

国立研究開発法人連携講座フロンティア宇宙工学研究拠点
(地球観測センサ科学研究拠点)ワークショップ
地球観測センサと情報システムの協働
2023年1月25日(水)

超小型衛星における地球観測データの オンボード処理技術の開発

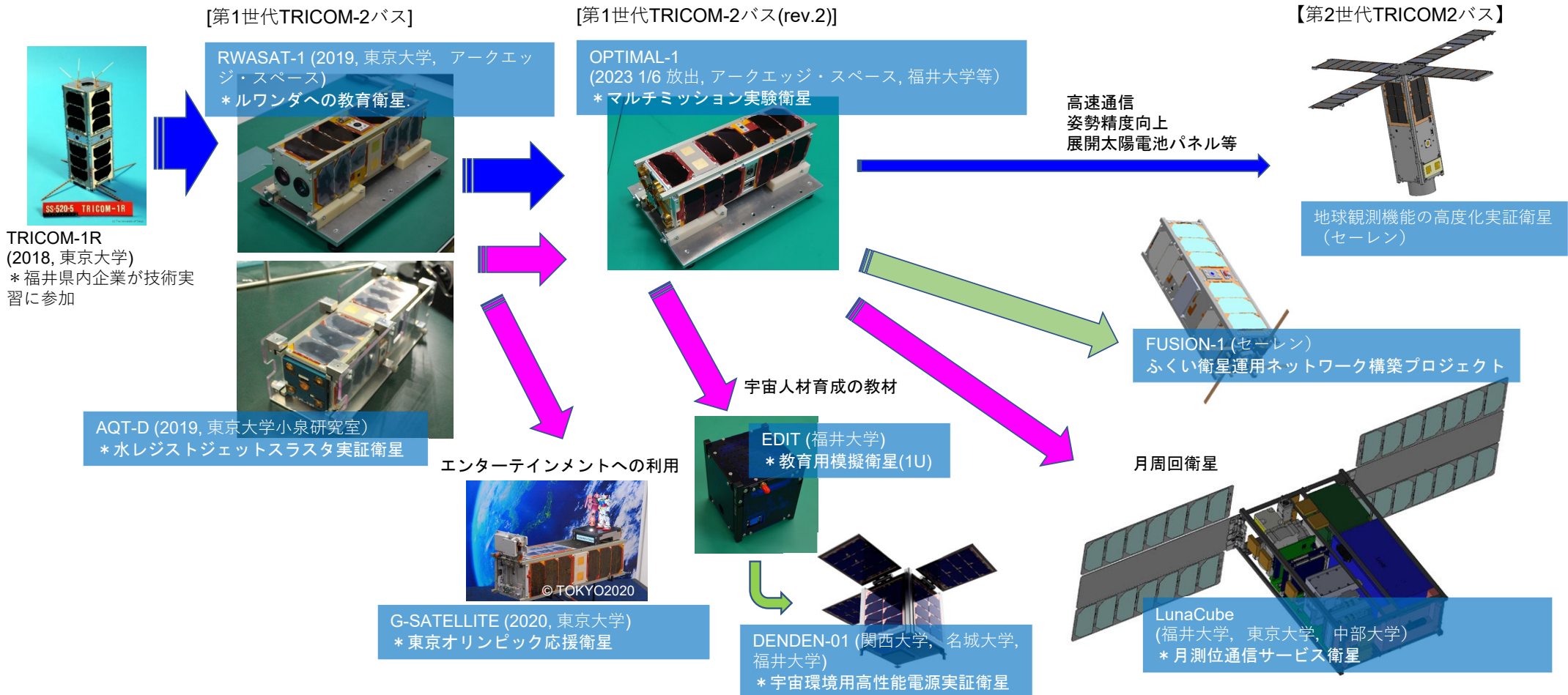
2023/1/25

福井大学 青柳賢英

アウトライン

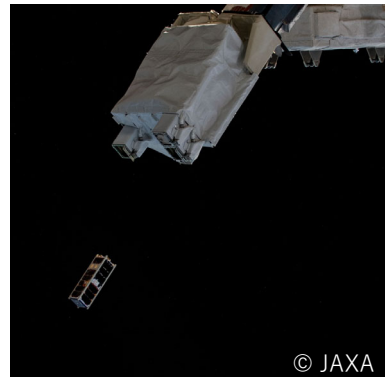
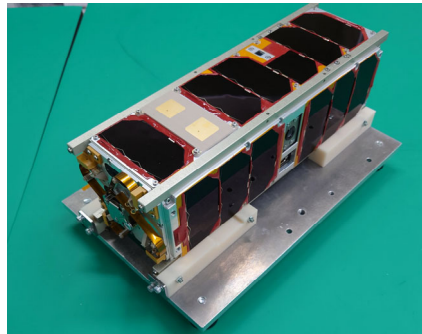
- CubeSatによる地球観測
 - 福井県における衛星開発の取り組み
 - OPTIMAL-1の取り組み
 - オンボードでの画像評価・雲・最適画像の選択
 - 小型ハイパースペクトルカメラのオンボード処理・生成
- ハイパースペクトル・マルチスペクトル連携撮影の実験計画
 - うみつばめ衛星の実証計画

