



# 国立研究開発法人連携講座 フロンティア宇宙工学 (地球観測センサ科学研究拠点)

## 連携講座活動紹介

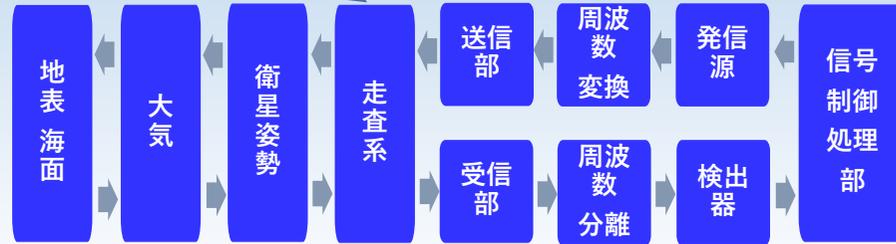
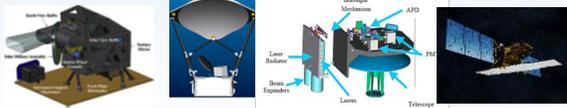
2023年1月25日

東京大学大学院 工学系研究科  
航空宇宙工学専攻  
川島高弘

第1回ワークショップ(2021年)

国内外地球観測  
センサ調査

受動光学 受動電波 能動光学 能動電波



シグナルチェーン  
として体系化

一般化

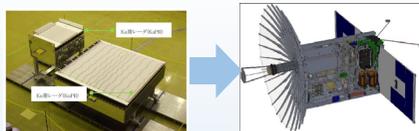
今回報告

受動センサの  
統一解釈

能動センサの  
統一解釈

小型化ビジョン

第2回ワークショップ(2022年)  
システム最適化+新規要素技術



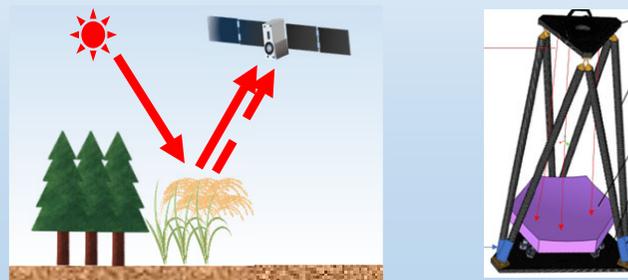
DPR

RainCube

今回報告

能動補正光学

大型鏡の軌道上  
アライメント補正

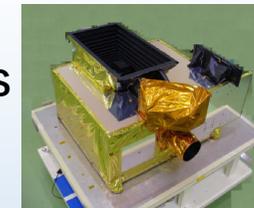


今回報告

End-to-end simulator

センサモデルと補正処理の一体化

GOSAT/  
TANSO-FTS  
へ適用



新たな観測手法に基づく  
地球観測センサ?

H/WとS/Wの融合?  
光学と電波の融合?

