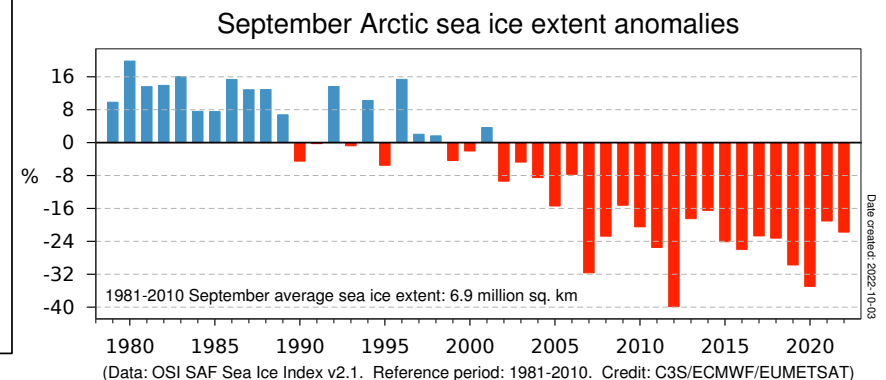
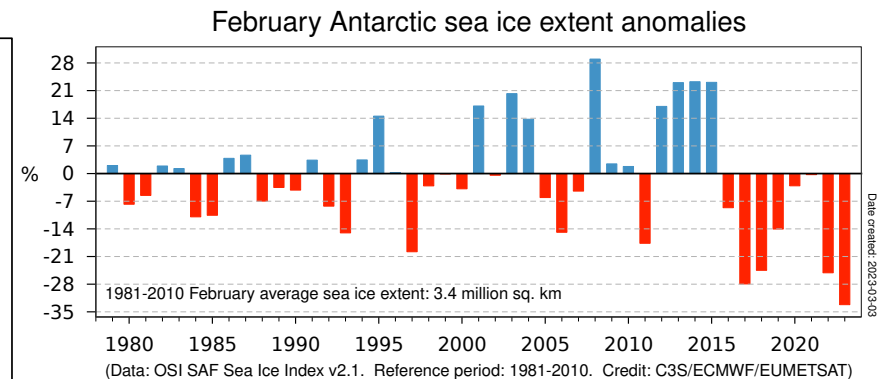
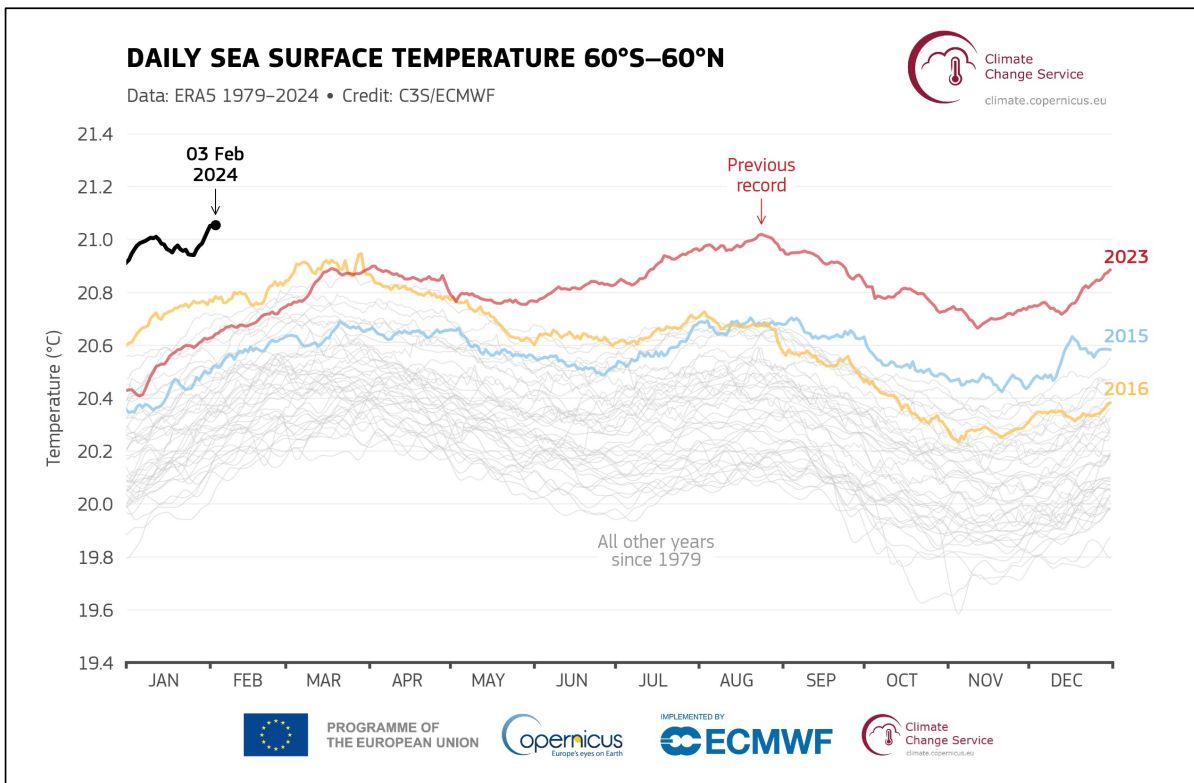