福井におけるCubeSat開発の取り組み



マルチミッション衛星: OPTIMAL-1 (3U-CubeSat)

- ・ アークエッジ・スペース, 福井大学らが開発
 - ・ アークエッジ・スペースが経済産業省「宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業」に採択された「TRICOM衛星による超小型推進系・通信装置及び軌道上高度情報処理技術の実証事業」で開発
- ・ 2023年1月6日にISSから放出され, 現在順調に初期運用中

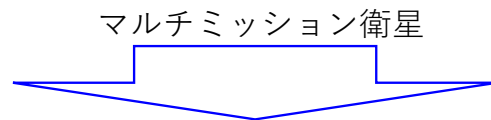


ミッション1	広域地球観測・簡易分光観測 - 観測範囲: 280km, 地表分解能 100m程度 - カラー(RGB), ハイパースペクトルカメラの2台搭載	福井大学
ミッション2	Store & Forward (データ蓄積中継) 20mWの特定小電力によるセンサ情報の転送	東京大学, アークエッジ・スペース
ミッション3	超小型推進系 - 水レジストジェットスラスタ	PaleBlue
ミッション4	エッジコンピューティング技術 - 先端デバイスを用いた高度処理の軌道上実証	アークエッジ・スペース, 福井大学
ミッション5	光モジュールの軌道上実証	三菱電機

サイズ	100×100×H340 mm ³
重量	3.9kg
姿勢制御系	3軸 姿勢安定 (太陽指向・地球指向) 3軸磁気センサ 3軸 MEMS ジャイロ스코ープ, 太陽センサ 3台, GPS受信機, 3軸磁気トルカ, 3軸リアクションホイール
電源系	発生電力: 8 W (最大) 消費電力: 2.6W (Safe) バス電圧: 8V(非安定), 5.0V(安定) リチウムイオン電池 (5.8Ah) 太陽電池: 4面ボディマウントセル
通信系	テレメトリコマンド: S-band コマンド通信速度: 4 kbps, ダウンリンク通信速度: 4kbps – 64kbps
CDH (OBC)	32bit PIC - ArduinoベースのAPI - C2A based Application

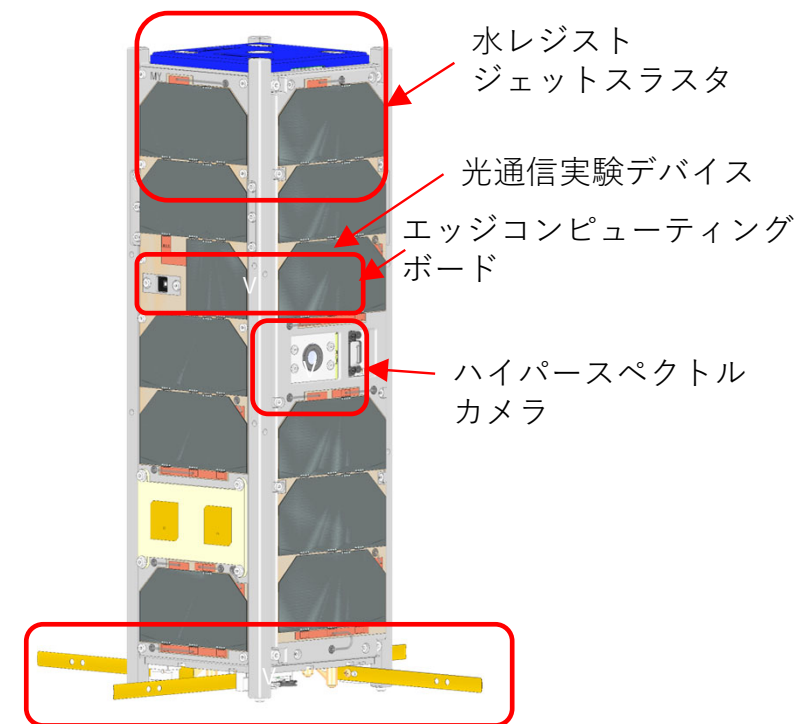
マルチミッション衛星: OPTIMAL-1 (3U-CubeSat)の特徴

- 衛星リモートセンシングには、全地球域における定期的な観測が期待される。
 - 例えば、農業分野では、作物管理や雑草除去等のために定期的かつ高頻度な観測が望まれている。
- 衛星1機のみでは観測頻度が少なく、高頻度に観測できる方法の構築が課題



