

# 超小型衛星と画像処理技術を組み合わせた 簡便なハイパースペクトル観測の実現

福井大学 基盤部門 産学官連携本部  
准教授 青柳 賢英

2025年9月4日

# 研究分野の概要(1)

- 100kg以下の「**超小型衛星**」の開発・打ち上げが国内外で加速的に増えている
- **キューブサット**: 10cm立方を1Uとする超小型衛星、国内外で量産製造や実利用、ビジネスが進められている
- 福井大学においても、企業・スタートアップ等との産学官連携体制で、**ハイパースペクトル等の地球観測ミッション**を行う多数のキューブサットの宇宙実証を行っている(年1～2機)

## 大型衛星

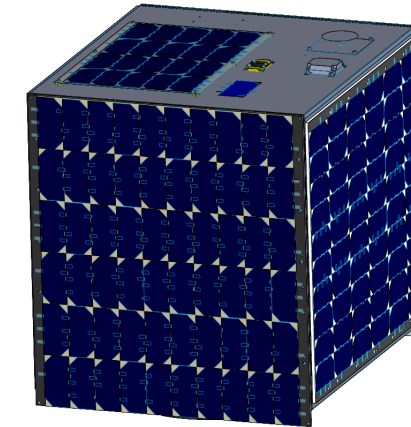
- ・高性能・大型観測機器が搭載できる
- ・莫大なコスト、長期開発が必要
- ・高信頼性設計

## 超小型衛星・CubeSat

- ・低コスト化、開発期間短縮(半年～2年)
- ・新規技術を導入し、技術革新を起こしやすい
- ・長寿命化を目指さず、世代交代を促す
- ・規格化により、専用部品の入手性が高い
- ・軌道上に多数配置することにより、高頻度観測が可能

キューブサット (CubeSat):  
10cm立方を1Uとする超小型衛星

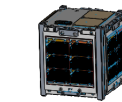
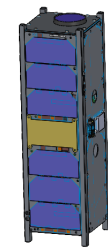
50kg級超小型衛星



6U-CubeSat



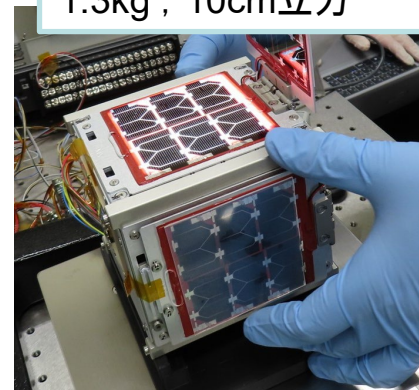
3U-CubeSat



1U-CubeSat

< 1.33kg/1U

1U-CubeSat  
1.3kg, 10cm立方



DENDEN-01

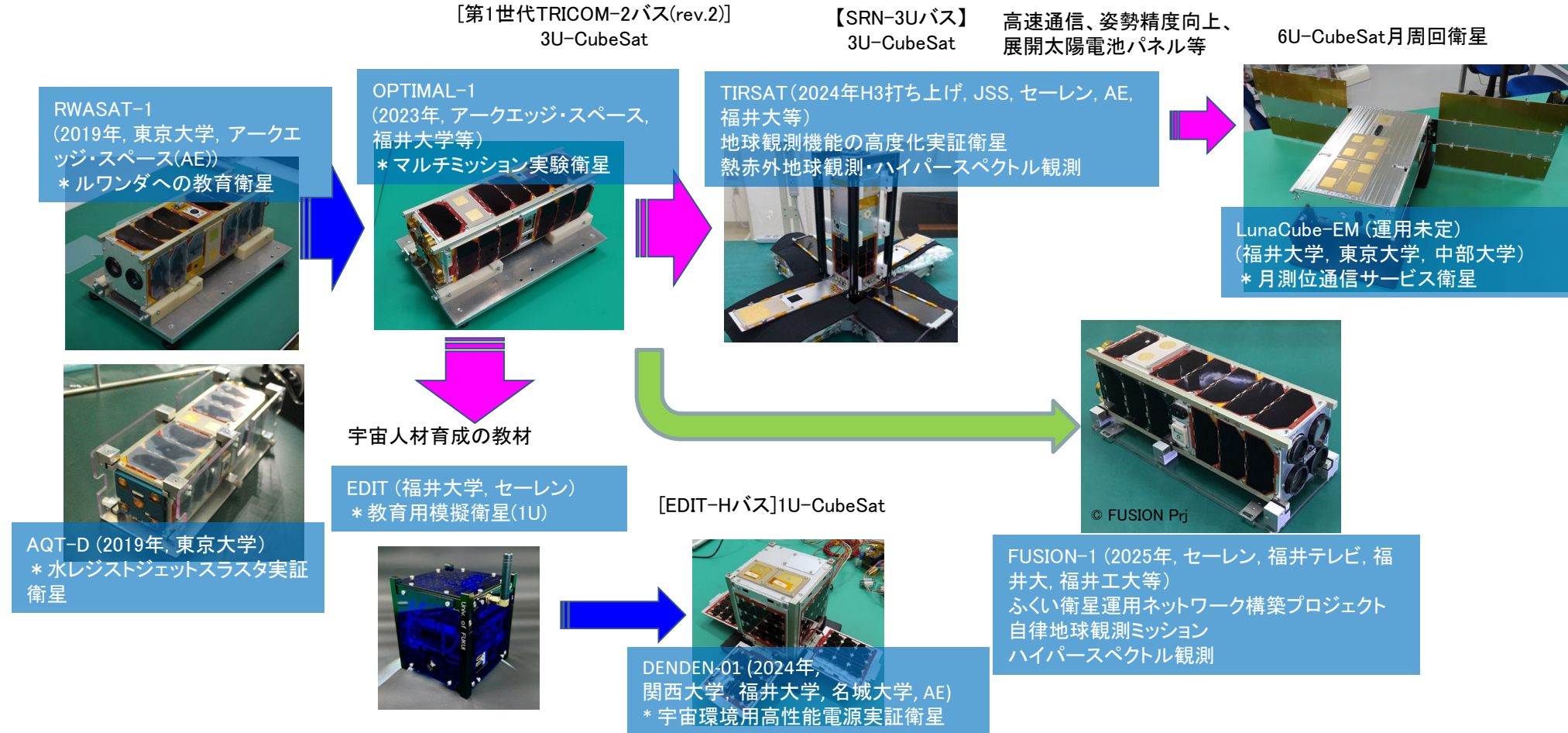
3U-CubeSat  
3kg, 高さ約30cm



TRICOM-1

# 研究分野の概要(2)

- 福井大学においても、地域企業・スタートアップ等との産学官連携体制で、**ハイパースペクトル等の地球観測ミッション**を行う多数のキューブサットの宇宙実証を行っている(年1～2機)