マイクロ波放射計の重要性と 今後への期待

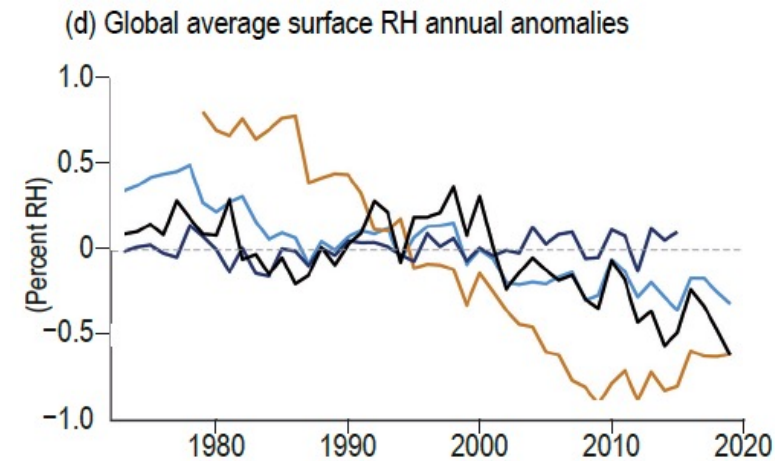
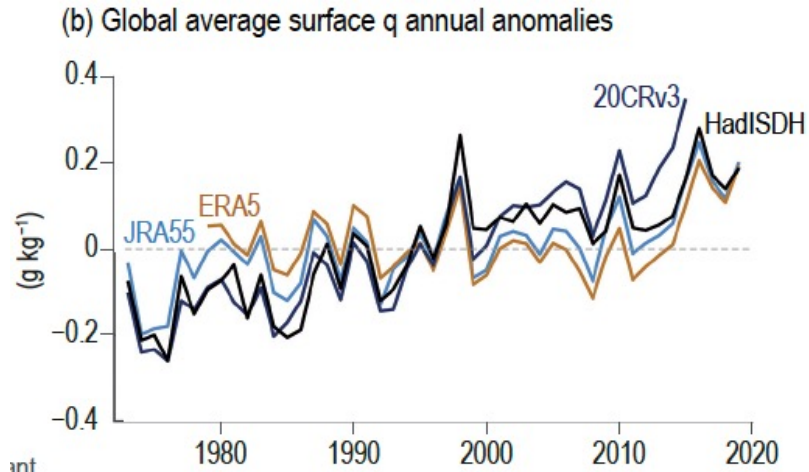
早坂 忠裕

東北大学／JAXA EORC

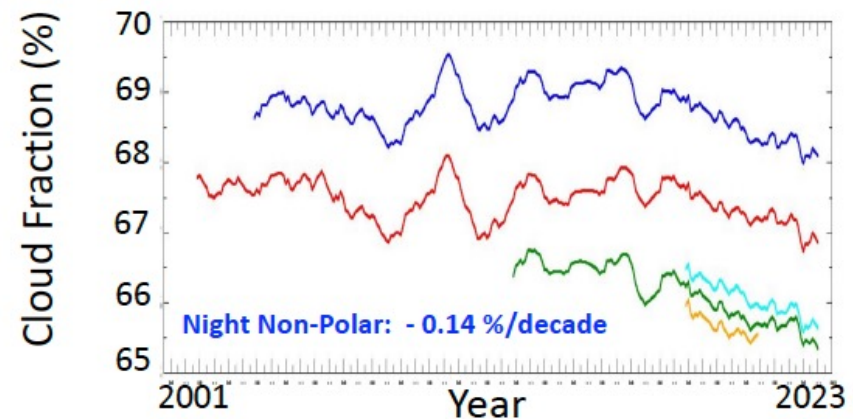
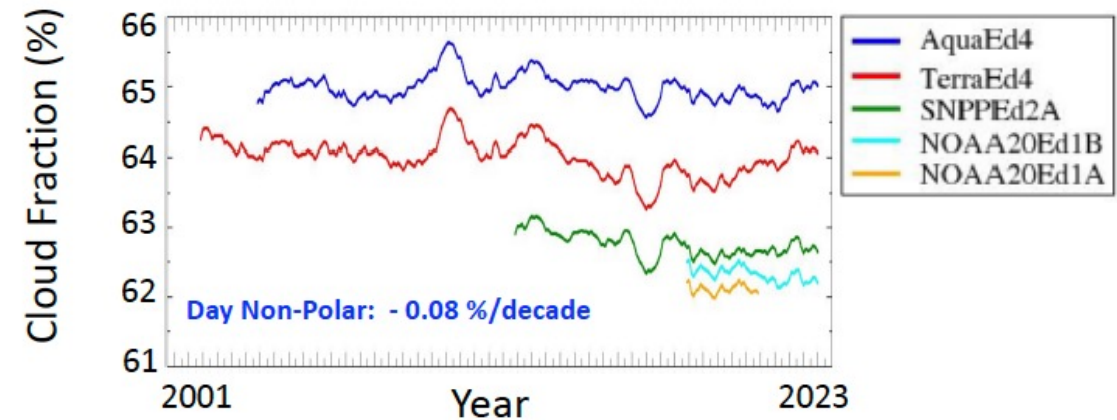
地球の気候は未知の世界に突入か？



温暖化で水蒸気量は増加、相対湿度は低下、雲量は？



(IPCC-AR6, 2021)

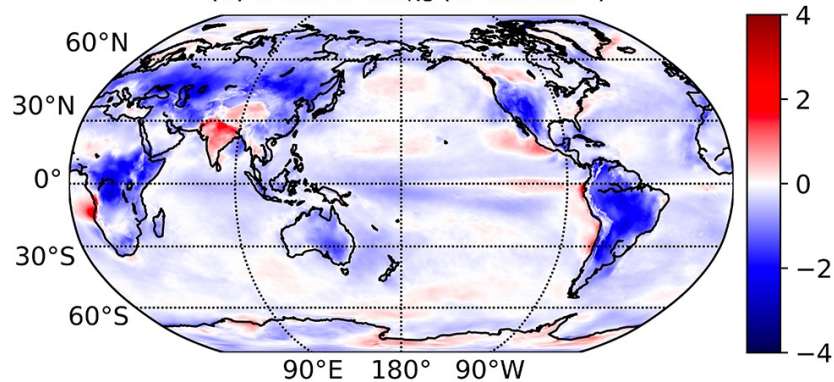


(Smith et al. CERES Sci.Team Meeting 2022)