- 複数のユーザ（機関）による共用が可能な点が特徴であり、一機関あたりの開発コスト等が低減され、打ち上げ頻度の増大や量産化が進むことが期待される
- このようなCubeSatに地球観測カメラを搭載できれば、専用衛星を作らずに、観測頻度の増加を実現することができる

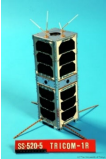
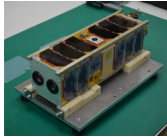
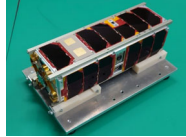
マルチミッション型CubeSat
OPTIMAL-1



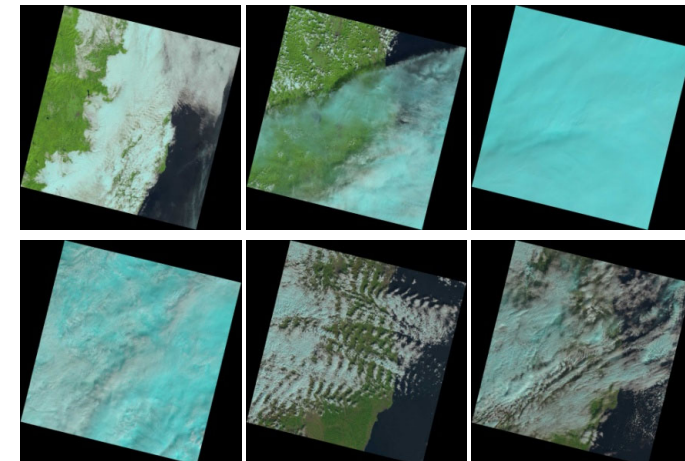
Store&Forward送受信機・アンテナ

CubeSatによる地球観測ミッションの課題

- 広域～中分解能程度の地球観測
- 衛星地上間の回線速度が遅い
 - イメージセンサの高解像度・高感度化が進んでいるが、CubeSatのUHFやS-band通信では数十～数百kbpsが限度のため、高解像度画像のダウンリンクを高頻度にするのは難しい
 - X-band等を用いた高速通信を行う例もあるが、なかなか難しい
- 被雲率
 - 特に日本・アジア地域では雲に覆われた画像が多く、折角ダウンリンクした画像が使い物にならないことが多く、CubeSatの画像取得率は著しく悪い

	TRICOM-1R	RWASAT-1	OPTIMAL-1
衛星/項目			
周波数	UHF	S-band	S-band
通信速度(実効)	1.2kbps -	4kbps - 64kbps	4kbps - 64kbps

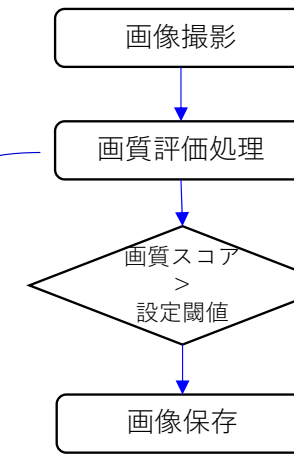
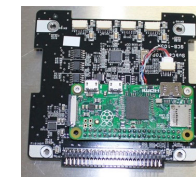
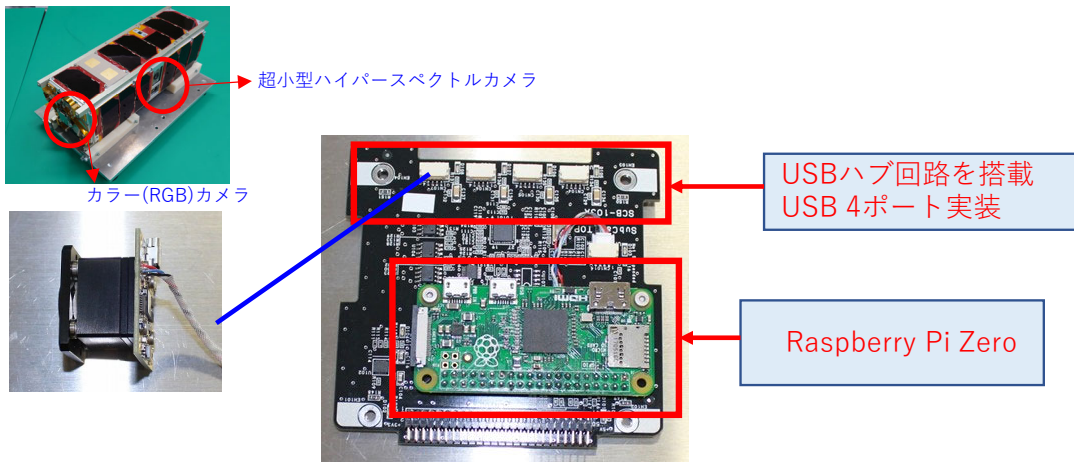
Landsat-8/OLI: 2014/08/19-2014/11/23



