

高精度衛星編隊飛行が切り拓く 新たな超小型衛星ミッション

東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻
准教授

五十里 哲

五十里 哲(いかり さとし)

2004年

北九州高専入学

ロボコンで全国優勝(2007)

2009年

東大航空宇宙工学科編入学

2010年 (学部3年)

中須賀研の活動に参加

UNISEC初参加

2017年

東大 博士課程修了

2017-2023年

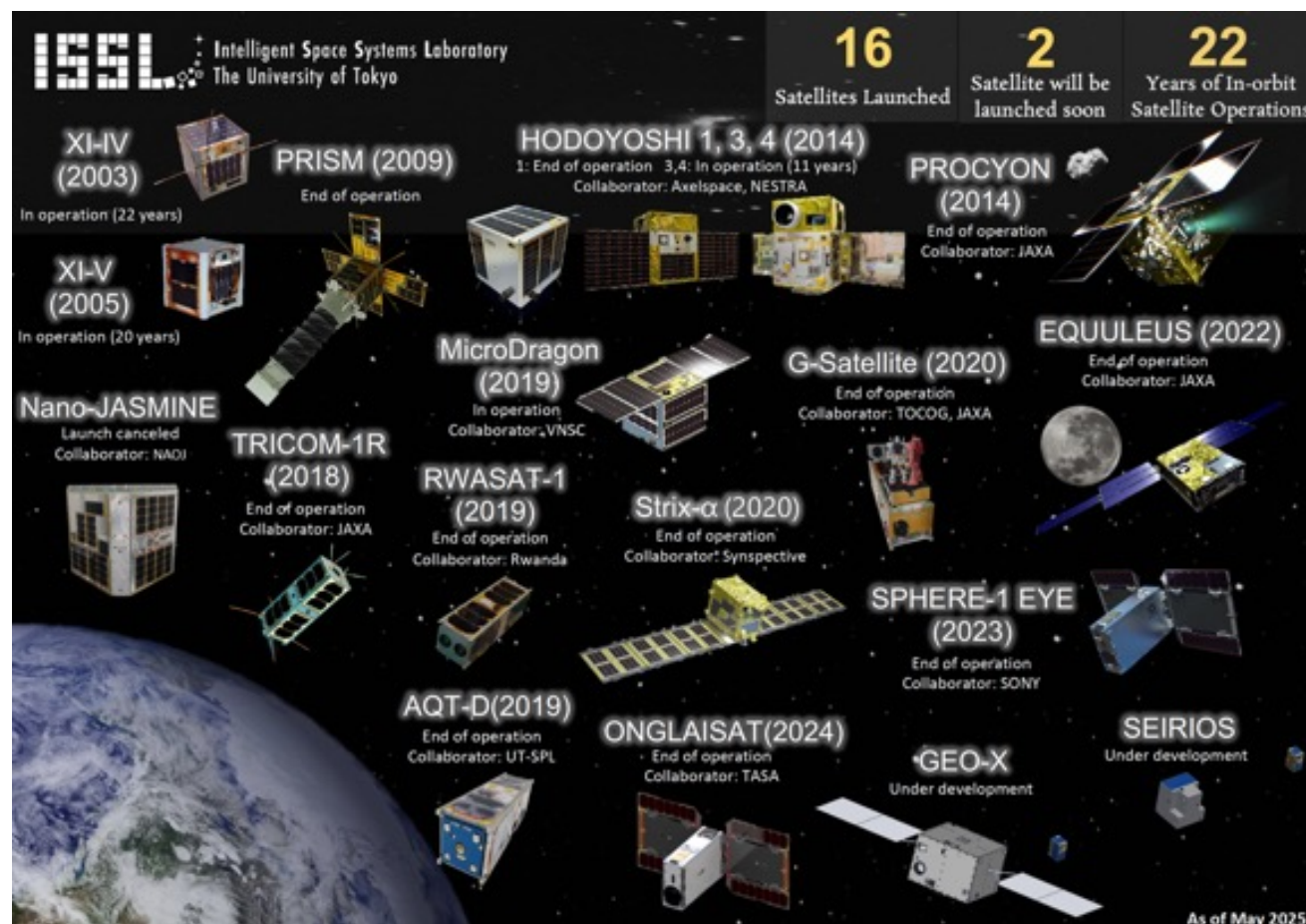
東大 助教

2022-2024年

ドイツ航空宇宙センター(DLR)

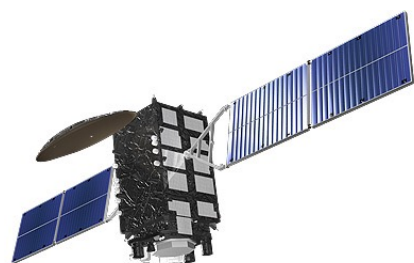
2024年-

東大 ISSL 准教授

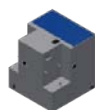


五十里 哲(いかり さとし)

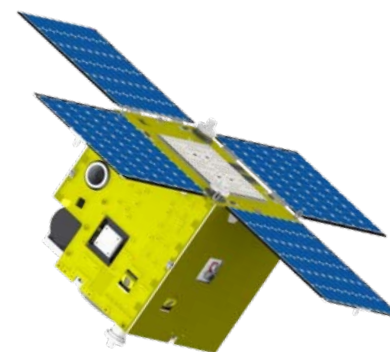
- 衛星に加わる小さな力に関する研究
 - 太陽光圧、熱輻射圧、大気抵抗、電波放射圧等
- 衛星の高精度軌道(位置)決定・予測
 - GPS衛星、QZSS衛星のcm級軌道決定
- 複数衛星の高精度協調制御
- 超小型衛星開発
- 超小型衛星の姿勢制御システムの開発
- 超小型衛星を使った新規衛星ミッション提案



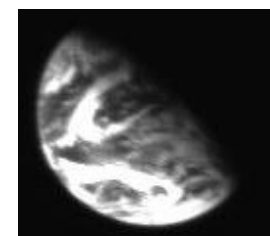
QZSS衛星 (©CAO)



