

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

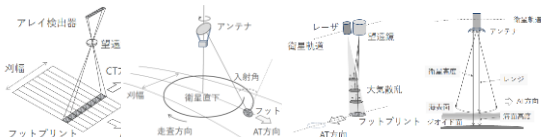
2024年12月6日

東京大学

川島高弘

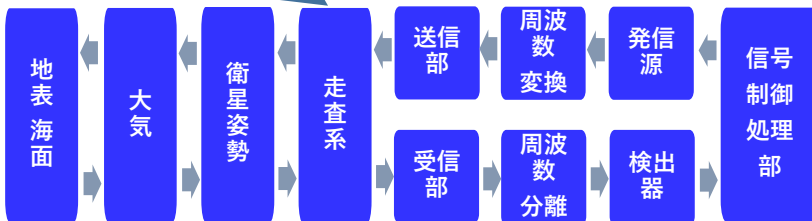
国内外地球観測 センサ調査

受動光学 受動電波 能動光学 能動電波



リモートセンシング辞典、2-1 センサの分類 (2022)

シグナルチェーン として体系化



一般化

<https://doi.org/10.11440/rs.sj.2022.013> (RSSJ論文賞)

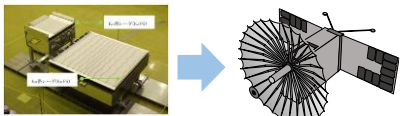
受動地球観測センサ性能の統一解釈

能動地球観測センサ性能の統一解釈

RSSJ第74回 (令和5年度春季) 学術講演会

小型化ビジョン

システム最適化+新規要素技術

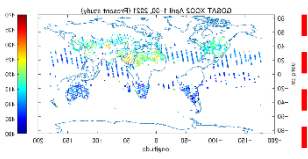


DPR RainCube
<https://www.sjac.or.jp/pdf/publication/backnumber/202208/20220802.pdf>

シグナルチェーンシミュレータ

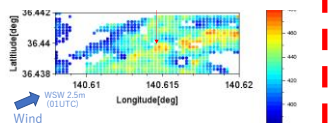
センサモデルと補正処理の一体化

GOSAT
CO₂全球分布解析



<https://doi.org/10.1117/12.2600186>

HISUIセンサ特性を考慮した発電所上空CO₂濃度の導出



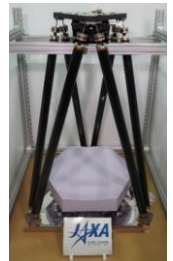
RSSJ第76回 (令和6年度春季) 学術講演会

能動補正光学

軌道上アライメント補正技術

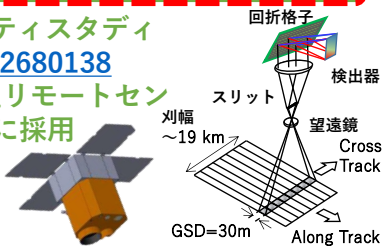
科研費「大型地球観測センサを可能とする光学計測と構造制御技術の融合」に採択

<http://doi.org/10.1088/2631-8695/abc9cf>
<https://doi.org/10.1117/12.2652282>



小型ハイパースペクトルセンサ開発

JAXA-SMASH フィージビリティスタディ
<https://doi.org/10.1117/12.2680138>
および経済産業省SBIR「衛星リモートセンシングビジネス高度化実証」に採用