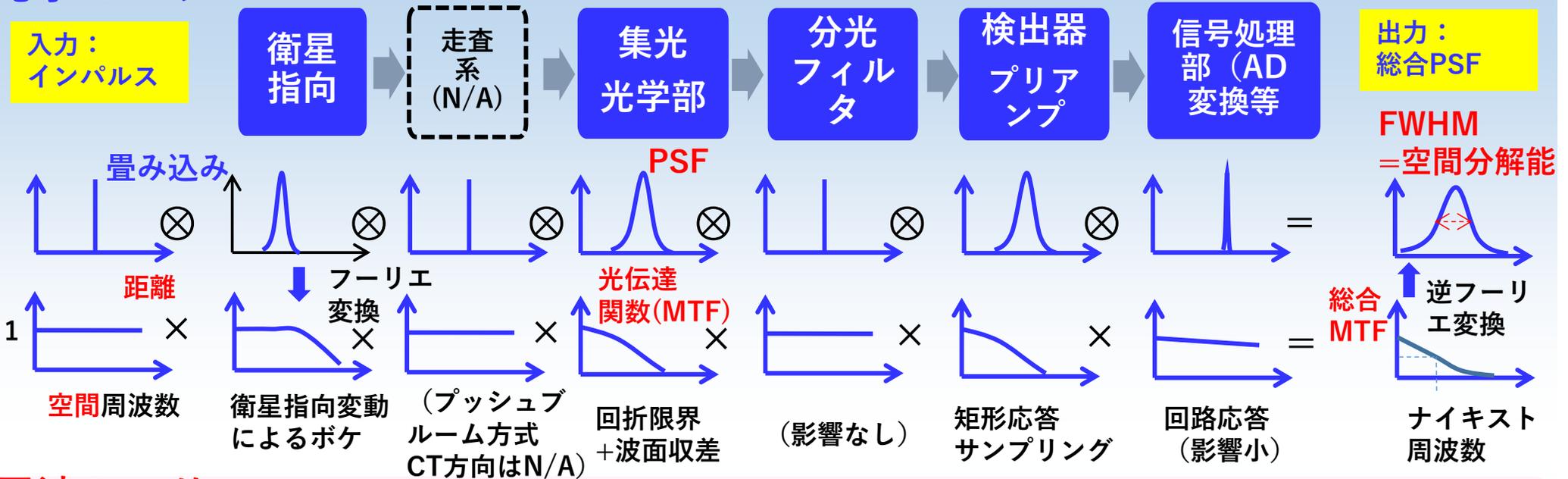
進化

今回報告

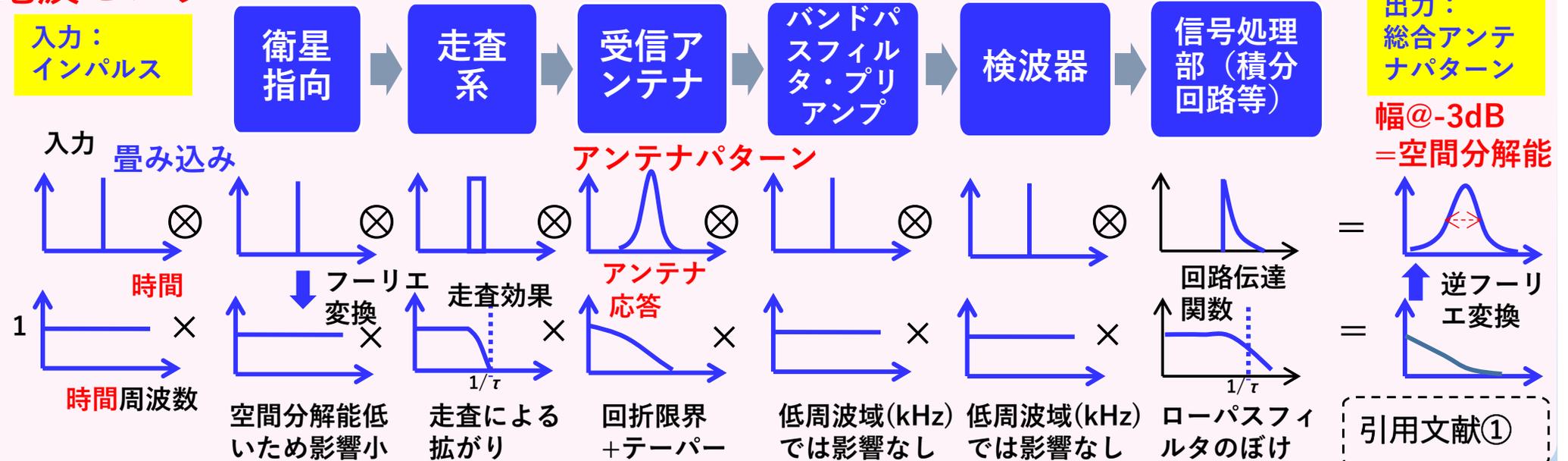
超小型衛星ミッション・  
みどりの食料システムを  
支える衛星(GreFSat)

具体化

## 光学センサ



## 電波センサ



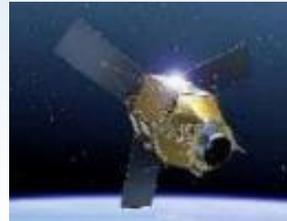
## 回折限界とその他劣化要素の畳み込みで表現

### 光学センサ

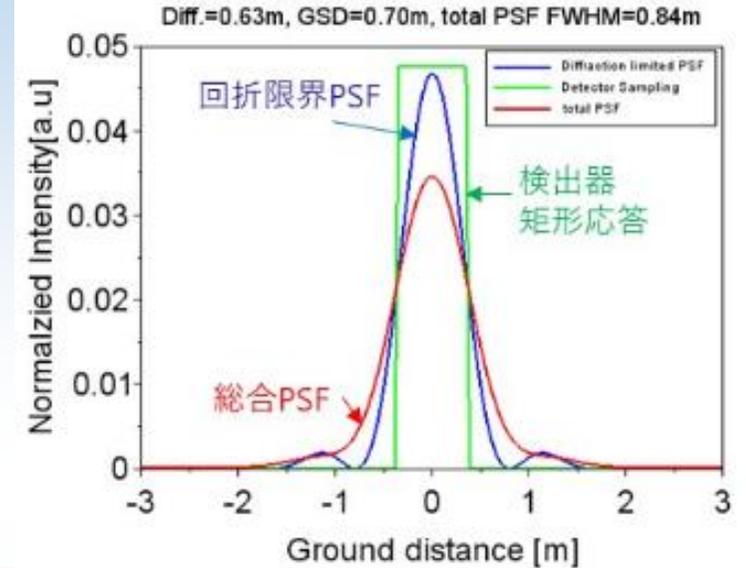
$$PSF_{total} = PSF_{diff} \otimes IFT(MTF_{sat} \cdot MTF_{abe} \cdot MTF_{rect} \cdot MTF_{samp})$$

- $PSF_{total}$  : 総合PSF
  - $PSF_{diff}$  : 回折限界PSF
  - $MTF_{sat}$  : 指向変動MTF
  - $MTF_{abe}$  : 波面収差MTF
  - $MTF_{rect}$  : 検出器矩形応答MTF、
  - $MTF_{samp}$  : 検出器サンプリングMTF
- ( $\otimes$ :畳み込み、 $IFT$ :逆フーリエ変換)

Pleiades  
へ適用



### 総合点拡がり関数(PSF) FWHM=0.84m (実際の見え方)

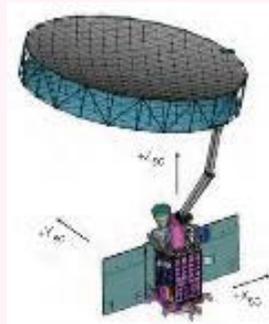


### 電波センサ

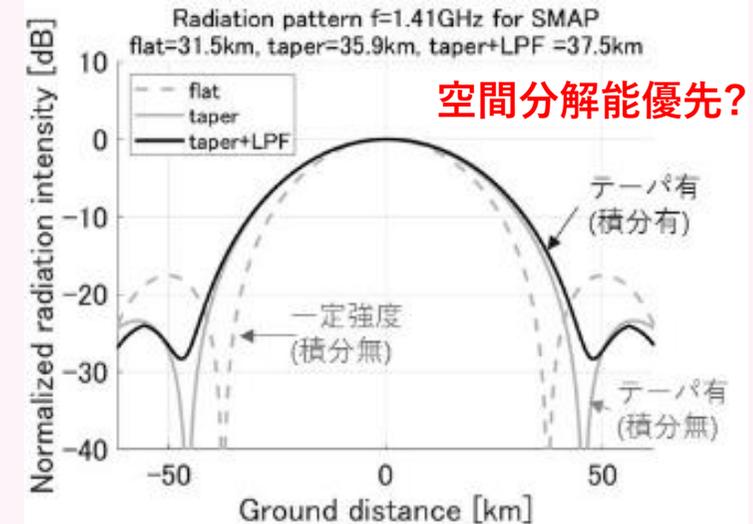
$$Ant_{total} = Ant_{diff} \otimes IFT(H_{scan} \cdot H_{int})$$

- $Ant_{total}$  : 総合アンテナパターン
  - $Ant_{diff}$  : 回折限界アンテナパターン
  - $H_{scan}$  : 走査効果に伴う伝達関数
  - $H_{int}$  : 積分回路伝達関数
- ( $\otimes$ :畳み込み、 $IFT$ :逆フーリエ変換)

