

国立研究開発法人連携講座 第4回ワークショップ 近未来の地球観測センサ

マイクロ波センサの開発動向と方向性

高橋 暢宏

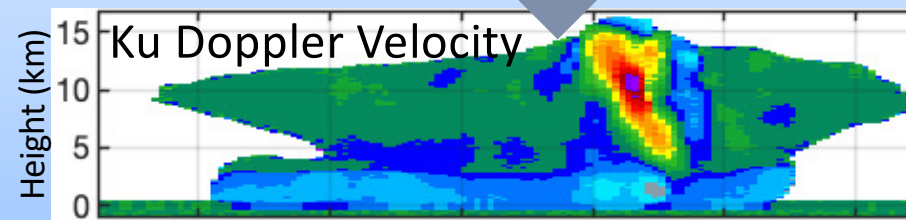
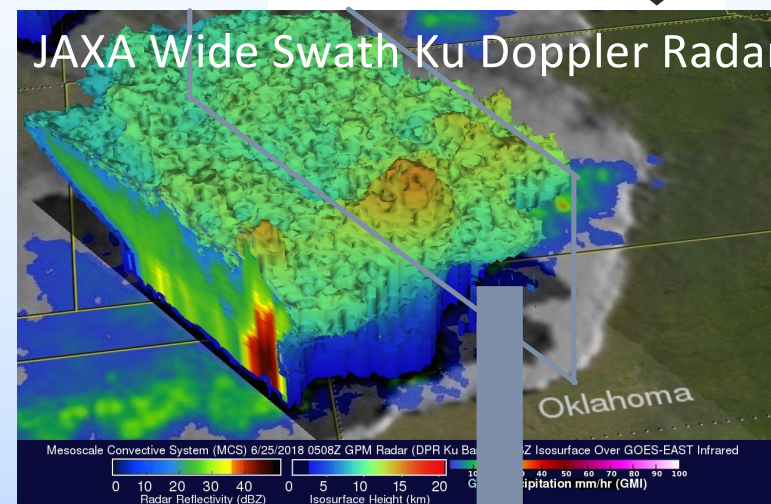
東海国立大学機構名古屋大学

宇宙地球環境研究所附属飛翔体観測推進センター

衛星搭載降水レーダの開発・研究

- ▶ 全球降水観測計画 (Global precipitation Measurement, GPM 2014年打上げ) プロジェクトサイエンティスト
 - ▶ GPM衛星搭載 Ka帯降水レーダの開発にも従事
- ▶ 降水観測ミッション (Precipitation Measuring Mission, PMM, 2029年打上げ予定) プロジェクトサイエンティスト

PMMミッション



S. Braun IPWG presentation

自己紹介（2）

衛星搭載雲レーダ開発・検証

EarthCARE 衛星 2024年5月29日打上げ

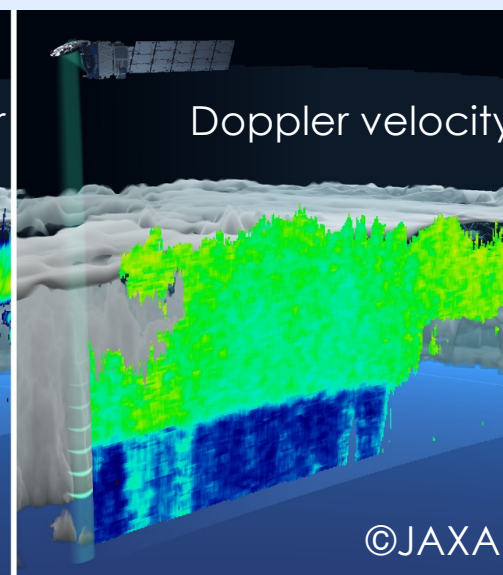
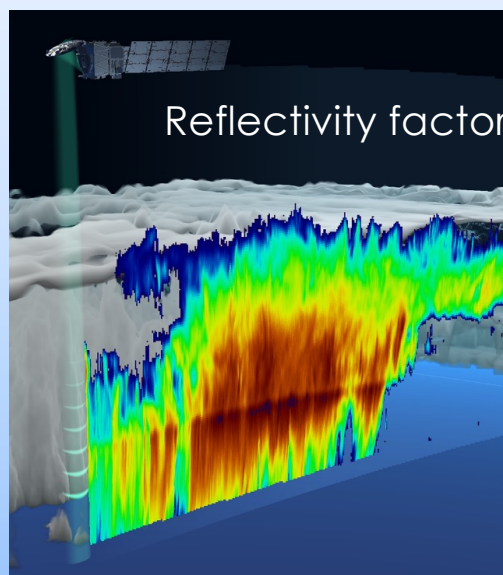
- ▶ EarthCARE 検証チームリーダー
- ▶ 2008-2014 情報通信研究機構(NICT)のEarthCARE衛星 Cloud profiling radar (CPR)プロジェクトマネージャ