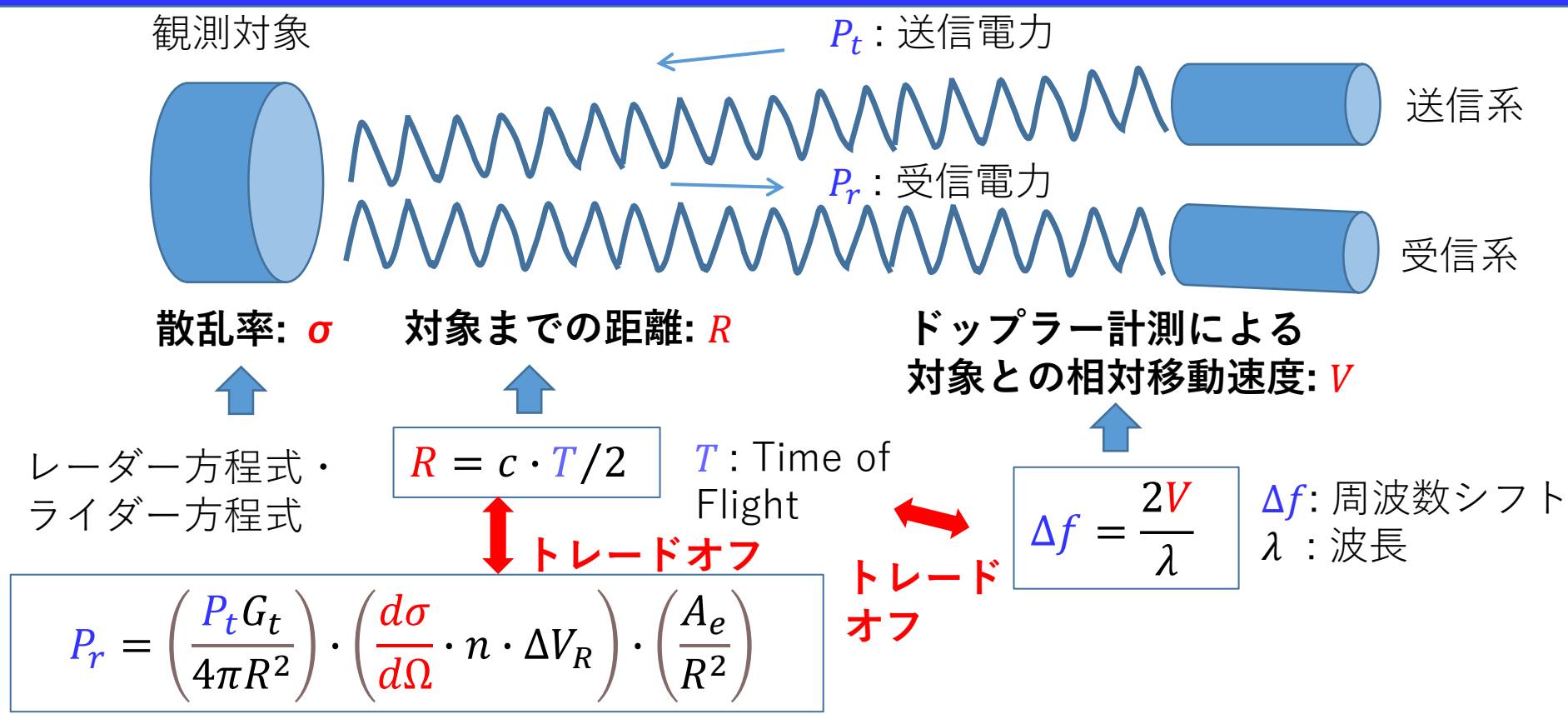
具体化

近未来の地球観測センサ (物理量駆動型?)

H/WとS/Wの融合?
光学と電波の融合?

進化

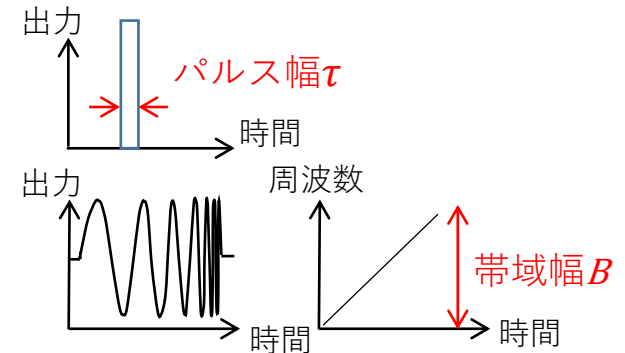
能動地球観測センサの統一解釈～3つの観測量



レンジ分解能

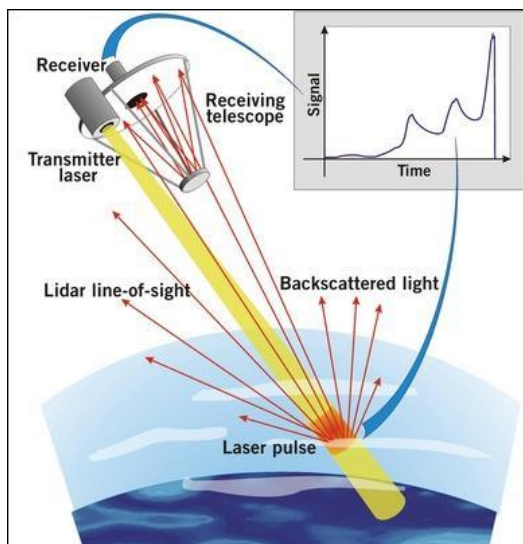
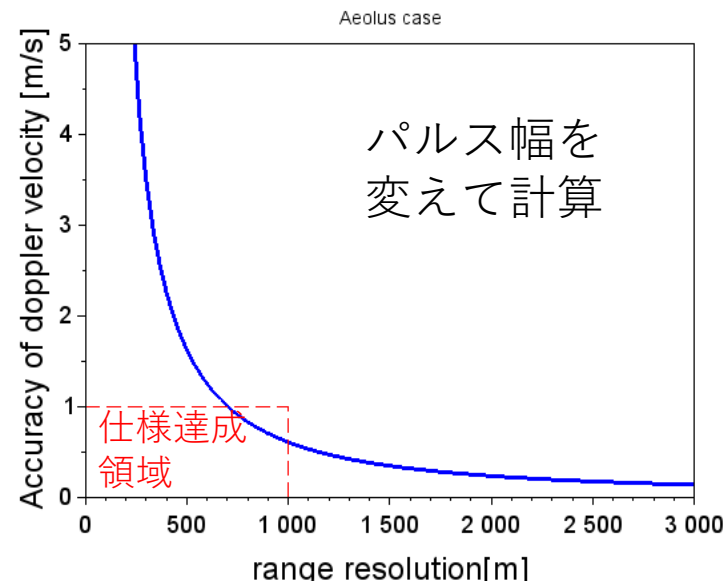
$\Delta R = c \cdot \tau / 2$ 矩形パルス送信信号の場合

$\Delta R = c / 2B$ チャープ送信信号の場合
 ※レンジ圧縮
 (直接検波ライダーは不可)



計算例：ドップラー速度精度とレンジ分解能の関係 (Aeolus/ALADINの例)

項目	表記	数値
衛星高度	H	410km
波長	λ	355nm
パルス幅	τ	30ns
送信エネルギー	E	120mJ
パルス周期	PRF	100Hz
有効アンテナ径	D	1.5m
受信系効率	ξ	0.16 ^{*1}
パルス積算数	N_{ave}	694 ^{*2}

