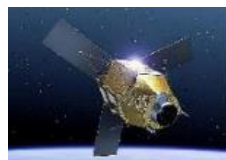


# 地球観測センサの 小型化ビジョン

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

## 地球観測センサの設計手法・要素技術の体系化

1. 国内外地球観測センサの調査
  - 性能進化とその技術根拠
  - **小型化動向とその技術根拠**

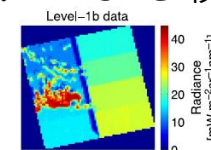
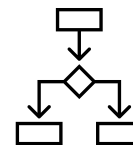


Pleiades

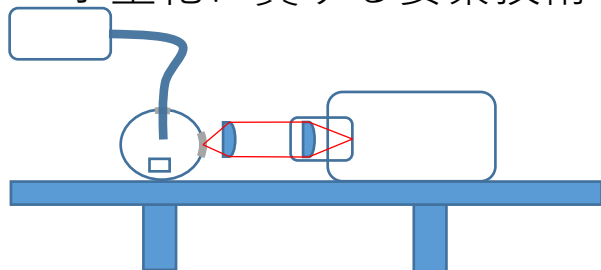


Planet/Dove-R

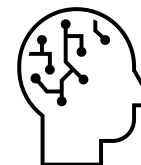
2. **対象センサの再システム設計**
  - **前提、制約条件の確認**
  - **センサモデル確立、実センサ設計根拠の確認**
  - 軌道上実データによる検証



3. 将来の要素技術調査・試験評価
  - 性能向上に資する要素技術
  - 小型化に資する要素技術



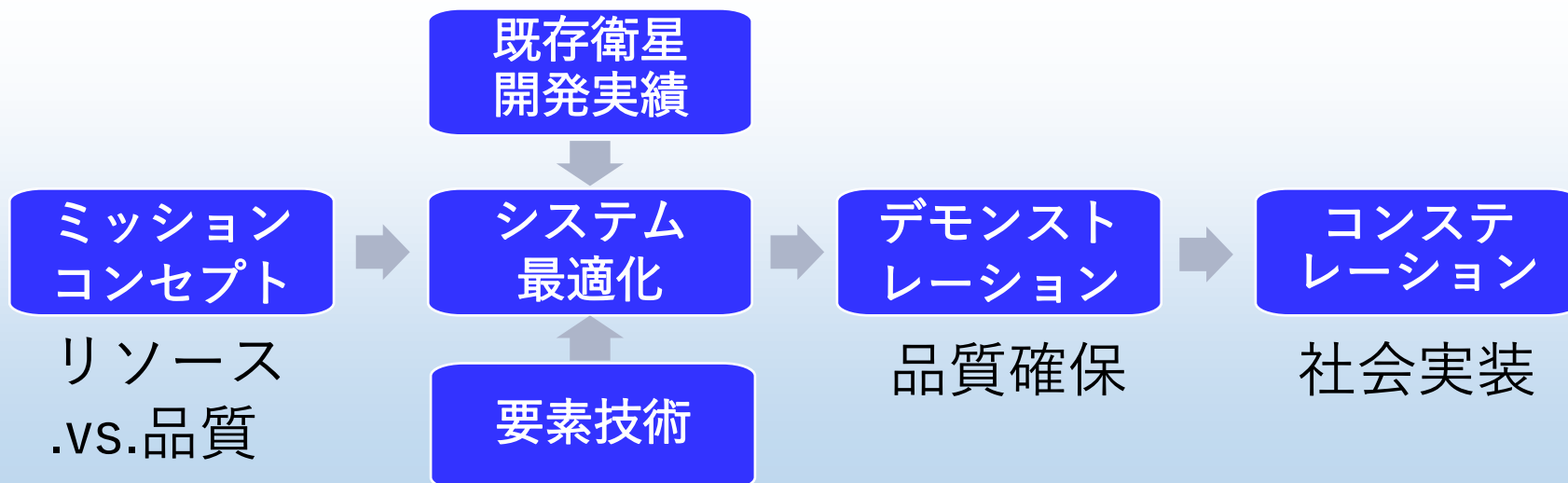
4. 設計手法のナレッジ化
  - 学会発表・論文等
  - ホームページより情報を発信



