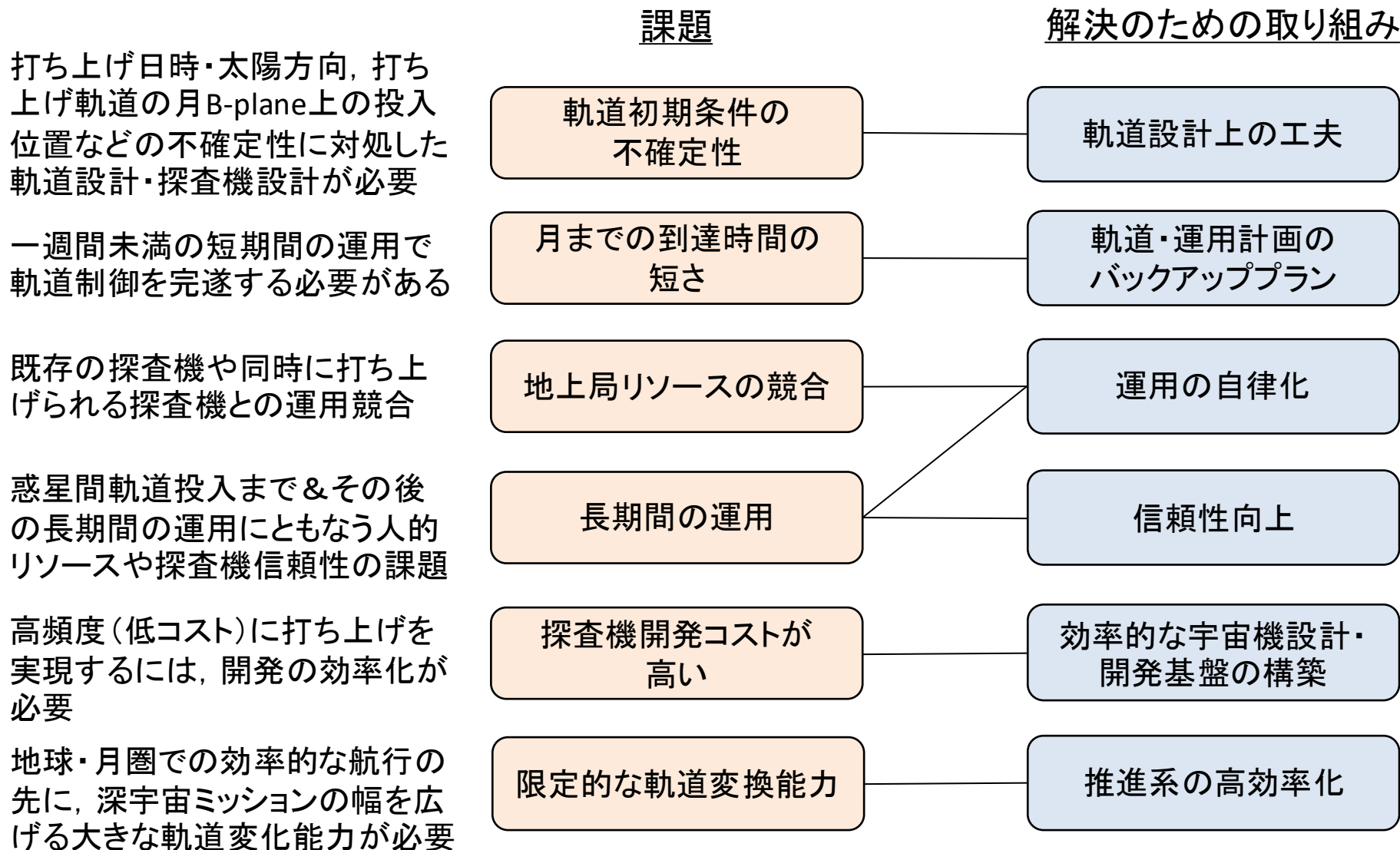
EQUULEUS成果報告会・お祝い会
(OB/OG含めて90名近くが参加！)

日本の宇宙業界の産業育成にも貢献！
○...アークエッジ・スペース社を起業
○...Pale Blue社を起業



さらに高頻度な太陽系探査の実現に向けて…

「まだ」何が課題なのか？（月遷移軌道打ち上げを活用する場合）



月遷移軌道相乗りによる探査は、どのくらい技術が確立されたか

低リソースな探査機が深宇宙アクセス手段を持つには、月遷移軌道への打ち上げ機会を「使いこなす」ことが鍵となるが、最近になっても**月遷移軌道相乗りからの軌道制御に成功した事例は極めて少ない状況が続いている。**