SEIRIOS



PROCYON



PROCYONが
撮影した地球

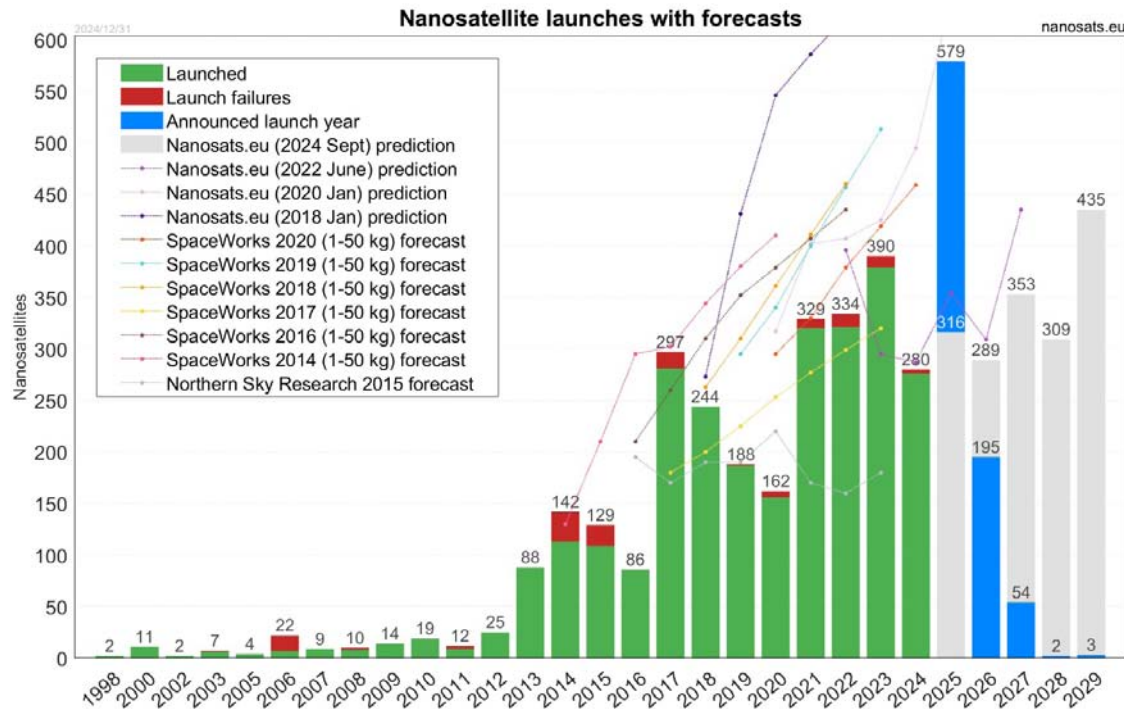
01

.

超小型衛星のこれまで

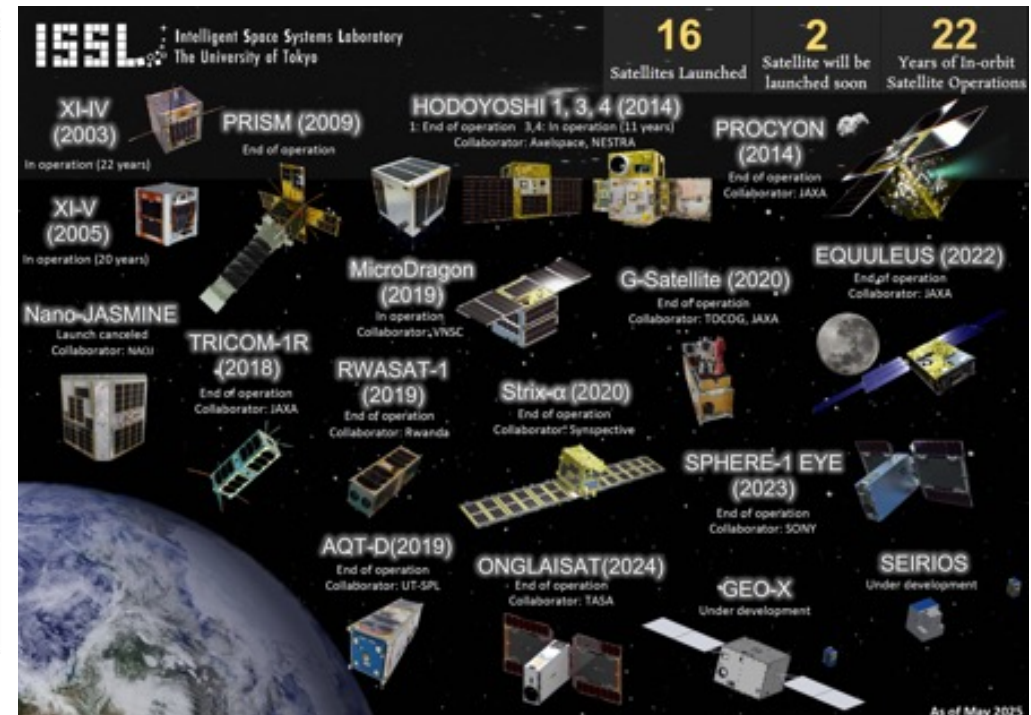
超小型衛星のこれまで

超小型衛星は世界中でブームに！



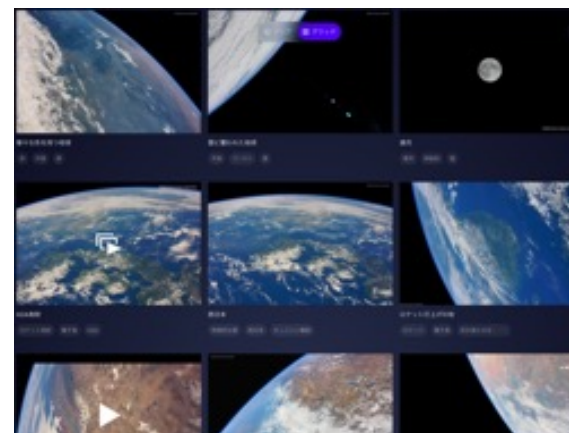
2024/12/31 Version

©NanoSat DataBase

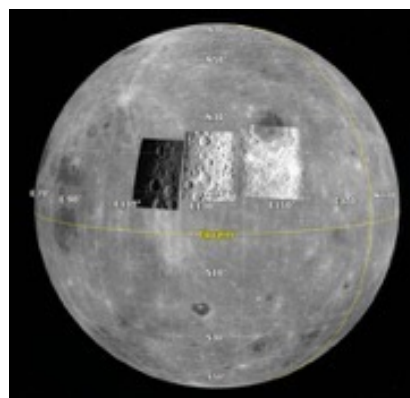


超小型衛星のこれまで

地球周回のビジネスから深宇宙探査まで



SPHERE-1 EYEの撮影画像が見えるEYEコネクト



EQUULEUSが撮影した月の裏側



ONGLAISATによる2.4m分解能撮像



高精度姿勢制御ユニット

超小型衛星のこれから

- 2003年に産声を上げた超小型衛星 (XI-IV)

10年

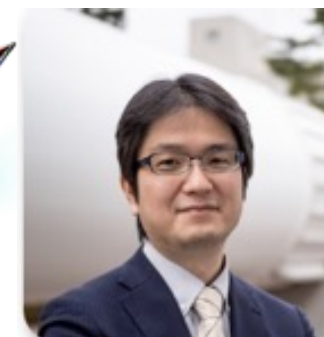
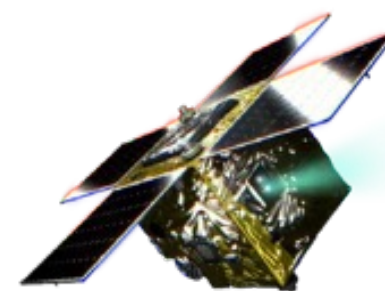
- 2014年には深宇宙探査に進出 (PROCYON)

10年

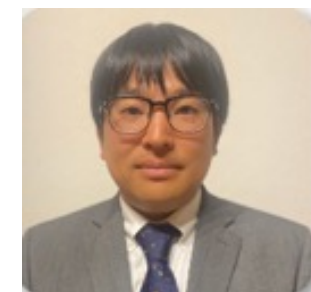
- 2025年現在、多くのベンチャー企業が参入・サービス化・上場企業も

10年

- 2030-35年はどうなっているだろう？



?