launched by
SPACE-X Falcon-9



©ESA



©JAXA

本日の内容

- ▶ マイクロ波センサの原理と種類
 - ▶ イメージャとサウンダ
- ▶ マイクロ波センサの現状と将来計画
 - ▶ アクティブセンサ
 - ▶ パッシブセンサ
- ▶ センサの課題
 - ▶ 周波数拡張
 - ▶ サンプリング
 - ▶ キャリブレーション（校正）
- ▶ センサイングの課題
 - ▶ ダウンリング、軌道上ストレージ

リモートセンシングの代表例

5

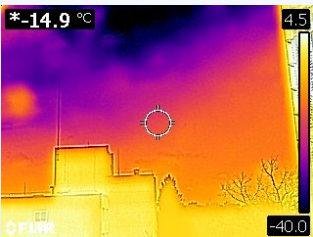
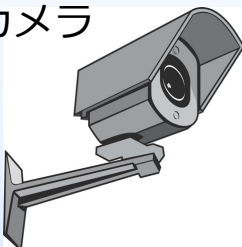
光学カメラ



光源からの光（太陽光
など）が対象物で**反射
した光**を観測（可視領
域～近赤外）

写真、植生、雲、海洋

赤外線カメラ



ターゲットからの**赤外
放射強度**を観測する。
（**表面温度**に相当）

雲（昼夜を問わず）、
温度

マイクロ波放射計



赤外線カメラと同様
であるが、**マイクロ
波**を利用。（**光学セ
ンサ**ではない）

雲（昼夜を問わず）、
降水、気温プロファイ
ル、水蒸気量



Radar



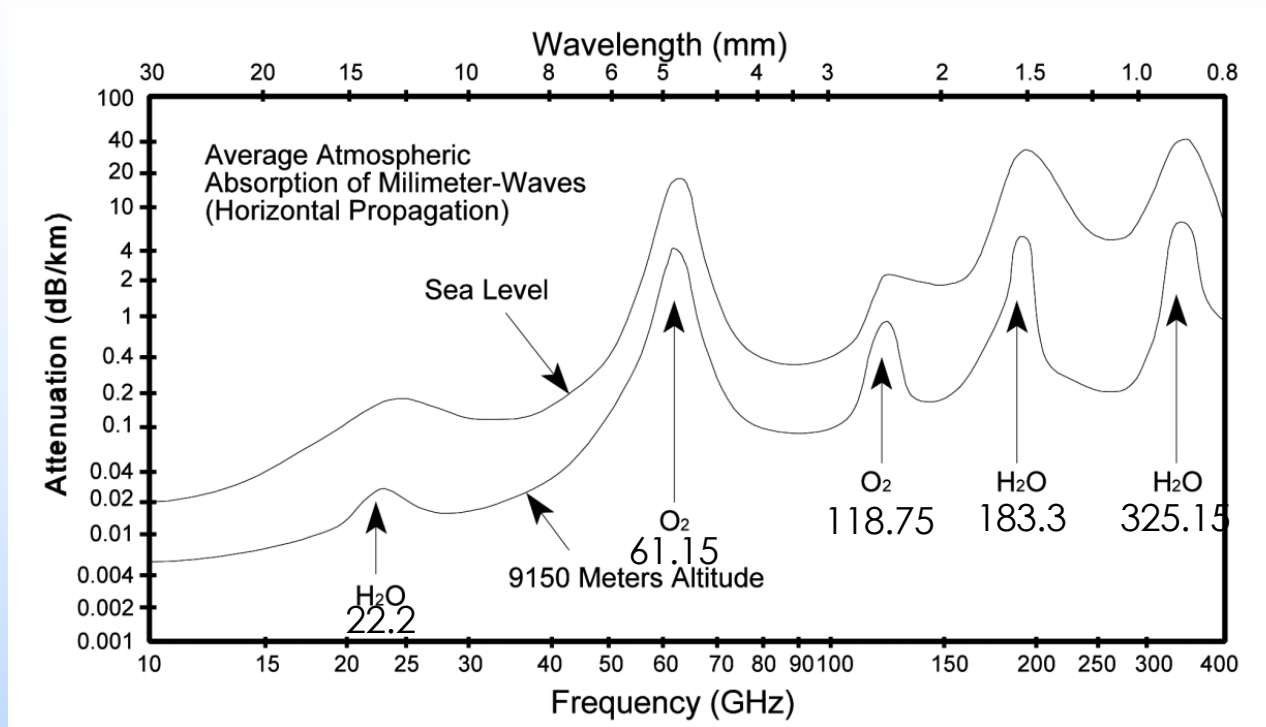
Lidar

レーダ(Radar)/ライダ (Lidar)

自ら電磁波（マイクロ波、光）を送信し、ターゲットからの反射した電磁波を受信し、強度等を計測する。

Radar: 雲、雨・雪
Lidar: エアロゾル、
二酸化炭素、水蒸気

マイクロ波帯における大気吸収線

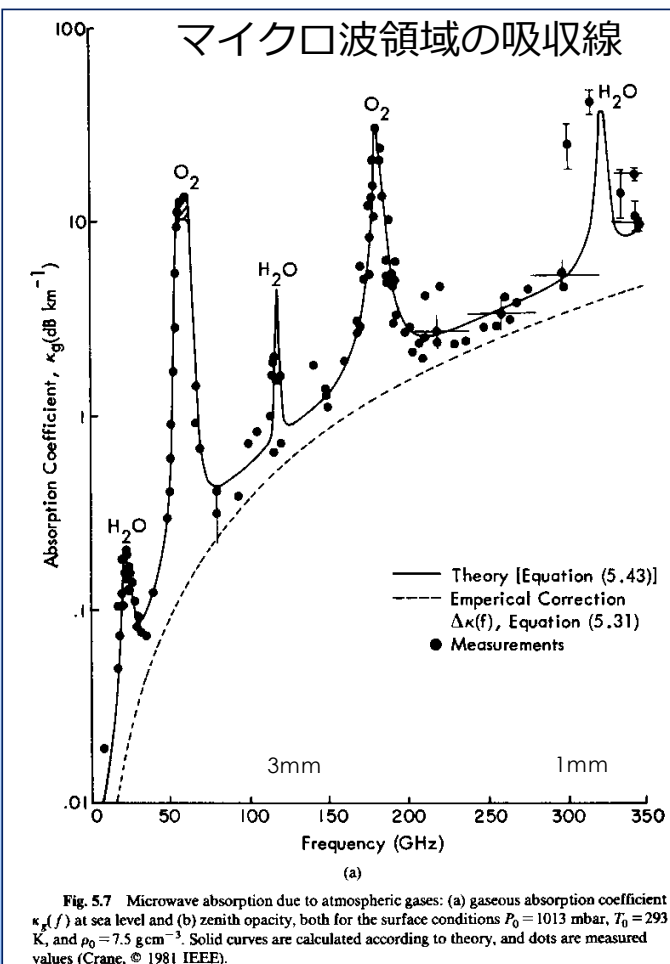


(<https://www.everythingrf.com/>)

