

超小型衛星による天文学： 宇宙可視光背景放射観測

佐野 圭¹、布施 哲人¹、瀧本 幸司¹、趙 孟佑¹、
北村 健太郎¹、増井 博一¹、寺本 万里子¹、中川 貴雄²、
松原 英雄²、磯部 直樹²、和田 武彦²、宮崎 康行²、
船瀬 龍²、松浦 周二³、津村 耕司⁴、高橋 葵⁵、五十里 哲⁶、
青柳 賢英⁷、谷津 陽一⁸、軸屋 一郎⁹、VERTECS collaboration

¹九州工業大学、²JAXA/ISAS、³関学大、⁴東京都市大、
⁵ABC、⁶東京大、⁷福井大、⁸東工大、⁹金沢大

目次

超小型衛星による天文学

宇宙可視光背景放射観測ミッション

共通化プラットフォーム計画

まとめ

目次

超小型衛星による天文学

宇宙可視光背景放射観測ミッション

共通化プラットフォーム計画

まとめ

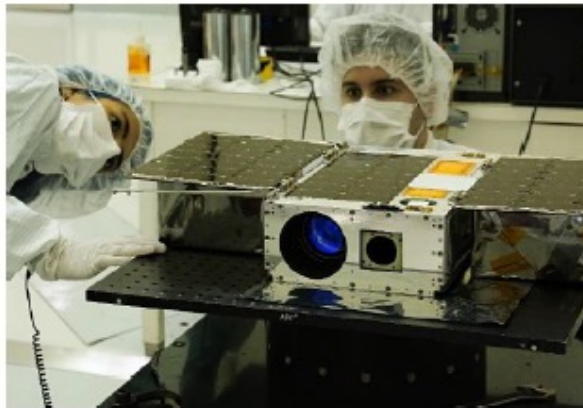
スペース天文ミッションの問題と打開策

- 問題：ミッションの巨大化・長期化
 - 学問の発展に即した新しいアイデアの埋没
 - 宇宙科学を進める人材の枯渇
- 打開策：迅速・機動的なミッション実現
 - 方法：超小型衛星の活用
 - 超小型衛星の特性を活かし、「新しいパラメータスペースを拓く」特定目的に特化。迅速に、機動的に。
 - 大規模ミッションとの相補性
 - 確実に：プラットフォームの共通化
 - バス部のプラットフォームを、ある程度共通化することにより、迅速・確実・安価に実現する。

超小型衛星と大型衛星

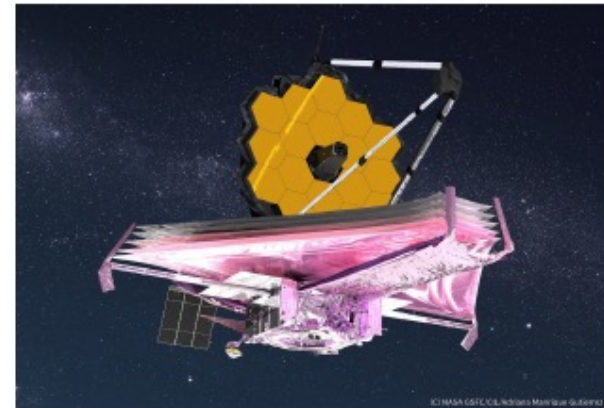
ASTERIA (6U)

超小型天文衛星



JWST

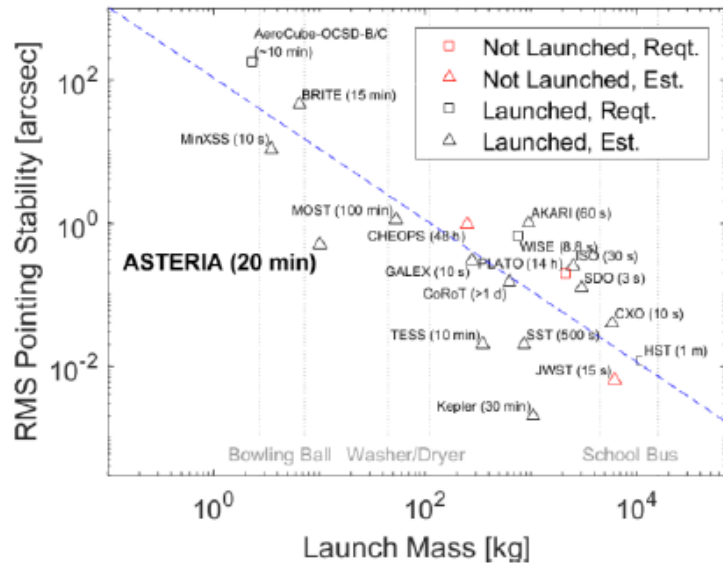
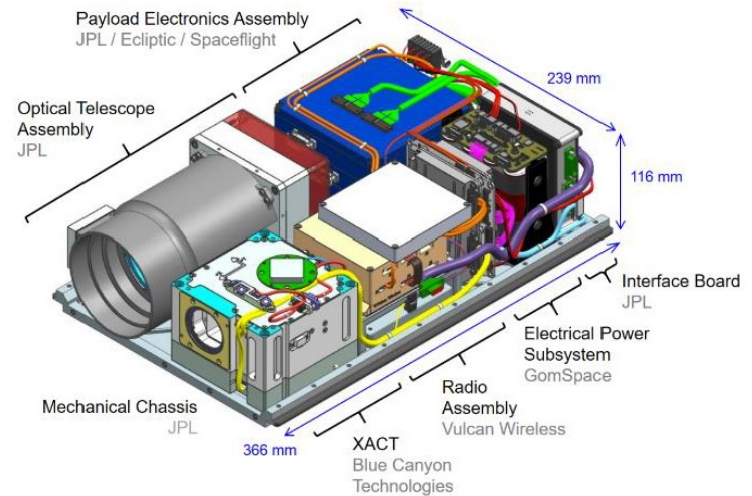
大型天文衛星