# 地球観測における小型衛星の目的

リソース制約下で相応の品質のデータをコンステレーション観測により高時間分解能で取得すること

- ミッションコンセプト確立（リソース.v.s.品質）
- 既存衛星の開発実績を活用したシステム最適化、必要に応じた新規要素技術の開発・導入
- デモンストレーションフライトにおける品質確保、コンステレーション観測による社会実装



## 構成する各要素を観測信号の流れに沿いモデル化

本講座で地球観測センサの体系化の一環として整備

### センサリソース・性能

質量、寸法、  
消費電力

空間分解能  
刈幅

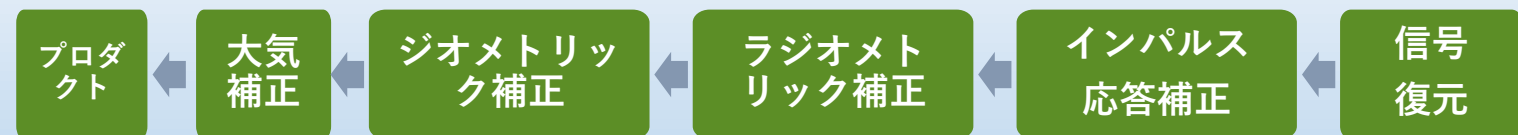
波長域  
周波数帯域

SNR、NE $\Delta$ T

### センサハードウェア



### 補正処理部



⇒ センサ小型化検討に応用

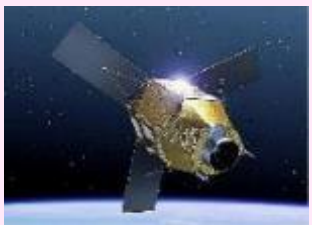
# 小型衛星による地球観測の現状

センサ種類	Selva and Krejci (2012)	Freeman (2019)	プロジェクト名 ( )は打上げ年
大気化学センサ	Problematic	Feasible	PICASSO (2020)
赤外サウンダ	Feasible	Feasible	CIRAS (開発中)
雲・降雨レーダ	Infeasible	Feasible	RainCube (2018)
地球熱輻射計	Feasible	Feasible	RAVAN (2016), CSIM-FD (2018), PREFIRE (開発中)
高分解能光学センサ	Infeasible	Feasible	Planet Dove (2013~)
合成開口レーダ	Infeasible	Feasible	Capella-2 (2020), ICEYE (2018)
マルチ・ハイパー スペクトルセンサ	Problematic	Feasible	AstroDigital Landmapper (2017)
マイクロ波 放射計・サウンダ	Problematic	Feasible	TEMPEST-D (2018), TROPICS (開発中)
ライダー	Infeasible	Problematic	TOMCAT (構想段階)
海色スペクトルメータ	Feasible	Feasible	SeaHawk (2018)
レーダ高度計	Infeasible	Feasible	SNoOPI (開発中)
レーダ散乱計	Infeasible	Feasible	CYGNSS (2016)