- ▶ (光学センサと同様に) 目的に応じて**吸収帯を積極的に使う**センサと**窓領域**を用いるセンサの2つに大きく分けられる。

観測方式：イメージングとサウンディング

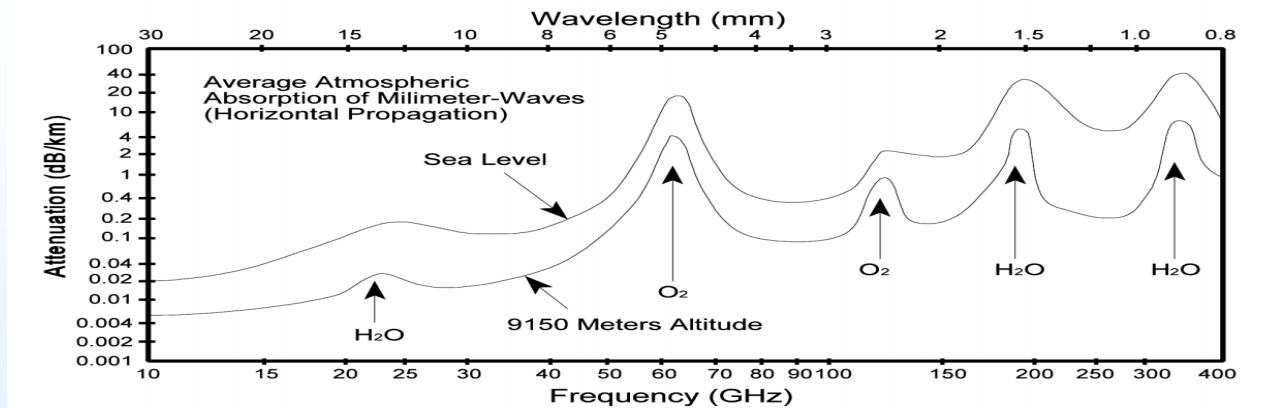
7



- ▶ 窓領域は地球のイメージングに利用：イメージャ
 - ▶ 衛星写真的な利用：地表面・海面水温・土壌水分
 - ▶ そのほか、海上風、雲水量、降水強度の推定に利用
- ▶ 吸収帯は大気構造（プロファイル）の推定（=サウンディング）に利用：サウンダ
 - ▶ 酸素の吸収線：気温
 - ▶ 水蒸気の吸収線：水蒸気量
 - ▶ 主に現業気象予報の初期値として利用
 - ▶ 吸収線付近の複数周波数を用いる。周波数ごとの高度に対する重み関数を用いてプロファイルを推定。
- ▶ 降水（や雲）の有無により、利用の範囲が変化する。

マイクロ波放射計（イメージャ）の動向

8



(およそ古い順に並べている)

SSM/I (1991-)

TRMM/TMI(1997)

AMSR-E (2002)

AMSR-2 (2012)

SMAP (2015)

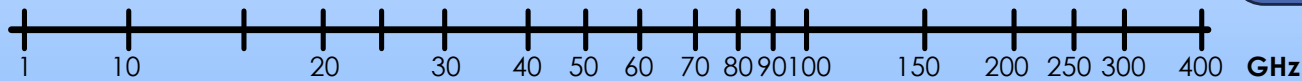
GPM/GMI (2014)

AMSR-3 (2025)

TROPICS (2018)