重量	数10kg以下	数100kg以上
開発コスト	数億円以下	数百億円以上
開発期間	数年以下	10年以上

6U天文衛星ASTERIA

- MIT/JPLにより開発
- 2017年打ち上げ
- 高精度姿勢制御による系外惑星観測

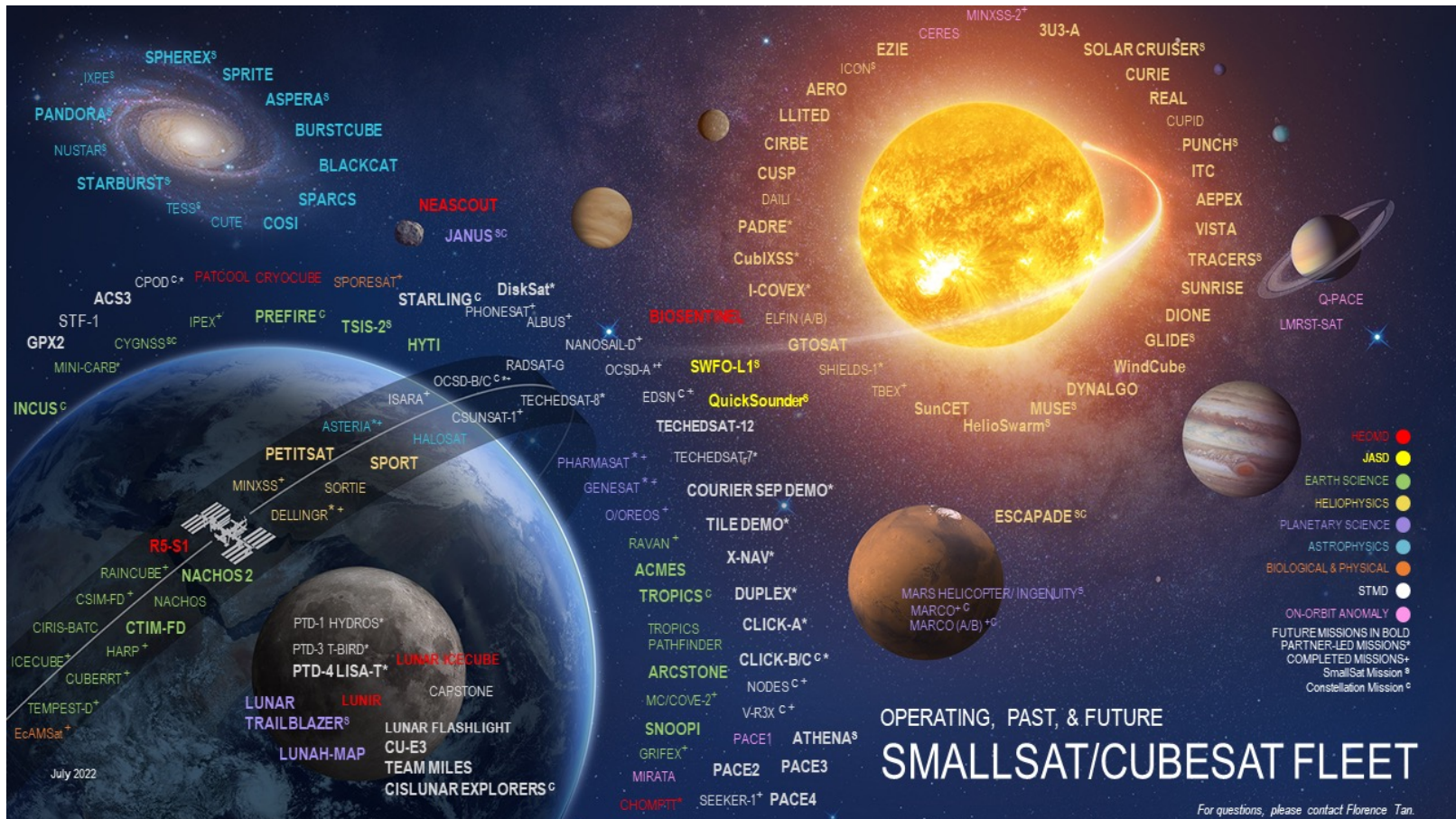


Parameter	Value
Mass	10.165 kg
Stowed dimensions	239 mm x 116 mm x 366 mm
Power generation	48 W (beginning of life)
Energy storage	52.7 Wh (beginning of life)
Telecom frequency	S-band
Data rates	32 kbit/s uplink 1 Mbit/s downlink
Processor	Xilinx Virtex 4FX / PowerPC405
Onboard storage	14.5 GB

Smith et al. (2018)