SMAP  
へ適用

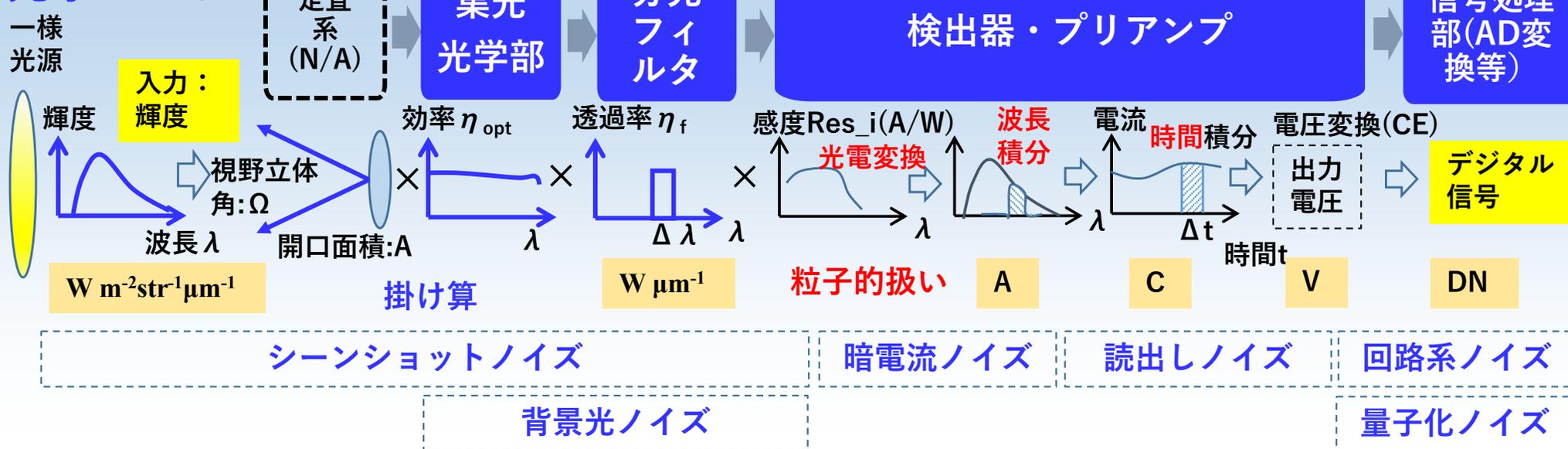


### 総合フットプリント(37.5m@-3dB)

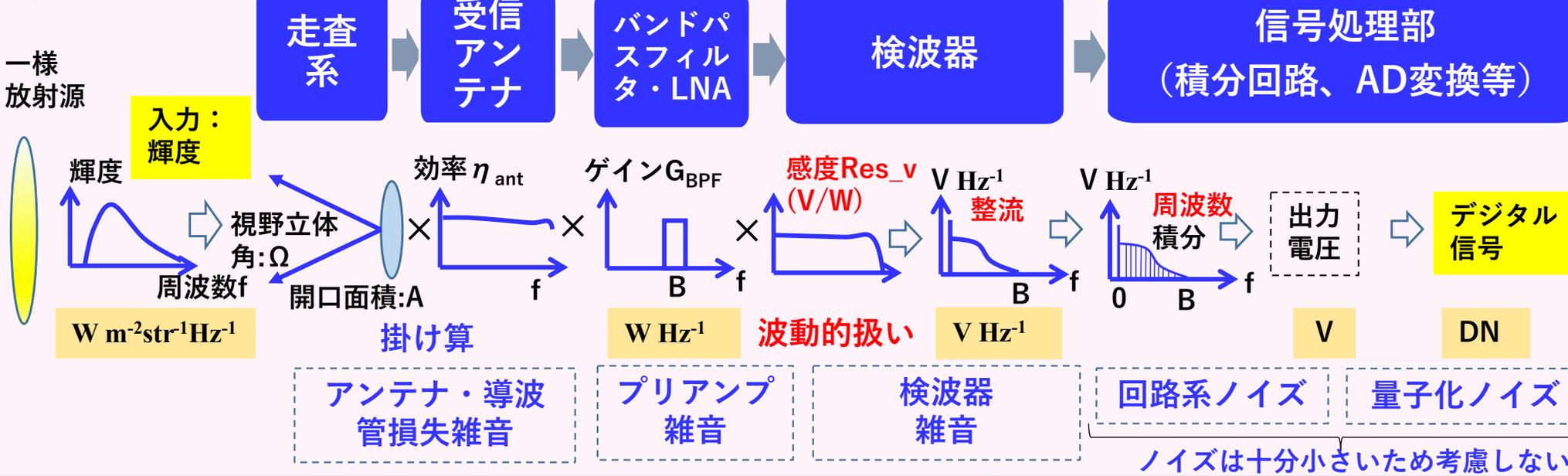


⇒実力値、設計思想を推定可能

## 光学センサ



## 電波センサ



## 光学センサ 入出力式

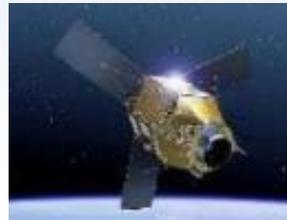
DN 出力 入射輝度 集光光学部スループット フィルター—効率分光分解能 検出器感度・積分  

$$I_o = L_\lambda \cdot (A \cdot \Omega \cdot \eta_{opt}) \cdot (\eta_f \cdot \Delta\lambda) \cdot (R_i \cdot \tau/q)$$

$$\cdot (CE \cdot G_{amp}) \cdot \left(\frac{2^{Nq}}{V_{AD}}\right)$$

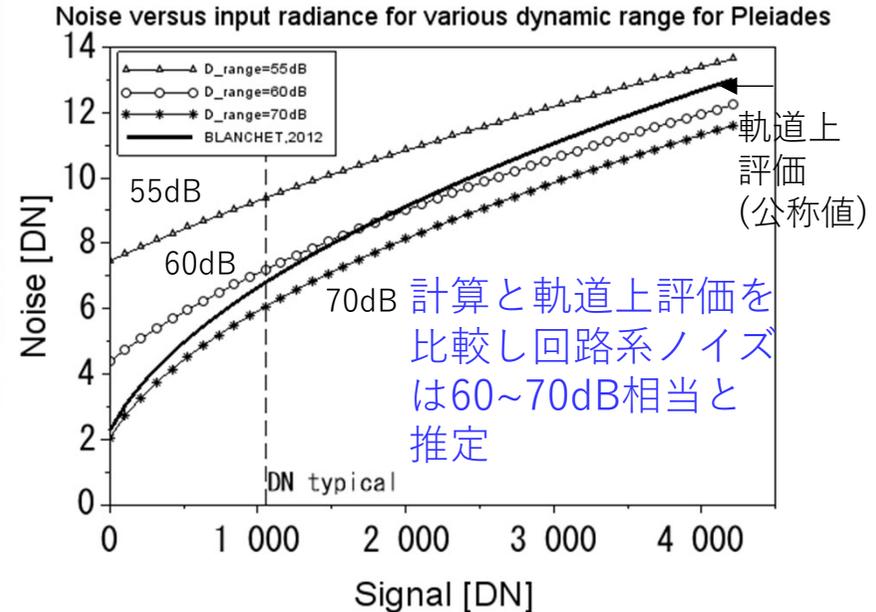
プリアンプ効率・ゲイン AD変換

Pleiades  
へ適用



$$SNR = \frac{S_{s\_e}}{\sqrt{S_{s\_e} + N_{other\_e}^2}}$$
 信号電子数  
 その他ノイズ

## 全ノイズ.vs. 信号電子数



## 電波センサ

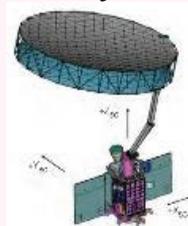
DN 出力 偏波別 入射輝度 アンテナスループット フィルター—効率帯域幅 検波器感度  