低周波化：土壌水分・極域
 の海面水温のニーズ

高周波化：氷
 雲、高高度水
 蒸気、小型化
 のニーズ



マイクロ波サウンダの動向

9

| Instrument | Agency responsible | Satellites | Time frame | Channels | Freq. range (GHz) | Footprint at nadir (km) |
|------------|--------------------|-------------------------------------|-------------|----------|-------------------|-------------------------|
| NEMS | NOAA | Nimbus-5 | 1973 - 1983 | 5 | 22.2 - 58.8 | 180 |
| MSU | NOAA | TIROS-N to NOAA-14 | 1978 - 2007 | 4 | 50.3 - 57.95 | 110 |
| AMSU-A | NOAA | NOAA-15/16/17/18/19; Metop-A/B/C | 1998 - 2024 | 15 | 23.8 - 89 | 48 |
| AMSU-B | Met Office | NOAA-15/16/17 | 1998 - 2014 | 5 | 89 - 183.31 | 16 |
| MHS | EUMETSAT | NOAA-18/19; Metop-A/B/C | 2005 - 2024 | 5 | 89 - 190.31 | 16 |
| ATMS | NOAA | S-NPP; JPSS-1/2/3/4 | 2011 - 2038 | 22 | 23.8 - 183.31 | 16 - 75 |
| SAPHIR | CNES | Meghatropiques | 2011 - 2018 | 6 | 183.31 | 10 |
| MWTS-1 | CMA | FY-3A/3B | 2008 - 2014 | 4 | 50.3 - 57.3 | 62 |
| MWHS-1 | CMA | FY-3A/3B | 2008 - 2018 | 5 | 150 - 183.31 | 16 |
| MWTS-2 | CMA | FY-3C to 3G | 2013 - 2026 | 13 | 50.3 - 57.3 | 32 |
| MWHS-2 | CMA | FY-3C to 3G | 2013 - 2026 | 15 | 89 - 183.31 | 16 - 32 |

Table 2: Cross-track microwave sounders providing heritage for MWS. Colour key: blue: temperature sounders; green: humidity sounders; red: combined temperature/humidity. Dates in italics are projected. The frequency range refers to channel centres.

EPS-SG MWS Science Planより

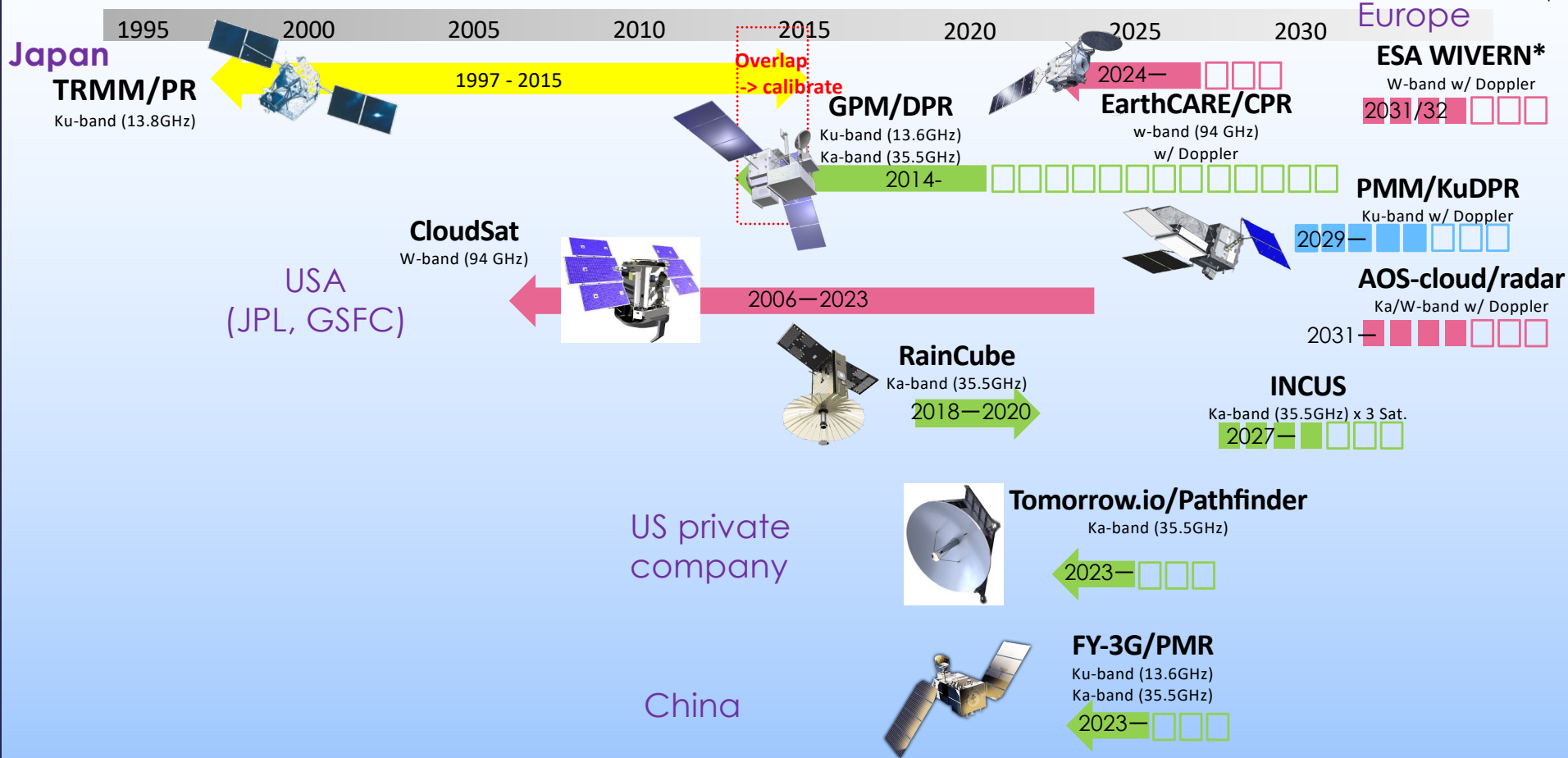
- 時代とともに高周波チャンネルの利用が増加
- 一方でフットプリントサイズ（アンテナサイズ）は、変化なし
- 民間事業者の参入が見られてきたが、現業機関が主な取引先となっている模様。