NASAの小型科学衛星計画

天文、太陽科学、惑星科学など多様なサイエンス



6U衛星による天文ミッション

制約条件

- ・ 口径6cm程度の小型望遠鏡
- ・ 常温での観測機器の運用
- ・ 厳しくない指向安定性、絶対指向精度

→宇宙可視光背景放射観測を着想

宇宙背景放射観測における要点：集光力

集光力 \propto 「集光面積」 \times 「観測立体角」

6Uの衛星による観測でも、広視野観測により、ハッブル宇宙望遠鏡を上回る「集光力」を達成できる

目次

超小型衛星による天文学

宇宙可視光背景放射観測ミッション

共通化プラットフォーム計画

まとめ

宇宙背景放射と天体形成史

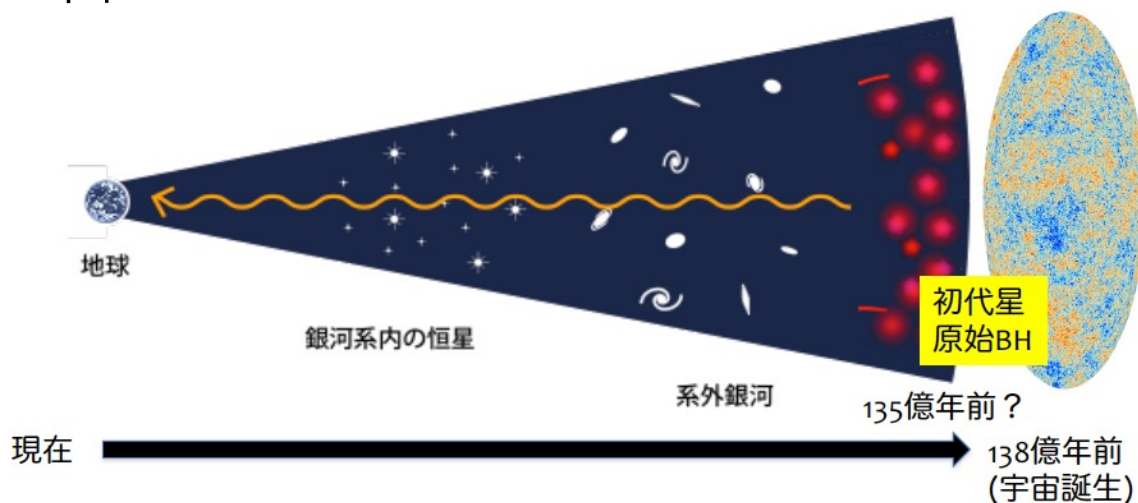
宇宙背景放射

- 宇宙初期から現在までに放出されたあらゆる放射の積算

可視光～赤外線宇宙背景放射

- 宇宙初期の天体やブラックホールなど未知天体からの放射を含む

→天体形成史を
解明するために
重要な観測量



宇宙背景放射の概念図

宇宙背景放射の観測

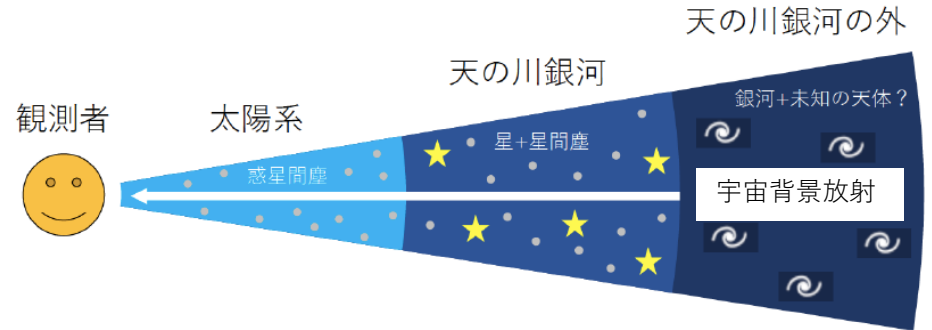
宇宙から飛来する放射：

地球大気放射

- + 太陽系内のダストからの放射（黄道光）
- + 銀河系内の放射
- + 宇宙背景放射

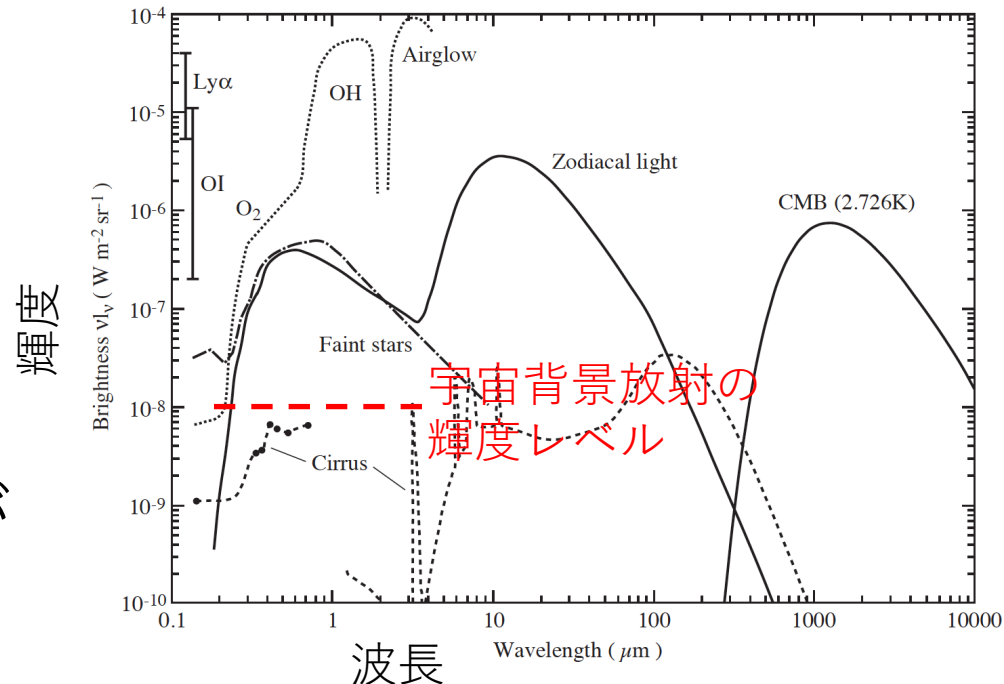
宇宙背景放射の測定

- 地球大気放射を避けるために宇宙からの観測が必須



宇宙から飛来する放射成分

Leinert+ 1998



宇宙背景放射超過問題

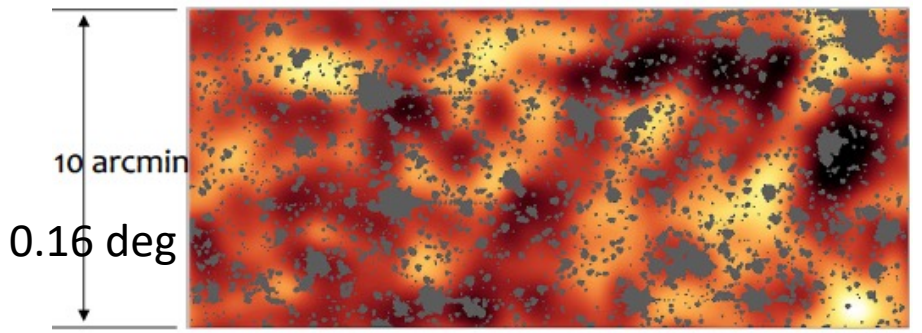
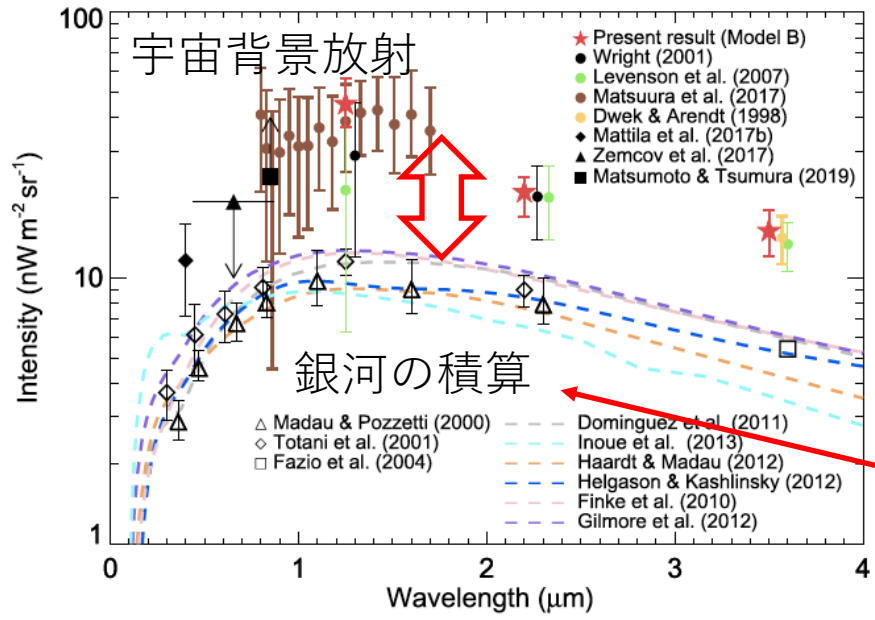
これまでの宇宙背景放射の測定