$$I_m = \frac{1}{2} \cdot L_\lambda \cdot (A \cdot \Omega \cdot \eta_{ant}) \cdot (G_{BPF} \cdot \Delta\lambda) \cdot R_v$$

$$\cdot \left(\frac{2^{Nq}}{V_{AD}}\right)$$

AD変換

電磁波の Rayleigh-Jeans 近似における状態数



SMAP  
へ適用

$$SNR = \frac{S_{s\_sta}}{\sqrt{S_{s\_sta} + N_{d\_sta}^2}}$$
 検波器ノイズ

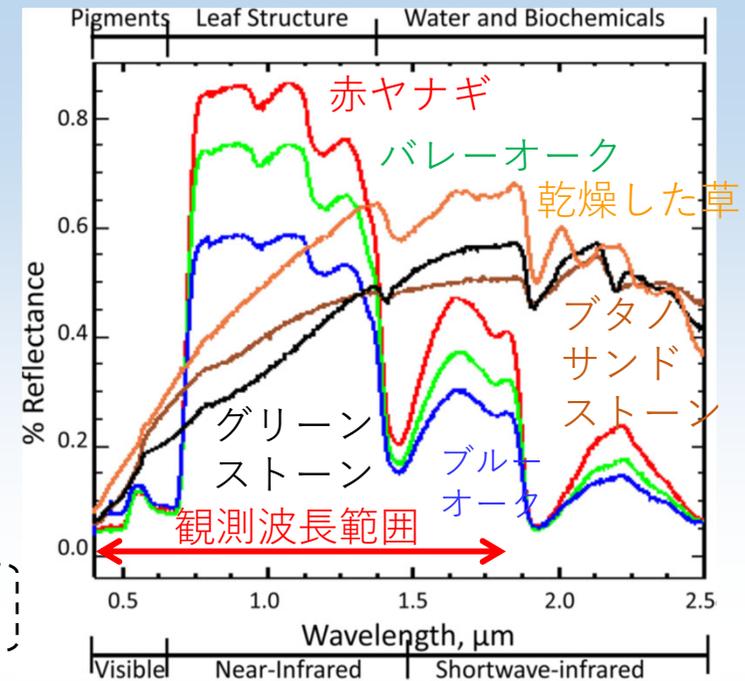
## NE ΔT算出値と公称値の比較

算出値	公称値
1.17 K	~1.1 K

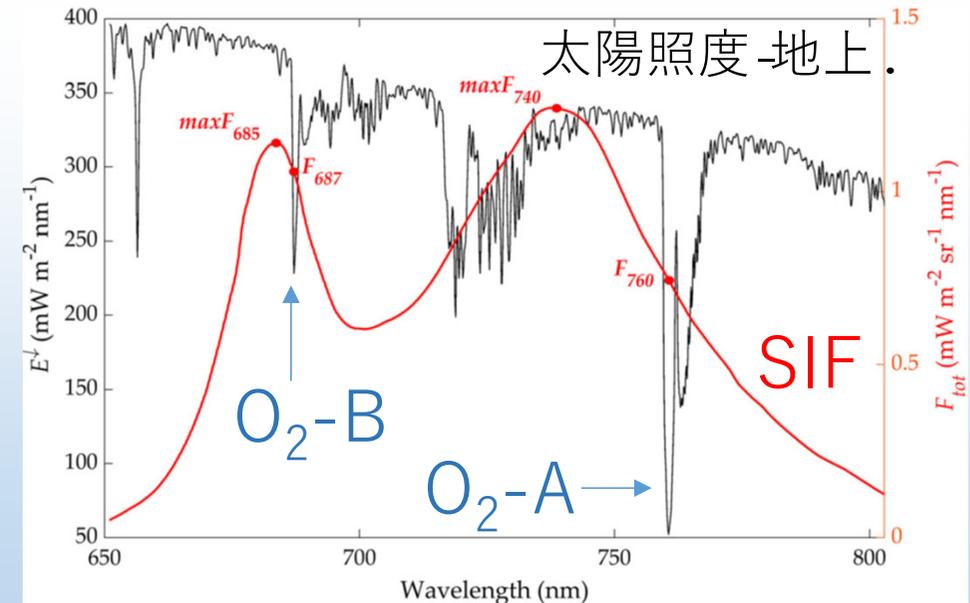
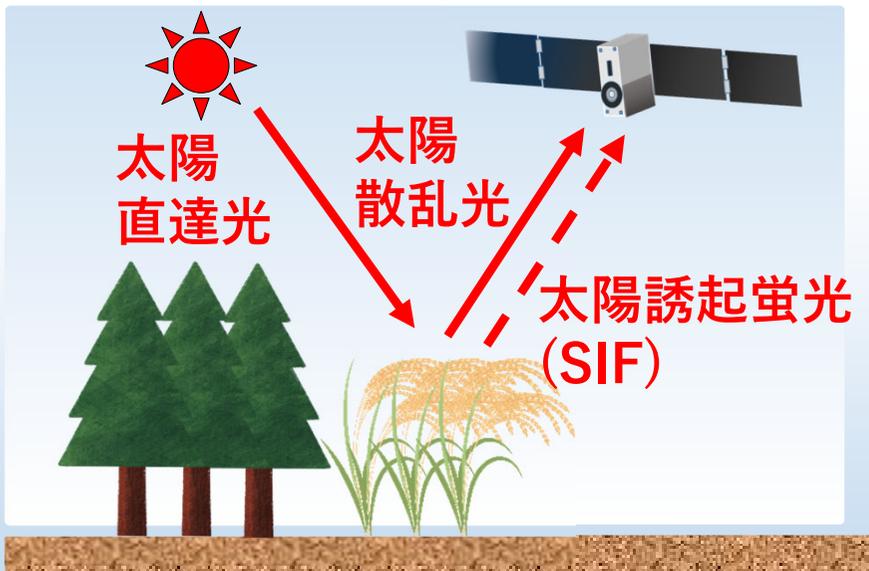
本手法により設計ベースでセンサ性能公称値の検証が可能となった  
 ⇒多様なセンサの性能を基本的な式と設計パラメータで体系化。

