

# 超小型衛星の国際動向と 編隊飛行への応用

東京大学 航空宇宙工学専攻 中須賀・船瀬研 五十里 哲（いかり さとし）  
光赤天連シンポジウム 2018年09月11日

自己紹介：五十里 哲(いかり さとし), 中須賀・船瀬研 助教

東京大学 中須賀・船瀬研



Nano-JASMINE

Awaiting launch  
Collaborator: NAOJ



EQUULEUS

In development  
Collaborator: JAXA



XI-IV  
(2003)

In operation (15 years)



PRISM  
(2009)

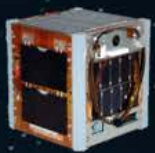
In operation (9 years)



PROCYON  
(2014)

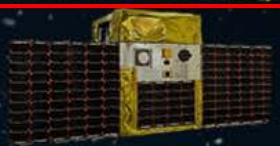
End of operation (3 years)  
Collaborator: JAXA

XI-V (2005)  
In operation (13 years)



HODOYOSHI  
1, 3, 4 (2014)

In operation (4 years)  
Collaborator: NESTRA



TRICOM-1R  
(2017)

In operation (0.5 years)



Mars landing mission (Planned)

8

Satellites Launched

15

years

of In-orbit Satellite  
Operations

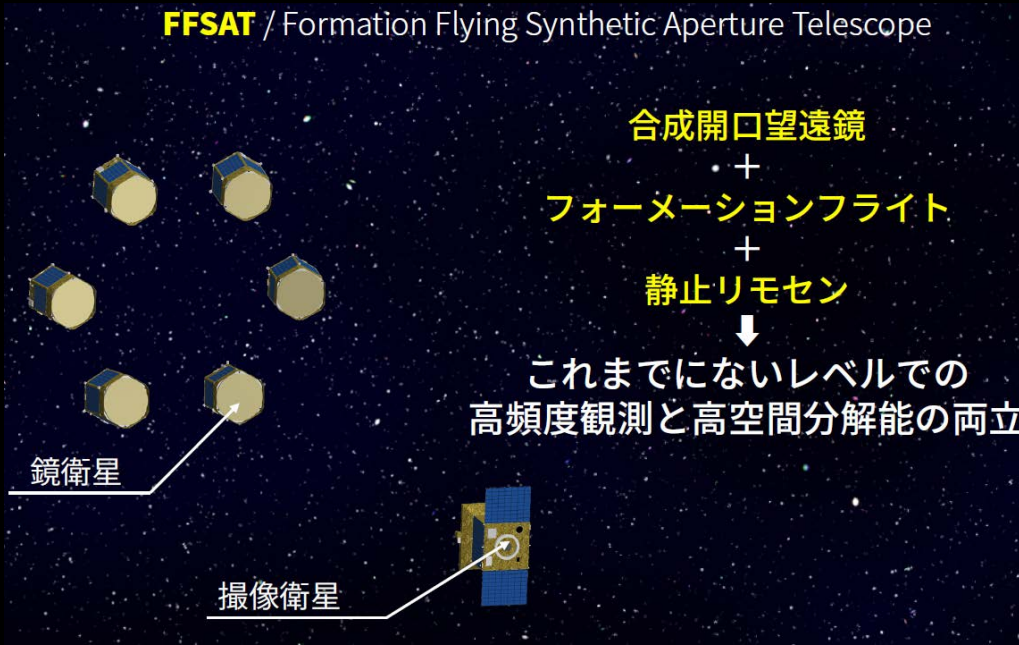
104

Students Graduated

自己紹介：五十里 哲(いかり さとし), 中須賀・船瀬研 助教  
高精度位置決定・制御研究 ⇒ Formation Flight

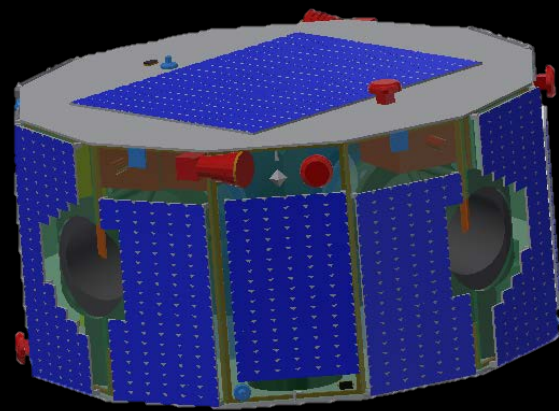


測位衛星みちびき cm軌道決定



宇宙重力波望遠鏡 DECIGO  
0.1Hz付近の重力波の観測を行う。

- Arm length: 1000 km
- Finesse: 10
- Mirror diameter: 1 m
- Mirror mass: 100 kg
- Laser power: 10 W
- Laser wavelength : 532 nm





# 発表の目的

---

- ▶ **超小型衛星を使った「新たな理学ミッション」の可能性を理学研究者と検討したい**
- ▶ **最新の超小型衛星について、理学系研究者と情報共有したい**
  - ▶ 海外で提案されている理学ミッション
  - ▶ 軌道上実証済みの最新性能、今後目指す性能
- ▶ **編隊飛行を利用したミッションの可能性について議論したい**

# 内容

---

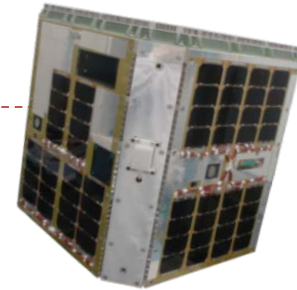
- ▶ 超小型衛星とは
- ▶ 超小型衛星の国際動向
- ▶ 超小型衛星の現状の性能・限界
- ▶ 編隊飛行の意義と実現可能性
- ▶ まとめ

# 超小型衛星とは

# 超小型衛星の分類

## ▶ Micro-satellite

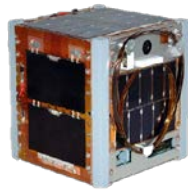
- ▶ 主に50kg級(40~70kgくらい), 50cm立方級の衛星



Nano-JASMINE 35kg

## ▶ CubeSat

- ▶ 1U = 10cm立方, 1kgを基準とした規格
- ▶ 3U(10\*10\*30cm), 6U(10\*20\*30cm), 12U(20\*20\*30cm)...