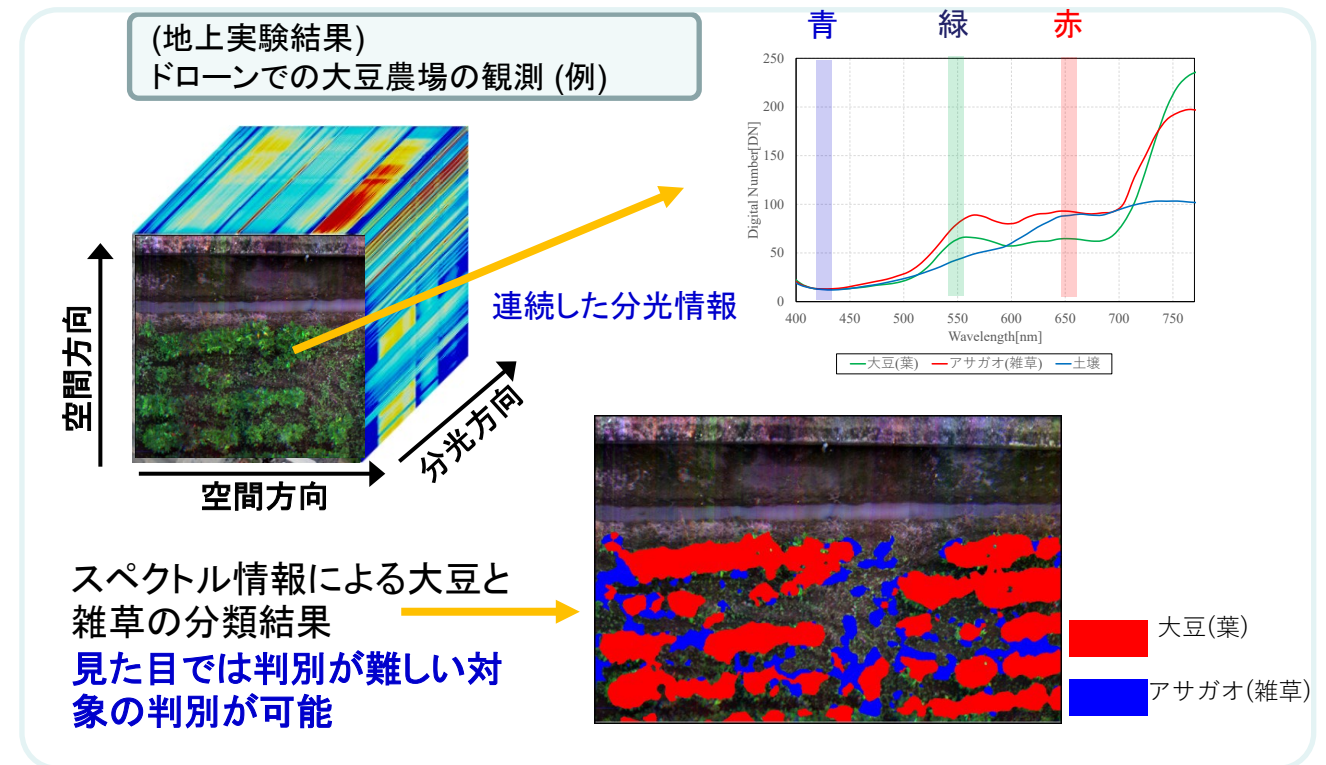
# 研究分野の概要(3)

## ・『ハイパースペクトル』とは？

- 一般的カメラは、赤・青・緑(RGB)の色で撮影する
- ハイパースペクトルカメラは数十～数百個の波長に分けて撮影することが可能
- 画像情報と分光情報を組み合わせた「3次元撮影」が可能**

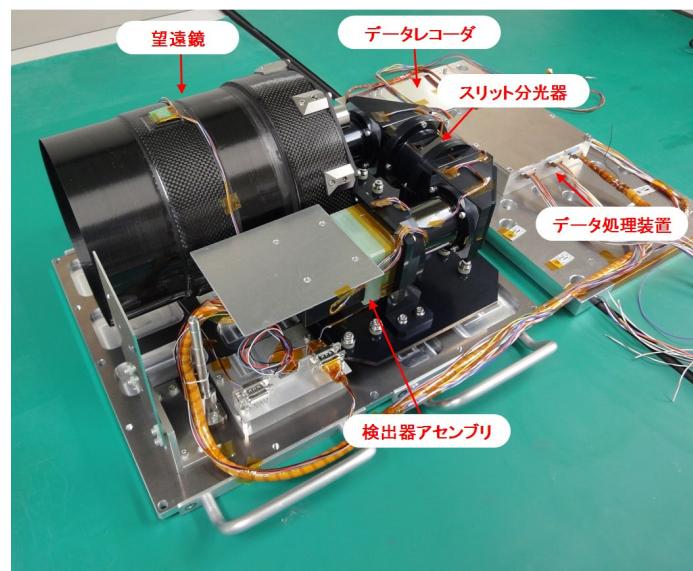
## ☆ 農業・森林リモートセンシング分野での利用が期待される

例) 農作物の種別ごとの生育度の把握、  
森林での樹種分類、  
海・湖等の水質の把握, etc...