OPTIMAL-1での取り組み: オンボードでの画像評価

オンボードでの撮影画像の評価(ダウンリンクの効率化)

- カラーカメラ・ハイパースペクトルカメラ(後で紹介)共に画像評価機能を実装
- 撮影した画像の「画質」, 「特徴量」を計算して, 良質な画像のみを保存する機能を実装
 - 例)被雲率の少ない画像の選択
- 衛星へアップロードした画像と類似度の高い画像を保存する機能
 - ターゲット(森林地帯や沿岸地域)の自動撮影
- 画質評価の方法やパラメータ, 閾値は地上からアップロード可能



画質スコア(モードによる, 例)JPEG圧縮量, HSVの各値, 教師データとのマッチング値等)

OPTIMAL-1での取り組み: オンボードでの画像評価

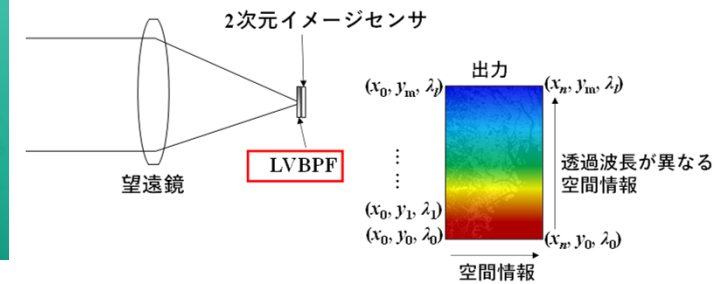
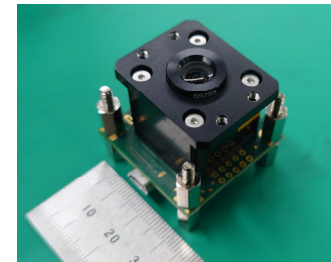
- 搭載カメラの正常動作・撮影は確認済み
- OPTIMAL-1は現在、3軸姿勢制御のパラメータ調整中のため、地球指向での撮影はまだできていない。
- カメラ撮影はタンブリング状態で実施中だが、少なくとも6回の撮影で6回とも地球側の撮影に成功
 - タンブリング状態だと深宇宙撮影(真黒な画像)になることがあるが、オンボード画像評価により深宇宙画像は削除できている
- 3軸姿勢制御確立後は、積極的に地表撮影を行い、オンボード画像評価機能により、晴天画像の取得頻度向上を目指す予定

OPTIMAL-1での取り組み2: 超小型ハイパースペクトルカメラのオンボード処理

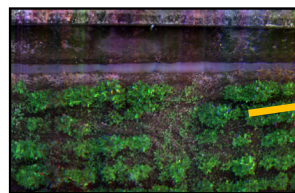
- LVBPF(リニア可変バンドパスフィルタ)を用いた超小型ハイパースペクトルカメラを搭載

LVBPF (Linear Variable Band-Pass Filter)

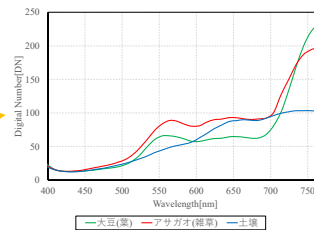
- 位置により透過波長が異なるバンドパスフィルター
- 大型の分光器が不要のため小型・簡易に分光情報の取得が可能
- 3cm角のハイパースペクトルカメラを開発



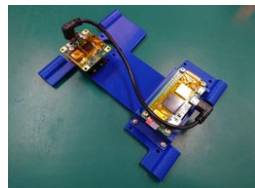
ドローンでの観測実験 (例)



ハイパースペクトルデータ
(RGB合成で表示)

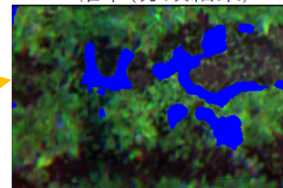


- 本手法によりハイパースペクトルデータが問題無く取得できることを確認した。
- スペクトル分類により、大豆・雑草の識別ができていることを確認できた



スペクトル情報による分類結果

雑草(分類結果)



雑草(目視確認)



