空へ挑み、宇宙を拓く

JAXA 宇宙航空研究開発機構 Japan Aerospace Exploration Agency

2021年度 第1回 宇宙史研究センター構成員会議＆成果報告会

「超小型テラヘルツリモートセンシングのための基盤技術研究」

2021年6月25日

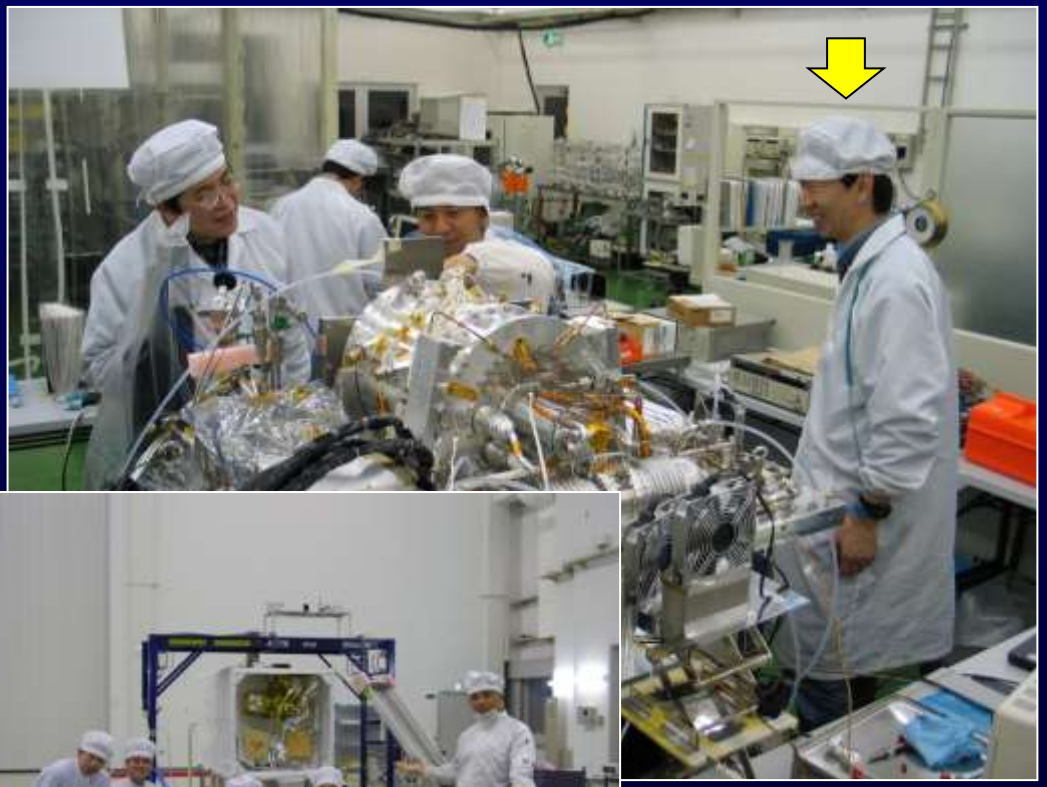
宇宙航空研究開発機構 研究開発部門
センサ研究グループ
西堀 俊幸

まずは自己紹介から

3年前まで宇宙科学研究所で地球のオゾン層を破壊する微量なガスを

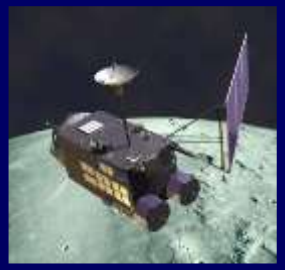
国際宇宙ステーションから観測するための装置の開発と観測運用をしていました.

現在は衛星用の新型レーダーやテラヘルツ波のセンサなどを担当しています.