- ▶ tomorrow.io sounder (6U CubeSat, 91-204 GHz, 2024年打上げ)
- ▶ AETHER (アイテール) プロジェクト (CubeSat 5年以内の軌道上実証)

衛星搭載レーダ（雲・雨）の動向

Center for Orbital and Suborbital Observations, ISSE, NU

*: Earth explorer 11 candidate



観測技術の方向性

放射計：

- ▶ 高周波数分解能
(ハイパースペクトル)
- ▶ 高周波化
- ▶ 低周波化
- ▶ 小型化

レーダ：

- ▶ ドップラー速度
- ▶ 小型化
- ▶ 高出力化
- ▶ 常時観測

必要となる技術

- 高速サンプリング
- 高周波デバイス (～THz)
- 大型アンテナ (展開)
- 小型デバイス・高周波化
- 大アンテナ・DPCA技術
- 小型デバイス・高周波化
- デバイス・パルス圧縮
- 静止軌道・大口径アンテナ

備考 (計画・課題)

- SAMRAI、干渉電波除去
- 現状 325 GHz
- アレイアンテナ・DELIGHT
展開技術
- CubeSatによるコンステ
レーション
- DPCAは小型化には必須
- 35GHz以上、
- ミリ波デバイス
- 大型展開アンテナ

マイクロ波センサの今後の方向性

現業気象予報や防災への貢献の観点では

- 常時データ取得
- 観測物理量の高度化や新たな物理量の取得

▶ 小型衛星コンステレーションによる高頻度観測

- ▶ TROPICS (NASA) → tomorrow.io
- ▶ 小型化→高周波数化 (CNES C²OMODO ~325 GHz)
- ▶ CubeSatの活用 (tomorrow.io sounder)

▶ 観測周波数の拡大

- ▶ 低周波観測による塩分濃度・土壌水分などの物理量の取得 (e.g. JAXA SAMRAI 1 GHz~)
- ▶ 高周波観測による地球の放射収支に重要な氷晶観測