- 近赤外線域において、系外銀河の積算を上回る輝度、大角度スケールのゆらぎを観測

輝度

輝度のゆらぎ

Sano+ 2020



Kashlinsky et al. 2005, 2007



Hubble Ultra Deep Field

http://www.spacetelescope.org/science/deep_fields/

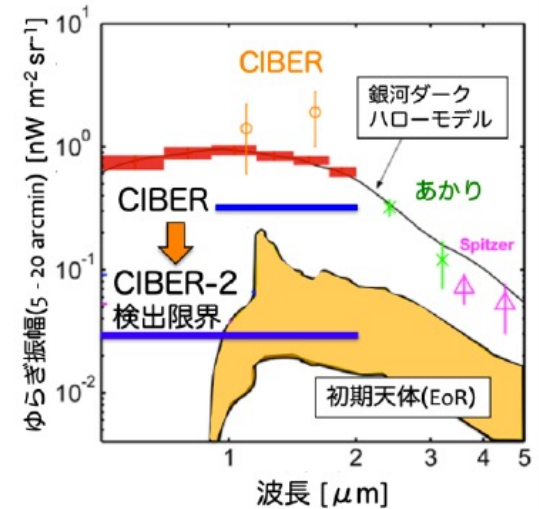
問題点：超過光の起源天体が不明

→ 解明する必要あり

ロケット観測実験CIBER-2

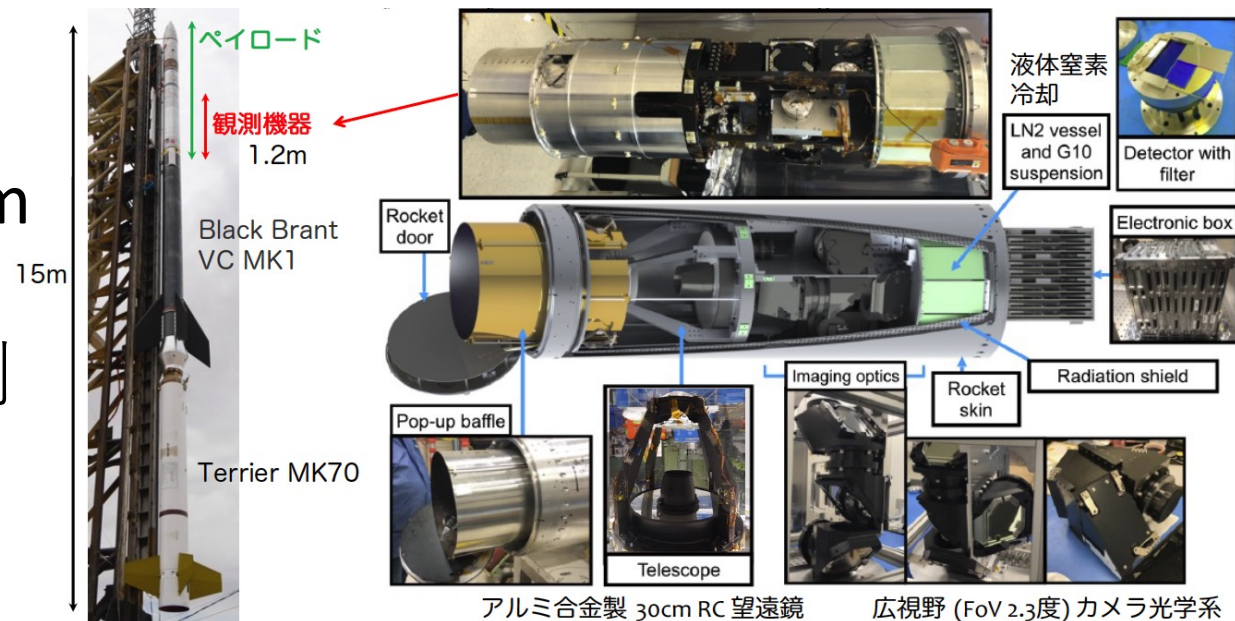
Cosmic Infrared Background Experiment 2 (CIBER-2)

- 可視光～近赤外線 ($0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$) の宇宙背景放射のスペクトルとゆらぎを観測し、その起源天体を解明 (ハロー星か初代天体か)