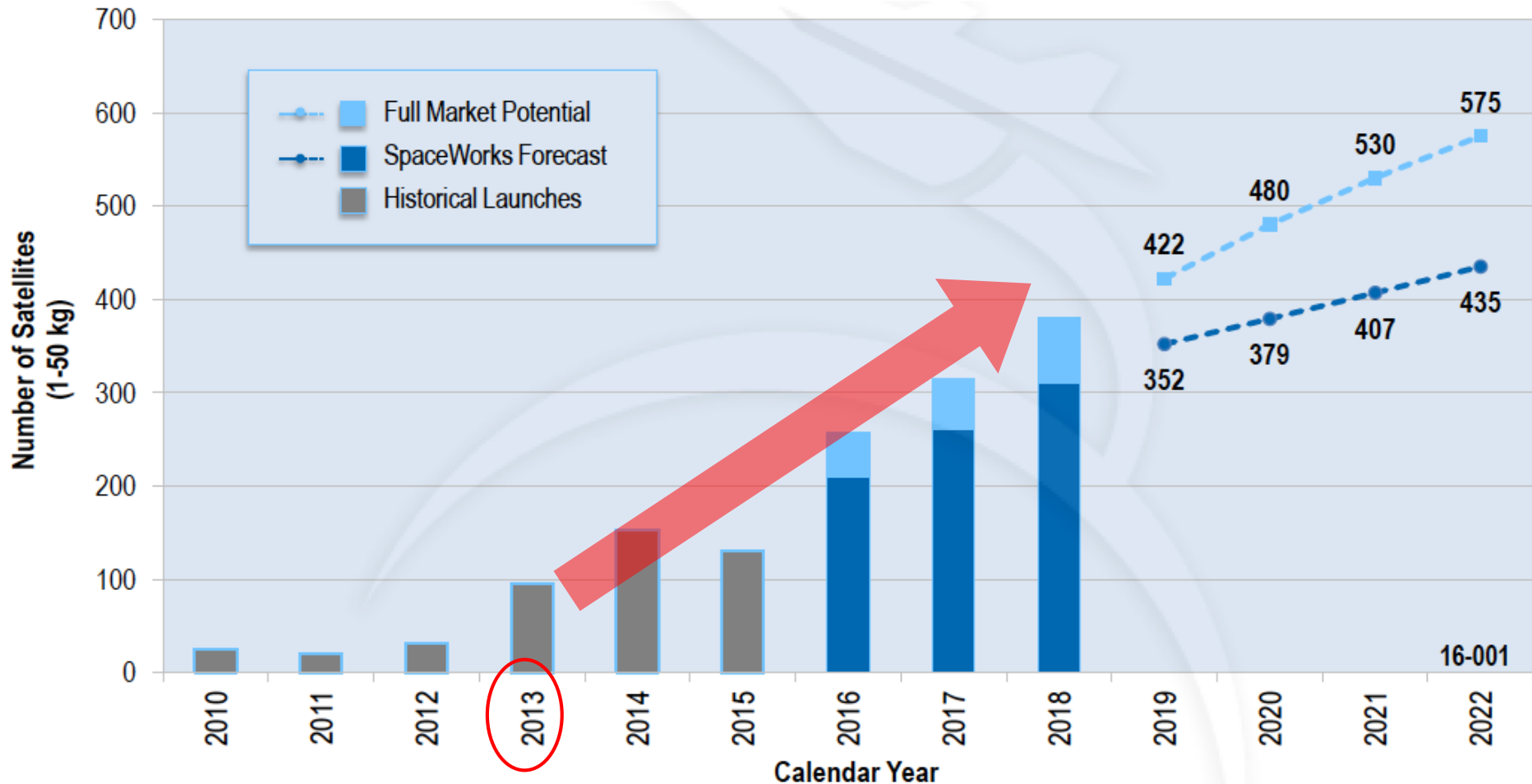


XI-IV, 1U

- ▶ 50cm立方規格や, CubeSat規格はISSからの放出が容易
  - ▶ 打ち上げ機会に恵まれている
  - ▶ ただし高度400km
- ▶ その他もロケットI/F, コンポーネントの観点から規格に沿った構造で話を進めるのがよい

# 超小型衛星の成長

- ・ 低価格，低開発期間という利点から，「教育ミッション」はもちろん「**挑戦的**なミッション」，「**多数の衛星**を使うミッション」に向く

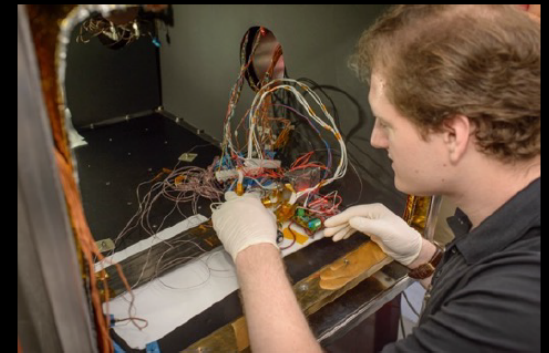




# 米国で超小型衛星開発が活発化

## What are Smallsat Technology Partnerships (STPs)?

- U.S.-based university and NASA center, PI-lead cooperative agreements
- Competitive solicitations
  - Specific technology topics vary
- Grants for max duration of two years
  - Year-2 option after first annual review
- 4 “classes” to-date: 2013, 2015, 2016, 2018