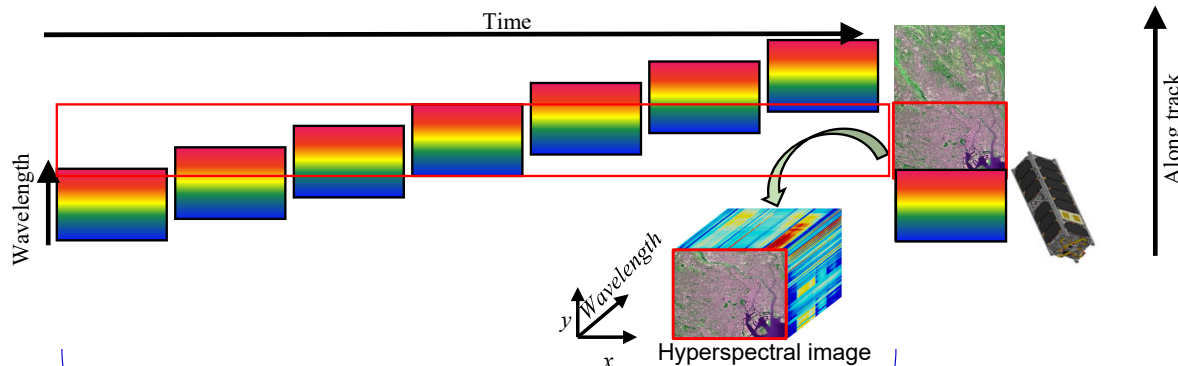
OPTIMAL-1搭載超小型ハイパースペクトルカメラの仕様

項目	カメラ本体
寸法	3.6cm x 3.6cm x 2.4cm ³
重量	35g
地表サンプリング間隔(GSD)	110m/pixel
観測サイズ	観測幅 52.8km * 700km以上連続撮影
視野角(FOV)	46deg
Fno	F/2.5
観測波長 (機能検証のため可視域のみ)	420nm - 658nm 波長サンプリング間隔: 5.4nm 47バンド

OPTIMAL-1での取り組み2: 超小型ハイパースペクトルカメラのオンボード処理

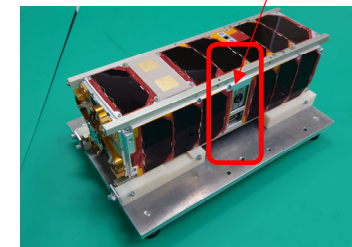
- ハイパースペクトルデータのオンボードデータ生成・解析機能
 - LVBPFハイパーは数百枚の画像を重ね合わせるによりハイパースペクトルデータを生成する。
 - OPTIMAL-1では、**オンボード上で撮影画像の位置合わせ**を行い、ハイパースペクトルデータを生成する
 - オンボード上で生成したハイパースペクトルデータを使って、**任意のバンドを組み合わせた指数画像**を生成。ダウンリンクデータ量の削減(圧縮)を行う
 - 生成に使用するパラメータは、コマンドによりアップリンクして指定する

オンボードでのハイパースペクトルデータ生成



オンボードでのハイパースペクトルデータ生成

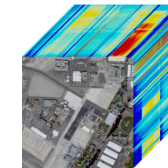
LVBPF型ハイパースペクトルカメラ



ハイパースペクトルデータ生成

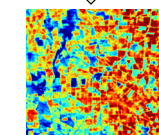


オンボード処理
Raspberry Pi Zero



ハイパースペクトルデータ (@JPL)

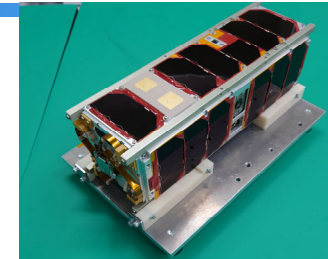
オンボード解析



解析結果をダウンリンク

今後の実験計画

- OPTIMAL-1での今年度中の実証試験を計画中
- 今後、オンボード画像評価機能や超小型ハイパーのオンボード処理の実証を1U, 3U-CubeSatで実施していく計画



	DENDEN-01	地球観測機能の高度化実証衛星	FUSION-1
衛星/項目			
衛星サイズ	1U	3U	3U
地表サンプリング間隔	132m/pixel	330m/pixel	36m/pixel
観測幅	観測幅 135km	観測幅 340km	観測幅 37km
観測波長	450nm – 735nm 波長間隔: 5nm 57バンド	450nm – 735nm 波長間隔: 5nm 57バンド	450nm – 735nm 波長間隔: 5nm 57バンド
実証予定時期	2023年以降	2023年以降	2024年以降

アウトライン

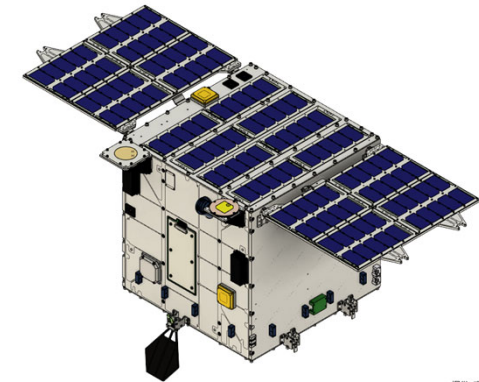
- CubeSatによる地球観測
 - 福井県における衛星開発の取り組み
 - OPTIMAL-1の取り組み
 - オンボードでの画像評価・雲・最適画像の選択
 - 小型ハイパースペクトルカメラのオンボード処理・生成
- ハイパースペクトル・マルチスペクトル連携撮影の実験計画
 - うみつばめでの実証計画