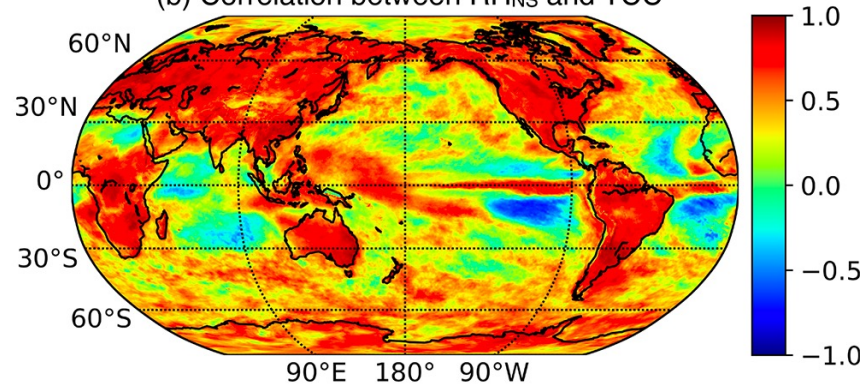
温暖化で相対湿度は低下、雲量、降水量の変化は？

ERA5: 1979-2020

(a) Trend in RH_{NS} (% decade⁻¹)

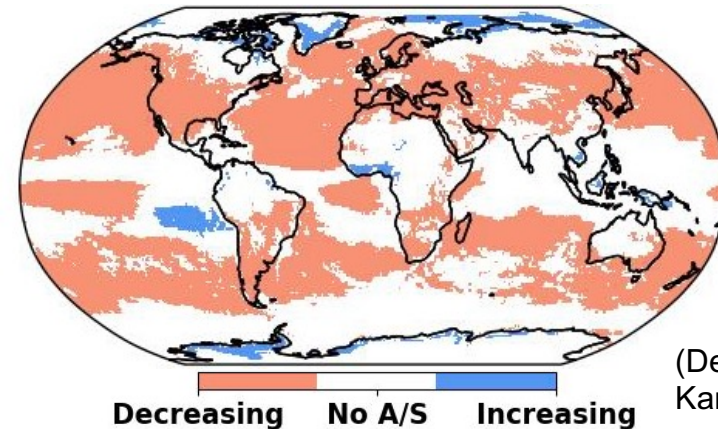


(b) Correlation between RH_{NS} and TCC



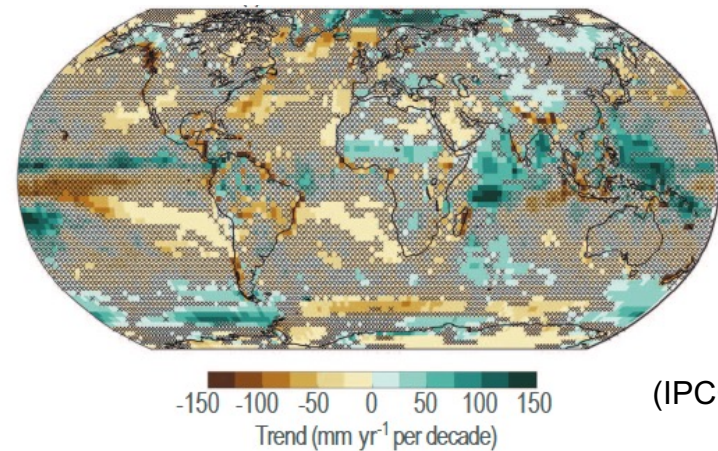
(Liu et al. ACP2023)

CLARA-A3, PATMOS-x, ESA Cloud CCI
Common trend: 1979-2020



(Devasthale and Karlsson et al. 2023)

GPCP V2.3: 1980-2019 Precipitation trend



(IPCC-AR6, 2021)

地球表層の変化(過去20～40年間)