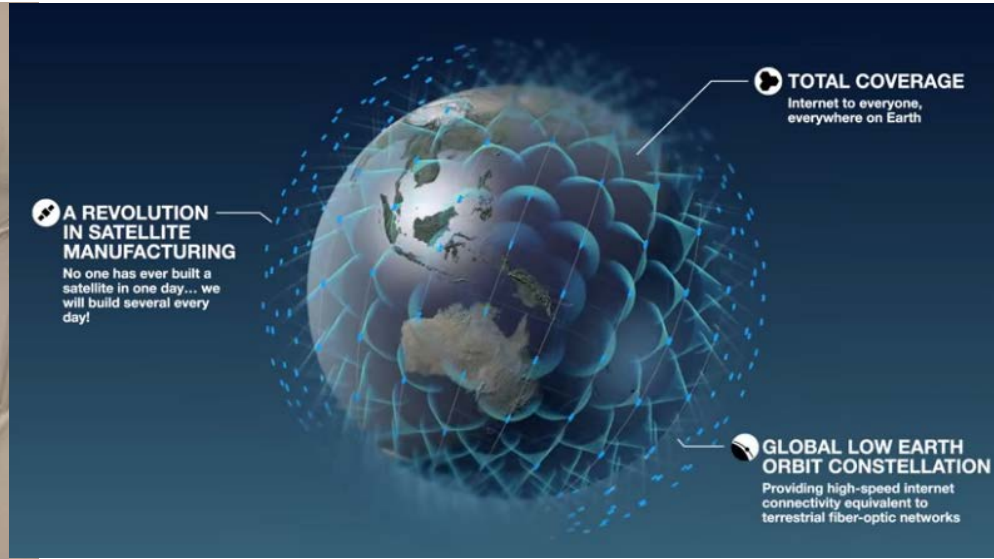


| Grant Award Caps   |                             |                                                                                                                                        |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STP Proposal Class | University                  | NASA/JPL FTE                                                                                                                           |
| 2013, 2015, 2016   | \$100k / year<br>2-year max | <ul style="list-style-type: none"><li>• 1.0 FTE for NASA/JPL partner,</li><li>• \$25k procurement to NASA/JPL in second year</li></ul> |
| 2018               | \$200k / year<br>2-year max | <ul style="list-style-type: none"><li>• 0.5 FTE for NASA/JPL partner</li><li>• \$25k procurement to NASA/JPL in second year</li></ul>  |

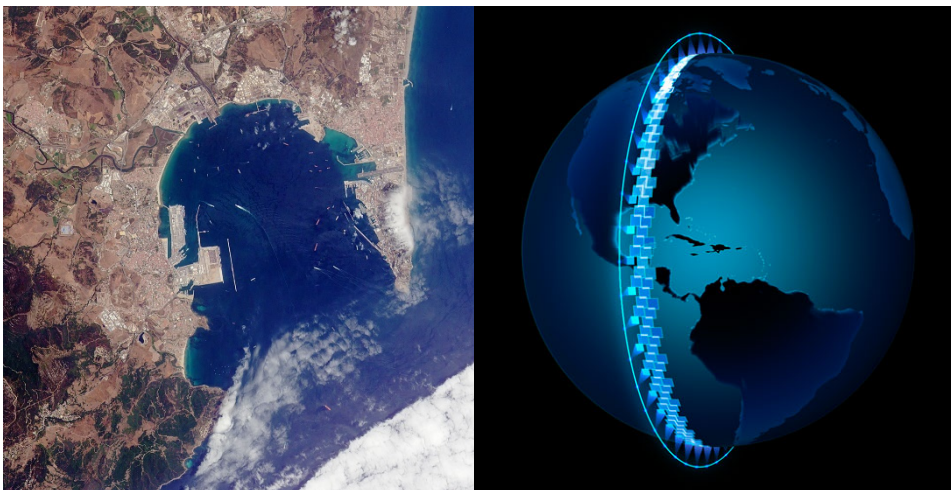
# 宇宙ベンチャー企業



Planet Labsによる3Uでの地球リモセン  
すでに150機打ち上げ済み



ワンウェブによる700機の宇宙通信網



その他、

- ・ リモセン企業
- ・ 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

Axel SpaceによるAxelGlobe計画

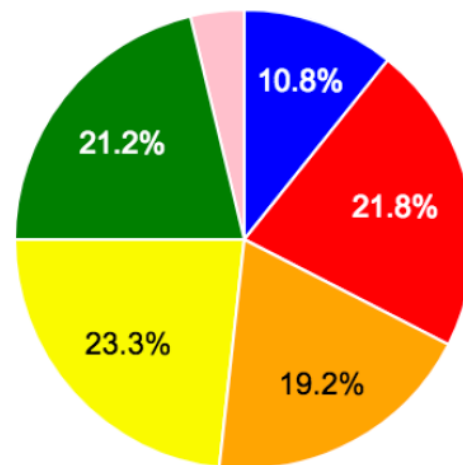
# 課題：性能の低さ，成功率の低さ

## ▶ 性能

- ▶ 低供給電力，低通信速度
- ▶ 粗い姿勢制御，軌道制御できない
- ▶ ここ数年で大きく改善されてきた(後述)

## ▶ 成功率

- ▶ 大学衛星は22%のDOA率 (DOA=Dead On Arrival)
- ▶ 改善に向けて，“基準”を決める動き



24年間の大学衛星ミッションの結果まとめ



\* 青はロケット打ち上げ失敗

## 最新国際動向

# Small Satellite Conference 2018

## -Delivering Mission Success-

---

Thank you for making  
SmallSat 2018 a success!