前述のような課題を解決することにより、**EQUULEUSの成功を偶然ではなく必然にしていく必要がある**し、その取り組みの**重要性はますます高まっている**と考えられる。

そして、単に月遷移軌道から深宇宙へ到達できることに留まらず、**再現性高く・効率的に・高い能力をもって深宇宙探査を実施できる技術を獲得すること**で、国際的な優位性を持った真に高頻度・低コストな深宇宙アクセス手段を実現したい。

- **CAPSTONE (NASA, 2022)**
 - 打ち上げ直後に通信途絶するも復旧に成功し、打ち上げから4ヶ月後のNRHO投入に成功
- **EQUULEUS (東大/JAXA, 2022)**
 - 予定通りの月フライバイに成功、EML2へのノミナル軌道への遷移に成功
- **その他Artemis-1 CubeSat (BioSentinel, Lunar IceCube, ArgoMoon, NEA Scout, LunaH-Map, LunIR, CuSP, 2022)**
 - 月フライバイでその先の目的軌道があるミッションについては少なくとも7機が全て失敗（通信喪失or軌道制御失敗）
- **Lunar Flashlight (NASA, 2022)**
 - 月到達前に推進系不具合によりミッション軌道到達を断念
- **Lunar Trailblazers (NASA, 2025)**
 - 月到達前に探査機との通信喪失
- **Odin (AstroForge, 2025)**
 - 月到達前に探査機との通信喪失