Shirahata+ 2016一部改変

- NASAの観測ロケットに口径30cm望遠鏡を搭載し、撮像および分光観測



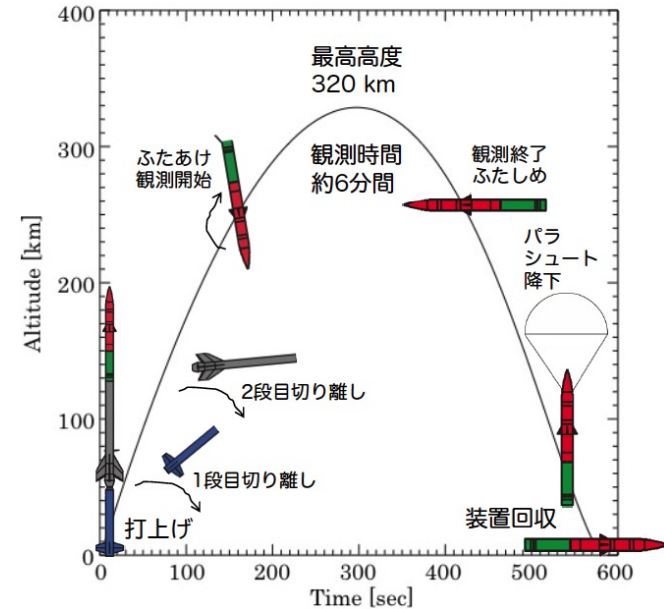
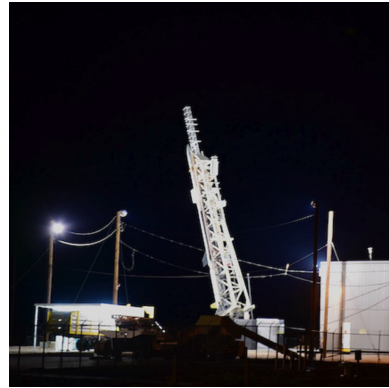
打ち上げと観測

2021年6月7日

第一回打ち上げ成功

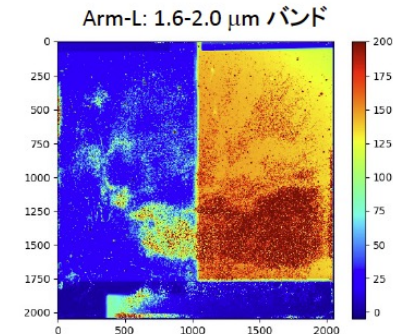
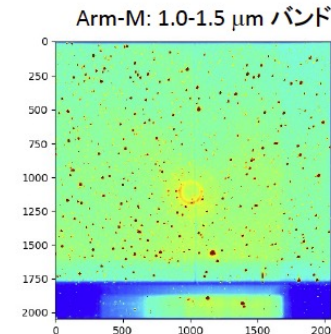
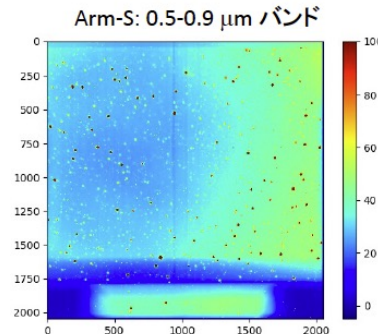
@米国ホワイトサンズ

- 全3波長帯でのデータ取得に成功
- 観測データの解析を実施中



観測シーケンス

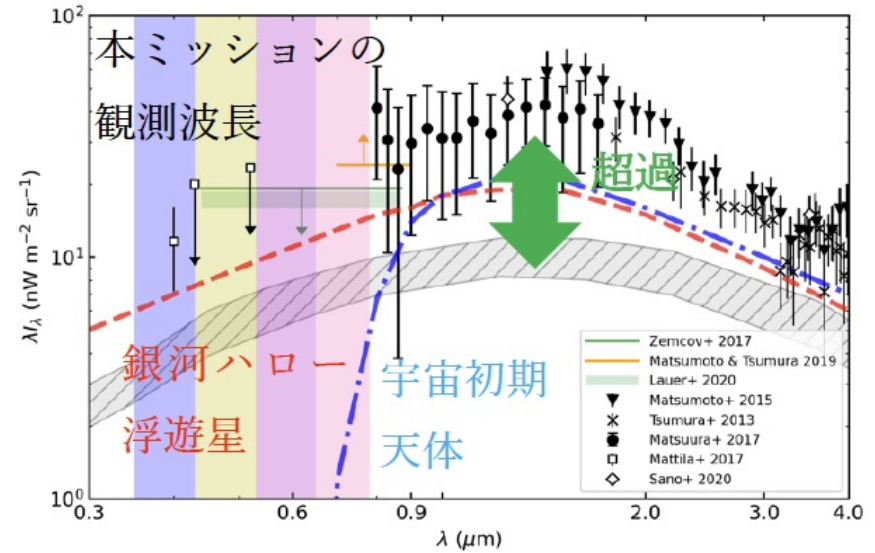
- ・ 迷光混入などの不具合があったが、2回目の打ち上げでは改善予定。



取得した画像データ

次代の宇宙背景放射観測

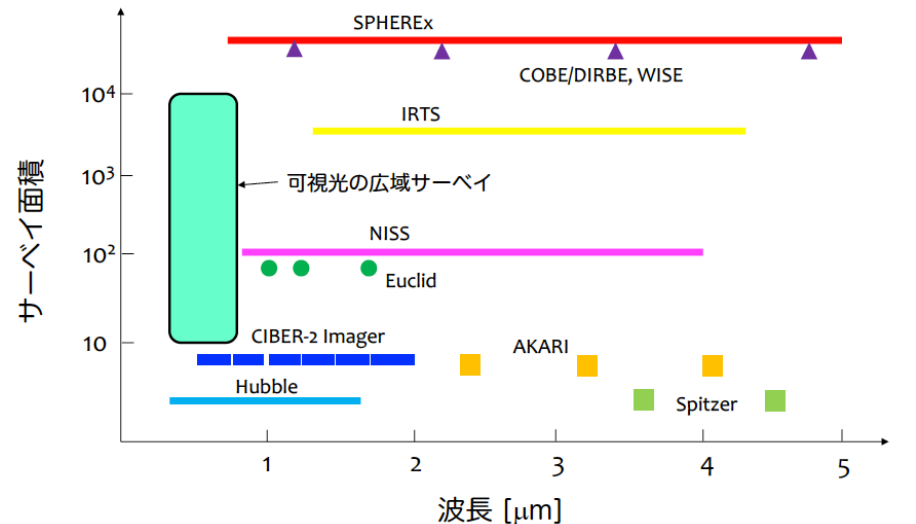
- ・ 観測波長域の拡大
 - スペクトル形状から起源天体を制約
- ・ 観測領域の拡大
 - 広天域におけるゆらぎ測定