### Participants

3050 total  
42 countries  
900 organizations



### Exhibits

206 commercial  
16 university



### Presentations

72 poster  
158 oral



### Plan Ahead

August 3-8, 2019

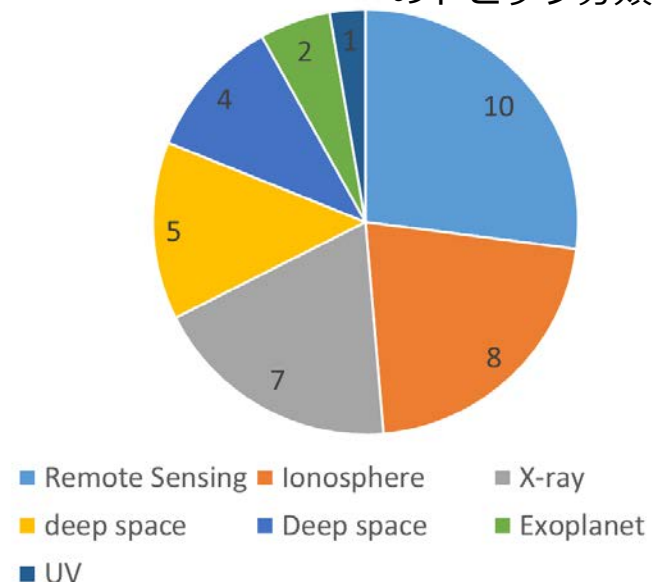




# 発表内容

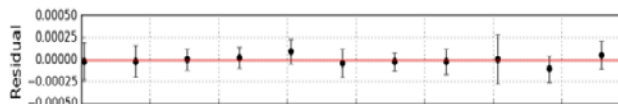
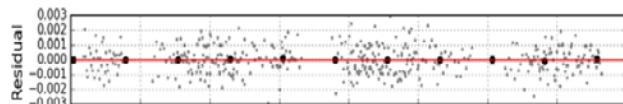
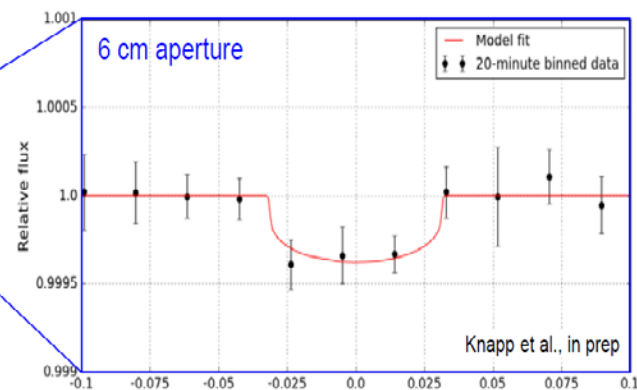
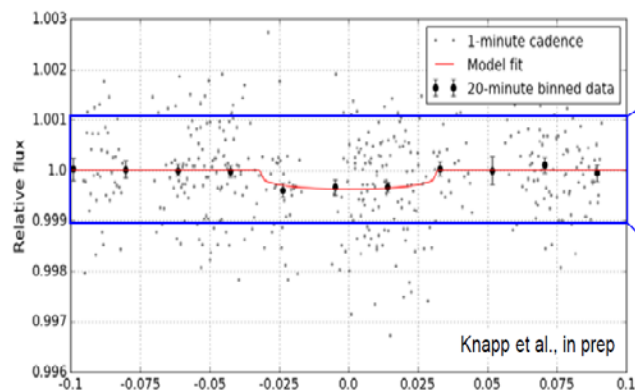
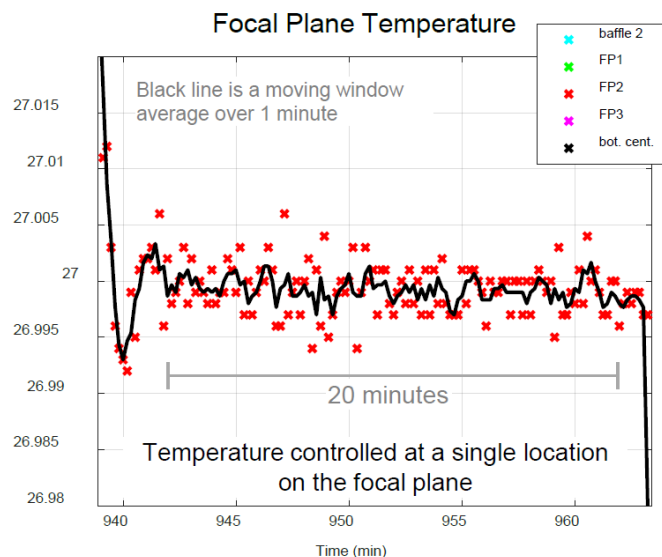
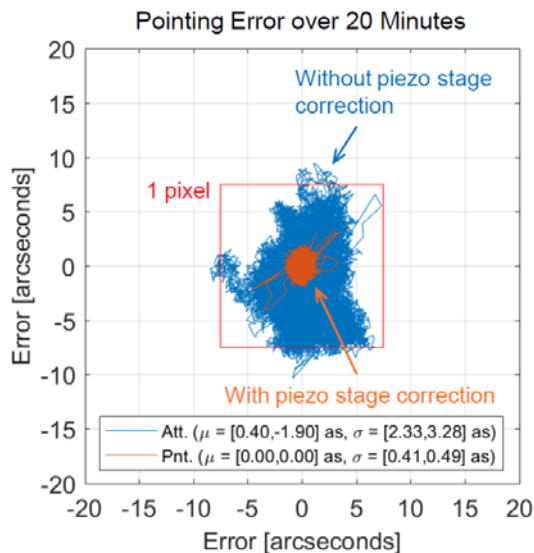
- ▶ 工学：61
  - ▶ 姿勢制御，光通信，**編隊飛行**，など
- ▶ 理学：37
  - ▶ 地球リモセン，電離層・磁気圏観測，**X線**観測など
- ▶ その他：47
  - ▶ **信頼性向上**，教育，打ち上げ手段など