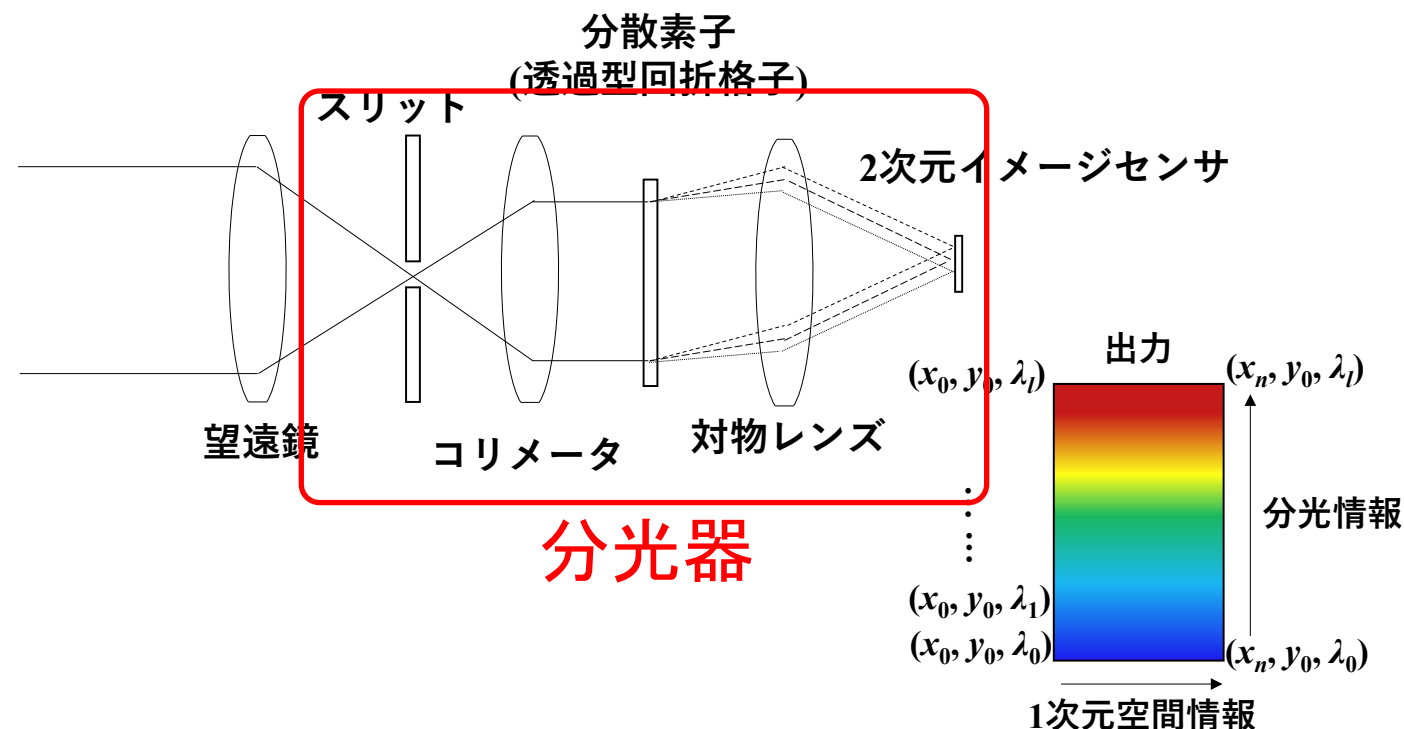




# 従来技術とその問題点



(参考) 青柳賢英, 宇宙機搭載ハイパースペクトルカメラの開発とその環境計測への応用に関する研究

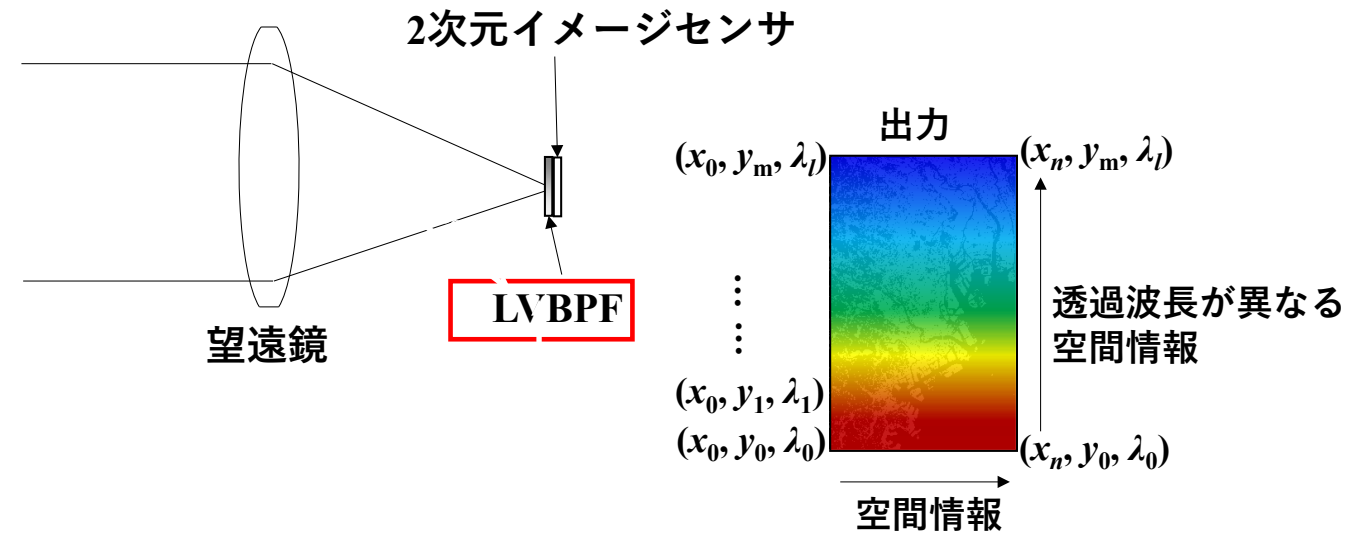
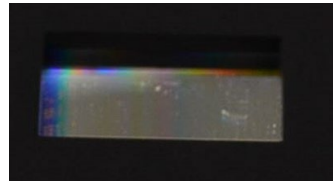
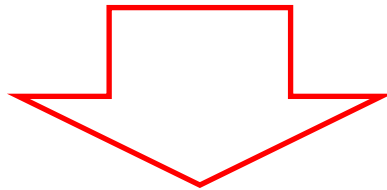