可視光～近赤外線のスเปクトル

→ 可視光波長での広域観測が重要

- ・ 世界的に唯一のパラメータスペースでの観測



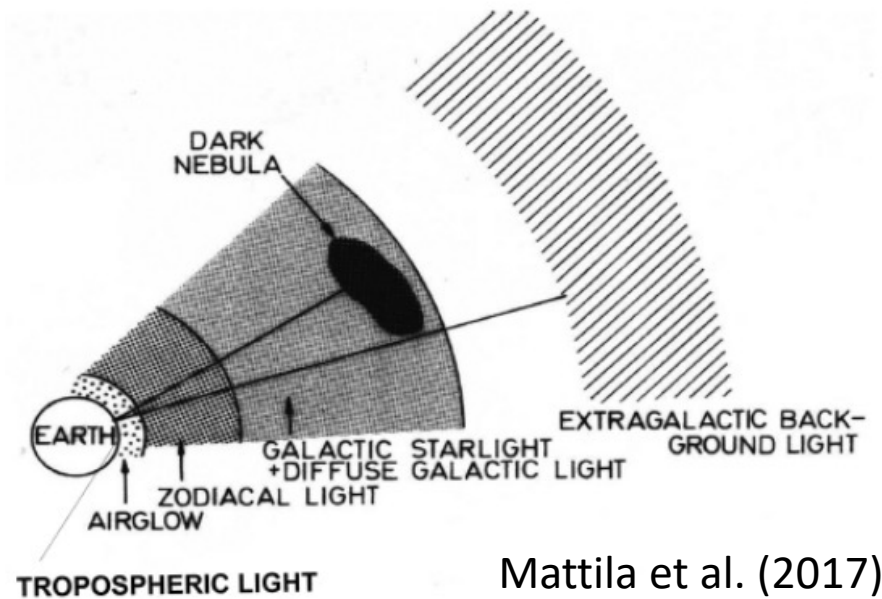
他天文プロジェクトの波長、サーベイ面積

暗黒星雲法

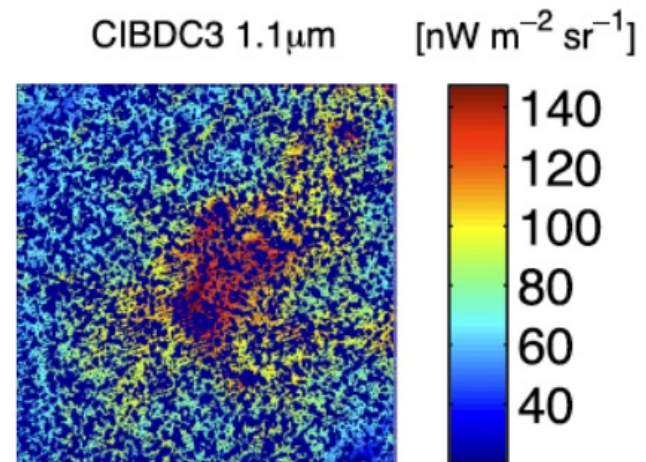
暗黒星雲による遮蔽効果を利用して、宇宙背景放射の絶対値を測定

→宇宙背景放射観測に特化した衛星でこそ可能な観測

ダストによる減光が大きい可視光波長において、多数の暗黒星雲の観測を計画



Mattila et al. (2017)



Onishi et al. (2018)

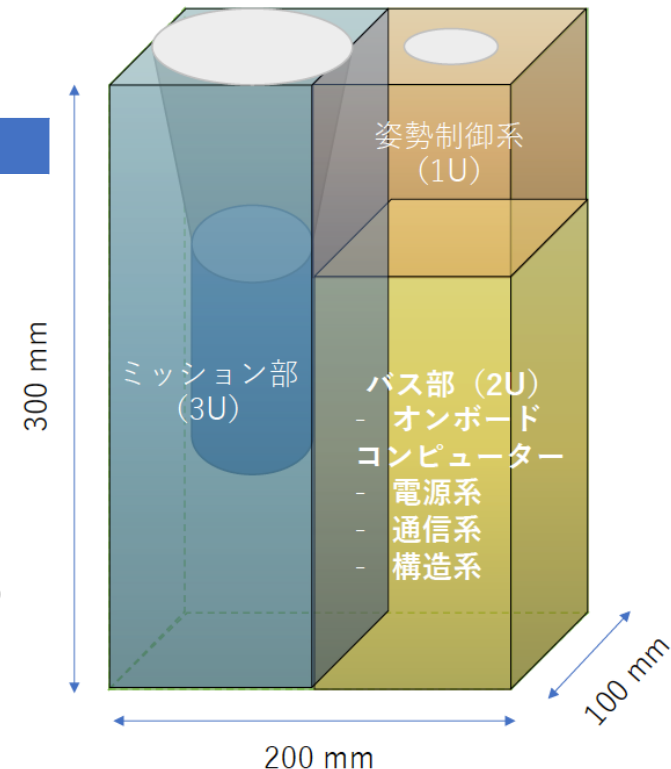
VERTECS構想

宇宙可視光背景放射観測6U衛星

VERTECS

(Visible Extragalactic background
Radiation Exploration by CubeSat)

Component	Volume	Properties
Payload	3U	Telescope (2U) + CMOS sensor (0.5U) + electronics (0.5U)
EPS	0.5U	KITSUNE based
Main bus (OBC, programming)	0.3U	KITSUNE based
Communication	1.2U	S-band command receiver (0.2U) S-band telemetry transmitter (0.2U) X-band telemetry transmitter (0.8U)
AOCS unit	1U	JAXA-UoT-Seiren developed