超小型衛星のこれから：一つの発展方向は深宇宙探査

より遠方を目指す深宇宙探査では、軽いということで価値を出せる

超小型衛星のこれから：五十里個人としての興味

- より高度な地球周回衛星を開発したい
- 理学観測に貢献したい
 - 天体観測
 - 宇宙空間での物理実験
- 野望：ノーベル賞受賞に貢献できる超小型衛星
 - 超小型衛星での技術実証 -> 大型衛星での観測 -> ノーベル賞
 - できれば超小型衛星で直接。。。。

02

.

複数衛星を利用する宇宙ミッション

超小型衛星の限界

● サイズの限界

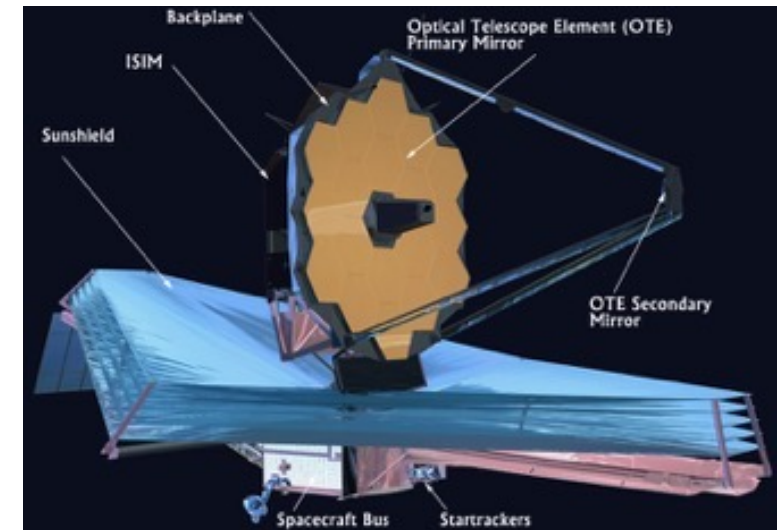
- サイズで性能が決まる場合、「単独の大型衛星 vs 単独の超小型衛星」では不利
 - 望遠鏡の口径、焦点距離
 - 大きな面積での発電・大きなアンテナでの通信

● 長期間動作の限界

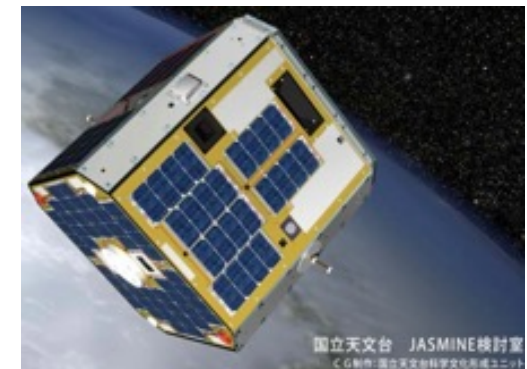
- 特に、燃料が必要な動作は長期間できない
- 燃料タンクの限界
- 冷却用液体窒素のタンクの限界

● 電力の限界

- 発電できない
- 発電できたとしても、発熱が小さな領域に集中しすぎて高温になる



JWST(口径6.5m)



Nano-JASMINE (口径5cm)

超小型衛星の限界を越えるには？

- 単独の衛星では大型衛星には敵わない

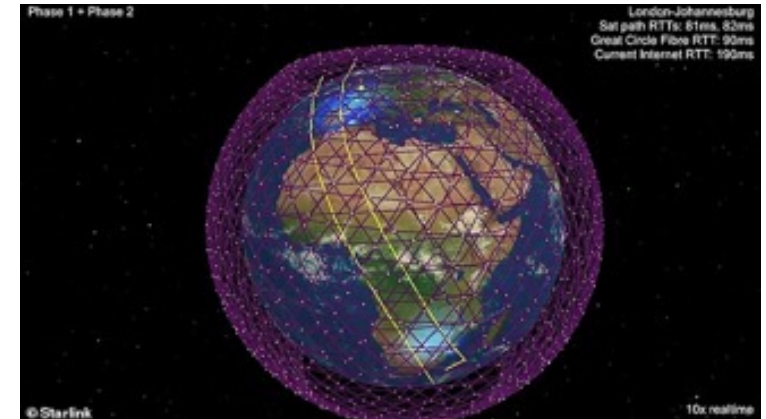
数で勝負！

- 単純に多ければいいのか？

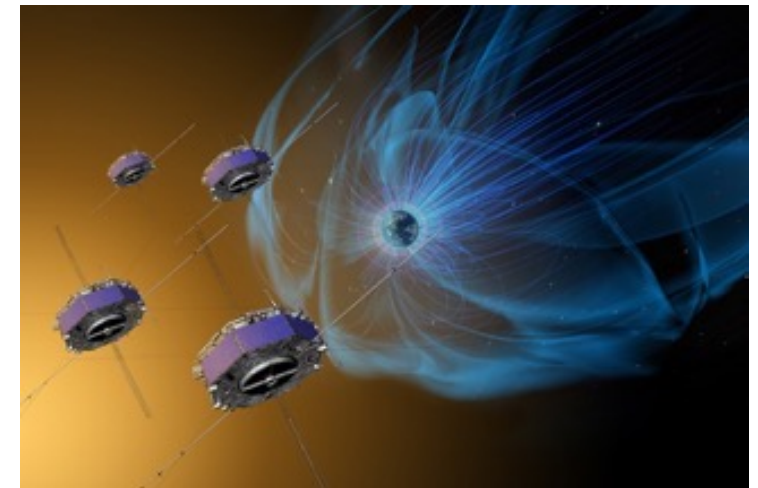
どの観点で数で勝負するかが重要！

複数衛星を利用するミッション

- 数の力で”頻度”を高める
 - コンステレーション
 - 例：地上観測の高頻度化、通信、GPS
- 数の力で”観測点”を増やす
 - スwarm、編隊飛行
 - 多点同時観測で空間構造を見る
 - 例：磁気圏、プラズマ、空気密度などの同時観測