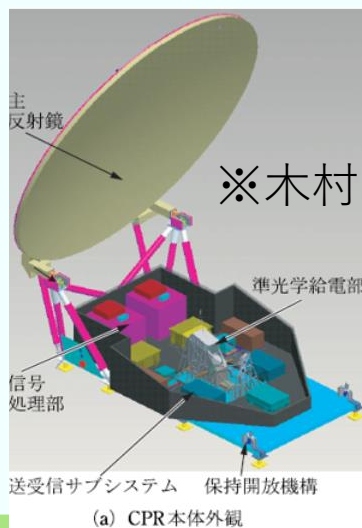
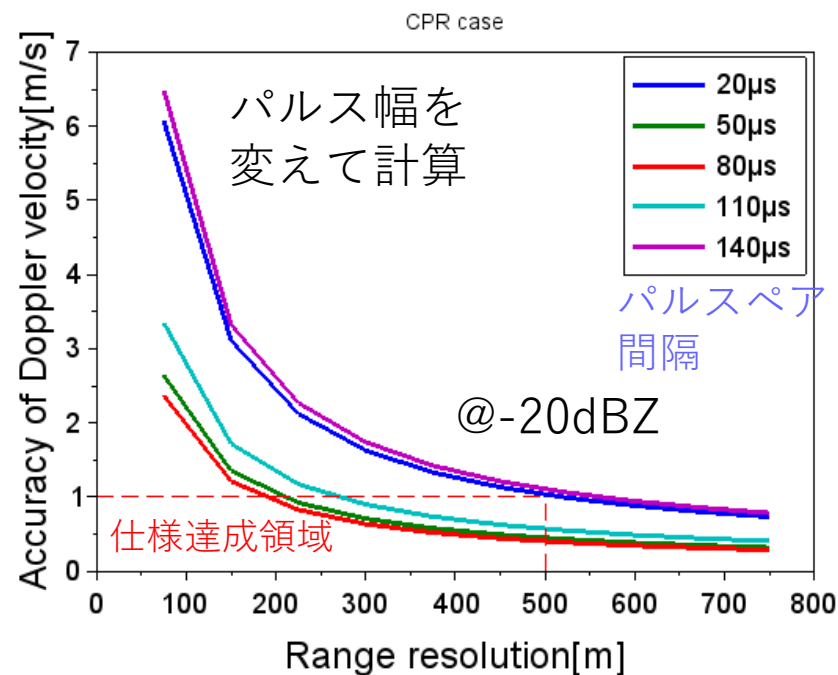


- レンジ分解能推定、ファブリペロー干渉計によるドップラー速度精度推定とレーダ方程式によるSNR推定を組み合わせ。
- 高度分解能1km, 水平分解能50kmにおいてドップラー速度精度1m/sの要求精度の実現性を確認。水平風が主な対象。

※ eoPortal Aeolus

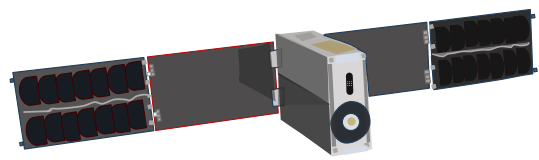
計算例：ドップラー速度精度とレンジ分解能の関係 (Earth-CARE/CPRの例)

項目	表記	数値
ドップラー拡がり (衛星進行速度)	σ_{comb}^2	$14.25 (\text{ms}^{-1})^2$
同上(降雨速度)	σ_{vfob}^2	$0.25 (\text{ms}^{-1})^2$
同上(大気擾乱)	σ_{wz}^2	$1 (\text{ms}^{-1})^2$
衛星高度	H	393km
周波数	F	94.05GHz
パルス幅	τ	$3.33 \mu\text{s}$
送信出力	Pt	1500W
有効アンテナ径	D	2.5m
バンド幅	B	7MHz
全雑音	N_f	9dB