SSC2018理学関連発表  
のトピック分類





# ASTERIA : 6Uでの系外惑星探査 -超高精度姿勢・熱制御-



# X線ミッション

## HaloSat : 2018年6月13日ISS放出



### HaloSat: mission requirements



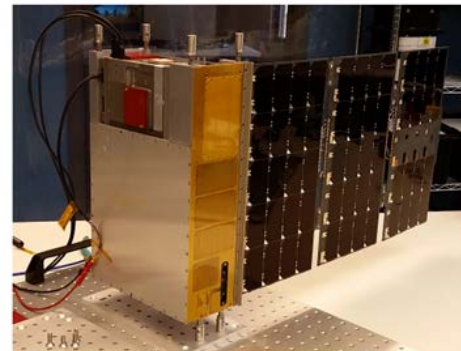
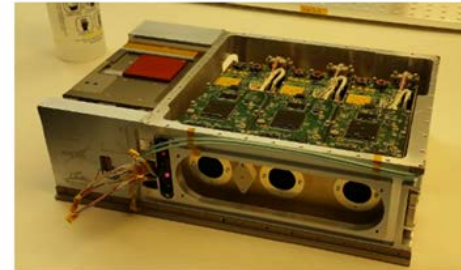
- Energy band  $\sim 0.3 - 2$  keV
- Sensitive near 600 eV with energy resolution of  $\leq 100$  eV
- Observe whole sky  $\rightarrow$  determine geometry of the halo
- Obtain sufficient number of X-ray counts:
  - Long duration mission (6-12 months)
  - View large part of the sky  $\rightarrow$  FOV with  $10^\circ$  diameter
  - Statistical accuracy of  $\pm 0.5$  LU\* for a field with an oxygen line strength of 5 LU



### HaloSat: spacecraft bus



- Spacecraft bus from Blue Canyon Technologies, Inc.
- 6U format, i.e. dimensions of 10.5 cm x 22.5 cm x 36.5 cm
- 4U volume allocated for the science payload, 2U volume allocated for avionics and payload-to-spacecraft interface
- Equipped with deployable solar panels
- Pointing capabilities, with pointing accuracy of  $\pm 0.002^\circ$
- Slewing rate of  $3^\circ/\text{sec}$



08/05/2018

HaloSat: search for missing baryons

08/05/2018

HaloSat: search for missing baryons

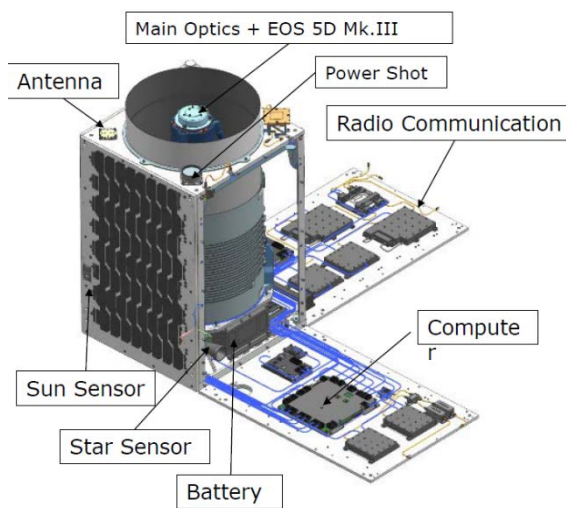
10



16

Anna Zajczyk, *et al.*, "HaloSat: A Search for Missing Baryons with a CubeSat", 32<sup>nd</sup> SSC, 2018

# 高分解能可視地球観測 キヤノン電子50kg級超小型衛星



Nobutada Sako, "Utilizing Commercial DSLR for High Resolution Earth Observation Satellite",  
32<sup>nd</sup> SSC, 2018