# 超小型衛星ミッション・みどりの食料システムを支える衛星 Green Food system support Satellite (GreFSat)

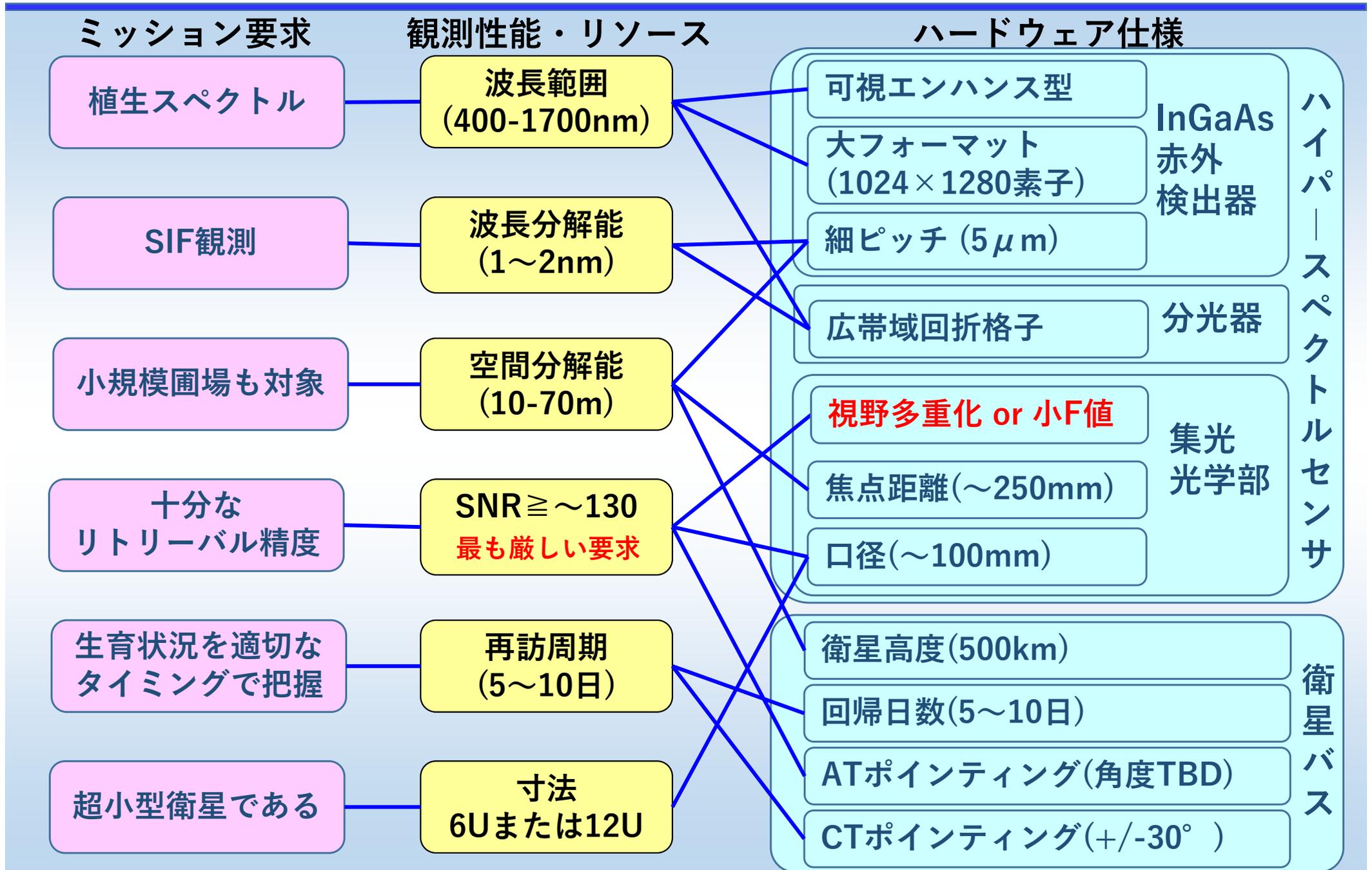
- ▶ 植生スペクトル：可視域の色素、近赤外域の葉の構造、短波長赤外域の水分・生化学域をカバー
- ▶ 太陽誘起蛍光(SIF)：O<sub>2</sub>-B帯(687nm), O<sub>2</sub>-A帯(760nm)では太陽直達光がマスクされ植物蛍光が衛星から観測可能



引用文献②



拡充プログラム・超小型衛星ミッション公募#1  
フィージビリティスタディに採用  
<https://aerospacebiz.jaxa.jp/expansion/call-for-mission1/>