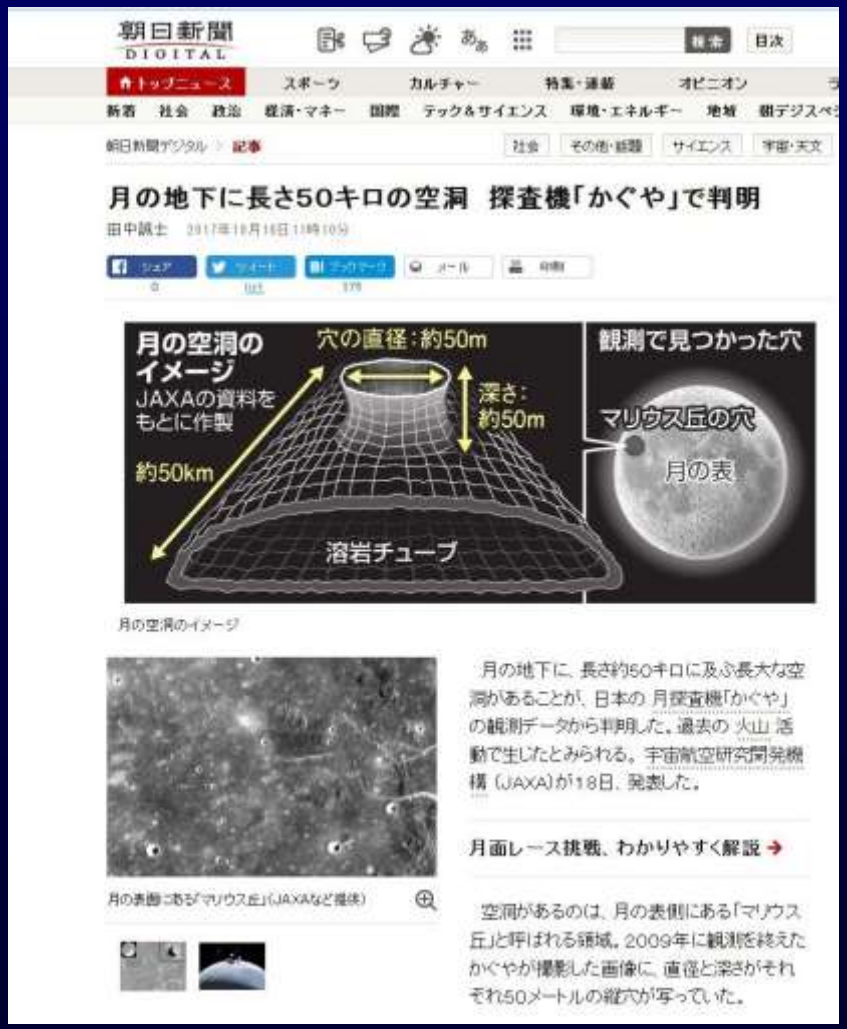
新型超軽量
高精度アンテナ

月の地下に巨大な地下空洞を発見！！

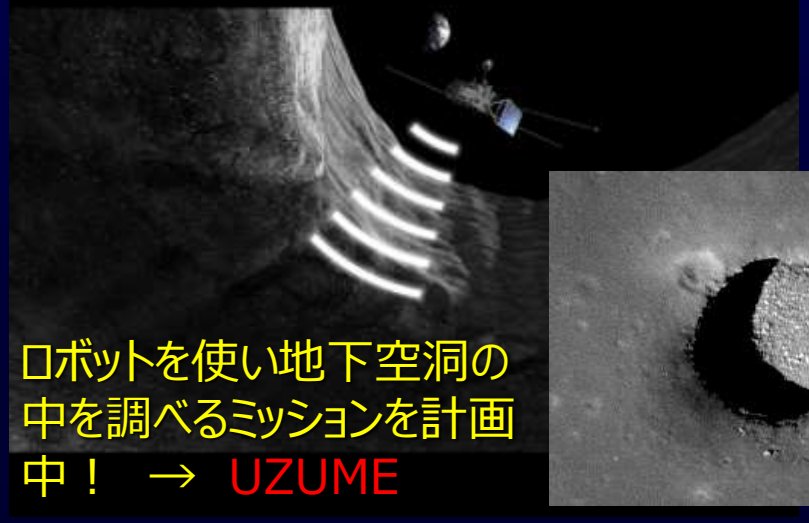


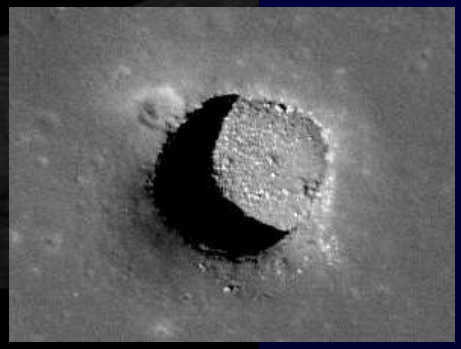
レーダーで月の地下を探査して見つけた！

アメリカの地球惑星科学専門誌 Geophysical Research Letters に掲載 （2017年10月）
“Detection of Intact Lava Tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder”
(かぐや搭載月レーダサウンダーによる月のマリウス丘の未崩壊溶岩チューブの発見)
郭哲也 (東海大学大学院/JAXA) 、春山純一 (JAXA) 、三宅亙 (東海大学大学院) 、熊本篤志 (東北大学大学院) 、石山謙、西堀俊幸 (JAXA) 、山本圭香 (国立天文台) 、Sara T. Crites (JAXA) 、道上達広 (近畿大学) 、横田康弘 (高知大学) 、R. Sood (アラバマ大学) 、H. J. Melosh (パデュー大学) 、L. Chappaz (アストロラボ) 、K. C. Howell (パデュー大学)



月面を撮影した映像から近くにたて穴があることも発見！





ロボットを使い地下空洞の中を調べるミッションを計画中！ → UZUME

JAXA 研究開発部門の仕事とは

研究開発部門の研究は、大きく次のような方針に基づき構成されます。

- ✓ 将来を展望し、柱とする技術にJAXAが戦略的、組織横断的に取り組む研究を「先導する研究」と位置付け、研究開発部門が中核となってその研究を推進します。
- ✓ JAXAが進めるプロジェクトの課題解決を担い、我が国の宇宙航空産業の競争力に不可欠な共通・基盤的な技術の強化に貢献する研究を「支える研究」として推進します。
- ✓ 広く日本の優れた知恵や技術と連携することで宇宙利用の促進を図るための宇宙実証機会を広く提供する研究開発活動を進めます。