## 現状の実力と限界

# CubeSatの能力

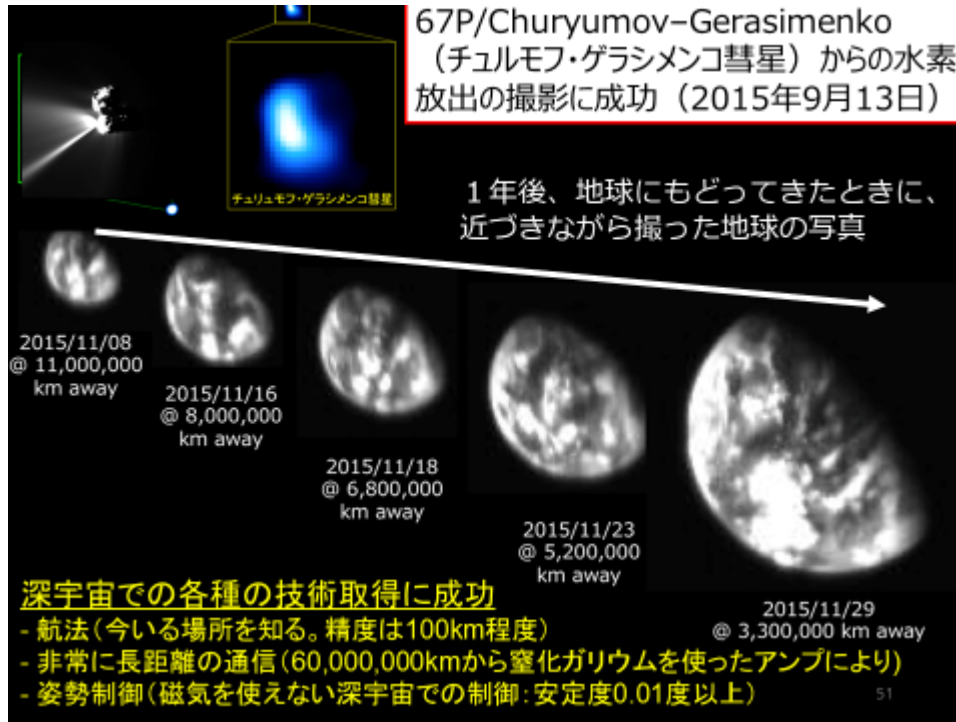
- ▶ 姿勢制御ユニットXACT  
(Blue Canyon technology社)
  - ▶ 0.5U, 0.91kg, 制御精度  $1\sigma 0.003$  度,  $1\sigma 0.007$  度(STT光軸周)
    - \* ASTERIAでは, **星画像フィードバック**とピエゾアクチュエータと組み合わせて0.0001度を達成済み
- ▶ 太陽電池HaWK (MMA design社)
  - ▶ 1kg, 40Wの発電能力
  - ▶ ジンバル付きの物もあり
- ▶ その他, 計算機, 電源制御回路なども購入可能



EQUULEUS(6U,14kg)

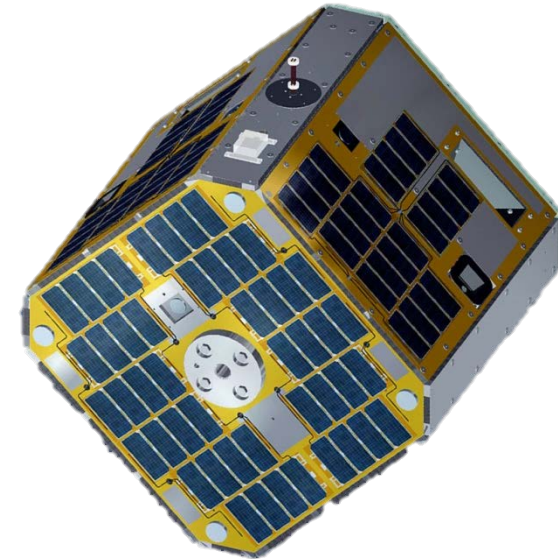


# Micro Satellite



## PROCYON(60kg)

- 姿勢安定度  $1\sigma 0.002$ 度@10秒  
 $1\sigma 0.007$ 度@200秒以上
- イオンエンジンでの軌道制御



## Nano-JASMINE(35kg) :

- 姿勢安定度 :  $0.0002$ 度@8秒
  - **星画像フィードバック**による
- 温度制御 : -50度程度まで受動冷却
- 温度安定度 :  $0.1$ 度@90min



# 超小型衛星の現状の課題

## ▶ 低温熱制御

- ▶ 電力/質量比が高く、温度を下げづらい
- ▶ 超小型用Cryo pumpも提案されつつある

## ▶ 高精度位置制御

- ▶ CubeSatクラスでの最高相対位置制御精度は25cm
- ▶ 3年間0.5km精度でフォーメーション維持も成功
- ▶ 干渉計にはもう二桁良い精度が必要

## ▶ 体積・質量の限界

- ▶ 超小型である以上避けられない

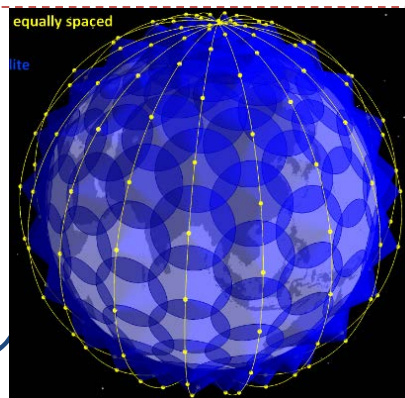
⇒ Formation Flight(編隊飛行)