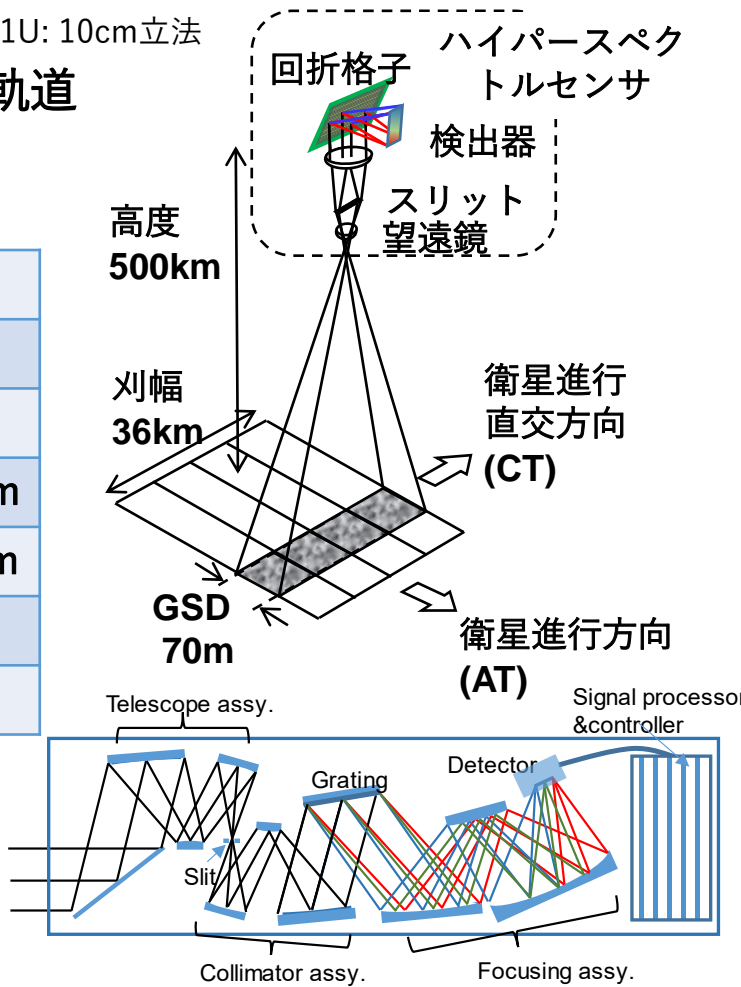
※木村, 2009

- レンジ分解能推定、パルスペア法によるドップラー速度精度推定とレーダ方程式によるSNR推定を組み合わせ
- 高度分解能500m, ドップラー速度精度1m/s(@-20dBZ)の要求精度の実現性を確認。鉛直風が主な対象
- パルスペア間隔は70~80 μs が最適



6U キューブサット ※1U: 10cm立法
高度500km 太陽同期軌道
質量：12~15kg

センサ方式	ハイパースペクトルセンサ (回折格子型)
走査方式	プッシュブルーム方式
波長域	400 - 1700 nm
波長分解能	通常観測モード: 10 nm, SIF観測モード: 2 nm
空間分解能(GSD)	通常観測モード: 70 m, SIF観測モード: 175 m
刈幅	36 km
SNR@1600nm	通常観測モード: 130, SIF観測モード: 120



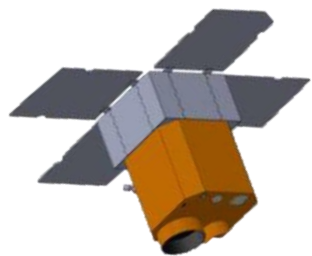
- 従来型地球観測センサとの連続性を意識し、国際宇宙ステーション搭載型ハイパースペクトルセンサ(HISUI)と方式は合わせた (※GSDはHISUIの2倍以上)
- 最新の可視エンハンス型赤外検出器技術を用いて可視と短波長赤外光学系を一体化するなど大幅な小型化を実現の見込み (※HISUIはセンサのみで190kg)

民生技術の積極活用



可視エンハンス型
 赤外検出器
 (InGaAs)

経産省SBIR ハイパースペクトルセンサ開発



衛星質量：150kg class-bus
高度 500km，太陽同期軌道
打上げ: 2027年（予定）

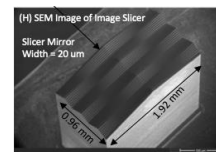
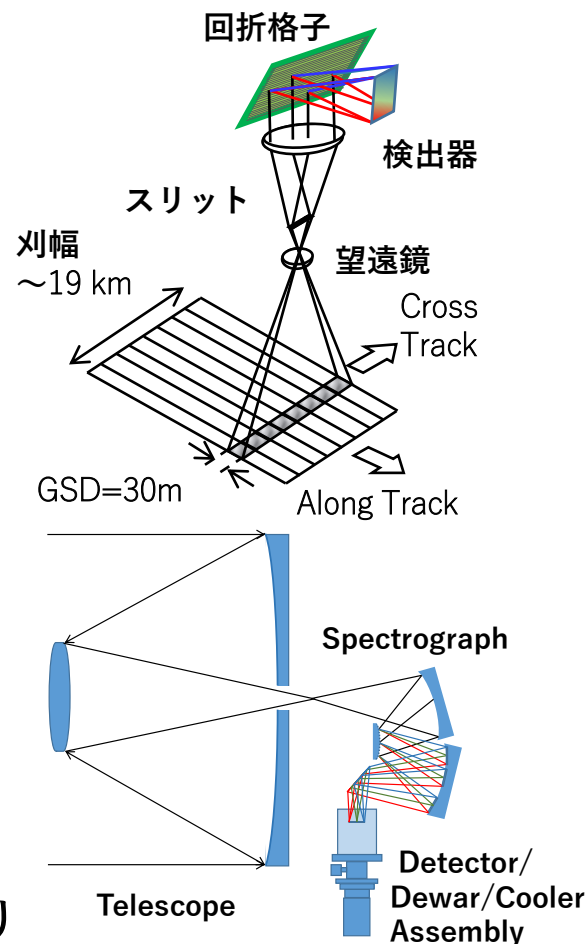
<ハイパースペクトルセンサ主要諸元>

方式	回折格子型ハイパースペクトルセンサ
走査方法	プッシュブルーム方式
波長域	400 - 2500 nm
波長サンプリング	10 nm
空間分解能 (GSD)	30m
刈幅 (Swath)	19km
SNR	~250
寸法、質量 (センサのみ)	200 x 200 x 300mm (12U), ~20kg

小型化技術 (HISUI同等性能を質量・コスト 1/10で実現)

- 可視～短波長赤外域までカバーするeSWIR検出器により1つの分光器による簡素な光学系を実現
- 光学微細加工技術により分光器の一体加工を推進
- 超小型赤外検出器・デュワー・冷凍機統合アッセンブリ (IDCA) を採用