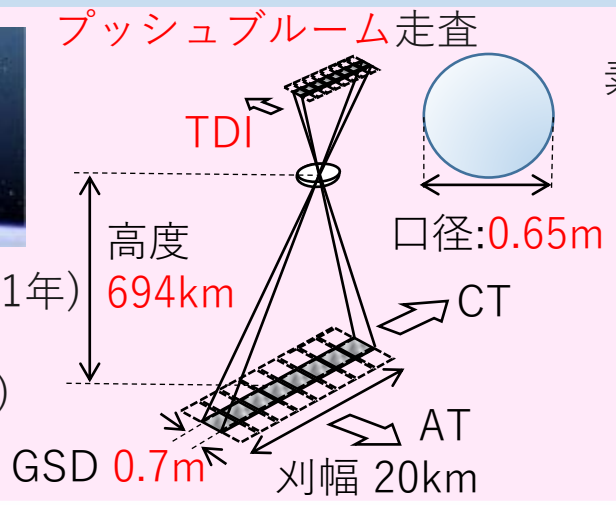
※上記は1~100kg級衛星。

⇒ 太枠センサを対象に設計を検証。

# 小型化例1: 高分解能センサ(Planet Dove-R)



**Pleiades** (2011年)  
質量: 940kg  
(センサ: 228kg)

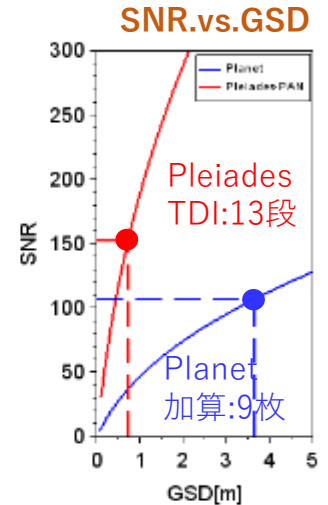
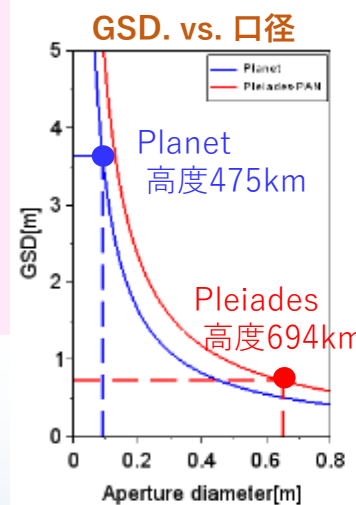


カスタムTDI検出器  
素子  $13\mu\text{m}$  (PAN)