# 小型化～システム設計最適化と新規要素技術の導入

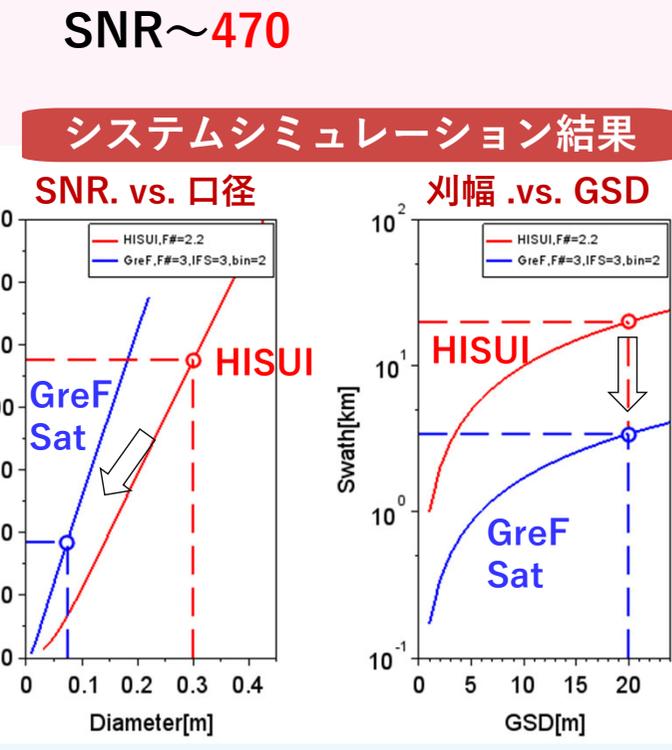


**プッシュブルーム走査**  
引用文献③

**HISUI (2019年)**  
センサ:190kg  
波長範囲:400-2500nm  
波長分解能:  
10nm (VNIR)  
12.5nm(SWIR)

**カスタム検出器 (VNIR/SWIR分離)**  
素子ピッチ:30 $\mu$ m

**HgCdTe 検出器 (要冷却)**  
※写真はイメージ



**プッシュブルーム走査**  
**視野多重化**

**GreFSat (構想段階)**  
衛星: ~15kg(目標)  
波長範囲:400-1700nm  
波長分解能:10nm (1nmサンプリング)

**波長範囲縮小を許容**

**望遠鏡小型化**  
**細ピッチ化**

**民生検出器 (VNIR/SWIR一体型)**  
素子ピッチ:5 $\mu$ m

**刈幅低下を許容**

**小口径化に伴うSNR低下を視野多重化により抑制**

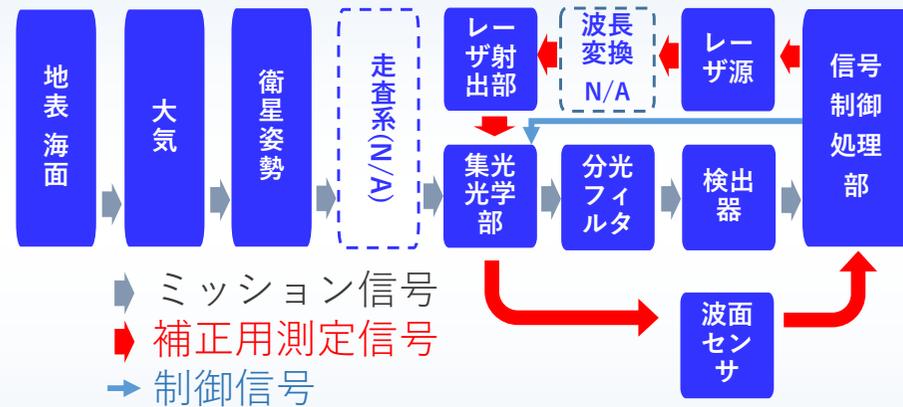
**GSDを優先するため刈幅大幅低下。**

**SNR~180 (例)**

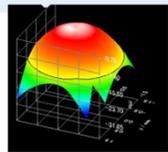
**SNR低下を許容**

**可視エンハンス型InGaAs検出器 (冷却不要)** ※写真はイメージ

- 目的：大型望遠鏡（メートル級）の軌道上アライメント調整
- 手法：波面センサ + 変位補正ストラット (defocus, tip&tilt)  
※光学モデル + 構造モデル連成
- 開発要素：小型軽量の波面センサ、サブマイクロ級変位補正