うみつばめ(東京工業大学)による分光観測

- 東京工業大学が開発する50kg級衛星
- 紫外線帯の天文観測と、陸海域の分光ビジネスの実証を行う

分光観測機器

- LCTFマルチスペクトルカメラ
 - 高分解能1台・広域観測1台
 - 可視近赤外ハイパースペクトルカメラ(30mGSD)
- うみつばめでは、LCTFカメラとハイパースペクトルカメラを連携させた運用を行う。



提供:東京工業大学

プロジェクトメンバー

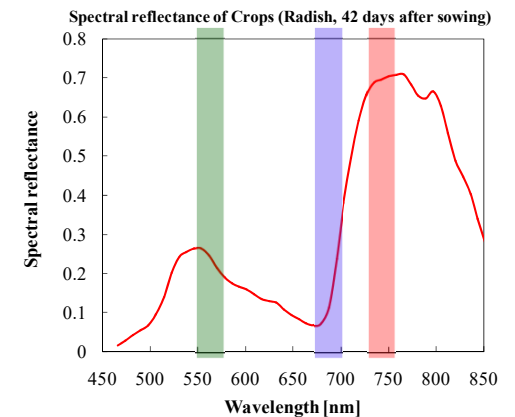
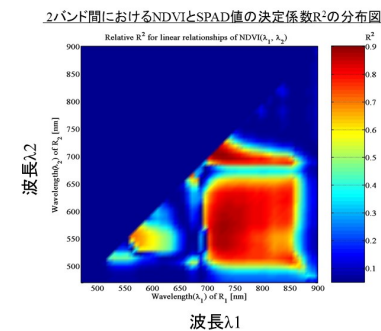


<http://www.hp.phys.titech.ac.jp/umitsubame/about.html>

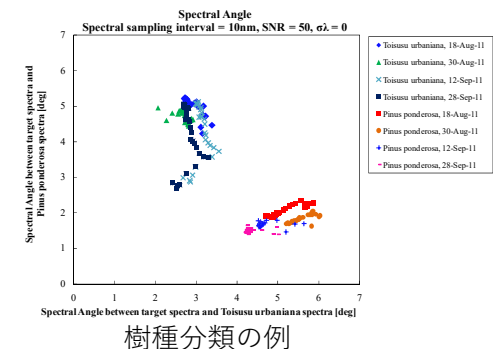
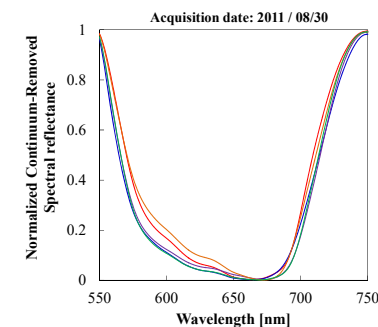
ハイパースペクトルの利用 (植生解析を例として)

- 最適な波長を組み合わせた植生指数
 - 従来の研究(植生指数等)では、「赤外波長」と「赤波長」が使用される。
 - 植物(作物)によって、特徴のある「波長の組み合わせ」が異なる
 - ハイパースペクトルは、様々な波長を使って植生指数を計算できるので、観測対象に合わせた「**最適な波長の組み合わせ**」で指数を作ることができる

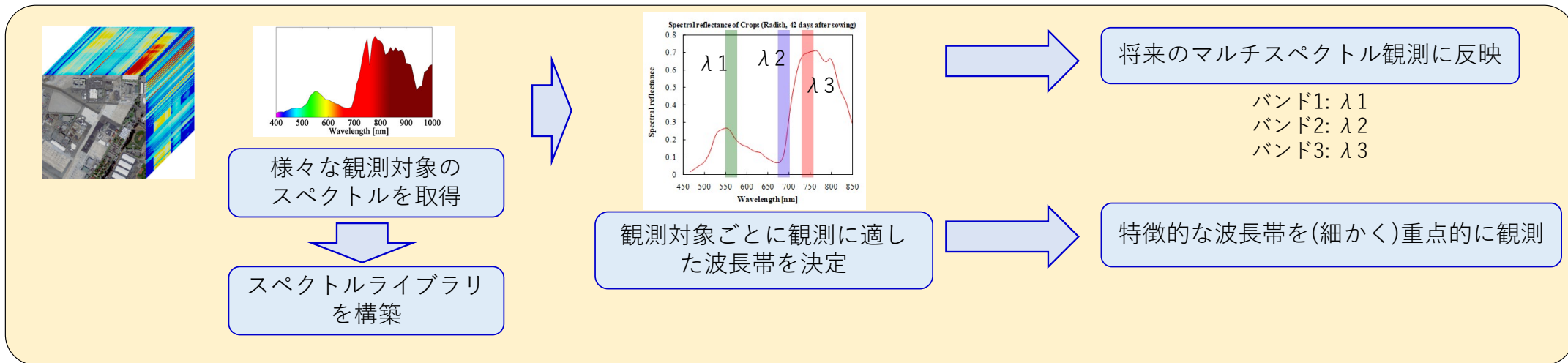
$$NDVI(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{R(\lambda_1) - R(\lambda_2)}{R(\lambda_1) + R(\lambda_2)}$$