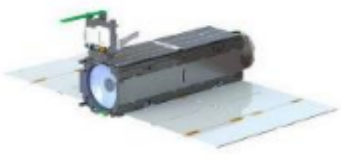


ダウンリンク  
レート: 465Mbps

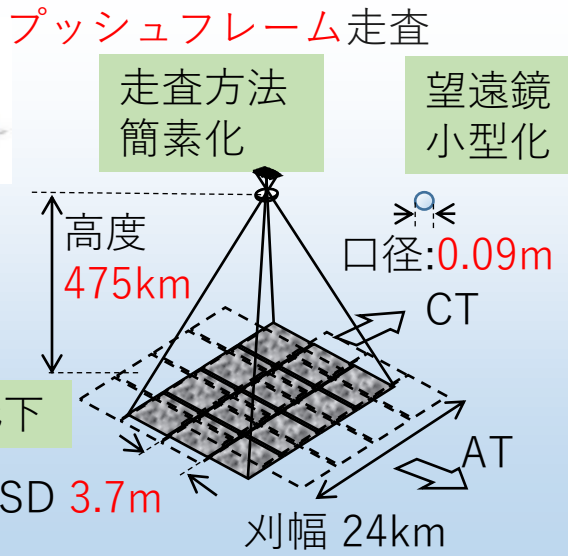
## システムシミュレーション結果



SNR  
~150



**Planet Dove-R**  
(2018年)  
質量: ~5kg



口径小型化に伴う  
空間分解能低下

GSD増大+デジタル  
加算でSNR維持

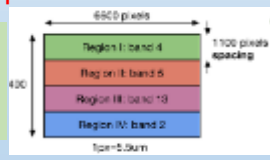
ほぼ  
維持

SNR  
~110

民生フレーム検出器  
素子  $5.5\mu\text{m}$

ダウンリンク  
レート: 1.7Gbps

細ピッチ化

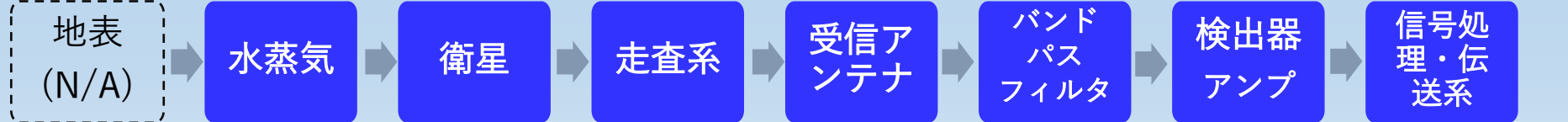


伝送  
高速化

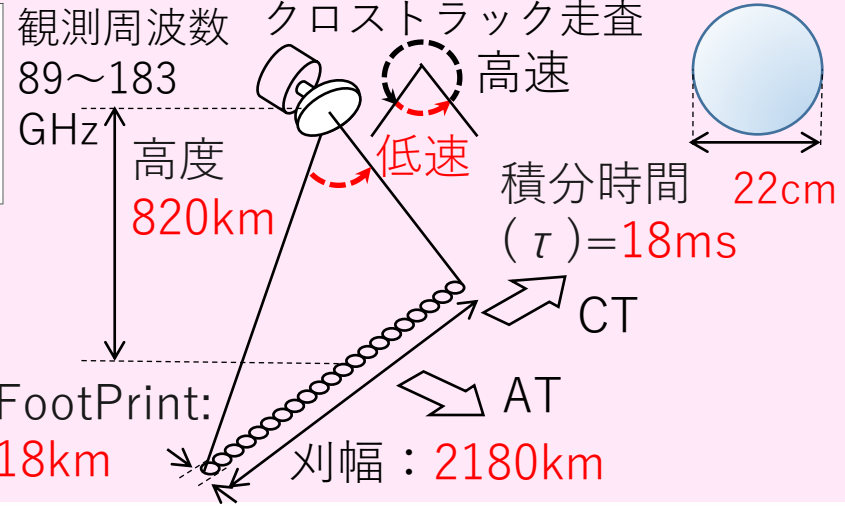
地上デ  
ジタル  
加算

低下

# 小型化例2:マイクロ波サウンダ(TEMPEST-D)

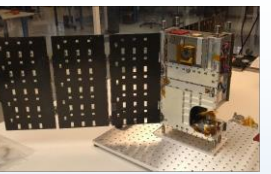
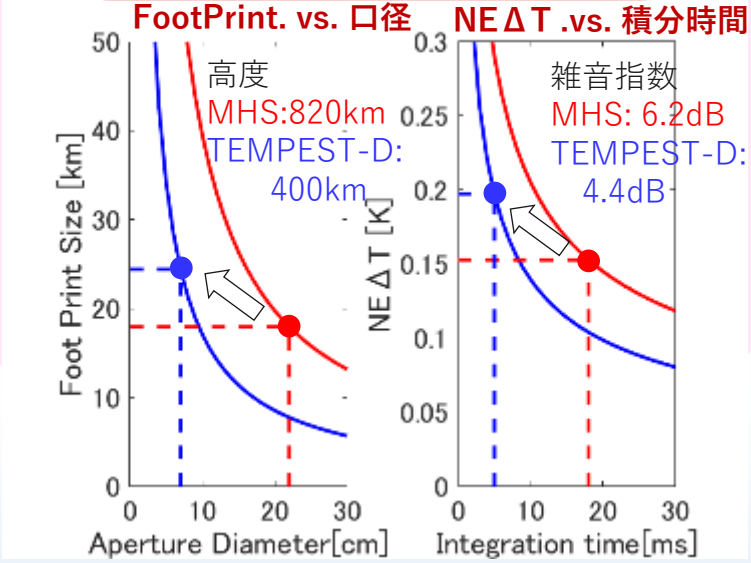