気候は予定調和的に変化しない。数年～数十年のスケールで予想外の変化
→ 長期間(数十年以上)のモニタリングが重要

- 気温上昇
- 海面水温上昇
- 大気中の水蒸気量は増加
- 相対湿度は減少
- 雲量はやや減少?
- 降水量のトレンドは不明
- 海氷・雪氷面積は減少

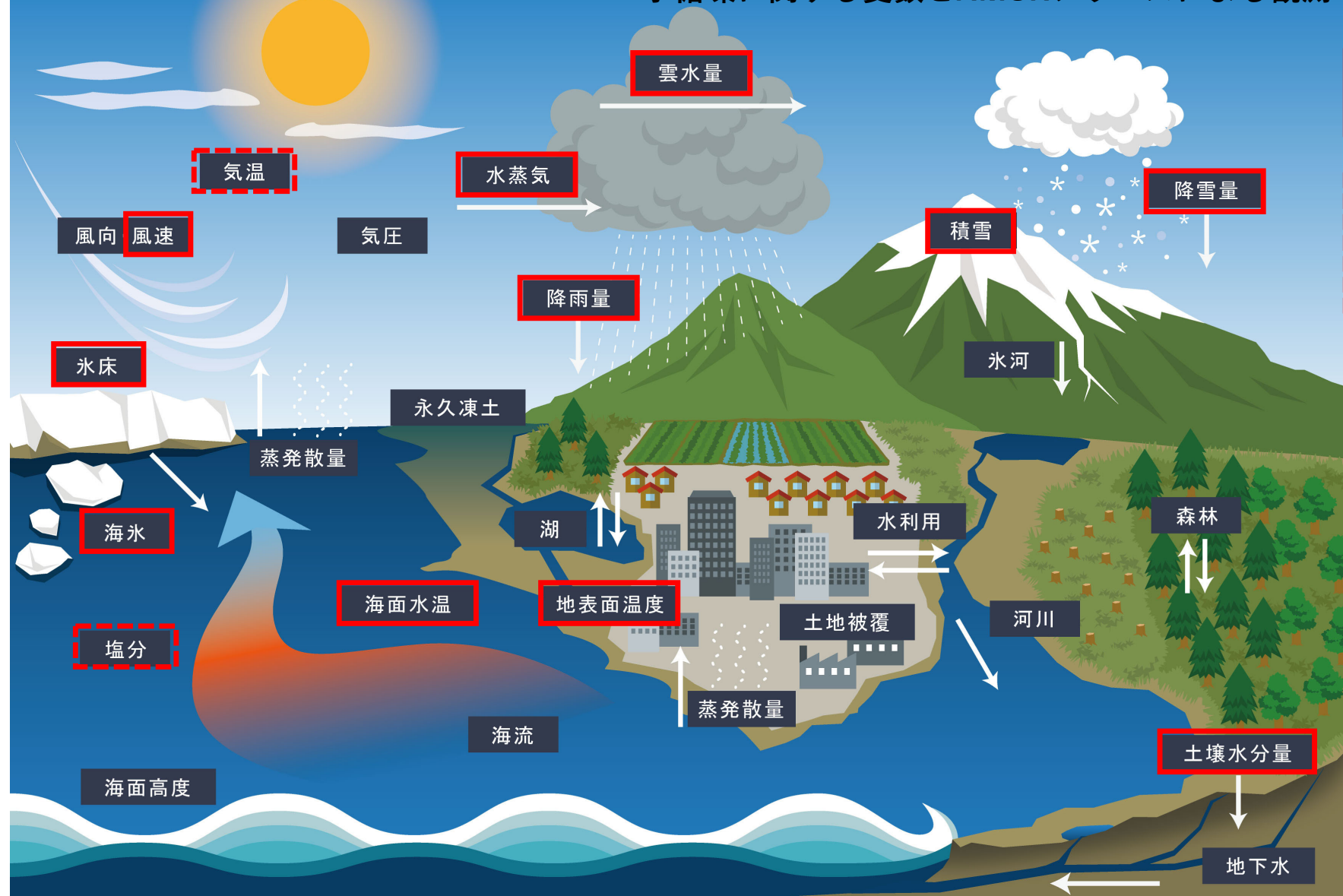
これらの観測には衛星搭載マイクロ波放射計観測の貢献度が大きい

- 雲があってもSSTや海氷の観測が可能
- 全天候での気温、水蒸気の鉛直分布観測
- 雲水量、降水強度の定量的観測
- 氷雲観測への期待

一方で、

- 時空間解像度が悪い

水循環に関する変数とAMSRシリーズによる観測



AMSRで
観測

他の
マイクロ波
放射計で
観測

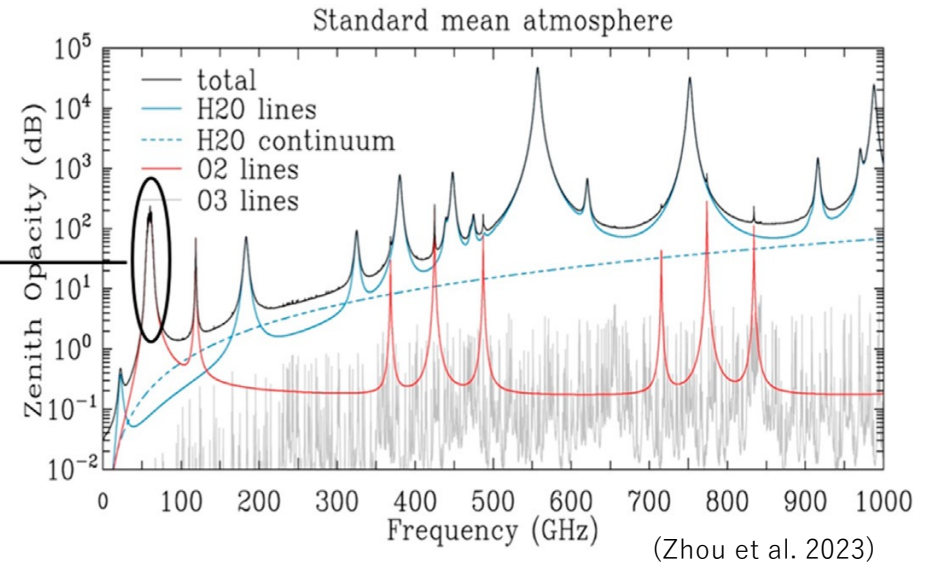
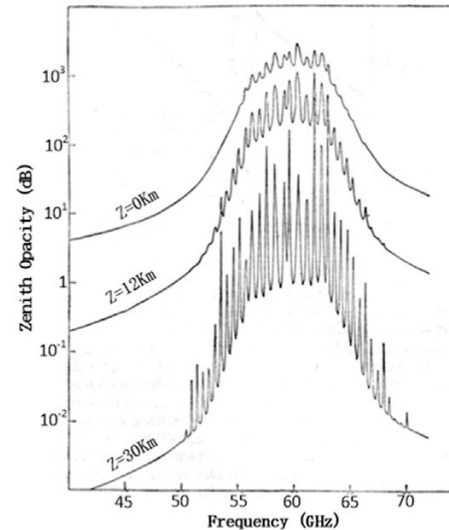
衛星搭載マイクロ波放射計の将来

(現在)

- 数GHz～183GHz帯
- 空間解像度、数km～数十km
- 地球周回低高度軌道で観測



- 周波数域の拡張
- 小型衛星
- コンステレーション
- 高解像度 – CIMR
- 静止衛星に搭載
- 可視赤外センサー、アクティブセンサーとの連携、相乗効果
- 数値モデルとの連携、相乗効果



(Zhou et al. 2023)

高周波数帯を用いることにより、大気・地表面系の“水”に加えて大気の様々な化学組成、同位体を観測することができる。

(例) MLS/UARS, SMILES/ISS

O₃, ClO, HNO₃, BrO, HCl, N₂O, CO, SO₂, 等

Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition, Volume 1, 2003

高周波観測の例(氷雲)