- スペクトルの形状的特徴を用いた分類
 - 波長吸収帯などの、スペクトル形状は、植物品種等によって微妙に異なる。
 - **スペクトルの形状データ**を使うことにより、マルチスペクトルでは分類が難しかった品種の分類等が可能になる



ハイパースペクトルの利用



ハイパースペクトルの実験衛星が少ないため、
必要・特徴的な波長が、まだ不明確であり、研究・模索している段階

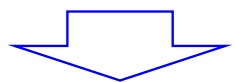
観測対象毎に見たい波長帯が異なるので、ハイパースペクトルの需要もある

うみつばめ: LCTFとハイパースペクトルのオンボード連携

LCTF(液晶波長可変フィルタ)は、任意の1波長を透過させることができ、連続的に透過波長を変更することで、マルチスペクトル撮影が可能

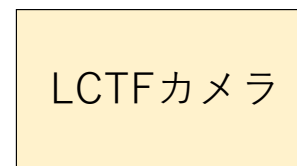
+

ハイパースペクトルカメラは、広い波長範囲を連続的に観測することが可能。



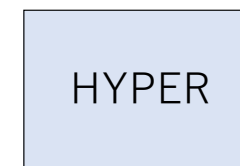
ハイパースペクトルカメラで撮影したデータからオンボードで特徴的な波長を見つけ出し、その波長をLCTFカメラで撮影