# 編隊飛行の可能性

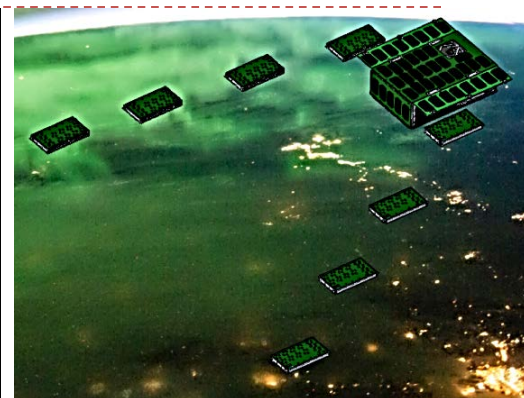
# 複数衛星を使うミッション

## ▶ Constellation

- ▶ 高性能な数基～数百基
- ▶ 軌道・位相が大きく異なる
- ▶ 位置制御は粗い
- ▶ 例：GPS, リアルタイムリモセン



Constellation



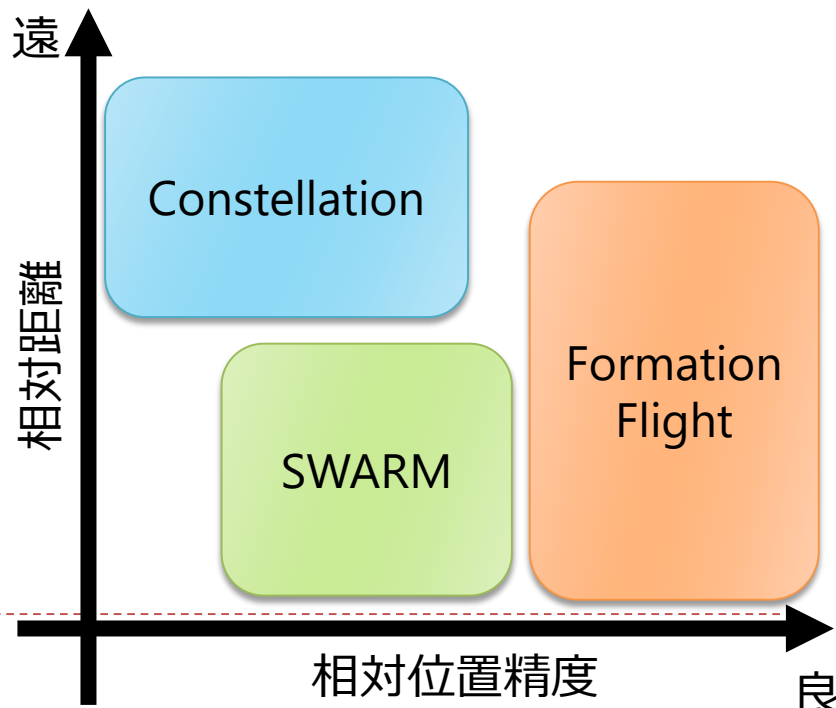
SWARM

## ▶ SWARM

- ▶ 低性能な数基～数百基
- ▶ 相対位置は近い
- ▶ 高精度位置計測が必要だが，位置制御は粗い
- ▶ 例：同時多点観測

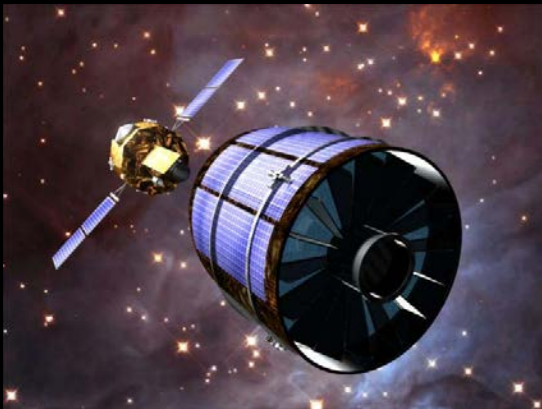
## ▶ Formation Flight(編隊飛行)

- ▶ 数基，相対位置制御精度が高い
- ▶ 例：干渉計，重力波

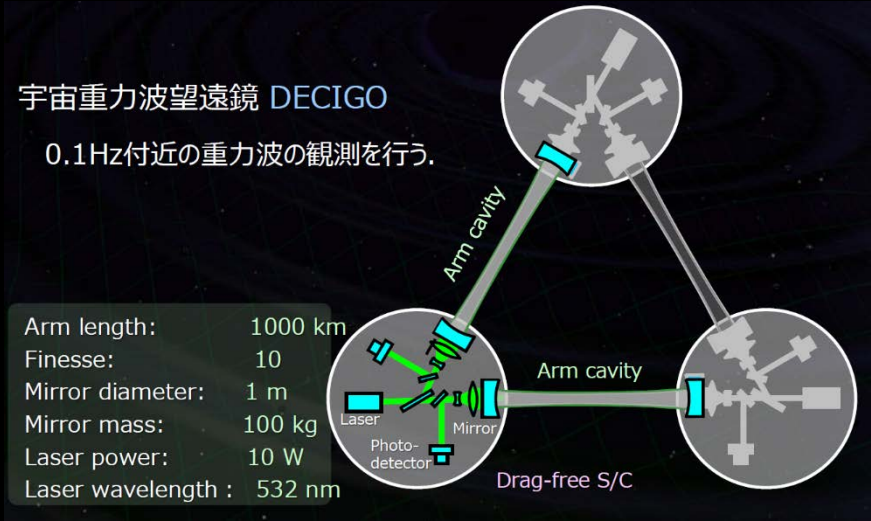


# Formation Flight (編隊飛行)

## 大型・中型衛星

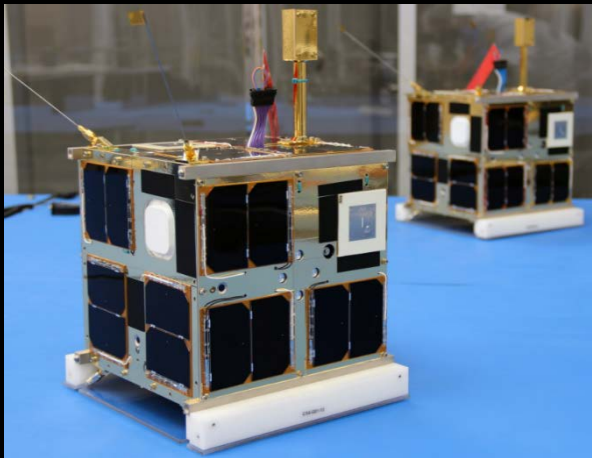


XEUS(ESA)



DECIGO(日本)

## 超小型衛星



CanX-4&5(カナダ, 2014)  
CubeSatで25cm精度FF(100m基線長)