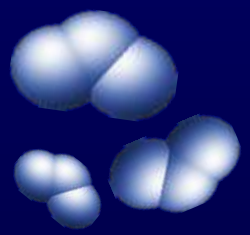
電波を使った観測センサ研究（研究リーダ）を担当しています！

「きぼう」から地球の大気を診断する SMILES（スマイルズ）を13年かけて開発！！

スマイルズで国際宇宙ステーション（ISS）から地球のオゾン層を診断しました

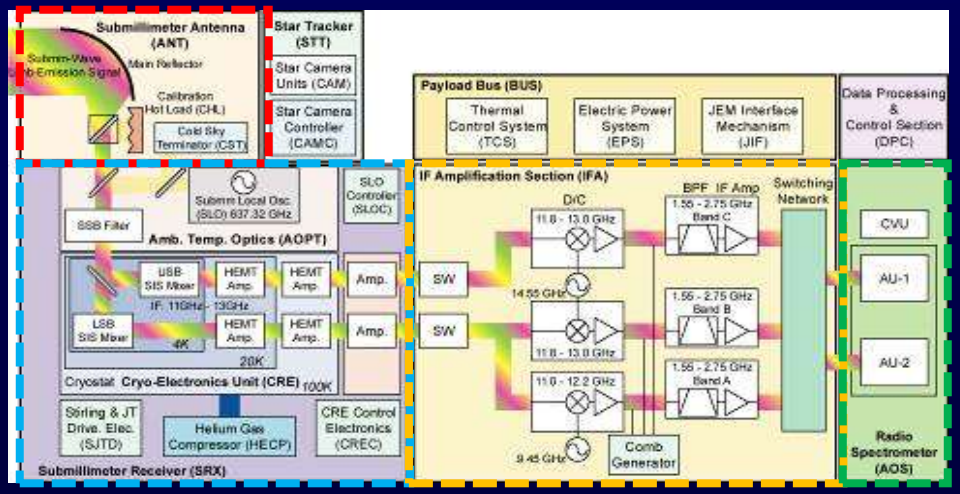
SMILES のハードウェア概要

- **観測周波数:**
  624.32 – 626.32 GHz (LSB)
  649.12 – 650.32 GHz (USB)
- **システム雑音温度:** < 400 K (SSB)
- **スペクトル分解能 :** 1.8 MHz (FWHM)
- **ペイロードのサイズ:**
  0.8 m (W) × 1 m (H) × 1.85 m (L)
- **消費電力:** 332 W
- **質量　　:** 476 kg
- **設計寿命:** 1 年（冷凍機の寿命）



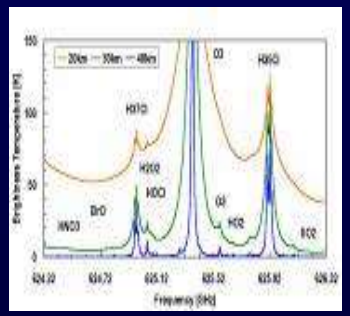
大気分子からの
サブミリ波信号
（回転遷移）

アンテナ系



サブミリ波受信機系　中間周波変換増幅系　電波分光系(AOS)

分光スペクトル

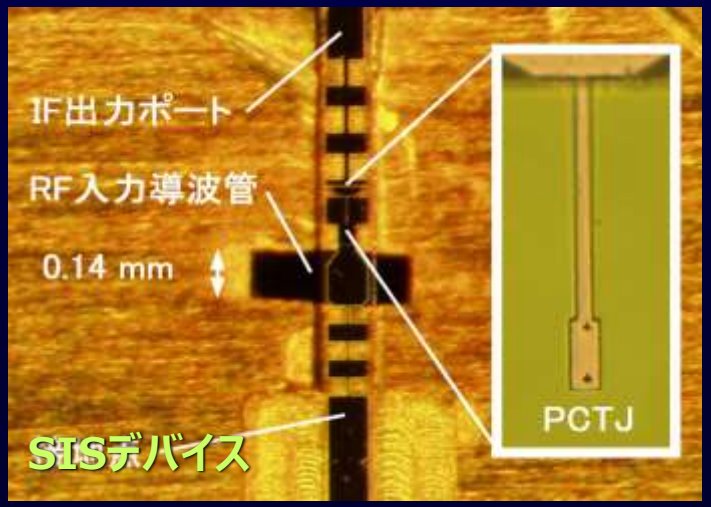


- アンテナ系は地球大気からの微弱なサブミリ波信号 (～640 GHz) を受けて、サブミリ波受信機系へ伝送する。
- サブミリ波信号は、サブミリ波受信機系内で 4 K に冷却された超伝導ミクサによって検出され、中間周波数信号 (約 12 GHz) に変換される。
- 続く中間周波変換増幅系において、周波数をさらに 2 GHz 程度に落として増幅し、後段の電波分光系へ伝送する。
- 電波分光系は受信した信号の分光処理を行い、分光スペクトルを出力する。