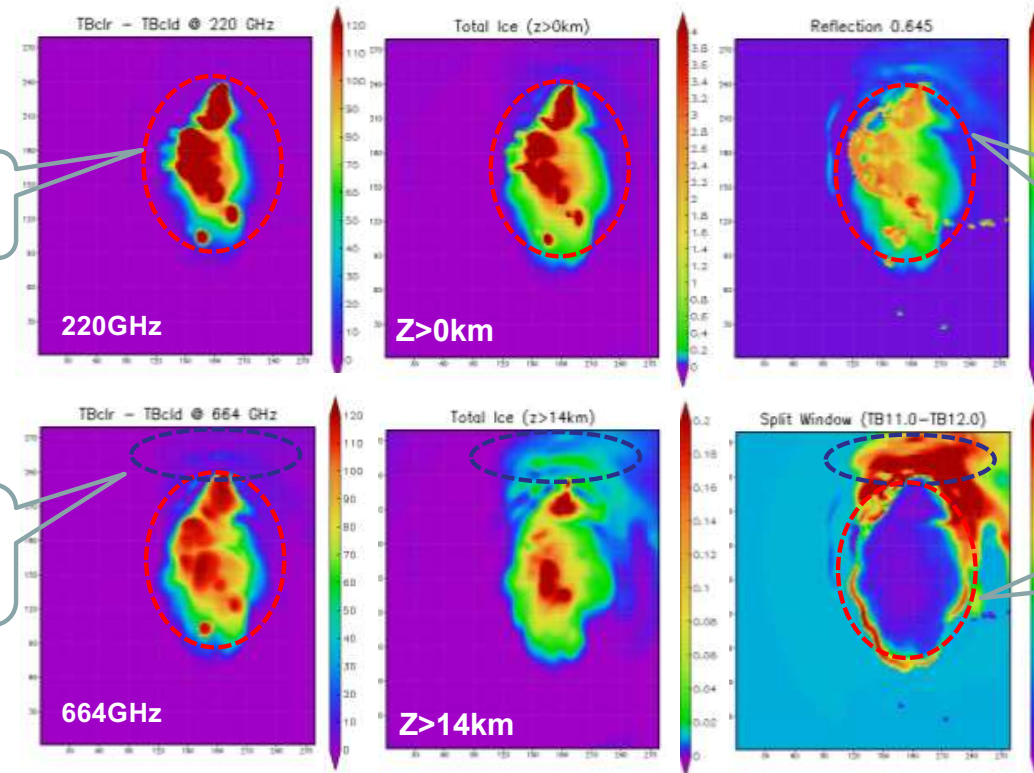
(可視・赤外ラジオメータとのナディア観測の比較計算例(比較は220GHz, 664GHz))

←【雲氷量(真値)】→

テラヘルツ波で見た場合

可視・赤外放射計で見た場合

総雲氷量の分布
をよく捉えている



薄い上層雲はテ
ラヘルツと赤外
で観測可能

可視反射率は雲
氷量の情報を含
むが、**定量的な
算定が難しい**

赤外は厚い氷雲
に対しては**飽和**

- 雲氷粒子全体の把握
→ 赤外やミリ波で観測
できない氷粒子の観測
- 氷点下では過冷却水の粒
子と氷粒子が共存
- 降水現象の理解に雲内部
の氷粒子の把握は極めて
重要
→ 豪雨等の予測精度向上
- 温暖化に伴い、水雲と氷
雲の割合が変化
→ 雲の放射収支に影響
→ 気候変動予測

テラヘルツ波による氷雲観測によって厚い対流雲や上層雲でも氷の量(カラム量)に関する2次元分布が得られる。実用衛星ではテラヘルツ波とマイクロ波帯、可視赤外放射計との併用により、雲降水システムにおける雨から上層の氷粒子まで捉えられる。

(上沢、EORC年報2010)

小型衛星によるコンステレーション

TMS/TROPICS

3U CubeSat – 5 satellites constellation

91.7GHz

118GHz – 7 channels

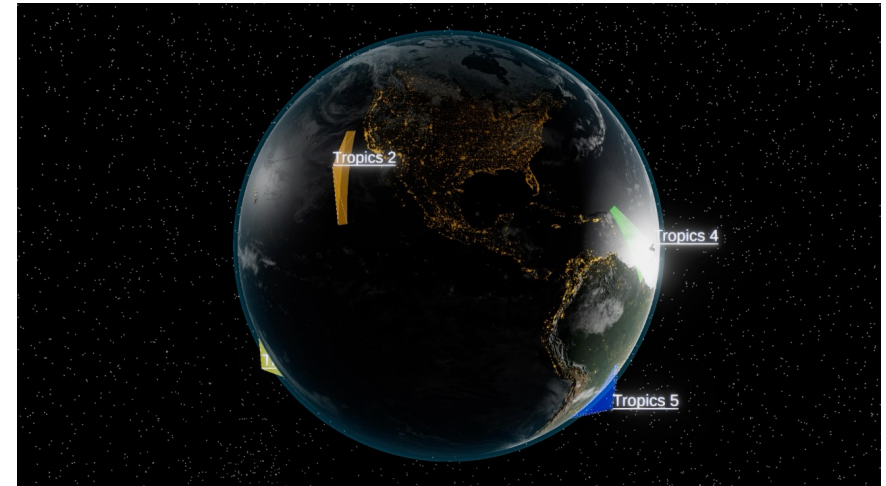
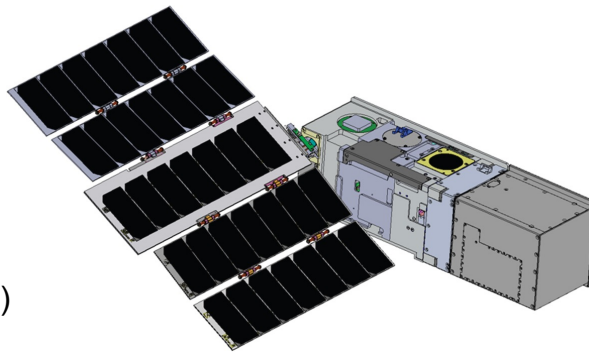
183GHz – 3 channels