- IPST計画（関学/松浦講演）と相補的

KITSUNE衛星

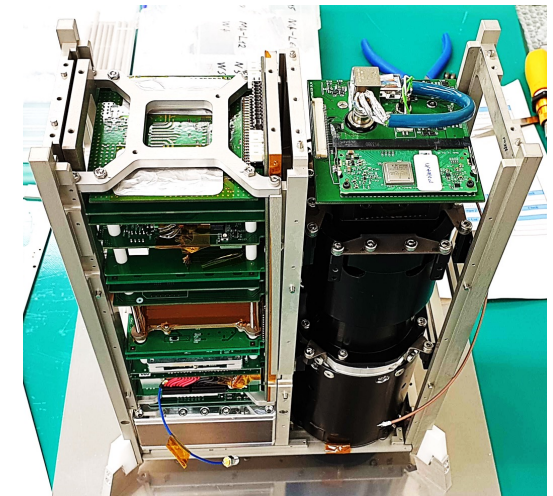
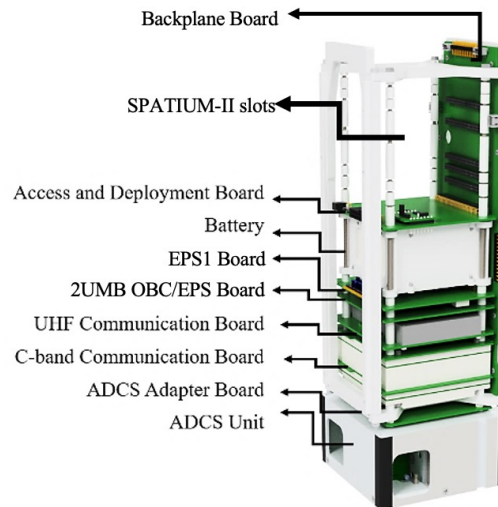
KITSUNE
(Kyutech standardized bus,
Imaging Technology System,
Utilization of Networking and
Electron content measurements)



- 地球観測6U衛星

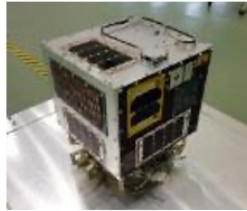
- 2Uサイズの
バスシステム

- 2022年3月に
ISSから放出



超小型衛星利用シンポジウム2022
趙講演資料から引用

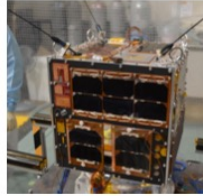
九州工業大学の実績



鳳龍弐号
2012/5/18



しんえん2
2014/12/3



鳳龍四号
2016/2/17



AV3
2017/1/16



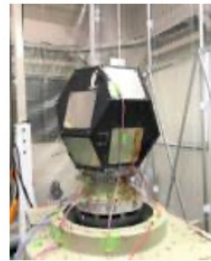
BIRDS-J, -G, -M, -N, -B
2017/7/7



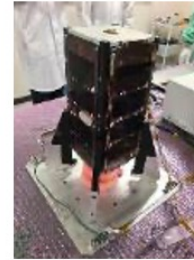
BIRDS-2B, -2M, -2P
2018/8/10



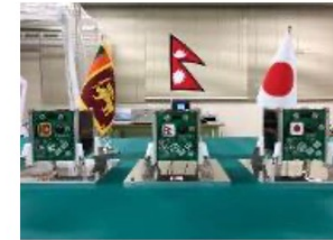
SPATIUM-I
2018/10/6



てんこう
2018/10/29



AV4
2019/1/18



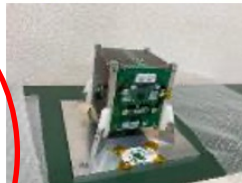
BIRDS-3N, -3S, -3J
2019/6/17



BIRDS-4P, -4P, -4J
2021/3/14



KITUNE
2022/3/24



FUTABA
2022/8/12

- これまでに23機が宇宙へ
- 2012年以降、世界で一番多く衛星を宇宙へ送った大学



→大学のヘリテージを活用した衛星開発が可能

国内の姿勢制御ユニット

姿勢安定度**10秒角**レベルを達成する**1U**ユニットが開発、軌道上実証されつつある状況。

外国製品との比較

Item	XACT-15	iADCS400	Developed Module
Size mm	100 × 100 × 50	95 × 96 × 67	91 × 90 × 90
Mass kg	0.9 kg	1.15 kg	1.2 kg
Stability deg (1 σ)	0.003 deg (10 arcsec)	0.003 deg (10 arcsec)	0.003 deg (10 arcsec)
Max MTQ output	0.1 Am2	0.4 Am2	0.37 Am2
Max RW torque	4 mNm	2.5 mNm	4 mNm
Max RW Momentum	15 mNms	15 mNms	5 mNms



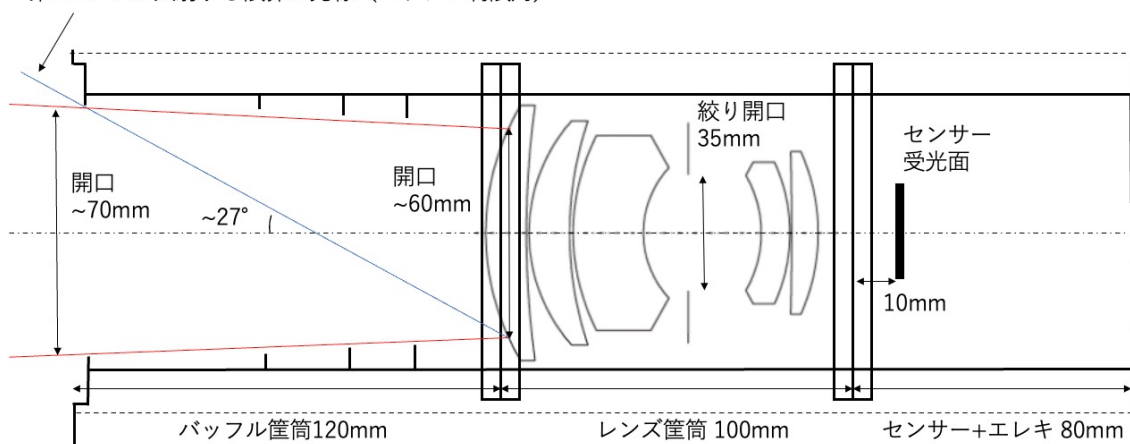
Ikari et al. (2022)