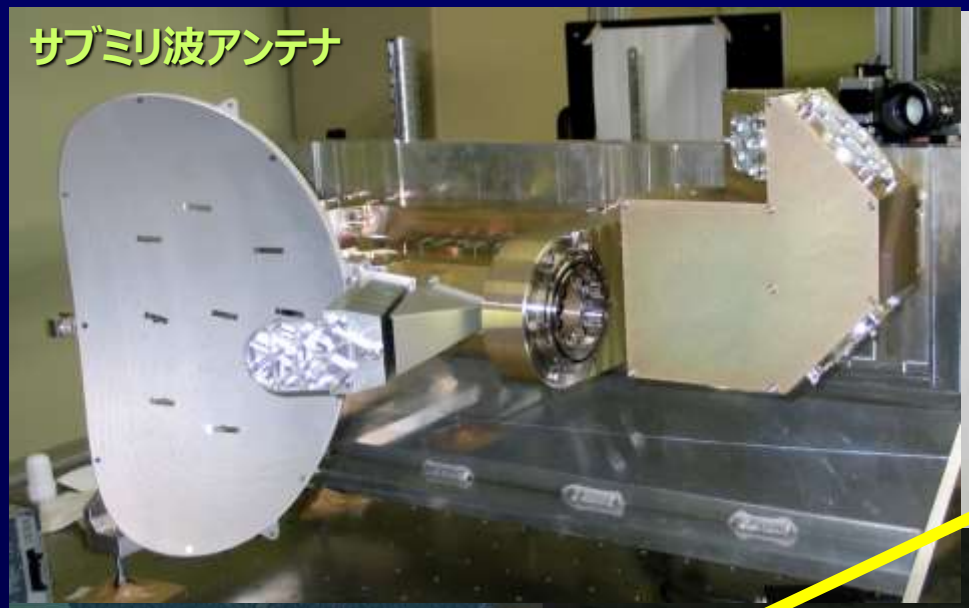
SMILESの新規開発要素

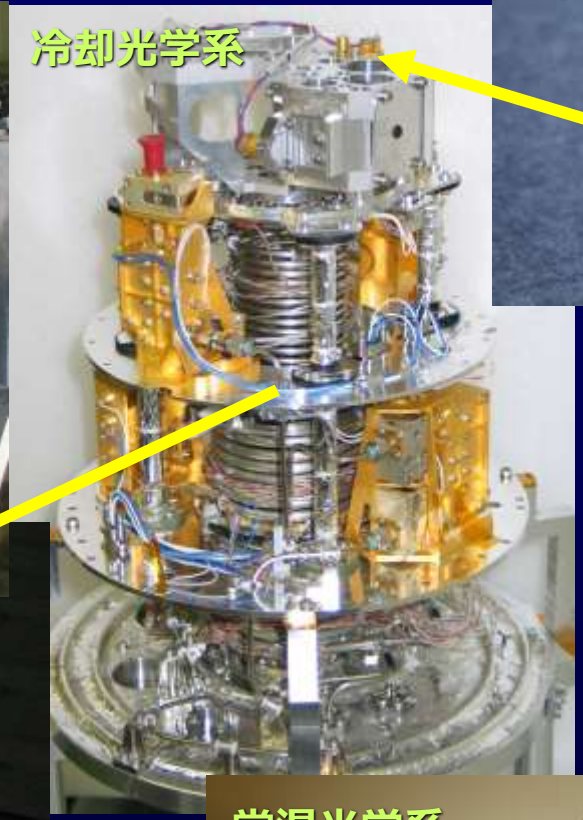
宇宙用としては世界初!!

- 宇宙用4K極低温機械式冷凍機の開発及び実証(2段スターリング冷凍機，ジュール・トムソン冷凍機，軌道上ライフ1年以上)
- 宇宙用640GHz帯超伝導SISミクサの開発及び実証（ミクサ雑音温度DSB：約60K，受信機システム雑音温度：<500K)
- 宇宙用サブミリ波アンテナ及び光学系の開発及び宇宙実証（高ビーム効率アンテナ，低損失ビーム伝送系，高精度サブミリ波測定技術）