90GHz and 205GHz

204.8GHz

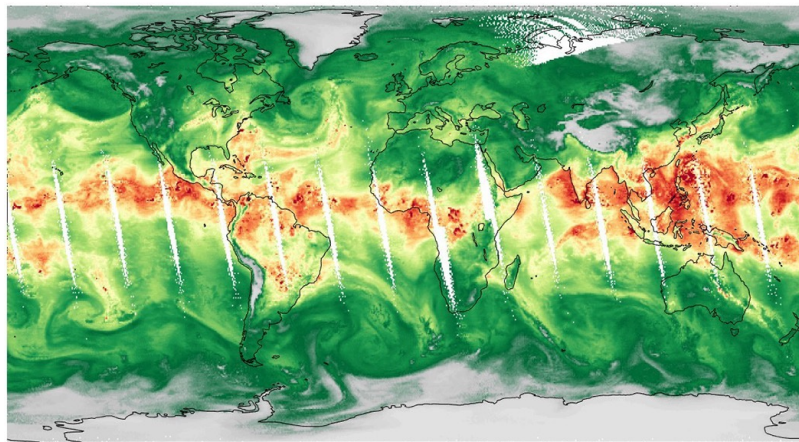
気温、水蒸気、雲、降水

(Blackwell et al. QJRM2018)

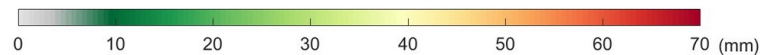
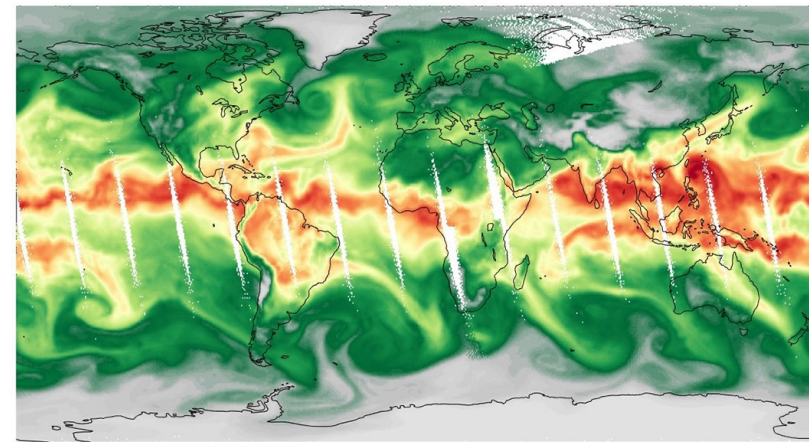


(MIT Lincoln Lab.)

TROPICS TPW



ECMWF TPW

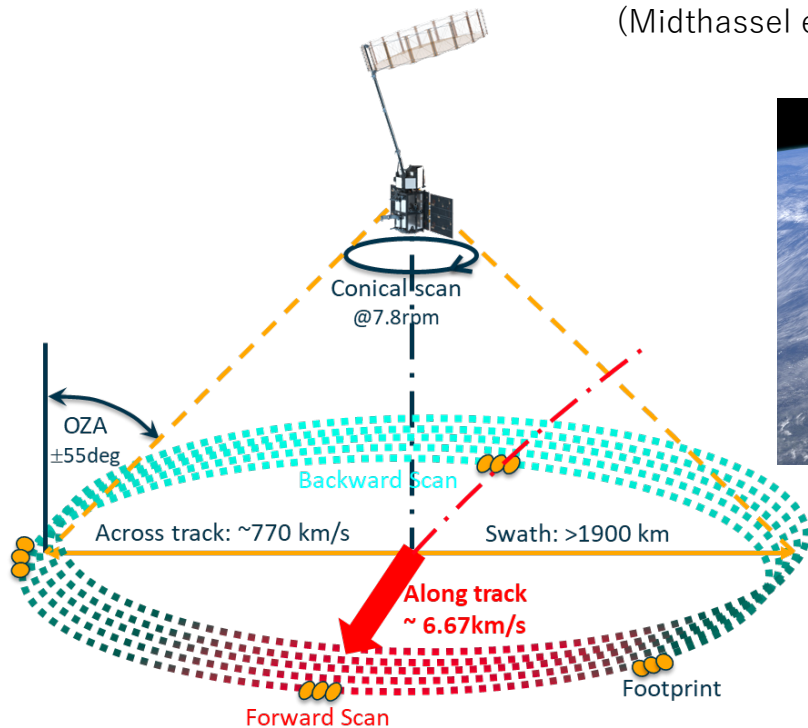


(Yang et al. RSE2023)

The Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR)

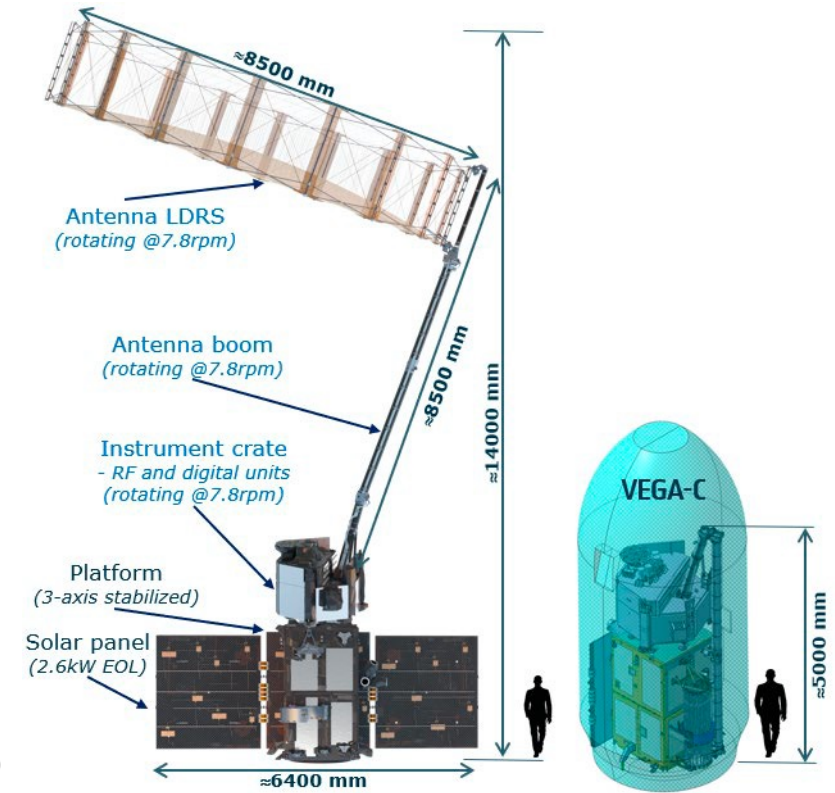
	L-Band	C-Band	X-Band	K-Band	Ka-Band
Center Frequency (GHz)	1.425	6.875	10.65	18.7	36.5
Bandwidth (MHz)	50	400	100	200	300
Footprint Size (km)	<60	15	15	5	5
Swath Width (km)	~1800	>1900			
Observation Zenith Angle (deg)	52±1.0	55±2.0			
Polarization	Full Stokes				

(Midthassel et al. IGARSS 2023)



(Galeazzi et al. IGARSS 2023)

- Sea-surface temperature
- Sea-ice concentration
- Sea-surface salinity.