ミッション部の検討

市販のCMOSセンサーをもとに
検出感度を検討

→広視野光学系を採用することで
宇宙背景放射観測を実現

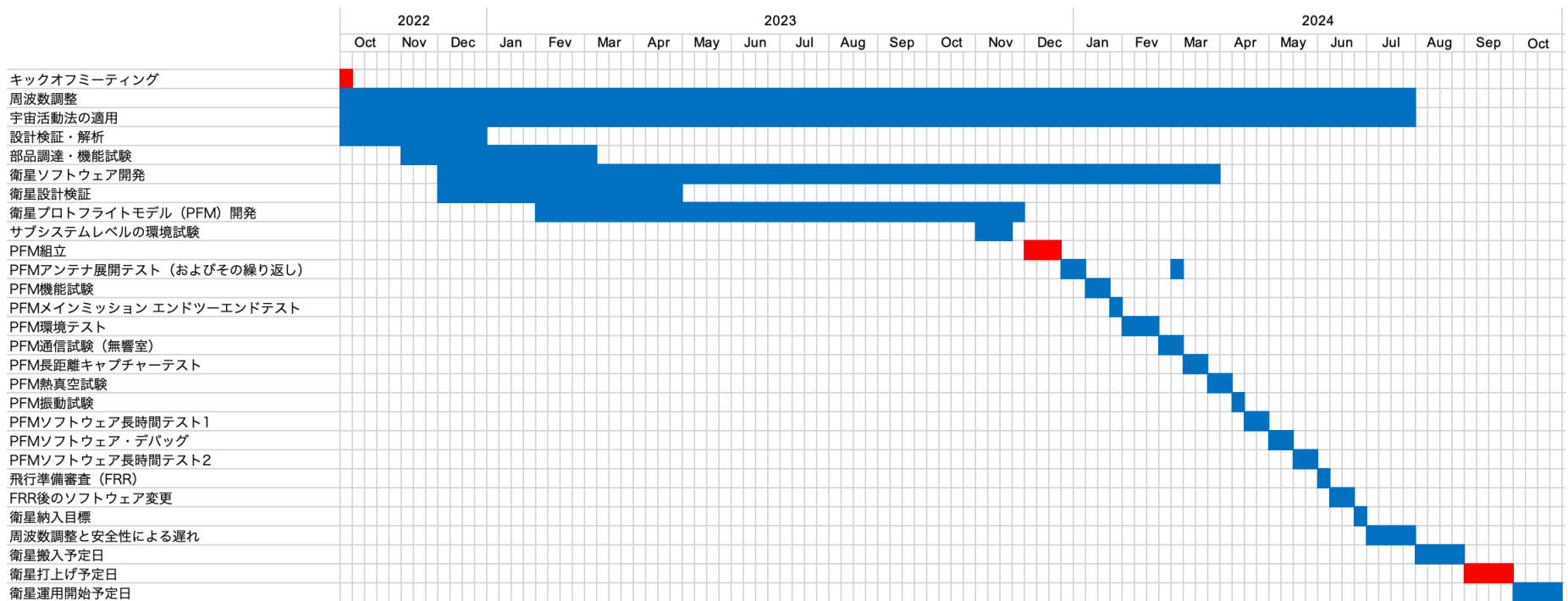
第1レンズに入射する限界の光線（バツフル制限角）



諸量	IMX533(SONY)
ピクセルサイズ (μm)	3.76
センサーサイズ (mm)	11.3 (diagonal 16)
解像度(H x V)	3008 x 3008
受光面サイズ	7.4×7.4 mm (1970×1970pix)
F値	2
焦点距離(mm)	70
有効口径 (mm)	35
ピクセル視野	11" × 11"
全視野	6 deg × 6 deg
光学効率	0.85 @450 nm 0.93 @550 nm 0.95 @650 nm 0.75 @750 nm
量子効率	0.92 @450 nm 0.83 @550 nm 0.57 @650 nm 0.36 @750 nm
暗電流 (e-/s)	0.1
読み出し雑音 (e-)	1.0 (Gain>125)
拡散光 S/N=1 1ピクセルあたり 60秒積分	8.8×10 ⁻⁸ W m ⁻² sr ⁻¹ @450 nm 8.9×10 ⁻⁸ W m ⁻² sr ⁻¹ @550 nm 1.02×10 ⁻⁷ W m ⁻² sr ⁻¹ @650 nm 1.4×10 ⁻⁷ W m ⁻² sr ⁻¹ @750 nm
40" × 40"点源 S/N=5 60秒積分	$m_{AB} < 15.3$ @450 nm $m_{AB} < 15.2$ @550 nm $m_{AB} < 14.8$ @650 nm $m_{AB} < 14.1$ @750 nm
星が占める割合 星1つ:40" × 40"	7.7%

開発スケジュール

2年程度の開発期間を想定（KITSUNEを参考）
→迅速な科学成果創出



開発費用、打ち上げ機会

・・・JAXA 輸送/超小型ミッション拡充プログラム、科研費等に応募

目次

超小型衛星による天文学

宇宙可視光背景放射観測ミッション

共通化プラットフォーム計画

まとめ

共通化プラットフォーム

- 対応
 - 複数ミッションで共通プラットフォーム活用（安価、高信頼性）
 - 共通性が高くかつ現実的な、リソース要求、姿勢制御要求の確立
 - VERTECSバスの標準化
- 利点
 - 迅速なミッション実現→単発ではなく、流れに！
 - 安価
 - 安定した運用
- 課題
 - 共通化は生きるか？（使いにくいものにならないか？）
 - リソース制約（volume、mass、power、data rate..）
 - 指向要求制約
 - 運用制約

共通バスへの要求

「超小型衛星利用シンポジウム2022」において、
宇宙科学ミッションへの要求仕様のアンケートを実施（JAXA/ISAS 中川）

6U衛星の場合

指向制御

数十 kg 級の衛星を中心に
~10 arcsec の
姿勢制御安定性要求あり。

軌道

I ~ 30-50 deg, 低軌道

SSO (Solar synchronous orbit)/ dawn-dusk の要求が多い。
天体観測特有の事情。打上げ機会の確保が課題。

運用

Target of Opportunity 対応が必要なものもある。

- ・ 要求について、コミュニティからのインプットを歓迎

項目	要求値
ミッション部体積	3 U
絶対指向精度	10 分角
指向安定度	10 秒角/分
データダウンリンク	数GByte/日
軌道	太陽同期軌道

目次

超小型衛星による天文学

宇宙可視光背景放射観測ミッション

共通化プラットフォーム計画

まとめ

まとめ

超小型衛星の利用は、大規模ミッションと相補的に、科学成果を迅速かつ継続的に得るために重要

宇宙可視光背景放射の観測は、6Uサイズの衛星で実現可能性が高く、超小型衛星の特性に合致したミッション

バス部を共通プラットフォーム化。ミッション実現の高信頼性化、迅速化、低コスト化