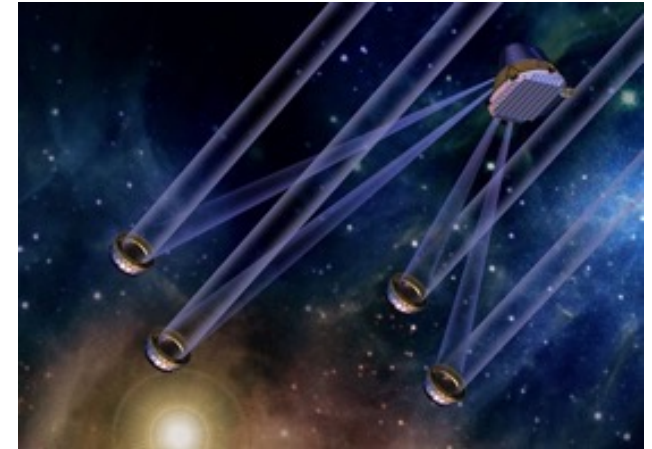
Star Link コンステレーション



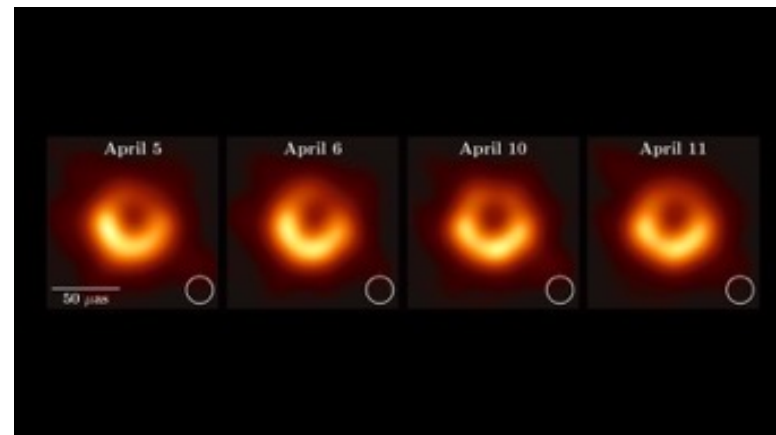
MMSでの磁気圏同時観測

複数衛星を利用するミッション

- 数の力で距離を伸ばす
 - 距離 = 基線長
 - 編隊飛行での干渉計
 - 例：赤外線干渉系、電波干渉系
 - 注意点：面積は増えない

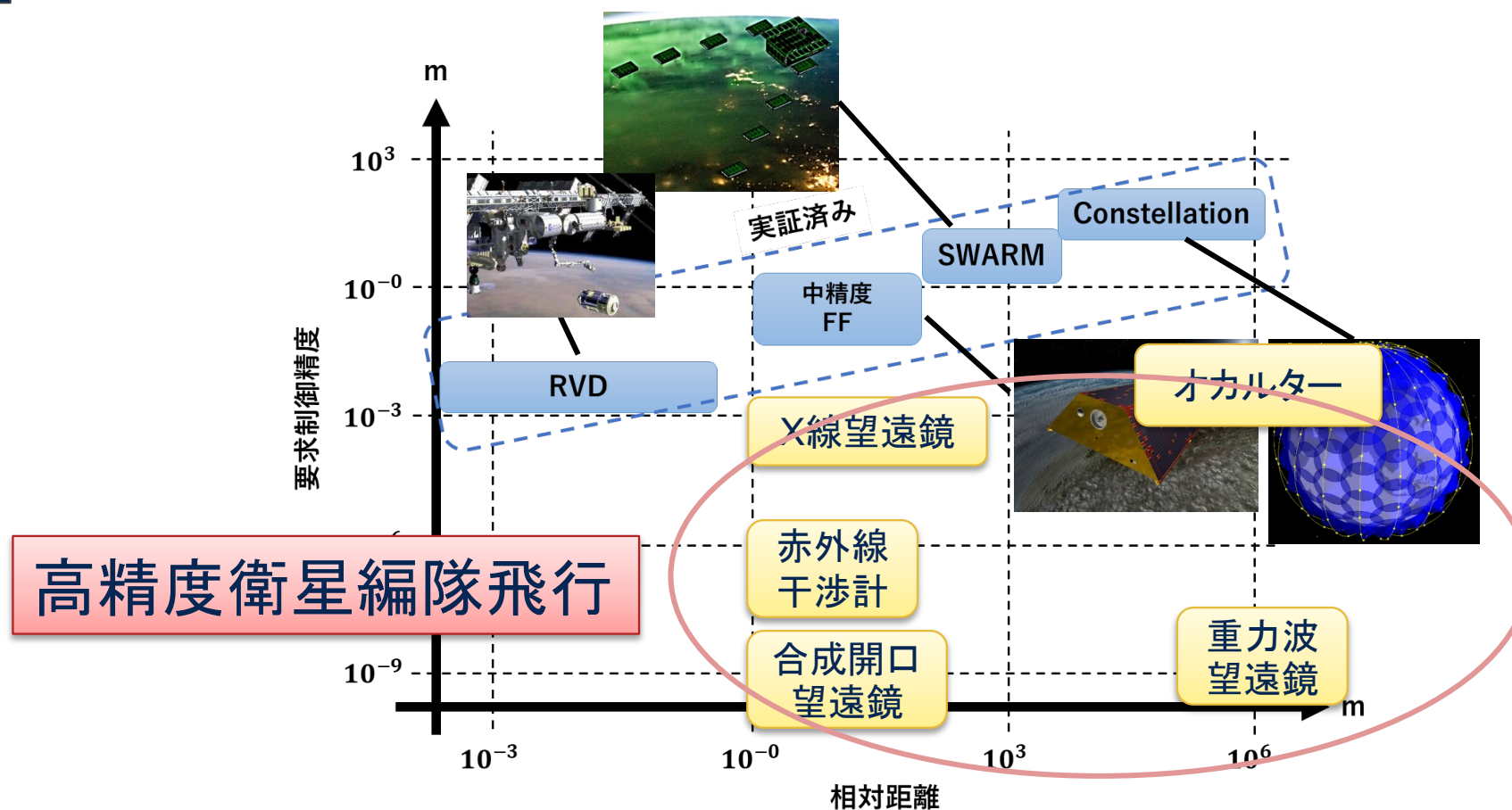


TPF-I(無期限延期)