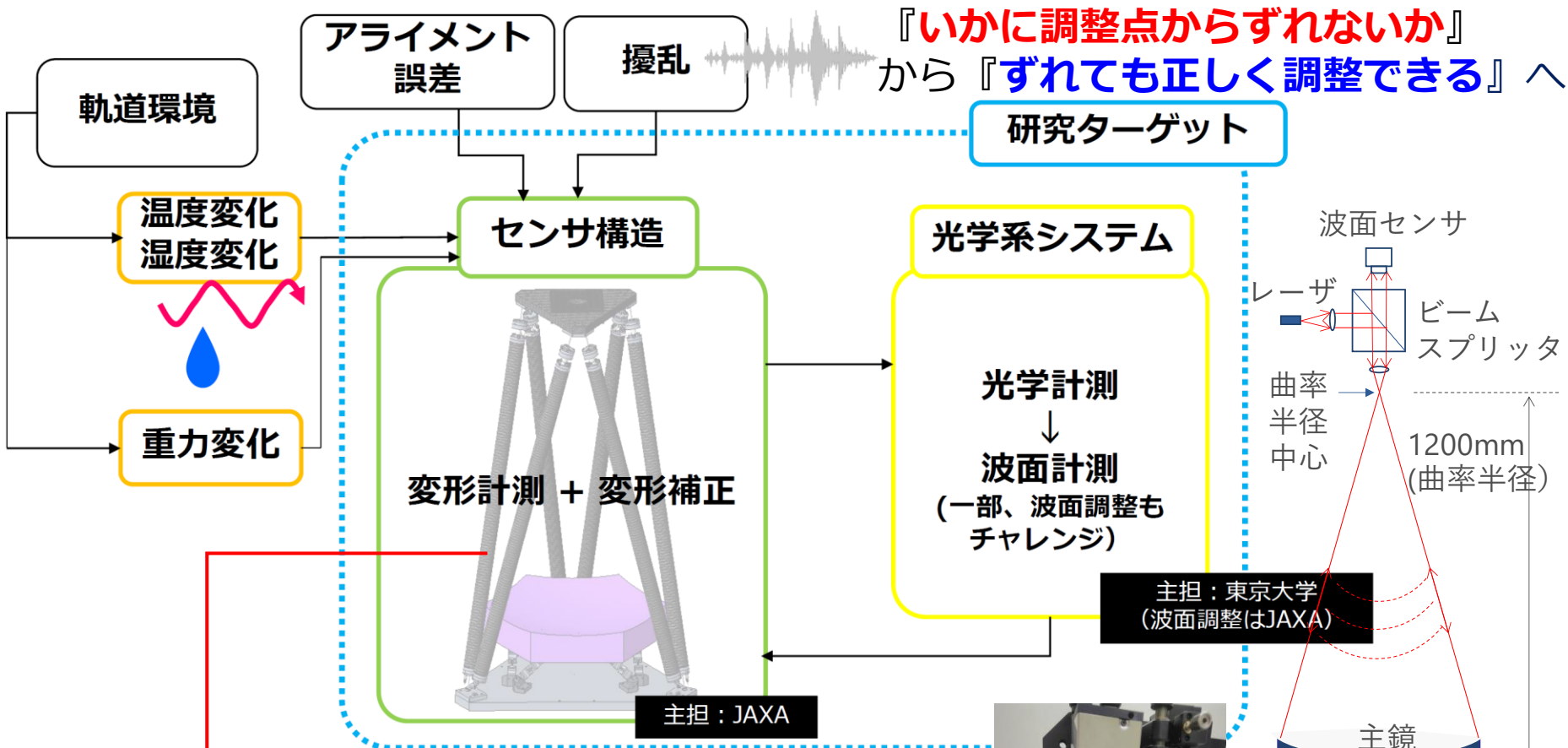
民生技術の積極活用



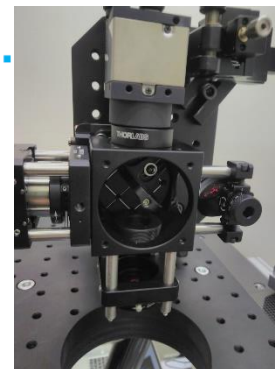
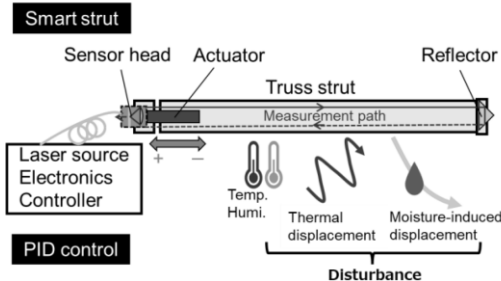
一体加工分光器の例