- 従来のハイパースペクトルカメラは、分光器(回折格子やプリズム含)が必要となるため、光学系が大きくなる。そのため、大型の衛星にしか適さなかった
- 超小型衛星・キューブサットによる地球観測は、多数衛星による準リアルタイム観測が可能という利点があるが、大型のハイパースペクトルカメラの搭載は難しく、これが普及の大きな障壁となっていた

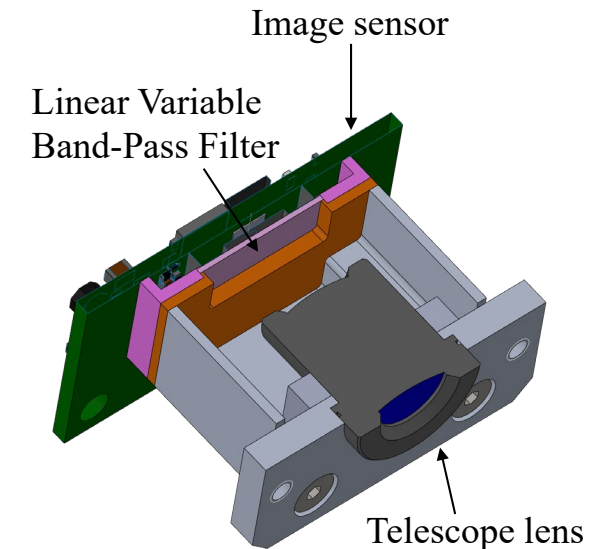
# 新技術の特徴・従来技術との比較(1)

## LVBPF (Linear Variable Band-Pass Filter)

- 線形可変フィルタ
- 位置により透過波長が異なるバンドパスフィルタ



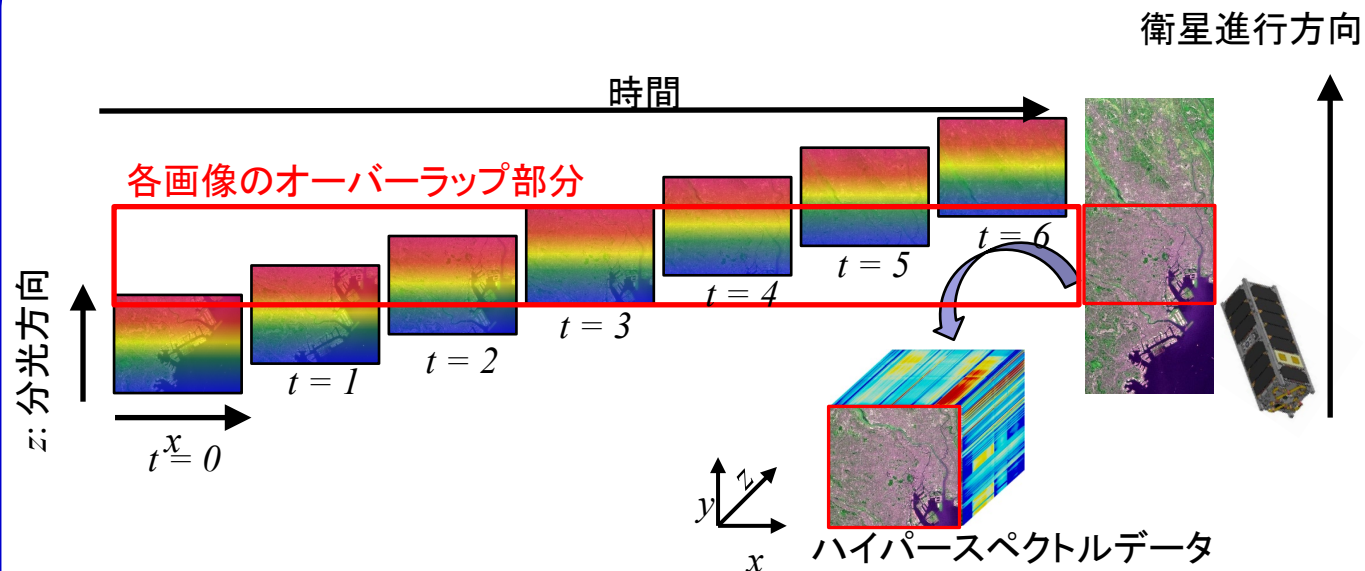
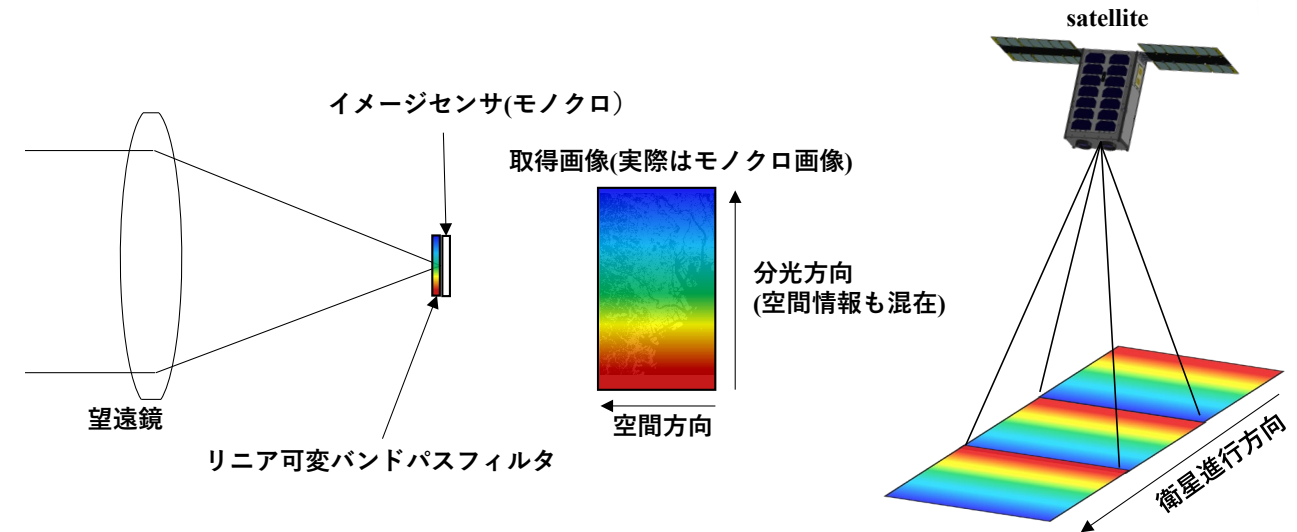
- LVBPFをイメージセンサ前面に着けることにより、分光器を必要とせずに、分光情報と空間情報を同時に取得
- 大幅な小型化が可能となる。
- 本技術では、イメージセンサへの蒸着では無く、機械的に搭載することにより、イメージセンサの付け替えが容易なため、カメラの種類を増やしやす