▶ 静止軌道からの常時観測

▶ 動的情報による、衛星観測物理量間の結合

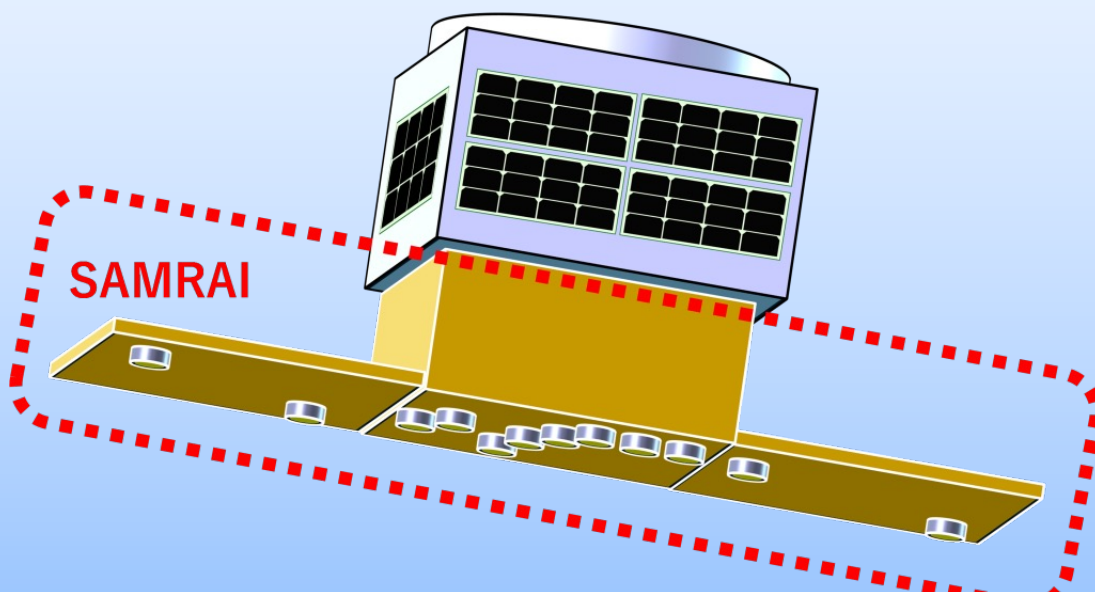
- ▶ ドップラー速度観測の推進 (e.g. PMM/KuDPR, 静止衛星搭載レーダ)
- ▶ 気象・気候モデルの改良

JAXA SAMRAI

- ▶ 広帯域アンテナ（1～40 GHz）の開発
 - ▶ アレイアンテナにより大口径を実現
- ▶ 高速1ビットサンプリングによるスペクトルデータ取得
- ▶ これらにより、軽量化に成功