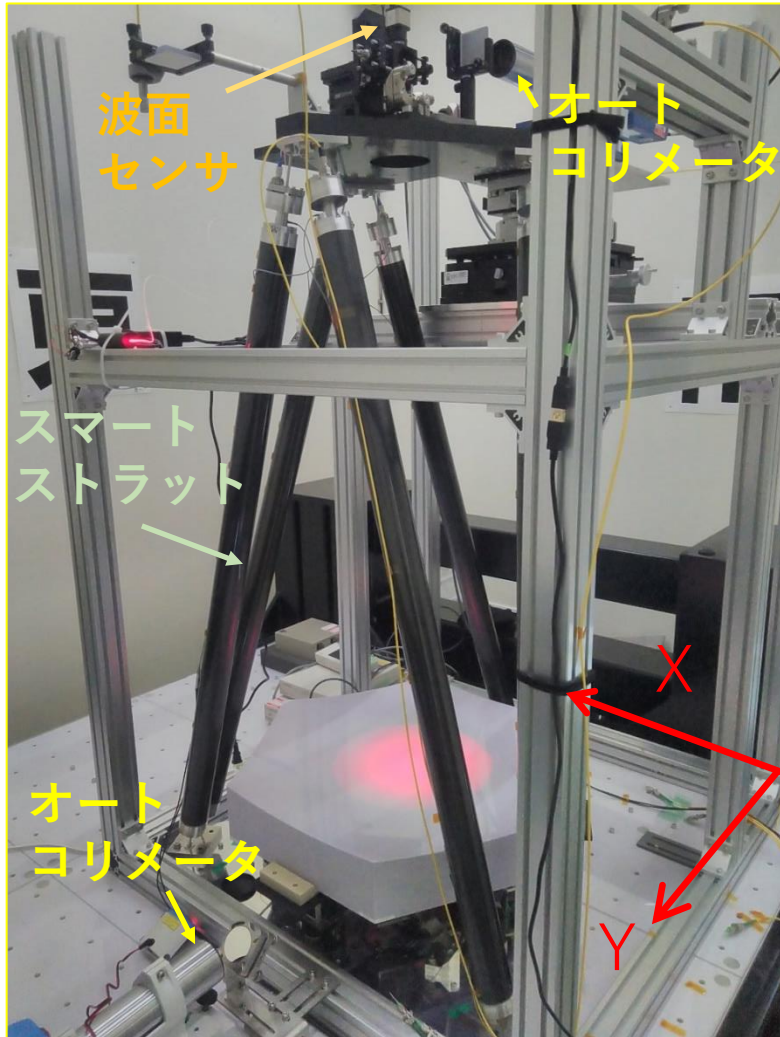
IDCA



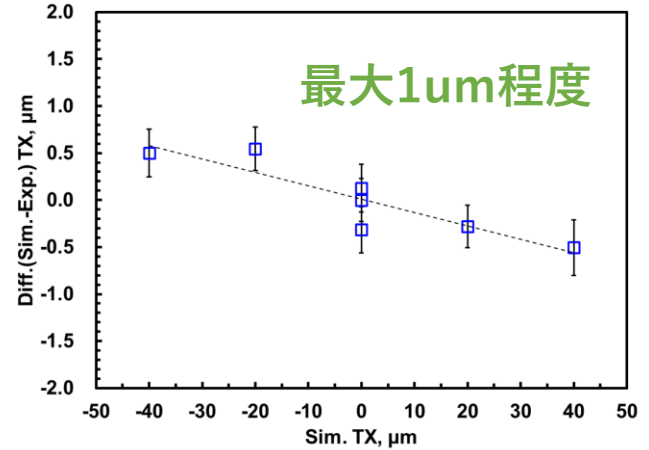
スマートストラット (変位測定 + 変位補正内蔵)
CFRPパイプ + アルミフィッティング