**MHS (2006)**  
センサ質量  
63kg

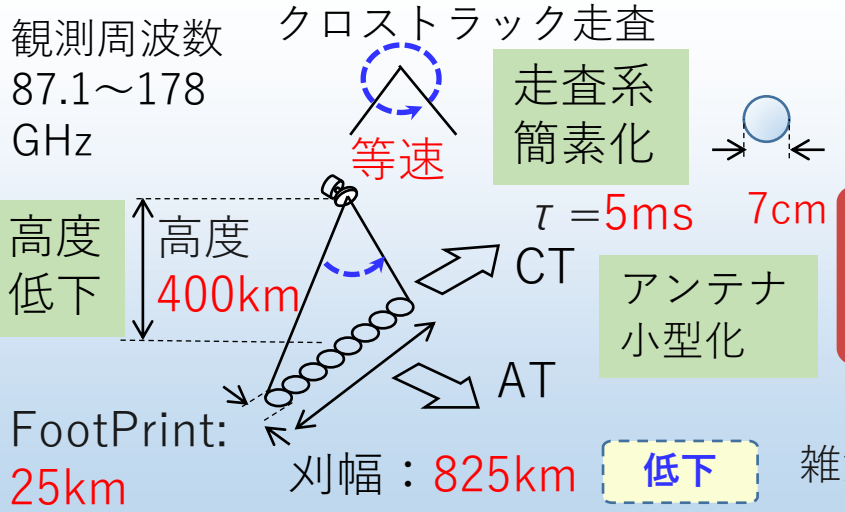


雑音指数: 6.2dB@89GHz  
NE $\Delta$ T: 0.15K

システムシミュレーション結果



**TEMPEST-D (2018)**  
質量: 14kg



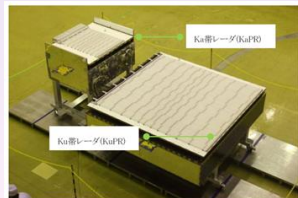
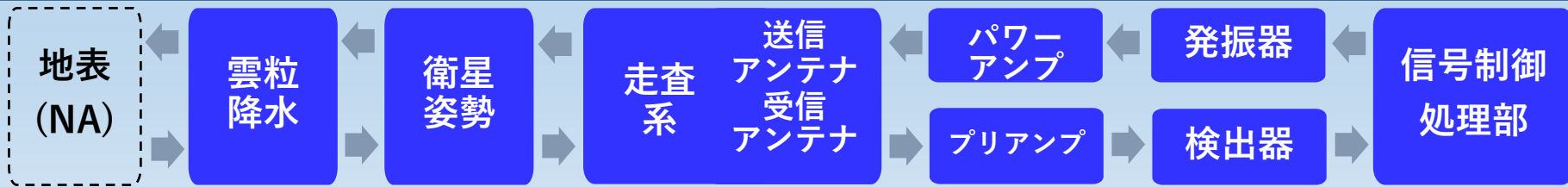
アンテナ小型化を高度低下で補い空間分解能をほぼ維持  
積分時間短縮を低雑音化で補いNE $\Delta$ Tをほぼ維持

ほぼ維持

低下

低雑音化 HEMT MMIC InP (冷却低雑音増幅器) 雑音指数 4.4dB @87.1GHz  
NE $\Delta$ T: 0.2K

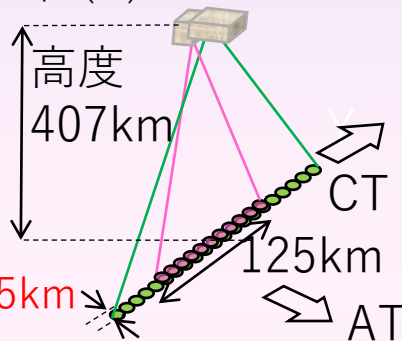
# 小型化例3: 降雨レーダ(RainCube)



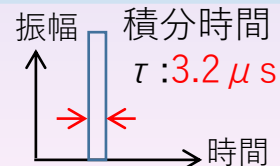
**DPR (2014)**  
 センサ質量  
 403kg(Ku)  
 302kg(Ka)

**Ku (13.6GHz)**  
 (強い降雨)  
**Ka (35.5GHz)**  
 (弱い降雨)

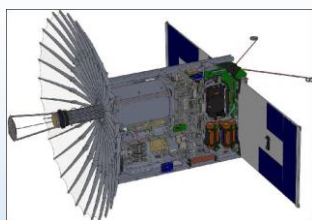
フェーズドアレイ型  
 径(D): 1.4m × 1.1m



送信電力( $P_t$ )  
 : 140W



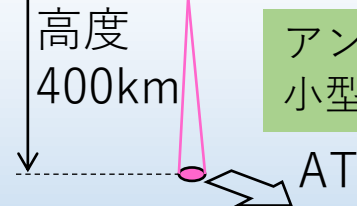
最小Ze: 15dB  
 鉛直分解能( $\Delta Z$ )  
 : ~500m



**RainCube (2018)**  
 質量: 5.5kg

**Ka (35.8GHz)**  
 (弱い降雨)

展開メッシュ型  
 D: 0.5m



観測対象  
 限定

アンテナ  
 小型化

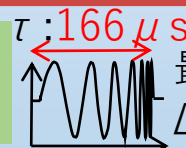
$P_t$ : 10W

ほぼ維持

刈幅: 無

低送信  
 電力化

パルス  
 圧縮

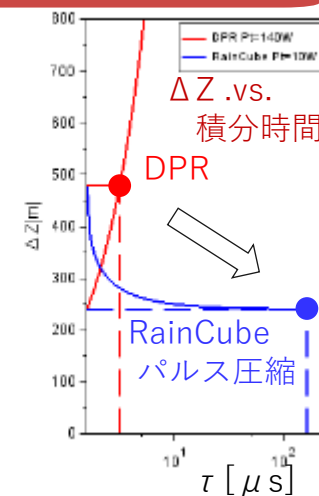
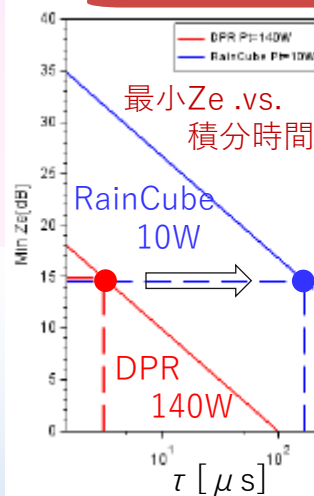