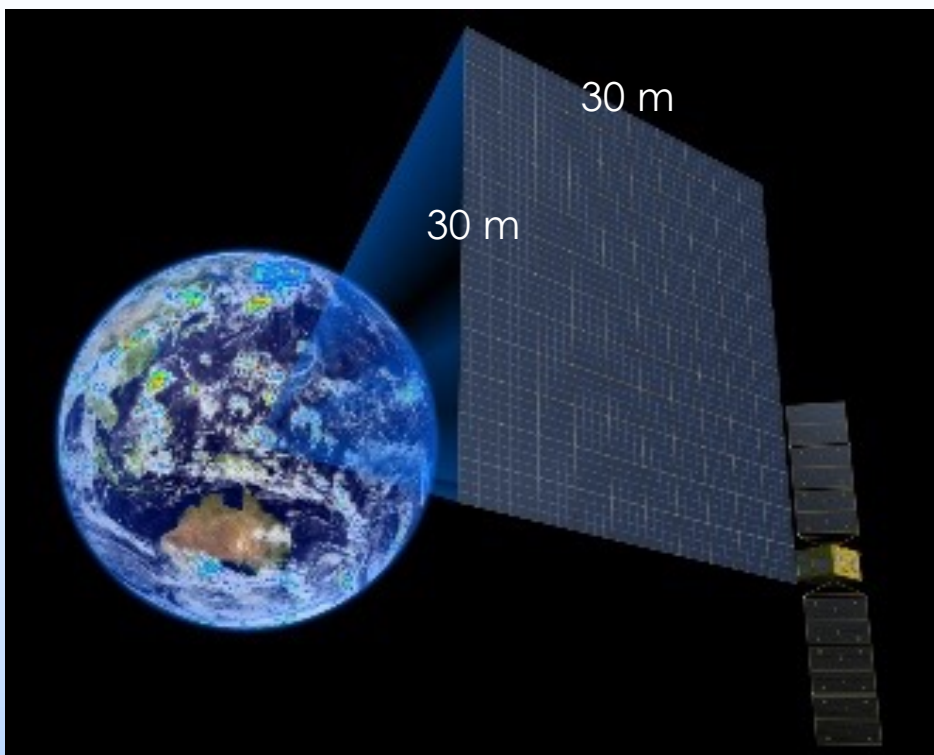
課題

- 軌道上でのキャリブレーション手法
- 大量データの処理技術



| パラメータ | 性能 |
|---------|---------------------------------|
| 周波数 | 1～40 GHz (27 MHz間隔) |
| フットプリント | 2 km (35 GHz), 50 km (1 GHz) |
| 走査幅 | 約 1000 km |
| 衛星軌道 | 太陽同期軌道 |
| 衛星高度 | 500 km |

静止衛星搭載レーダ構想



- ▶ 技術課題：空間分解能
 - 30m x 30mの大口徑展開アンテナで解決
 - ✓ 展開機構を開発・実証する必要
 - ▶ 軌道上での技術実証ミッション (DELIGHT)
- ▶ フィージビリティスタディの一環として、OSSEの実施 (Okazaki et al., 2019)

| パラメータ | 性能 |
|---------|-------------|
| 周波数 | Ku帯 |
| フットプリント | 20 km |
| 感度 | 20 dBZ |
| ドップラー観測 | スペクトル観測 |
| 走査 | 緯度経度50度を1時間 |

その他、将来考えられる課題

- ▶ ダウンリンクなどのインフラ
 - ▶ ハイパースペクトル、ドップラーIQ信号などのダウンリンク
- ▶ センサのキャリブレーション（校正）
 - ▶ 個々のセンサに校正機能を持たせると衛星が大きくなる。
 - ▶ 特にCubeSatなどの超小型衛星のデータ現業利用などへの影響は大きい。
 - ▶ 中大型衛星との相互比較手法の確立が必要（衛星間での観測データの整合性を担保する必要）
- ▶ 継続性
 - ▶ 継続的な利用を促すためには、継続性の担保があるとよい

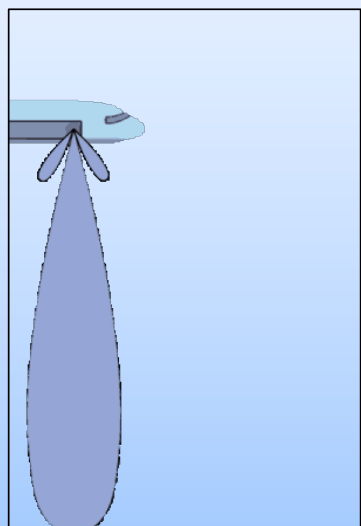
まとめに代えて

- ▶ 究極の目標は時空間的な常時高分解能観測
 - ▶ 多数衛星（小型衛星群）・静止軌道
- ▶ 情報の高度化
 - ▶ 高感度化（+最適周波数での観測）
 - ▶ ドップラー速度情報（レーダ、ライダー）
- ▶ 現在のセンサ開発・衛星開発はそのような方向性に乗って進められている。
- ▶ 気候変動問題を考えると、信頼性の高い長期的な観測も非常に重要であり、将来の衛星地球観測のあり方を深く議論しておく必要がある。

DPCA 方式について

- 基本的なコンセプトは、運用中に**受信開口部を後方に電子的にシフト**させることにより、プラットフォームが前進しているにもかかわらず、**アンテナを静止している**ように見せることである（左図）。SARでよく用いられる技術。
- ドップラーレーダとして利用する場合、パルスペア方式を想定すると、連続する2つのパルス間で同じターゲットを観測する必要がある（移動するプラットフォームではターゲットがずれる）。すなわち、**2つの連続するパルスを2つのアンテナに分ける**（右図下）と送信受信が2つのパルスで同じ幾何条件になる。
- このような方式を実現するには、アンテナ間隔をパルス間隔および衛星速度から決める必要がある。

DPCA方式の概念図



radartutorial.eu より

Durden et al. (2023) によるDPCAの2つの方式