構造制御精度、光学測定精度 とも1 μm 級を実現

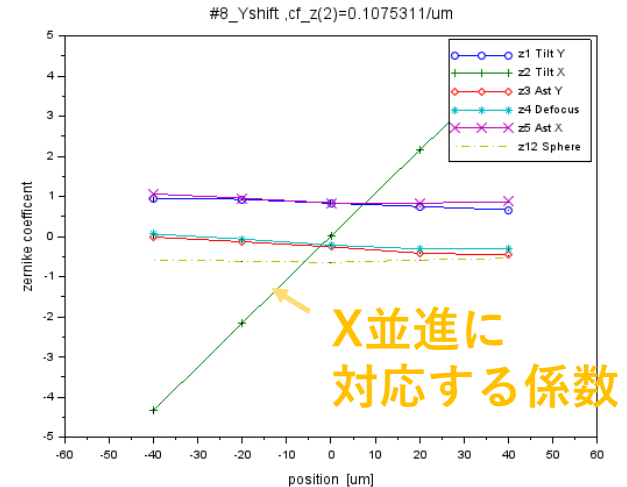


構造制御



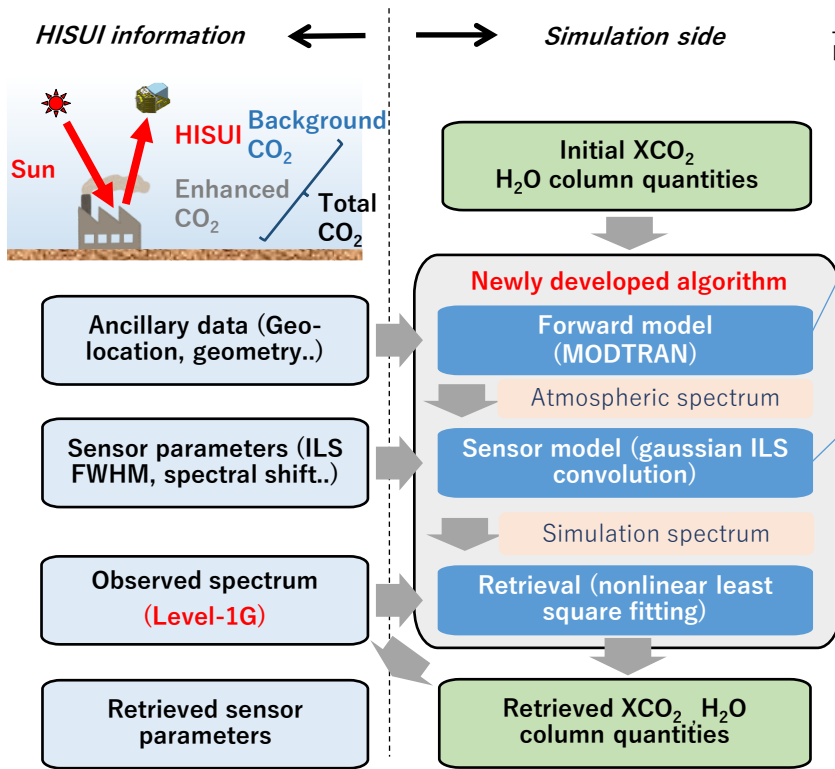
制御指示値(Sim)と実測(Exp.)の差

光学計測



波面センサ (Zernike係数) 測定結果

XCO₂ (Total-column dry air mole fractions)リトリバル手法



高速化のため大気スペクトルピックアップテーブル生成し補間

$$I_{atm}(\lambda) = \frac{I_{atm}^{n+1}(\lambda) - I_{atm}^n(\lambda)}{\rho_{n+1} - \rho_n} \cdot (\rho - \rho_n) + I_{atm}^n(\lambda)$$

radiance XCO₂

赤字: フィッティングパラメータ

輝度補正項を掛け装置関数(ILS)畳み込み

$$I_{syn}(\lambda) = (a + d \cdot \lambda) \cdot \{ \text{ILS} \otimes I_{atm}(\lambda) \} + b$$

Radiance correction offset

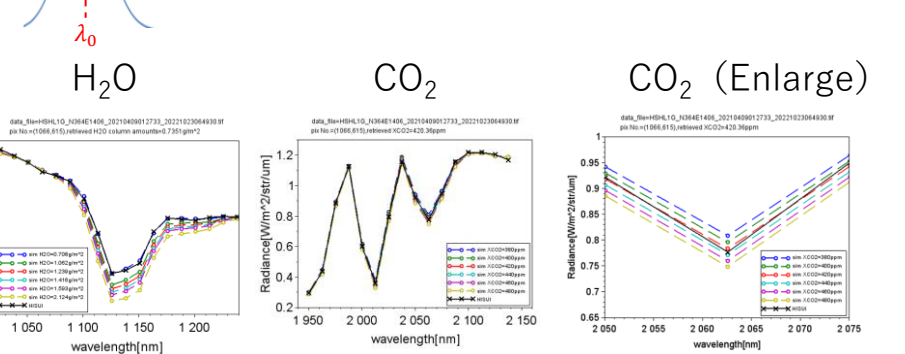
• 輝度補正

装置関数(ILS): Gaussianを仮定

$$\text{ILS} = \frac{\exp\{(\lambda - \lambda_0)^2 / (2 \cdot w^2)\}}{\int \exp\{(\lambda - \lambda_0)^2 / (2 \cdot w^2)\} d\lambda}$$

Center Wavelength Std dev. ⇒ FWHM

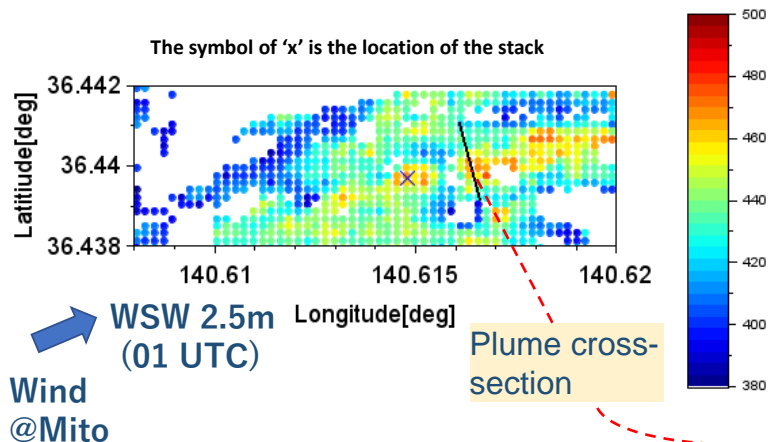
• ILS補正
• 波長補正



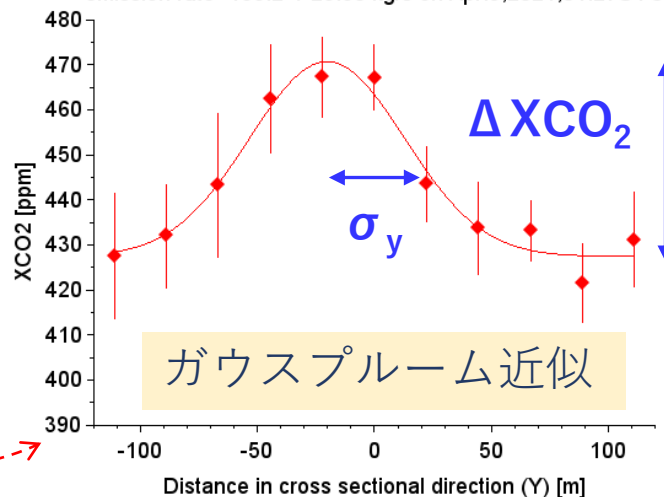
➡ センサ特性を考慮したシミュレーションスペクトルをL1Gスペクトルにフィッティングし、H₂O, CO₂密度を算出

発電所上空のCO₂濃度解析を実施、排出量を算出

XCO₂ around Stack on Apr.9,2021,01:27UTC
XCO₂ =470.3+/-12.87ppm at Stack N=36.44,E=140.6