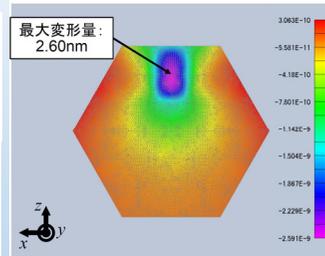


波面測定結果

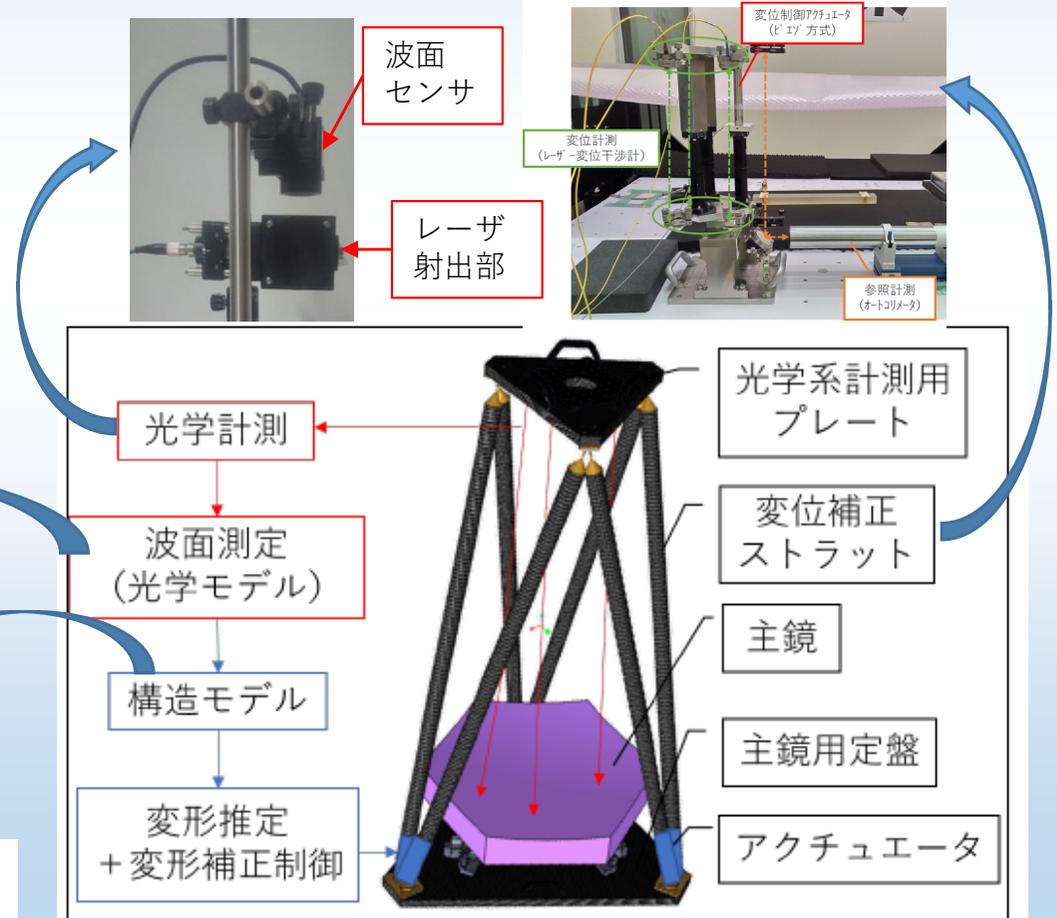


光学モデル

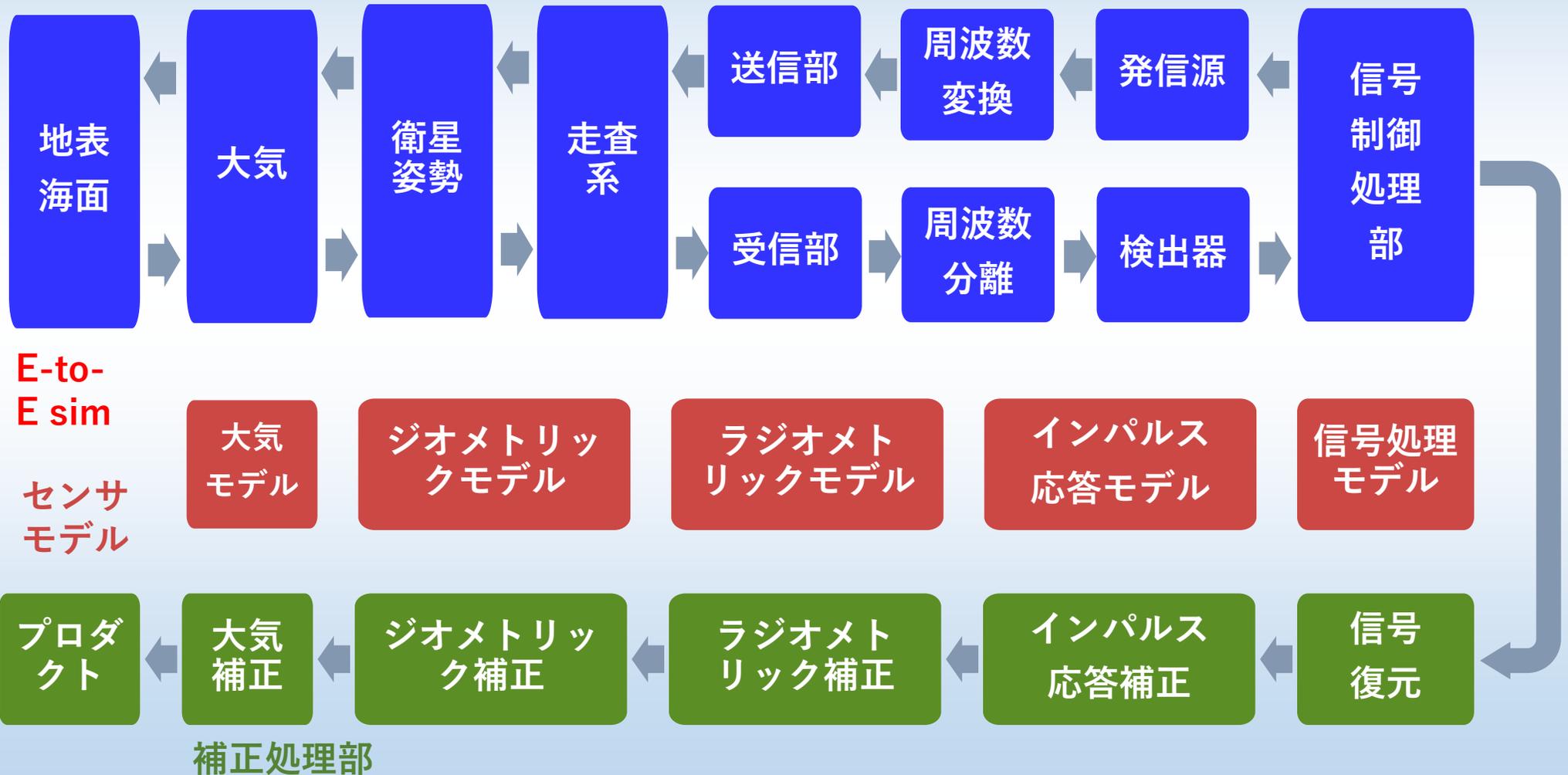
構造モデル



2023年度に全系試験評価試験を予定



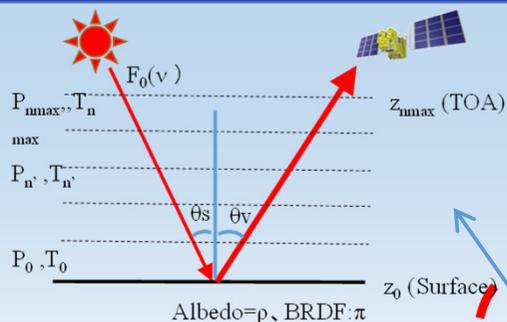
- 構想段階においてプロダクト精度を予測、ユーザとの仕様調整に有用
- 開発の早い段階でセンサ性能を予測、最適化設計が可能
- 地上試験・軌道上評価結果を取り込み補正処理精度を向上



# 温室効果ガス観測センサ(GOSAT/TANSO-FTS)への適用<sup>12</sup>

引用文献④

簡易  
大気  
モデル



初期 XCO<sub>2</sub>

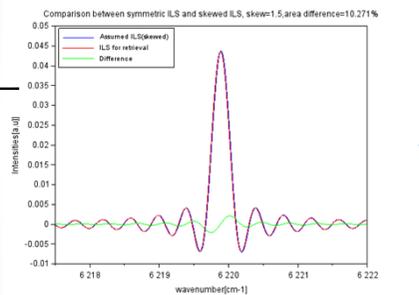
XCO<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub> カラム平均濃度

地理座標  
観測ジオメトリ

E-to-E simulator  
バックグラウンド大気  
フォワードモデル

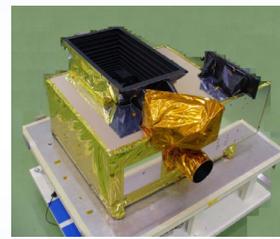
太陽照度  
気圧・気温プロファイル  
CO<sub>2</sub>吸収断面積