最小Ze: 15dB  
 $\Delta Z$ : ~250m

維持

維持

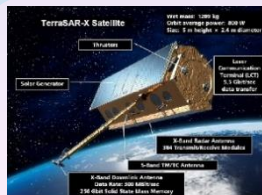
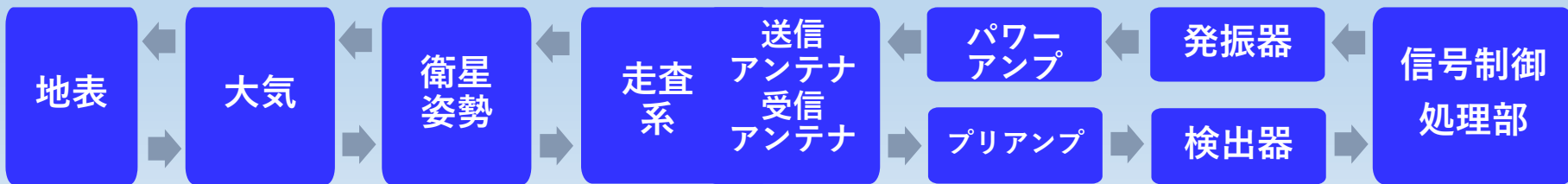
## システムシミュレーション結果



パルス圧縮採用により低送信電力においてもZeと $\Delta Z$ を維持。



# 小型化例4: 合成開口レーダ(Capella-2)



**TerraSAR-X (2007)**  
質量: 1230kg  
(センサ: 394kg)

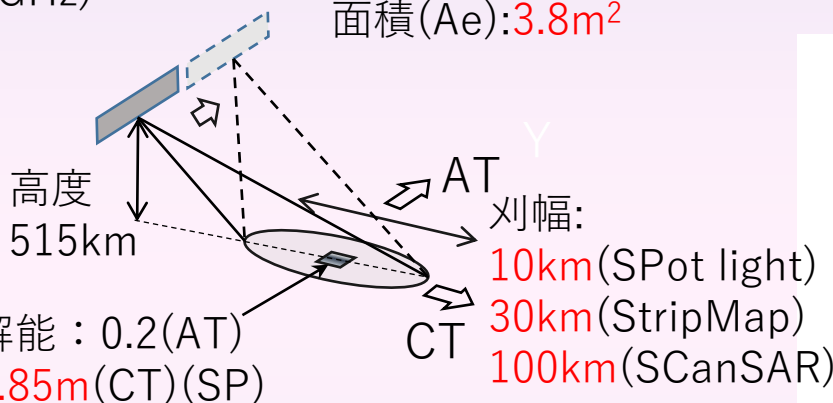
X-band  
(9.65GHz)

フェーズドアレイ型

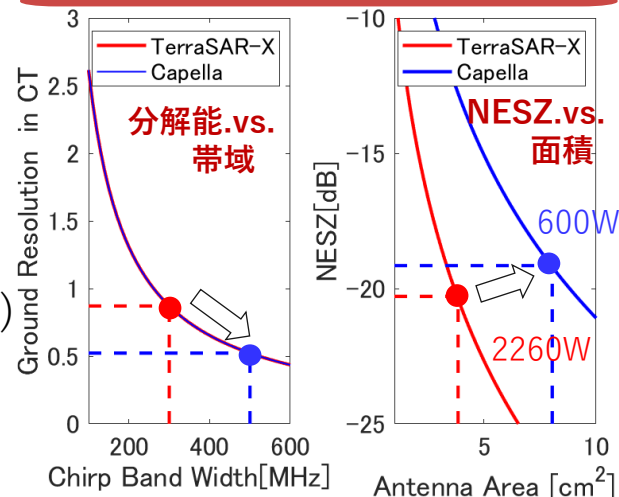
径(D): 4.8 × 0.8m  
面積(Ae): 3.8m<sup>2</sup>