Event Horizon Telescopeでのブラックホール撮像の例

複数衛星を利用するミッション

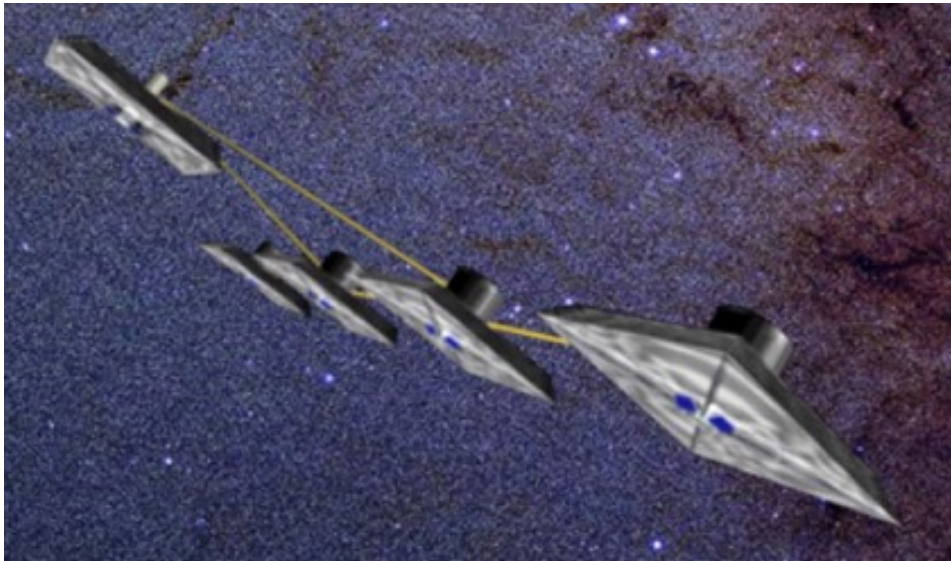


編隊飛行でできること

ミッション	衛星数	衛星間距離	要求精度	ミッション例 (赤字以外は未実証)
Bistatic SAR	2	数百mから数十km	後処理でmm	TanDEM-Xなど(2010)
重力場計測	2	数百km	後処理でmm	GRACEなど(2002)
電波源監視	3以上	数百km	後処理でcm	HawkEye360 (2021)
磁気圏観測	2以上	数km～数百km	後処理で数十cm	MMS(2015), SCOPE (ISAS)
太陽観測オカルター	2	数百m	リアルタイムでcmからmm	PROBA-3(ESA, 2024打上予定)
超焦点太陽観測	2	数百m	リアルタイムでcm	VISORS (米国複数大学, 2024打上予定)
系外惑星観測オカルター	2	数百km	リアルタイムでcm	Starshade計画(NASA)、mDOT(スタンフォード大)、Euryops(日大, ISAS)
電波干渉計	2以上	数百km	後処理でmm以下	MIR (イギリス)
X線望遠鏡	2	数十から数百m	リアルタイムでmm	FFAST(ISAS)、MIXIM(阪大, 東大)
赤外線干渉計	3以上	数十から数百m	リアルタイムでmmからum	TPF-I(米国, 無期限延期)、LIFE(国際協力)、SEIRIOS(名大, 東大)
重力波望遠鏡	3以上	数百km	リアルタイムでmmからum	LISA(ESA, 2037打上予定)、DECIGO(日本)、TianQin (中国)、Taiji (中国)
静止リモセン	7程度	数十m	リアルタイムでum	FFSAT(東大)

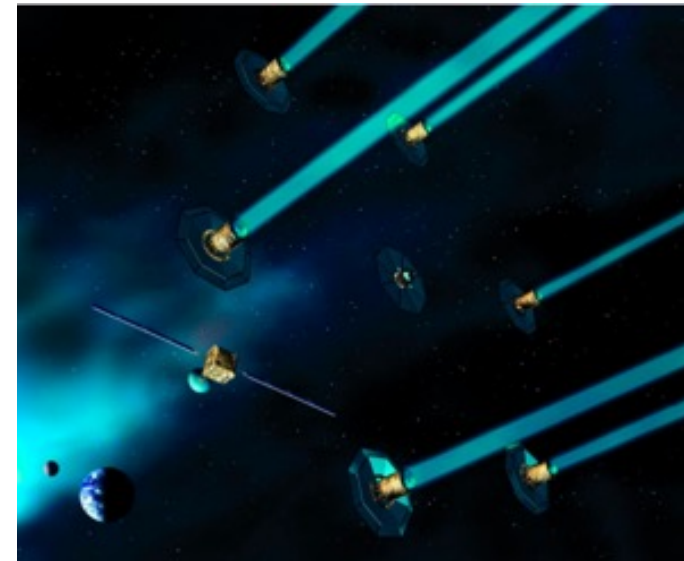
高精度編隊飛行は古くから検討されているが実現できていない。。。

2010年代には、大型高精度編隊飛行ミッションが永久停止となる。。。
ハイリスク・ハイコスト



TPF-I

Daniel P Scharf, Fred Y Hadaegh, Zahidul H Rahman, Joel F Shields, and Gurkupal Singh. An Overview of the Formation and Attitude Control System for the Terrestrial Planet Finder Formation Flying Interferometer. No. 818, pp. 1–12, 2017

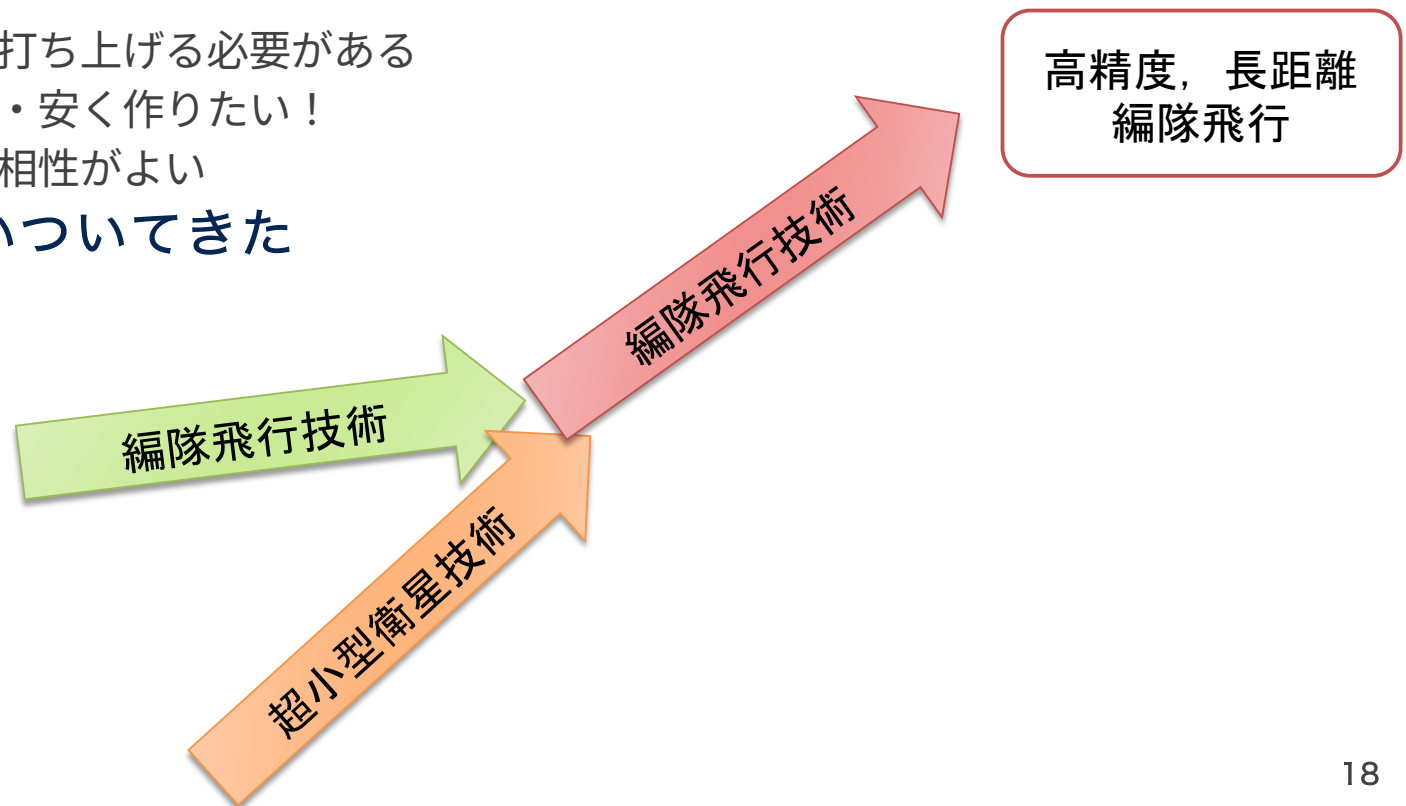


DARWIN

Markus Schlotterer and Stephan Theil. Testbed for On-Orbit Servicing and Formation Flying Dynamics Emulation. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, No. August 2010, 2010.