# 新技術の特徴・従来技術との比較(2)

## 【撮影原理】

- 1次元方向に透過波長が異なるため、一度の観測では、**空間情報と分光情報が混ざった画像**を得る
- 軌道進行方向に地表スキャン**し、画像のオーバーラップ部分を合成することにより、分光画像を生成し、ハイパースペクトルデータを構築する



## 【問題点】

- 実際の撮影画像には以下のような問題がある
  - レンズによる歪み
  - 撮影位置における視差 (地球が球体であることの影響も含む)
  - 撮影姿勢の不安定性

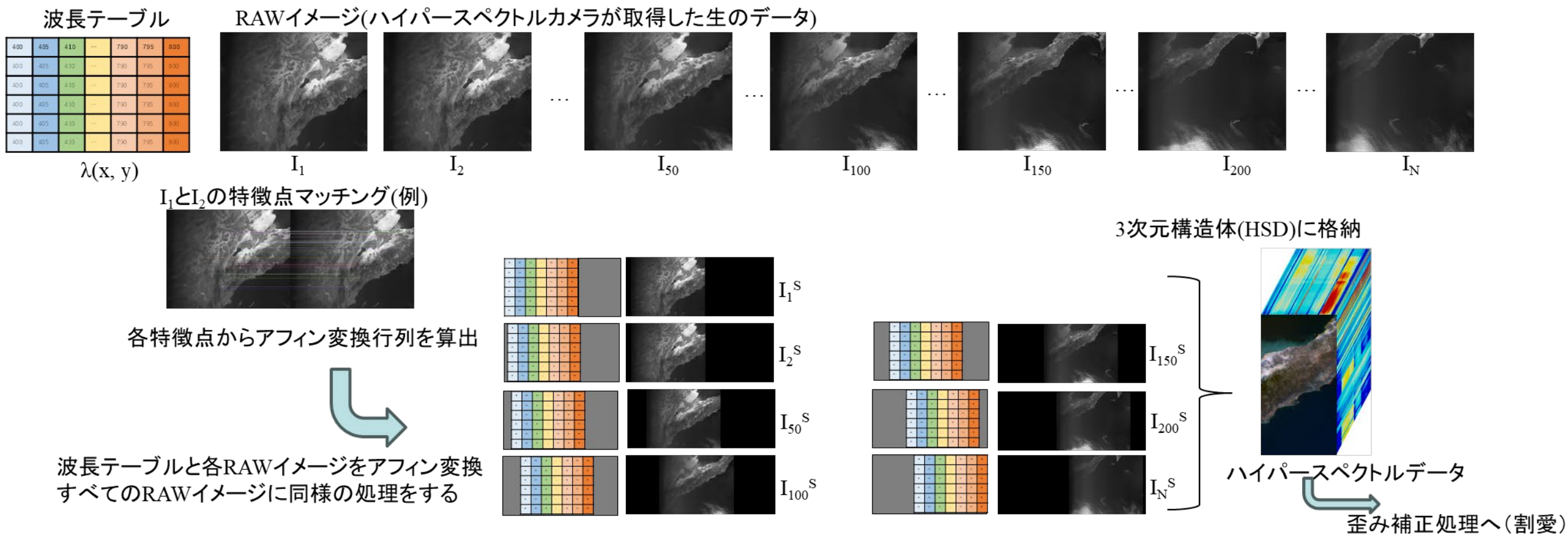
撮影時間情報だけでオーバーラップ部分を合成すると、**最終的に生成されるハイパースペクトルデータには歪みがあり、各分光画像が重なり合わない**