送信電力(P<sub>t</sub>) : 2260W

チャープ帯域: 300MHz  
NESZ: -20dB



## システムシミュレーション結果



帯域拡大でやや高分解能化。低送信電力においてもアンテナ大型化でNESZ維持。



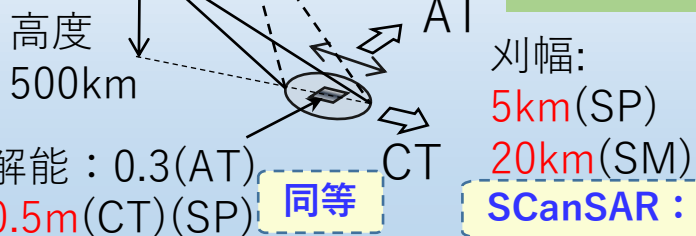
**Capella-2 (2020)**  
質量  
衛星: 112kg

X-band  
(9.65GHz)

展開メッシュ型

D: 3.2m  
Ae: 8m<sup>2</sup>

アンテナ  
軽量・  
大面積化



P<sub>t</sub>: 600W

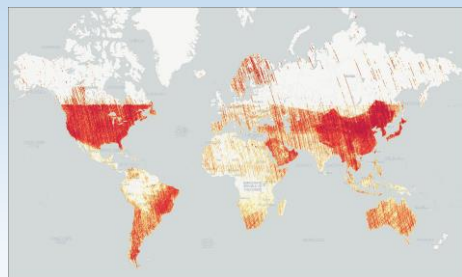
チャープ帯域: 500MHz  
NESZ: -19dB

低送信  
電力化

帯域  
拡大

維持

## Planet Dove-R

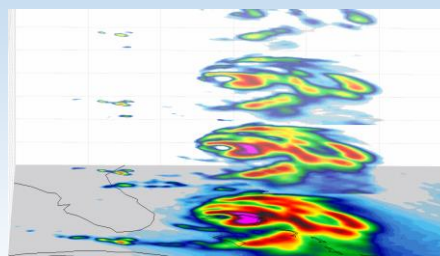


2015年6月の観測頻度

100機以上のコンステレーションで毎日の観測実現済。  
月、砂漠等による校正自動化。  
ニッチな分解能4m級グローバル観測網とのポジション確立。

中大型衛星と共存

## TEMPEST-D

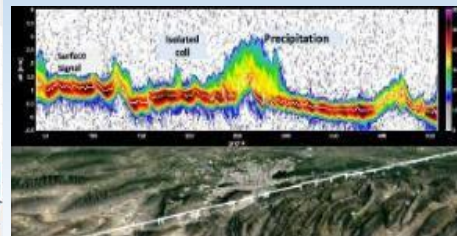


2019年9月3日 ハリケーン  
ドリアン 水蒸気鉛直分布

デモンストレーションとして水蒸気分布観測成功。  
MHSとの相互校正により精度検証。  
基幹衛星との異種コンステレーションが想定される。

中大型衛星の補完

## RainCube

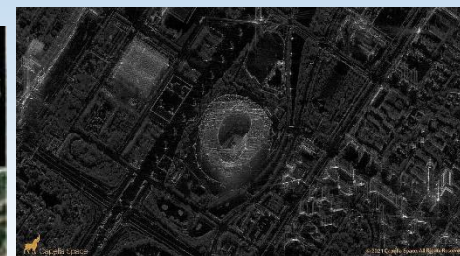


2018年8月27日 メキシコ  
上空におけるレーダ散乱率

デモンストレーションとして降水からの高い反射率を観測。  
降水強度の精度検証は未実施。  
基幹衛星への技術応用が期待される。

先行技術の実証

## Capella-2



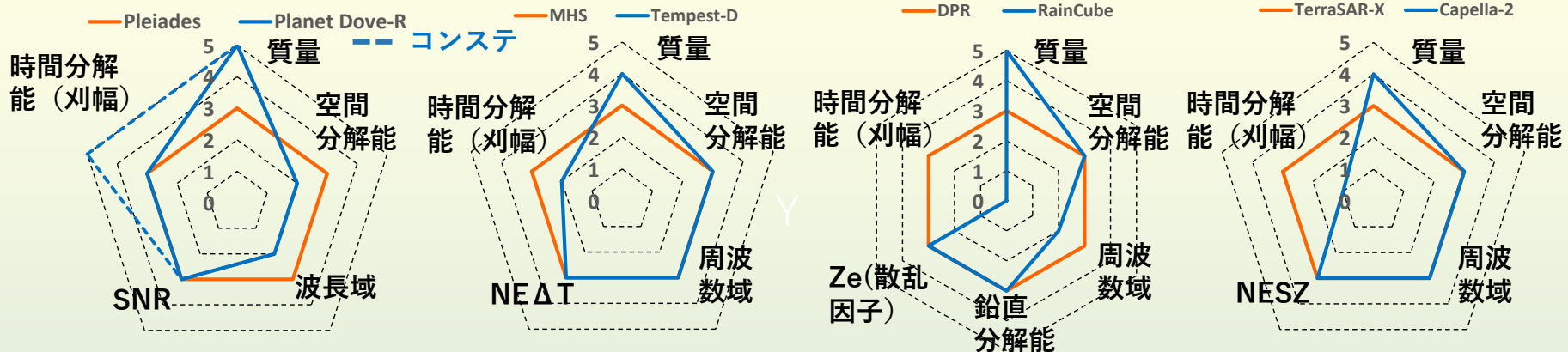
2021年  
北京国家スタジアム

7機のコンステレーション観測実現済。  
高分解能画像としての品質は確保済。  
即応的かつピンポイントの高分解能観測とのポジション確立を目指す。

中大型衛星と共存

# センサ小型化 分析結果サマリ

	Planet Dove-R	TEMPEST-D	RainCube	Capella-2
ミッションコンセプト	ニッチの空間分解能 (3.7m)、毎日観測	NE $\Delta$ T、空間分解能は中大型衛星と同等	最小Ze、鉛直空間分解は中大型衛星と同等	ピンポイントの高空間分解能観測