指示に従って波長の切り替え・撮影を実施

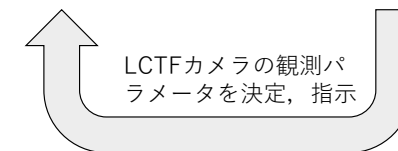


LCTFカメラ

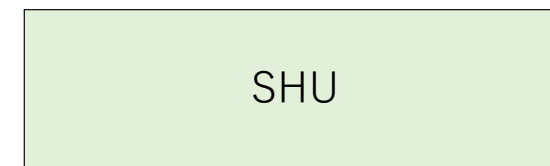
オンボードでハイパースペクトルデータの解析をする



HYPER



LCTFカメラの観測パラメータを決定、指示



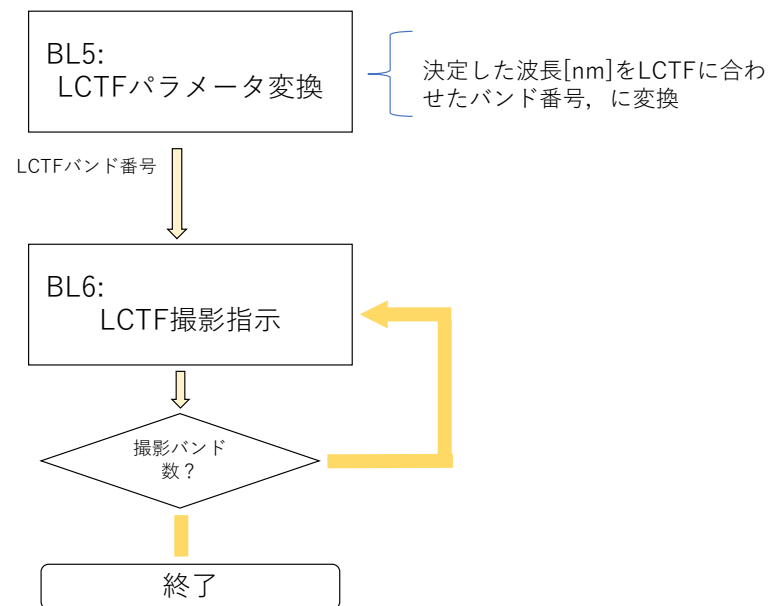
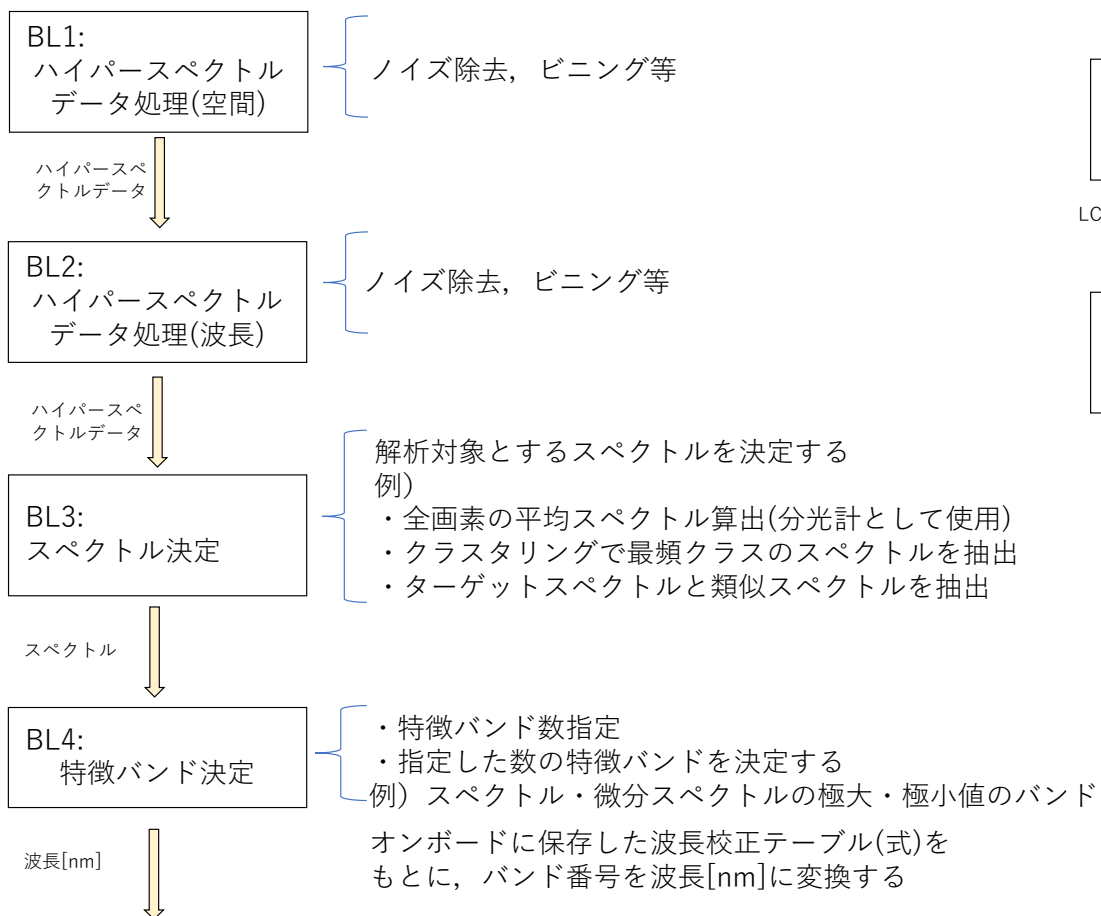
SHU

* SHU (Science Data Handling Unit)

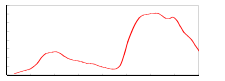
うみつばめ: LCTFとハイパースペクトルのオンボード連携の手順

BL: Block List

P: Command Parameter



※ ターゲットのスペクトルをインプットしておく (ROMに番号付きで保存しておく。) (デフォルトで登録しておくが, コマンドでも登録可とする)



- 基本機能はハイパースペクトルカメラに実装済み
- FMでの試験を継続中

まとめ

- CubeSat・超小型衛星搭載の地球観測カメラのオンボード処理について報告した

【CubeSat (OPTIMAL-1)】

- OPTIMAL-1は、可視(カラー)カメラ・超小型ハイパースペクトルカメラを搭載し、オンボードでの画質評価機能やハイパー画像の生成・解析機能を実装した
- 今後、本機能の軌道上実証を進めていく予定

【うみつばめ LCTF+HYPER連携機能】

- LCTFカメラとハイパースペクトルカメラの利点を活用した連携機能を実装
 - ハイパースペクトルカメラで撮影したデータからオンボードで特徴的な波長を見つけ出し、その波長をLCTFカメラで撮影
- 今後、FMでの機能実証、軌道上実証を進めていく予定

- **CubeSatによる軌道上実証機会は増えている。また、高性能なCPU, SoC等の利用が進められており、地上で処理をしていた高負荷な処理をオンボードでできるようになってきている。**
- **CubeSat・超小型衛星の効率的な地球観測画像取得を目指して、オンボード処理機能の実証・向上を進めていきたい。**

御静聴ありがとうございました