\* 人工衛星だけではなく、ドローン等の不安定状態での撮影にも当てはまる

# 新技術の特徴・従来技術との比較(3)

## 【データ構築方法・歪み補正方法の概要】

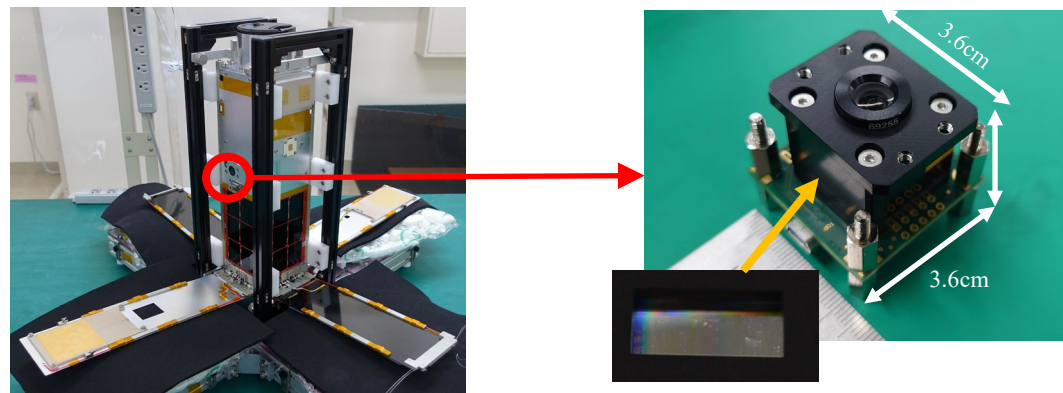
- 特徴量位置マッチング処理によって、オーバーラップ箇所を自動検出し、各画像の移動量を推定し、自動位置合わせをアフィン変換によって行う。波長テーブル(各画素の波長情報)も同様にアフィン変換を行う。変換した波長テーブルを基にして各画像をハイパースペクトルデータ配列に格納する
- 生成したハイパースペクトルデータの各分光画像同士の特徴点の組み合わせを基にしたホモグラフィ変換を行い、各画像の位置・歪み補正を一括で行う



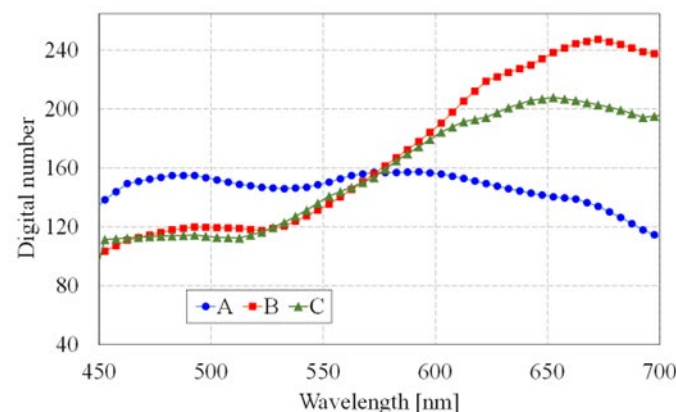
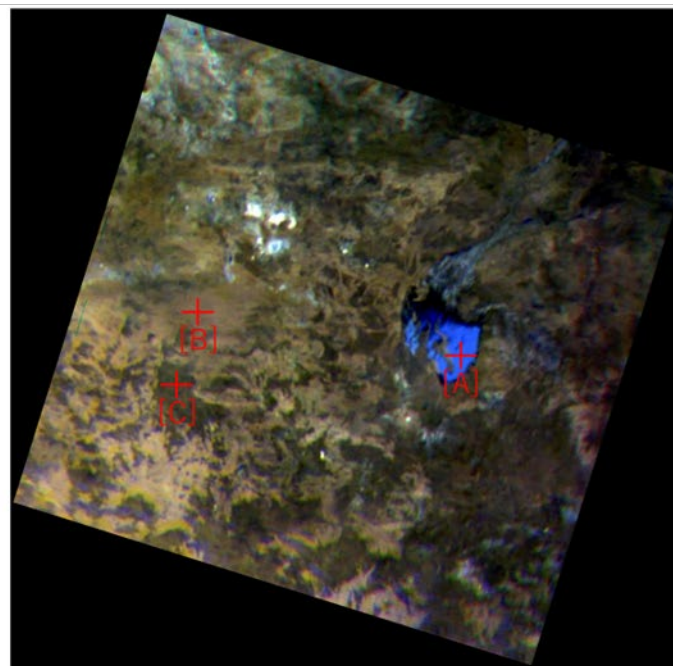


# 新技術の成果例(1)

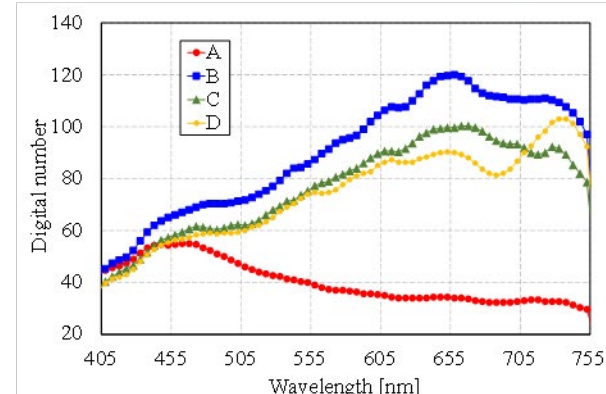
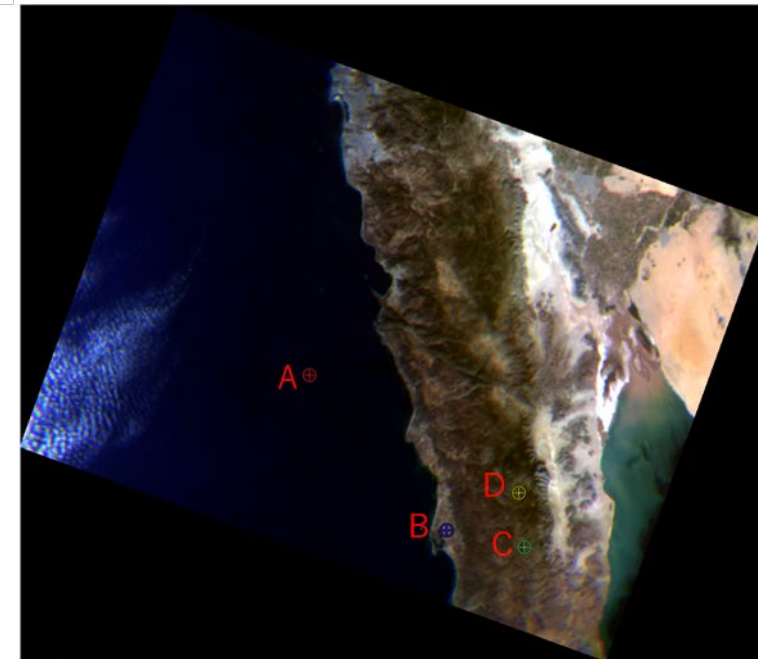
- 原理実証のために、**重量35g・3cm角の超小型ハイパースペクトルカメラの開発・軌道上からの観測に成功**
- 2024年2月に、H3ロケット試験機2号機により軌道投入されたTIRSATにサブミッションとして搭載され、軌道上実証を完了