超小型衛星 × 高精度編隊飛行

- 複数衛星ミッション
 - 複数の衛星を製造し、打ち上げる必要がある
 - 衛星一機あたりを軽く・安く作りたい！
 - 本質的に超小型衛星と相性がよい
- 超小型衛星技術が追いついてきた

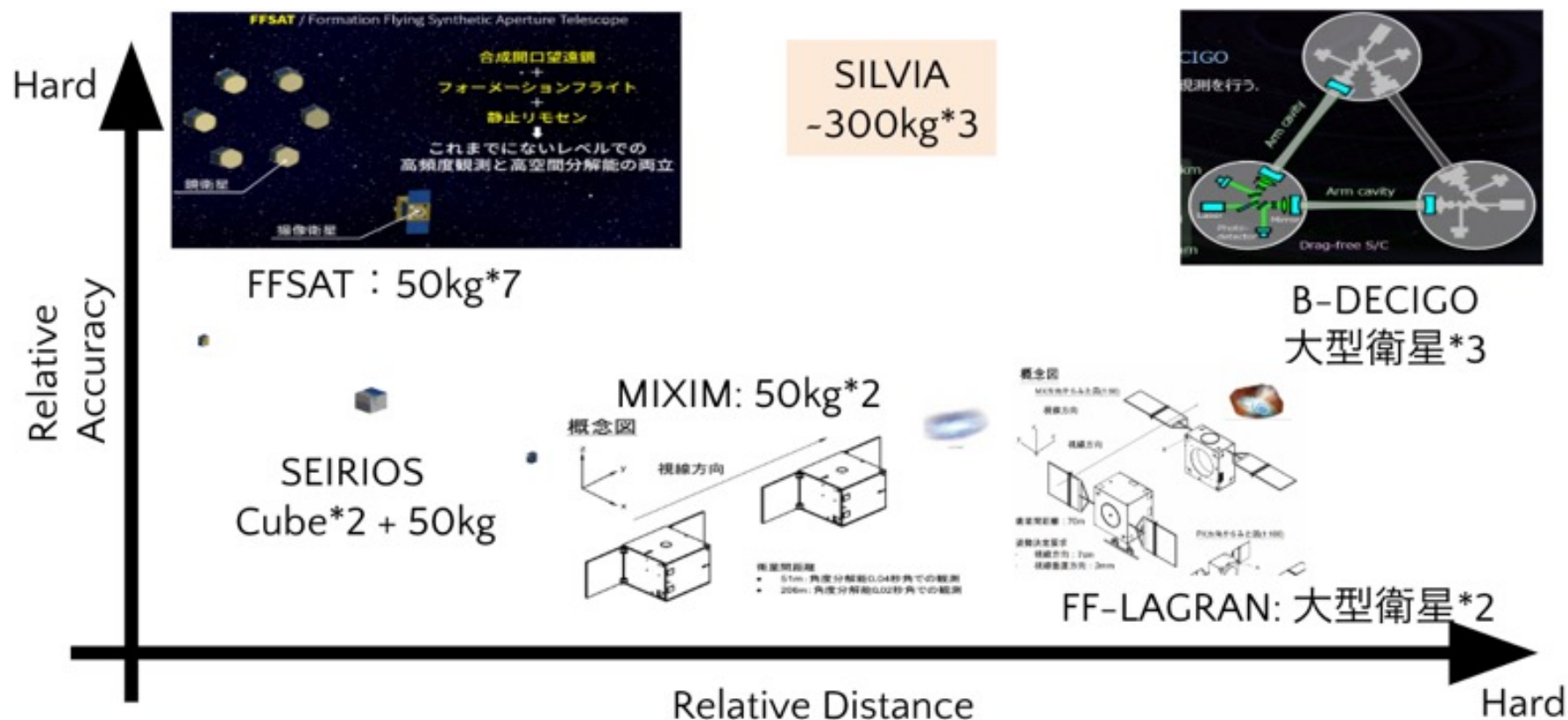


03

.

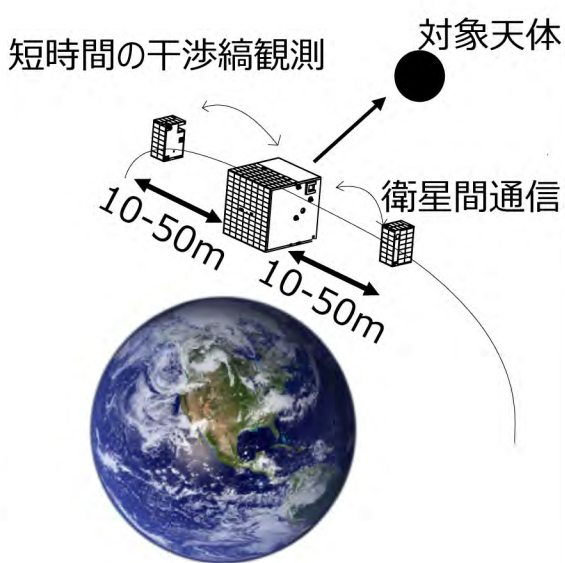
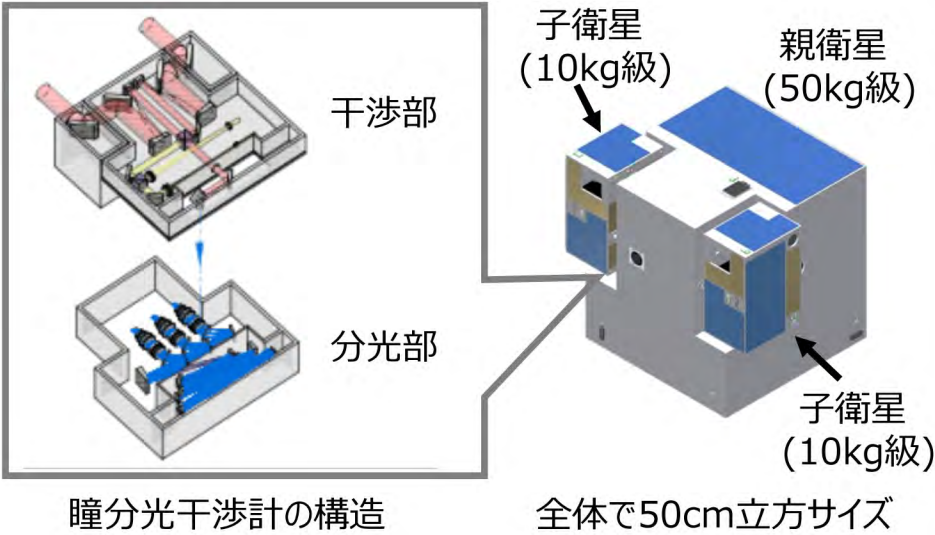
ISSLでの高精度衛星編隊飛行の取組み

ISSLで提案・研究している編隊飛行衛星ミッション

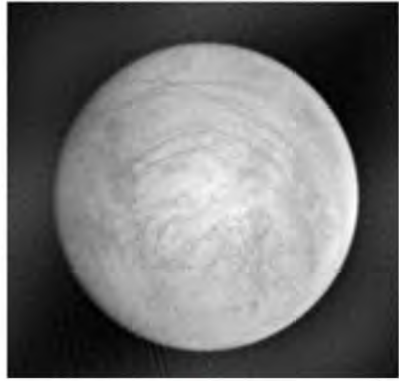


宇宙戦略基金：高精度衛星編隊飛行技術

SEIRIOS: Space Experiment of IR Interferometric Observation Satellite



UV空間を埋める長期間観測



開口合成の結果
(4m相当口径)