XCO₂ in cross-sectional direction at 177.9 m
 emission rate=133.2+/-25.38 kg/s on Apr.9,2021,01:27UTC



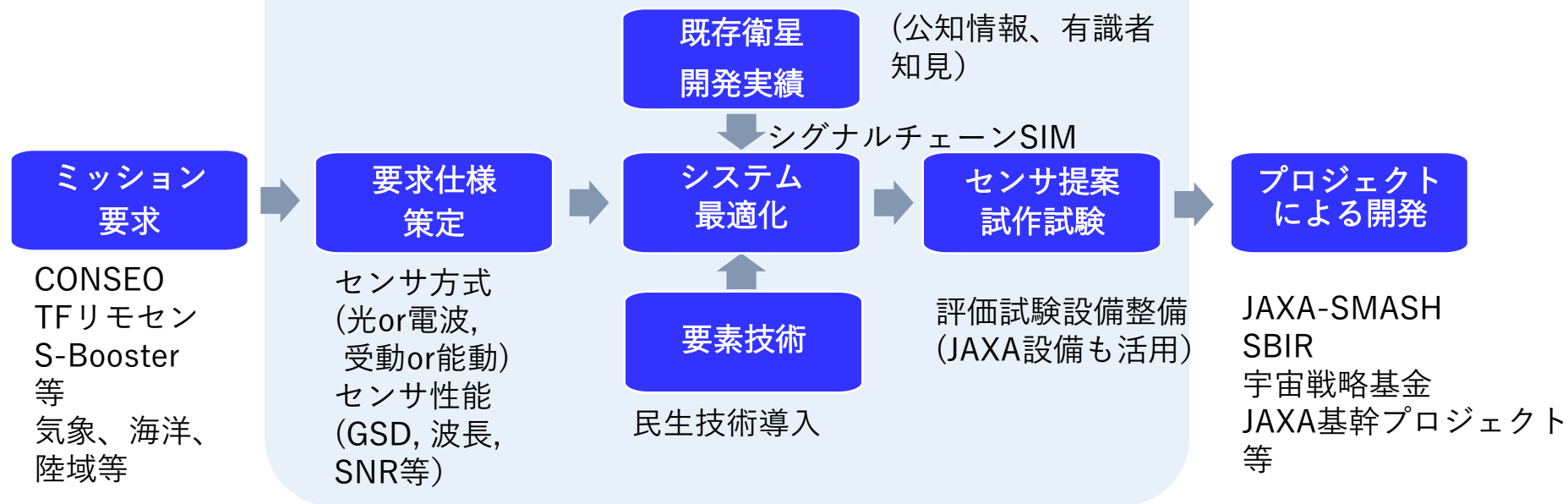
Physical quantities	Symbol	Unit	Apr. 9, 2021	Aug. 10, 2021
Enhancement	ΔXCO_2	ppm	43.3+/-3.3	57.5+/-9.4
Plume cross sectional spread	σ_y	m	33.1+/-3.5	25.9+/-5.5
Emission rate (by HISUI)	F_H	kg s ⁻¹	133.2+/-25.4	138.5+/-56.4
Emission rate (bottom up)	F_b	kg s ⁻¹	188.9*	

発電量に基づく排出率と30%の誤差で一致

1. 地球観測センサの体系化
 - 体系化の箱として**シグナルチェーン**を整備、光学/電波センサの同異に着目し**センサ性能を統一的に解釈**した。本解釈に基づき設計ベースで**既存センサ性能を検証**した
2. 小型衛星搭載センサ
 - **システム最適化**と**新規技術導入**の組み合わせを**小型化ビジョン**として一般化、小型衛星搭載**ハイパースペクトルセンサに適用・具体化**、開発フェーズへと導いた
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スマートストラットと波面計測系の要素試作評価を実施、所望の性能を得て、**構造モデル～光学モデル連成**を実現の予定
4. シグナルチェーンシミュレータ
 - **センサモデルと補正処理系の一体化**を進め、具体的にGOSAT/HISUIに適用しXCO₂を導出し有意な結果を得た

センササイエンスに基づいた 地球観測センサのインキュベーション

本講座の役割



フロンティア宇宙工学・地球観測センサ科学研究拠点 第4回ワークショップ 「近未来の地球観測センサ」

- 開催日時：2024年12/6(金) 13:30-16:40
- 場所：東京大学弥生講堂 一条ホール

	時間割	題目	発表者（敬称略）
1	13:30-13:35	開会挨拶*	木村俊義（JAXA）
2	13:35-14:05	ESTOのプログラム、将来計画の紹介*	Sachidananda Babu (ESTO)
3	14:05-14:35	JAXAの地球観測*	今井正（JAXA）
4	14:35-14:50	連携講座活動報告	川島高弘（東京大学）
	14:50-15:00	休憩	
5	15:00-15:15	マイクロ波センサの開発動向と方向性	高橋暢宏（名古屋大学）
6	15:15-15:30	衛星搭載ライダーの動向と技術課題	石井昌憲（東京都立大学）
7	15:30-15:45	アークエッジスペースの衛星事業紹介	福代孝良（株）アークエッジ・スペース
8	15:45-15:50	地球観測の現状と将来展望*	中須賀真一（東京大学）
9	15:50-16:10	質疑応答	
10	16:10-16:25	サステナブルファイナンスにおける衛星データ利活用の可能性*	橋詰卓実（三菱UFJ銀行）
11	16:25-16:40	閉会挨拶	岩崎晃（東京大学）

* 印はオンライン講演