# 大型編隊飛行と小型編隊飛行のつながり

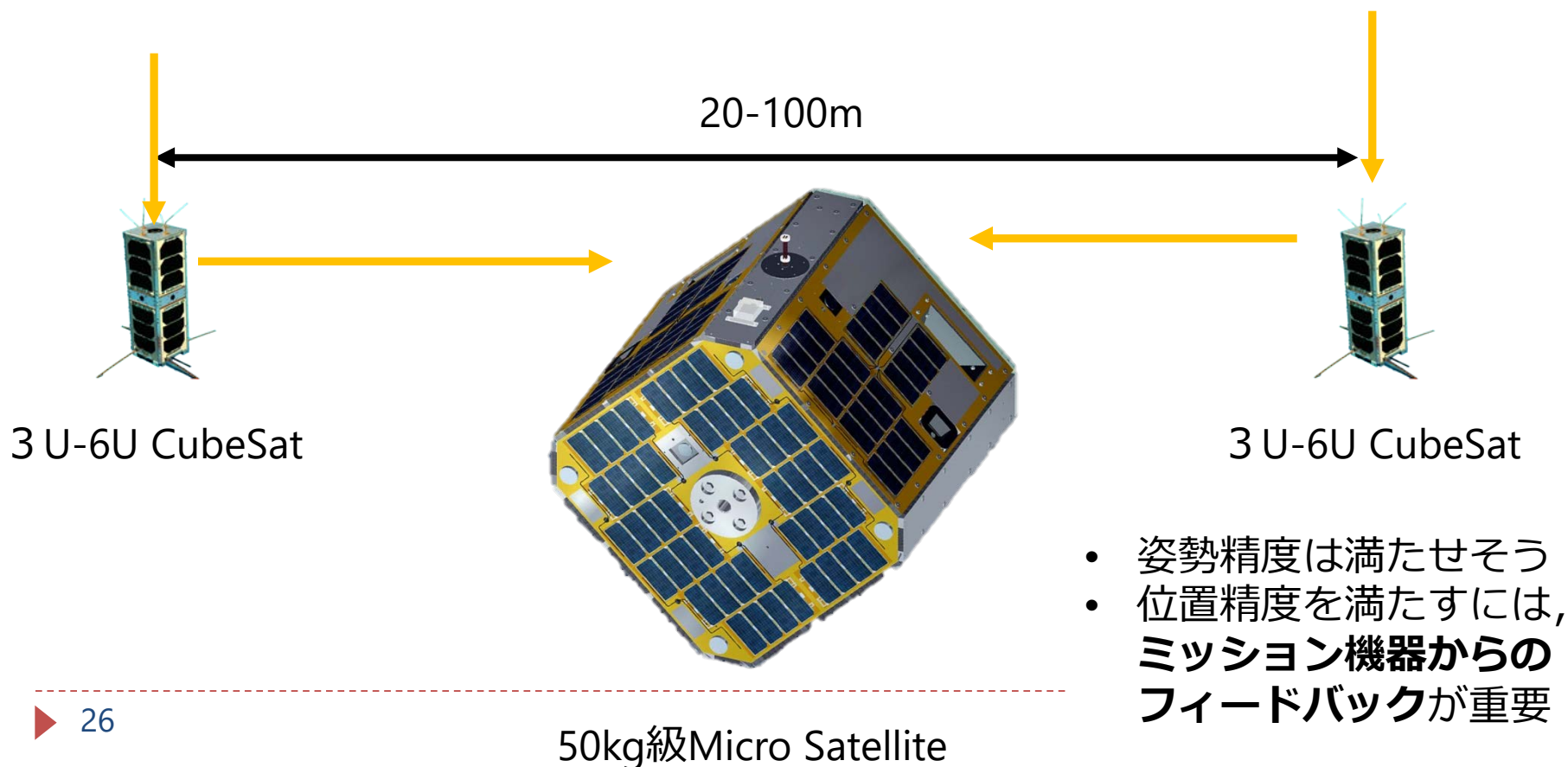
---

- ▶ 大型・中型であっても編隊飛行の実現例は少ない
  - ▶ ETS-VII(JAXA,1997)：ランデブドッキング技術の実証
  - ▶ GRACE(NASA,2002)：重力場観測
  - ▶ HTV(JAXA, MELCO)：ISSランデブドッキング
- ▶ 光学望遠鏡構築，干渉計構築といった実現例はない
- ▶ 制御アルゴリズム，検証シミュレータ等は共通にできる
- ▶ 制御コンポーネントで共通部分もある
  - ▶ 大型⇒小型は難しいが，小型⇒大型は可能な部分もある
  - ▶ 推進機：同じ推力でも，小型で普通の加速度  
⇒大型では微小加速度
- ▶ 大型編隊飛行(DECIGOなど)の実現のためにも，超小型編隊飛行での事前実証が重要
  - ▶ もちろん，超小型編隊飛行だけでも意義のある理学観測も可能



# 赤外線干渉計の実証機を超小型で(with松尾先生)

- ▶ 短いタイムスケールで可能なミッション
  - ▶ 干渉縞を宇宙空間で初検出すること为目标
  - ▶ \* 詳細は検討・調整中



## まとめ

---

- ▶ 超小型衛星の**性能は大きく改善**されてきている
- ▶ 超小型衛星を利用した**理学ミッションが多く提案・実現**されている
- ▶ 超小型衛星編隊飛行技術の獲得のため、  
かつ**大型衛星編隊飛行技術の事前実証機**として、  
新たなミッションを検討していきたい
- ▶ 精度を得るには、ミッション機器からのフィードバック、  
ミッション機器の微調整機能が重要

**「超小型」 × 「編隊飛行」 × 「理学観測」**