Yoshihide Aoyanagi, On-orbit demonstration of a linear variable band-pass filter based miniaturized hyperspectral camera for CubeSats, *J. Appl. Remote Sens.* 18(4), 044512 (2024),



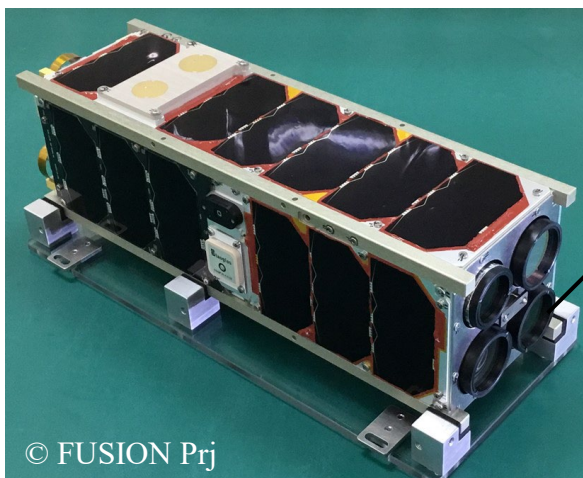
オーストラリア(グレゴリー湖),  
2024-07-19T01:45:12Z  
R:615nm, G: 575nm, B; 485nm



メキシコ,  
2024-11-14T17:34:12Z  
R:637nm, G: 547nm, B; 467nm

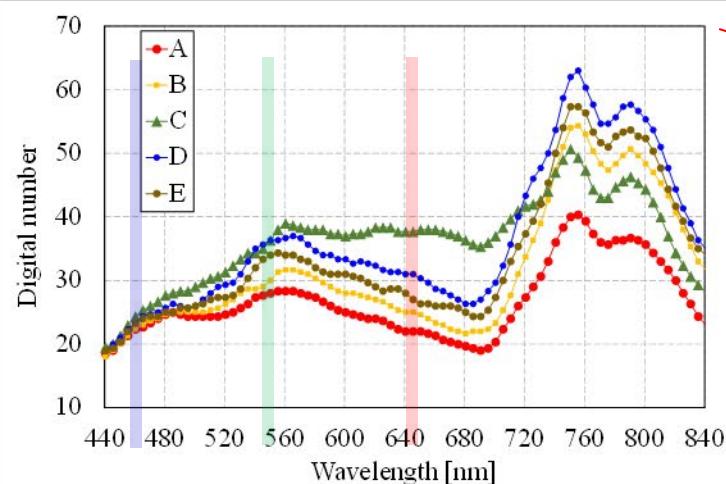
# 新技術の成果例(2)

## ハイパースペクトルカメラ (20m/pixel)



### 衛星: FUSION-1

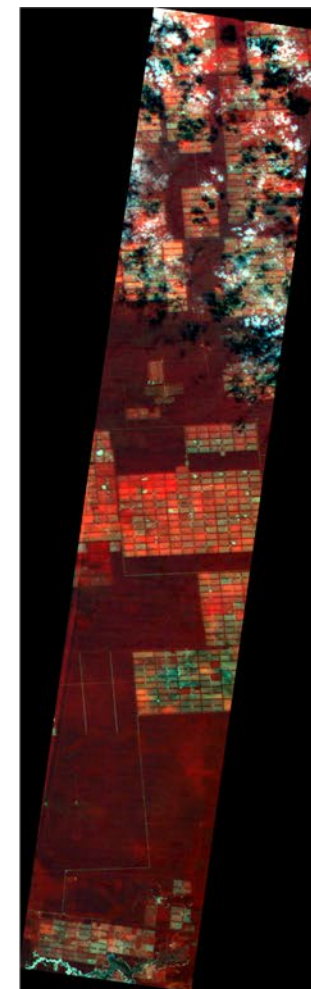
- 2025年1月に、打ち上げ
- 福井県における衛星開発・製造から衛星運用、データ提供までのワンストップサービス構築をするための技術試験衛星
- 開発・運用機関: セーレン、福井大学、福井テレビ、福井工大



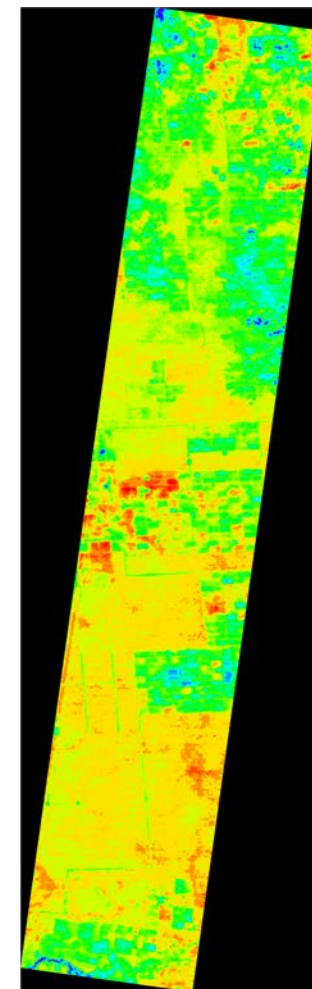
各位置でのスペクトル情報(未補正)



カラー画像  
R:640nm, G:550nm, B:470nm



疑似カラー画像  
R:800nm, G:600nm, B:500nm



正規化植生指数  
(IR=800nm, R=685nm)

観測場所: パラグアイ, 2025-04-23 05:11:13(UTC)