静止衛星にマイクロ波放射計を

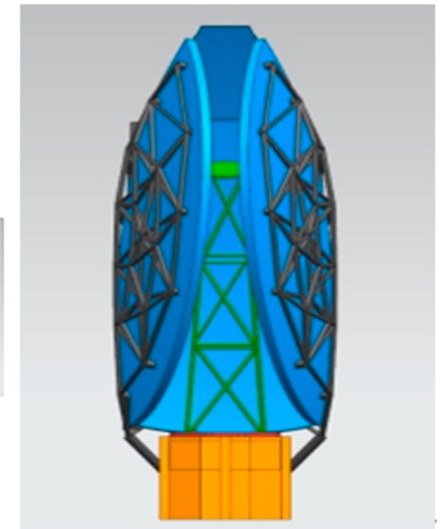
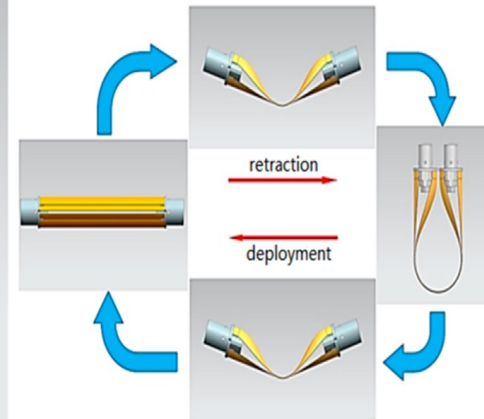
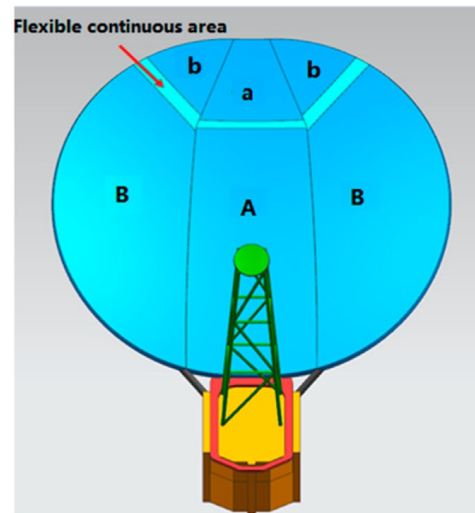
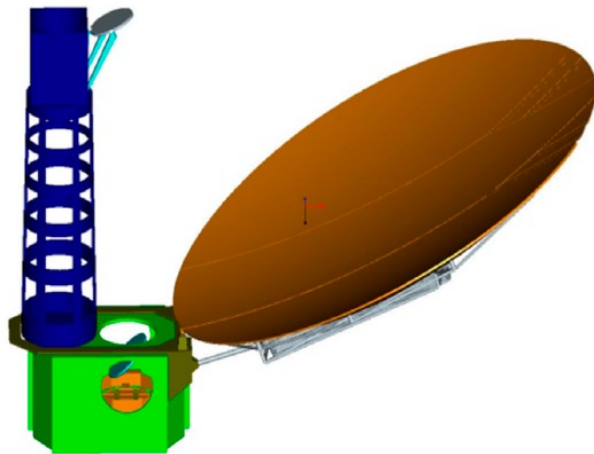
欧米で1990年代から検討されてきた。パラボラアンテナまたは干渉計タイプのアンテナ。近年は中国が実用化に向けて開発を加速。

(中国の例)

- 10mアンテナ
- ミリ波、サブミリ波
- 2025年以降

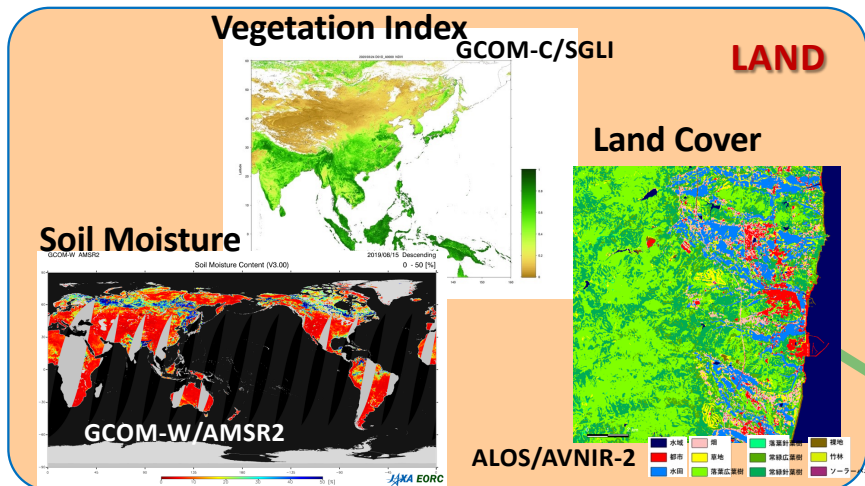
f/GHz	Polarization	Utilization
50-60/118/425	H	Temperature profile
23.8/183/380	H	Water vapour profile and snowfall cirrus clouds
31.4/89	V	Detection window area, surface radiation correction
243/664	H+V	Cirrus clouds, cloud ice water path