ミニマムサクセス FF機器動作実証・センサ補正	フルサクセス 子衛星分離・高精度FF実証	エクストラサクセス 本計画の天体の観測・像再生
獲得できる実績 FF機器の宇宙実績	高精度FF制御実績	長期高精度FF運用実績

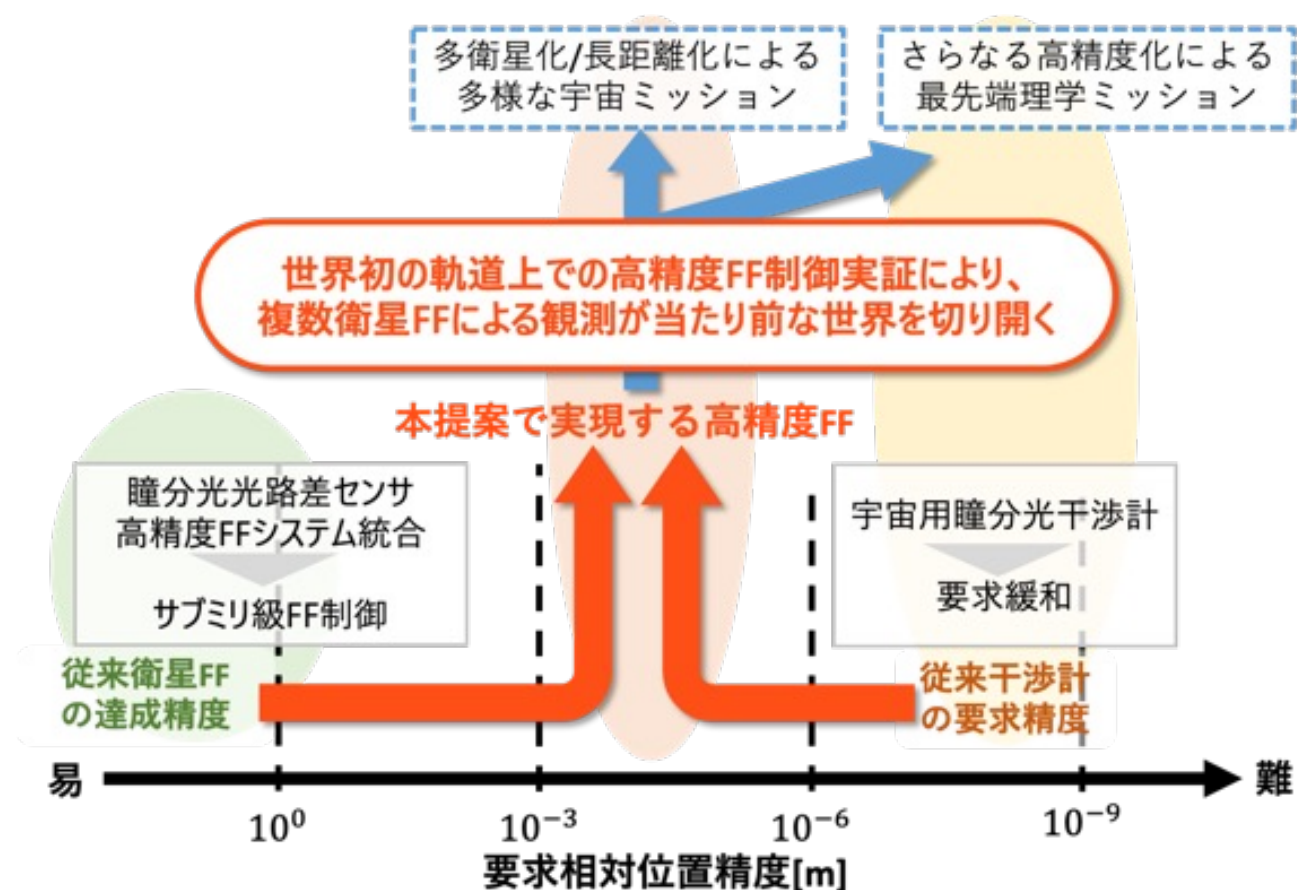
深宇宙探査機が取得できる分解能の画像を 地球周回軌道から撮影する

SEIRIOS: Space Experiment of IR Interferometric Observation Satellite

項目	親衛星	子衛星
構造	質量: 40 kg	質量: 12 kg
	ドッキングで1衛星として打ち上げ可能なサイズ	
熱	CCDを-20度まで冷却	通常の熱設計
電源	最大発生: 85W 最大消費: 60W	最大発生: 20W 最大消費: 15W
通信	S帯アップ: 4kbps S帯ダウン: 64kbps X帯ダウン: 10Mbps	S帯アップ: 4kbps S帯ダウン: 64kbps
姿勢制御	姿勢安定性10秒角	
精密FF	CDGPS レーザー距離計 相対航法カメラ Tip/tilt mirror スラスタ	CDGPS 光学ステージ スラスタ



SEIRIOSの独自性と発展性

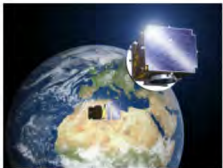


高精度編隊飛行の動向とSEIRIOSの位置付け

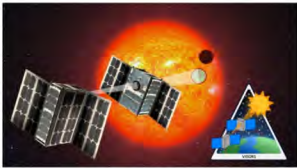
FF分野での位置づけ

PROBA-3 欧州 2024/12/4	VISORS 米国 2024年予定	SEIRIOS 本提案 2031年予定
太陽観測	太陽観測	干渉計での 恒星・衛星観測
数百kg級	10kg級	50kg級
衛星2機	衛星2機	衛星3機
mm級制御	cm級制御	サブmm級制御

目指す精度は**世界最高精度**である
衛星**3機**の**干渉計**という点で独創的



PROBA-3
2024年12月4日
打ち上げ

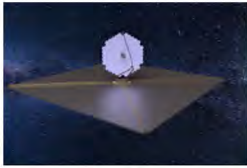


VISORS
(2024年予定)

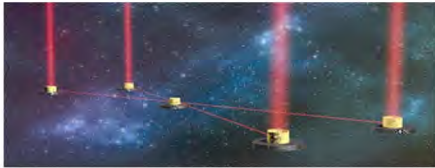
光赤外宇宙望遠鏡分野での位置づけ

	単一衛星 HWO, 米国 2042年予定	SEIRIOS 本提案 2031年予定	大型FF LIFE, 欧州 2042年予定
空間分解能	△	○	◎
感度	◎	△	○
衛星サイズ	大型	超小型	大型
開発コスト	大	小	大