# 海外技術との比較

ハイパースペクトルセンサを搭載する小型・超小型衛星の例（実験予定含む）、令和6年度調査

衛星(センサ名もしくは企業名) 重量	開発機関 (国)	地表サンプリング間隔	観測波長 (波長分解能)
Satellogic 38.5kg	Satellogic (アルゼンチン)	25m	460 – 830nm (14 – 35nm)
Kuva space 6U-CubeSat	Kuva space (フィンランド)	25m	400 – 1100nm (不明)
Tanager 150 – 200kg	Planet (アメリカ)	30m	400 – 2500nm (5nm)
Dragonette001 – 003 6U-CubeSat	Wyvern (カナダ)	5.3m	445 – 880nm (20nm)
Pixxel 15kg	Pixxel (インド)	10m(既存) 5m(計画)	可視～短波長赤外 (250バンド)
Intuition-1 6U-CubeSat	KP Labs (ポーランド)	25m	470 – 900nm (192バンド)
FUSION-1, HypCam 3U-CubeSat (< 4kg)	福井大学,セーレン等 (日本)	23m	440 – 840nm (5nm)

# 想定される用途

- 農業・森林リモートセンシング
  - － 農作物の生育度把握、樹種分類など
- 赤外波長への拡張による、CO<sub>2</sub>・メタン排出量の把握
  - － カーボンニュートラルへの利用
- ドローン等への超小型プラットフォームへの搭載
  - － より高い解像度・手軽にハイパースペクトル観測を実施



# 実用化に向けた課題

- 現在、本方式により宇宙からの観測が可能なことまでは実証したが、波長・輝度は未校正のため、実利用可能な信頼性の高いデータ配信まではできていない
- 今後、宇宙実証を通じて、実験データを取得し、衛星軌道上での分光精度や安定性に関しての評価、校正を進めていく予定であり、さらに課題抽出を行い、実利用可能な機器開発につなげていく予定である
- カーボンニュートラルなどに対する社会課題解決は、可視近赤外領域のみならず、赤外領域への拡大が必須である
- 実用化に向けては、モノづくりのみならず、ハイパースペクトルデータを様々な分野で利用できるようなデータ解析方法の研究や、データ利用先の探索も必要になる

# 社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	・LVBPFを利用したハイパースペクトルカメラの開発が完了	
現在	・キューブサットによるハイパースペクトル観測に成功	
1年後	・観測実験を繰り返し、本方式のハイパースペクトルカメラの性能を評価 ・ハイパースペクトルデータの利用アプリケーションの開発 ・赤外ハイパースペクトルカメラ開発のフィージビリティスタディ	・可視近赤外ハイパースペクトルデータの利活用を複数実施し、事例を作っていく。  ・赤外ハイパースペクトルカメラの開発は外部資金獲得を視野に入れて、FSを進める。
5年後	赤外ハイパースペクトルカメラの開発を完了し、宇宙実証を行う	・可視近赤外ハイパースペクトルデータの利活用を、連携企業・団体と共に進める。
7年後	可視～赤外領域におけるハイパースペクトル衛星の複数機開発を行い、観測のリアルタイム性の向上を行う。	赤外域も含めたハイパースペクトルデータの利活用を、連携企業・団体と共に進める。

# 企業への期待

## 【ハードウェア開発】

- 小型ドローンなどのプラットフォームでの、ハイパースペクトル利用を考えている方との技術協力
- 短波長赤外(波長2.5um)のイメージング・分光観測の技術や性能評価などの技術提供・交流

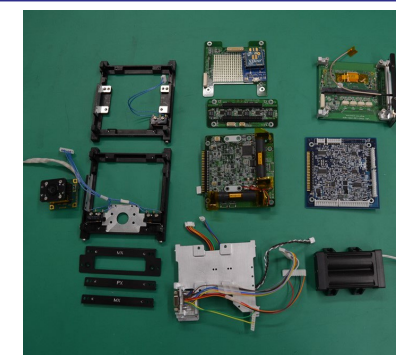
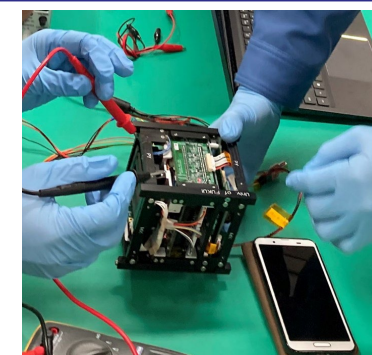
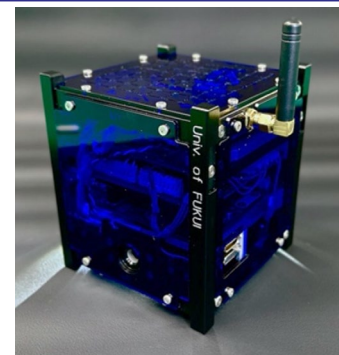
## 【データ利用】

- 宇宙から観測されたハイパースペクトルデータ・リモートセンシングデータの利活用を検討したい方々との連携
- 画像・分光解析技術を持つ方々との連携

## 企業への貢献、PRポイント

- 宇宙からのハイパースペクトル観測は国内外でも事例が少なく、未開拓の技術領域が多いため、新規参入企業にとって高付加価値の協業機会を提供可能
- 宇宙分野(特に人工衛星)への参入を考えている方々への技術指導やハンズオン実習を実施中のため、ハイパースペクトル観測に限らず、広く宇宙産業への参入支援や共同研究・実証機会を提供
- 超小型衛星による実証経験と支援体制を活かし、企業の製品・技術の宇宙実証に貢献可能

企業らが宇宙産業へ参入できるように、教育用衛星EDITを使い、人工衛星開発のハンズオン実習を実施、2019年度から毎年度開講し、**年4社～程度の企業・大学**が参加。





# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 画像情報生成プログラム、ハイパースペクトルカメラ及び人工衛星
- 出願番号 : 特願2025-052860
- 出願人 : 福井大学
- 発明者 : 青柳 賢英

# お問い合わせ先

福井大学

研究・地域連携推進本部 研究推進課（知財担当）

T E L 0776-27 - 9725

e-mail [titekiall@ml.u-fukui.ac.jp](mailto:titekiall@ml.u-fukui.ac.jp)