装置関数  
シミュレ  
ーション



大気散乱  
スペクトル

センサ  
パラメータ



TANSO-FTS

センサモデル

※公知情報のみ

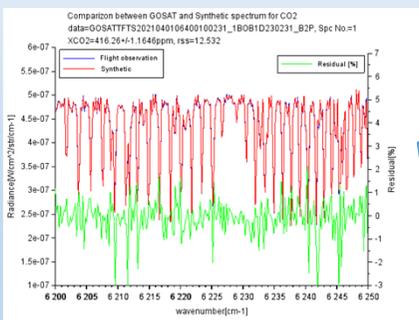
シミュレーション  
スペクトル

観測スペクトル

リトリバル

観測スペクトルに最適な  
センサパラメータ

スペクトル  
フィッ  
ティング

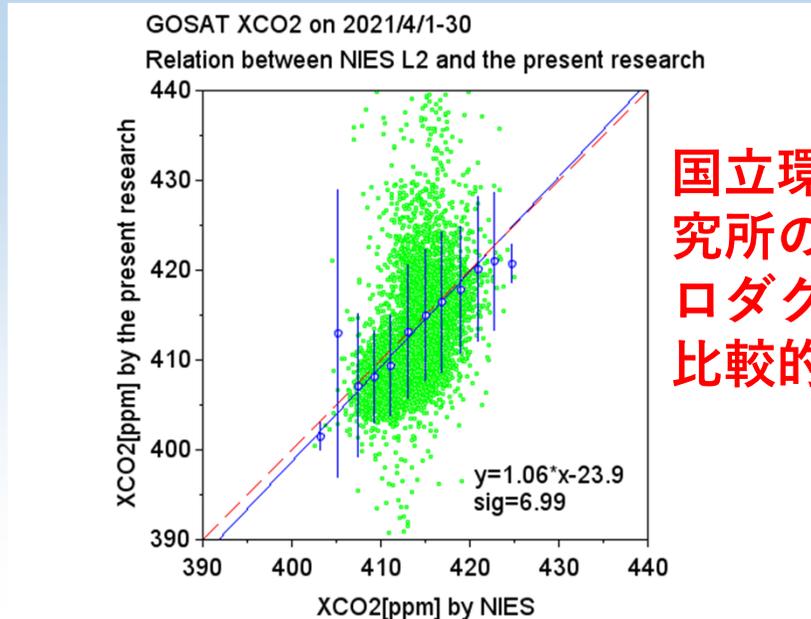


解析後 XCO<sub>2</sub>

全て内製による整備

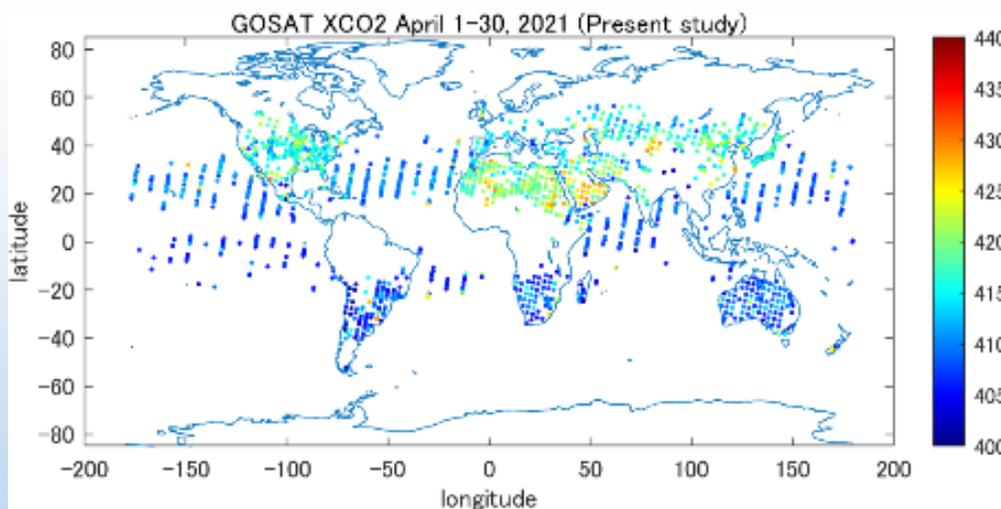
1.6 μm帯Level-1スペクトルからXCO<sub>2</sub>を導出。センサ性能予測には十分な精度である。

項目	本研究	NIES L2
平均値	413.1ppm	413.6ppm
標準偏差	7.7ppm	3.1ppm

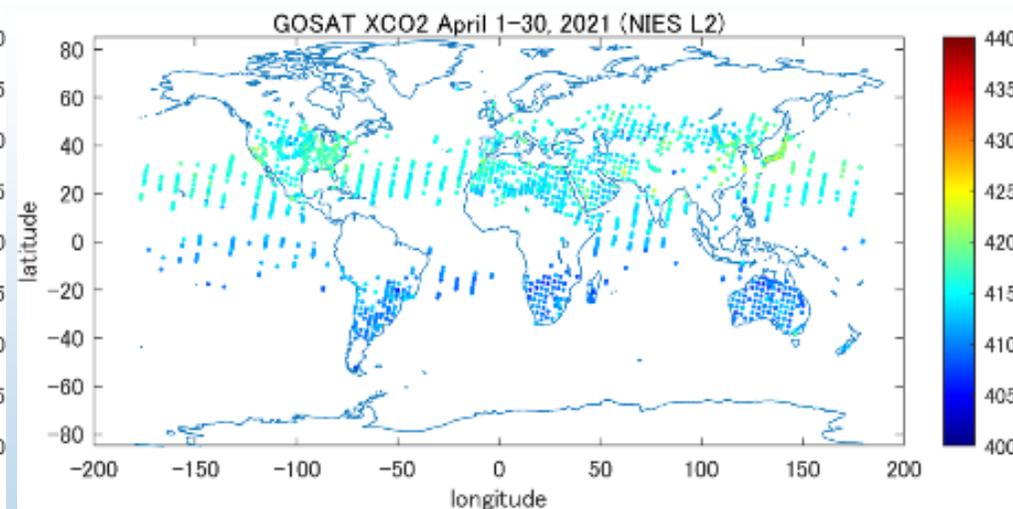


国立環境研究所のL2プロダクトと比較的一致。

## 本解析結果



## 国立環境研究所によるLevel-2



GOSAT で観測されたXCO<sub>2</sub> グローバル分布 (2021年4月1~30日)

1. 受動地球観測センサの統一解釈
  - センサ体系化の一般化として光学/電波センサの同異に着目し、空間分解能、SNRを統一的に解釈した。本解釈に基づき設計ベースでセンサ性能を検証した。
2. 超小型衛星ミッション (GreFSat)
  - システム最適化と新規技術導入の組み合わせによる小型化ビジョンを、超小型衛星搭載ハイパースペクトルセンサに適用、具体化した。
3. 能動補正光学系
  - 大型鏡の軌道上アライメント調整を目的に波面計測系と変位補正ストラットの要素試作評価、構造モデル～光学モデル連成を進めている。
4. End-to-End simulator
  - センサモデルと補正処理系の一体化を進め、具体的にGOSATに適用しXCO<sub>2</sub>を導出し有意な結果を得た。

- ① 川島高弘、岩崎晃、木村俊義、水谷忠均、植松明久、受動地球観測センサ性能の統一的解釈、日本リモートセンシング学会誌, 42,4,2022
- ② Ustin, S. et al., Current and near-term advances in Earth observation for ecological applications, Ecol Process, 10, 1, 2021
- ③ 宇宙システム開発利用推進機構(JSS)ホームページ, HISUIセンサ,  
<https://www.hisui.go.jp/sensors/index.html>
- ④ Takahiro Kawashima, Akira Iwasaki, Toshiyoshi Kimura, and Tadahito Mizutani, End-to-end performance simulator for green house gas observation sensor, Proc. SPIE 11858, 2021  
<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11858/118581A/End-to-end-performance-simulator-for-green-house-gas-observation/10.1117/12.2600186.full>