本提案はLIFEにつながる実証研究として、
LIFEチームからも期待されている

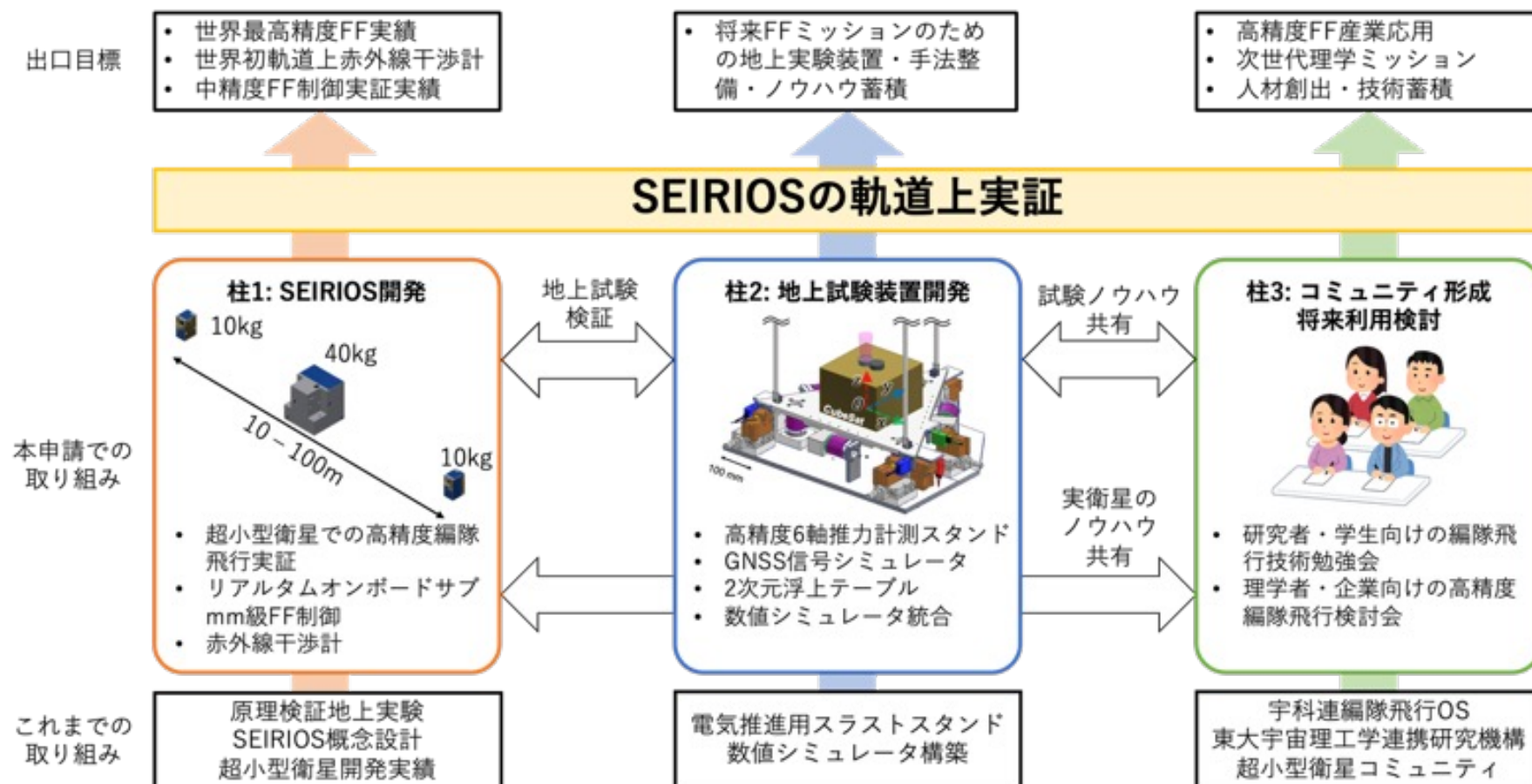


HWO
(2042年予定)

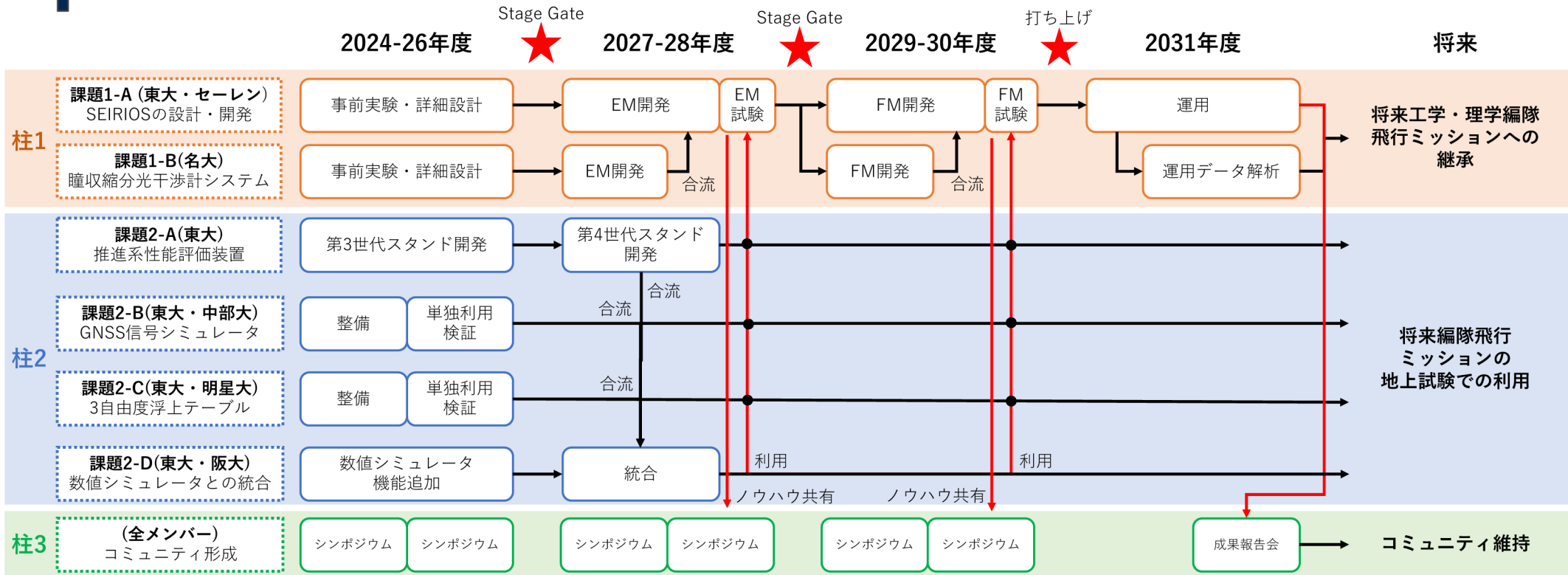


LIFE
(2042年予定)

SEIRIOSプロジェクトの概要



SEIRIOSプロジェクトのスケジュール



04

.

まとめ

まとめ

- 我々は次の10年でどんな新しい超小型衛星の世界を切り開くことができるか？
 - 深宇宙探査は一つの方向
- 複数機衛星ミッション、特に高精度編隊飛行ミッションが新たな世界を切り開く
 - 最先端の理学観測、大型衛星に負けない性能
- 東大ISSLでは、超小型高精度編隊飛行技術実証衛星SEIRIOSプロジェクトを開始した
 - コミュニティ形成に興味ある人はご連絡ください！
 - ikari@space.t.u-tokyo.ac.jp

SEIRIOSプロジェクトについてこちらのYouTube(超小型衛星利用シンポジウム)→
もしくはISTS2025の予稿などをご覧ください。



おまけ

- 今日は話せませんでした、
- 衛星関連ソフトウェアのOSS(Open Source Software)活動も行っています
- 衛星搭載S/W、衛星アストロダイナミクスシミュレータ、地上局S/Wのソースコードも含め全て無料公開しています
- 興味ある人は、GitHubのUT-ISSL organizationページをご覧ください
<https://github.com/ut-issl>