システム最適化	プッシュフレームと地上デジタル加算によりセンサ側の負荷を軽減。	アンテナ縮小による空間分解能低下を高度低下で補う。走査系素化。	パルス圧縮採用により低送信出力においてZeと $\Delta Z$ を維持。	展開アンテナにより低送信電力においてNESZ維持。
要素技術	ダウンリンクレート高速化	HEMT採用によるプリアンプ低雑音化	展開メッシュアンテナ、パルス圧縮技術の応用	展開メッシュアンテナ、チャープ帯域拡大
センサ性能	重視：時間分解能 (多数機観測前提) 維持：SNR、刈幅 許容：PAN無 空間分解能低下	重視：N/A 維持：空間分解能、NE $\Delta$ T 許容：刈幅低下	重視：N/A 維持：空間・鉛直分解能、最小散乱因子(Ze) 許容：周波数域(Ka帯のみ)、刈幅(直下のみ)	重視：空間分解能 維持：NESZ 許容：刈幅(Scan SAR モード 無)



スコアの意味 0: 無、1および5: 1桁以上の違い、2および4: 1桁以内、3: +/-50%以内

システムシミュレーションに基づき小型衛星搭載地球観測センサの実現性を検証した。

## ➤ ミッションコンセプトの確立

- 中大型衛星との役割分担を考慮（ニッチによる共存、異種コンステレーションによる補完、先行技術の実証等）
- 低下を許容するセンサ性能の明確化

## ➤ システム最適化

- 中大型センサの手法をベースとした設計
- リソース制約のもと、センサ設計値をパラメトリックに変えて、性能実現範囲を抽出

## ➤ 新規要素技術の導入

- 従来技術で実現不可の場合、民生含む新規要素技術導入

⇒ 従来手法同様の地道な改善の延長で小型化を実現

## 基幹衛星による地球観測と共存し補完する センサ小型化の推進

### ▶ 小型衛星の役割明確化

- 将来ミッション要求を衛星クラスごとに規定
- 基幹衛星/小型衛星の異種コンステレーション、複数小型センサの中型衛星への相乗り等、多彩なバリエーション含む戦略策定

### ▶ 観測センサの共通設計手法整備

- 従来設計手法の整理による既存衛星の設計資産活用
  - 例：電波/光学センサの性能モデルの一般化
- DX活用によるアジャイルな開発の実現で設計ループを短縮
  - 例：STOP(構造・熱・光学解析) 環境の整備

### ▶ 共通技術の開発

- 共通要素技術開発（検出器、集積回路、展開アンテナ等）  
※最新技術活用を目的とした民生部品の搭載化開発含む。
- センサI/F標準化のため小型衛星バスの共通化を推進

⇒ JAXA/大学/民間連携によるセンサ開発共通基盤の確立

ご清聴ありがとうございました。