Pale Blue社とともに超小型OTV（軌道間輸送機）の技術実証およびその後の事業化を目指した活動をJAXA基金に提案し、採択（2026年1月）



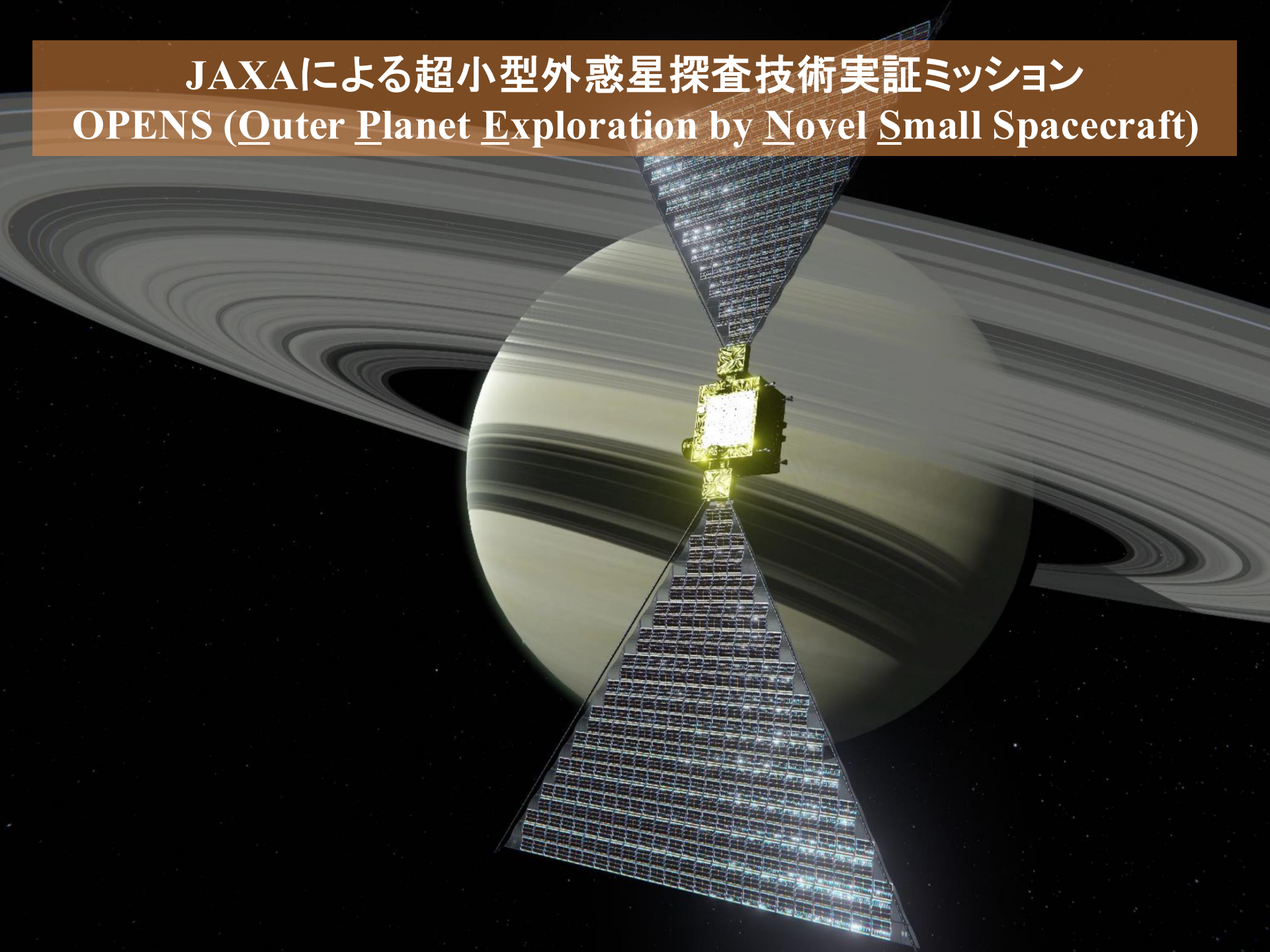
Research-Innovation 2026

宇宙戦略基金「空間自在移動の実現に向けた技術」に採択 — 超小型軌道間輸送機の研究開発を産学連携で推進 —

📅 2026/01/30

太陽系のさらに遠くへ！

JAXAによる超小型外惑星探査技術実証ミッション OPENS (Outer Planet Exploration by Novel Small Spacecraft)

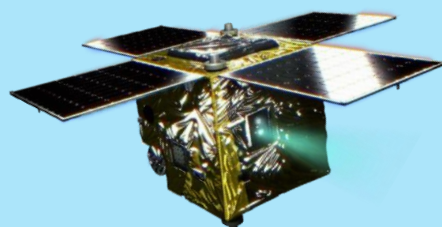


超小型探査の方向性(私見)

地球低軌道での
超小型衛星の実現
(2003～)

深宇宙への
進出

① 超小型衛星による
深宇宙探査の領域を開拓
(2014～)



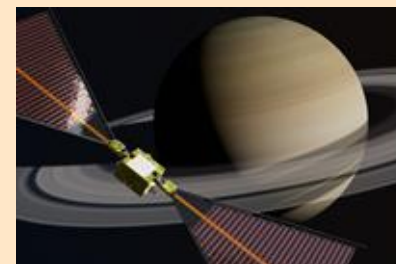
PROCYON(2014): 65kg
世界初の超小型探査機



EQUULEUS (2022): 10kg
CubeSatによるシスルナ領域探査

② 超小型衛星による深宇宙探査
の拡大・発展(～現在)

より遠くへ



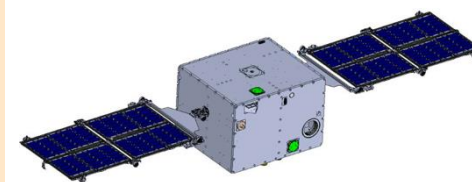
OPENS (20xx): ~150kg
世界初の小型探査機による土星探査

より高度に



Comet Interceptor (2029): 35kg
複数小型探査機による
世界初の長周期彗星探査

より高頻度に



超小型OTV実証 (20xx): 70kg
高頻度な深宇宙アクセス技術の実証

さいごに

- 日本のCubeSat成功(2003)と、その後の超小型衛星技術の発展により、世界的に超小型衛星の利用が爆発的に増えてきた。
- 超小型衛星の性能は大きく向上してきており、**深宇宙探査ミッションへの挑戦**も行われてきている
 - UNITEC-1, PROCYON, EQUULEUS, MarCO...
- 月～小惑星～火星、さらにそれ以遠を舞台にした、超小型衛星による探査は、「**より遠くへ」「より高度に」「より高頻度」の3つの方向性**があるだろう。
- 必要な技術は、軌道設計、自律化、推進系、熱制御系、開発の効率化、通信など多岐にわたる。
- CanSatでの実証、地球周回での実証など、段階的な取り組みが深宇宙へと結実する。色々な形で貢献がありえるはず。

それぞれの組織・団体の活動の中で、
深宇宙への適用を意識した活動も考えてみませんか？
(そして、是非一緒に議論させてもらえるとうれしいです)