Footprint size: 13~56km, 50-60GHz No. of channels: 500

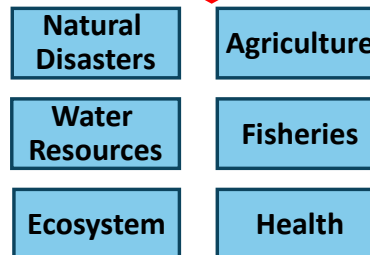
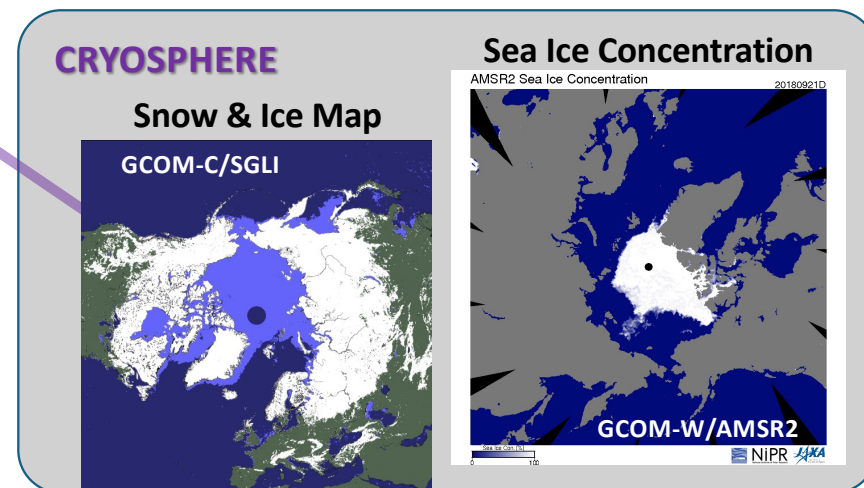
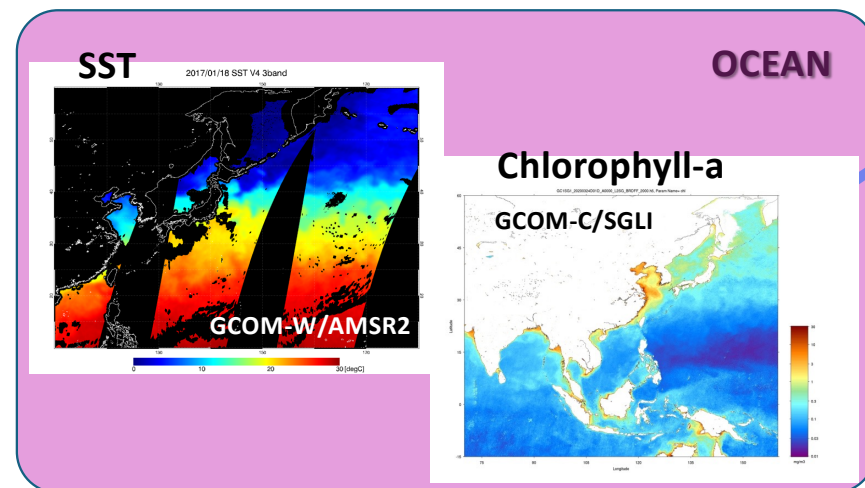
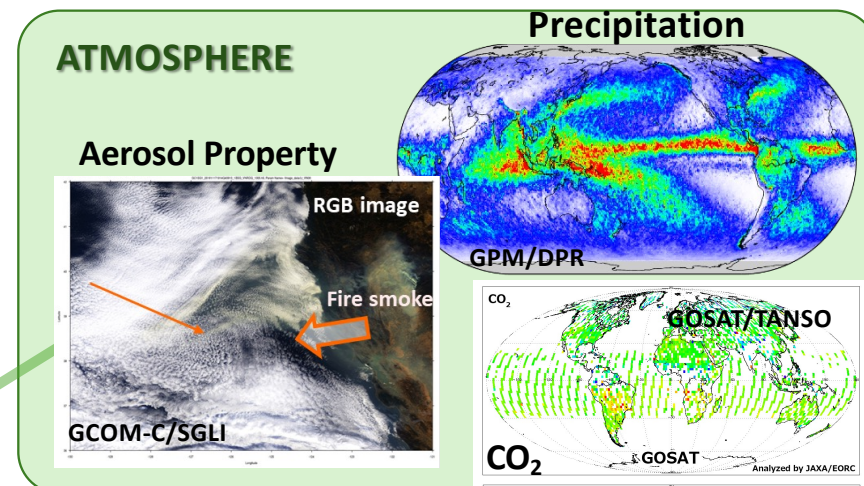
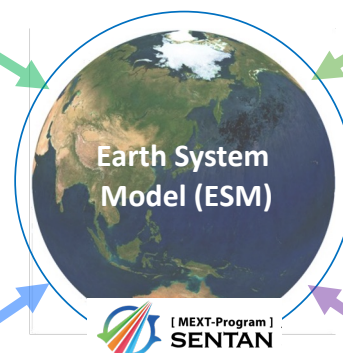


(Zhou et al. 2023)

衛星観測と数値モデルの連携



- ✓ Comparison of model & observation
 - ✓ Correlation between parameters
 - ✓ ...
- Improvement of ESM
- Improvement of future prediction of Earth environment



まとめ～今後への期待

- 気候変動研究や気象業務に対する衛星マイクロ波観測の大きな貢献。
- 日本のマイクロ波イメージャーは世界をリードし、国際的な信頼がある。
 - ✓ 継続した長期観測が重要
- マイクロ波放射計を用いた衛星観測にはまだ技術開発要素がある。
 - ✓ ミリ波～サブミリ波への周波数拡張、高分解能スペクトル
 - ✓ 小型衛星によるコンステレーション
 - ✓ 高解像度化
 - ✓ 静止衛星による観測
 - ✓ 可視赤外センサー、アクティブセンサーとの連携
 - ✓ 数値モデルとの連携、地球デジタルツイン
- 宇宙基本計画の工程表において、「マイクロ波放射計の継続的高度化」として後継ミッションの検討が2024、2025年度の活動とされている。
- 産学官議論の場である衛星地球観測コンソーシアム(CONSEO)も活用して後継ミッションの議論を開始してはどうか。