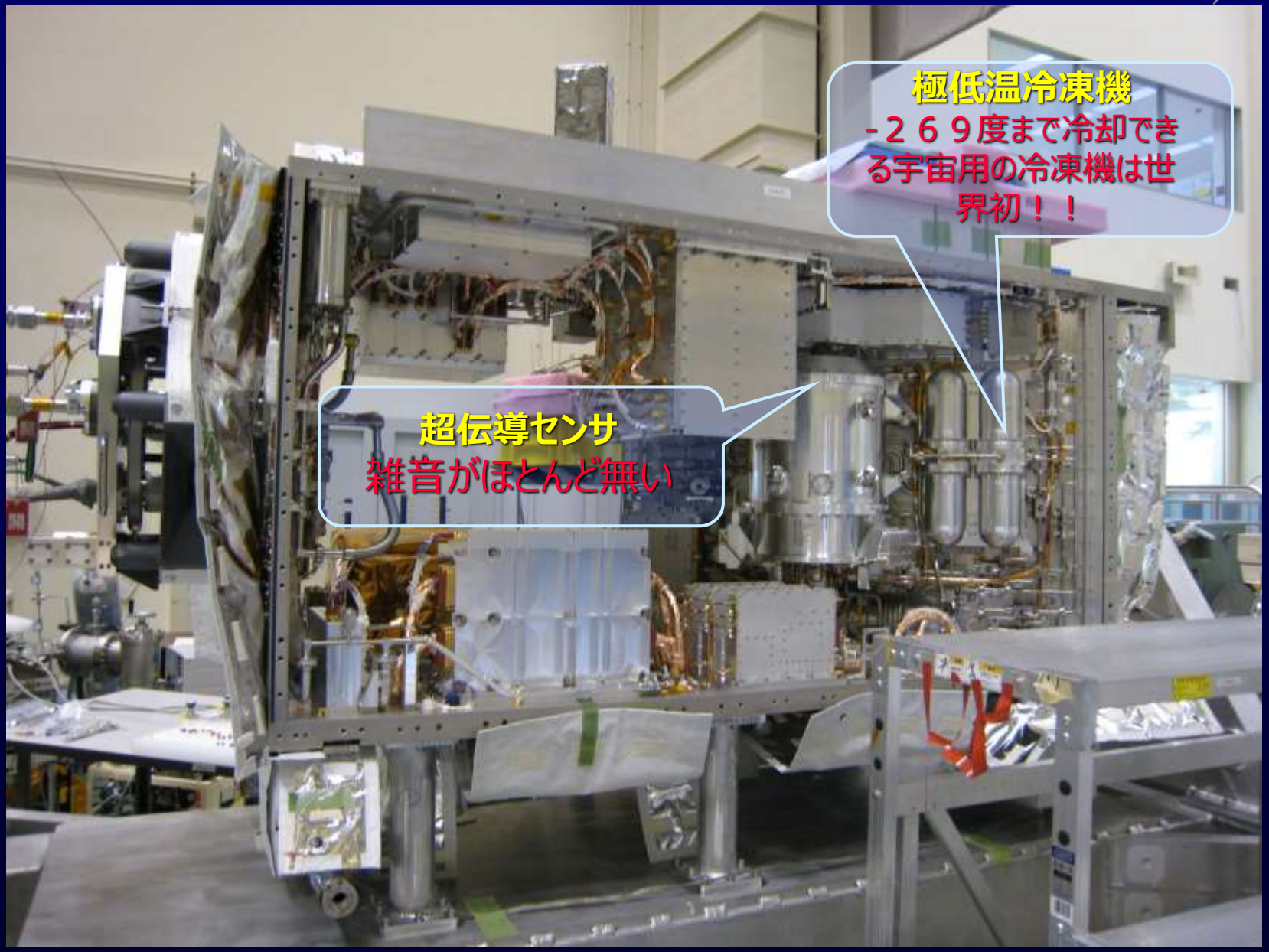


JEM/SMILESのサブミリ波光学コンポーネント



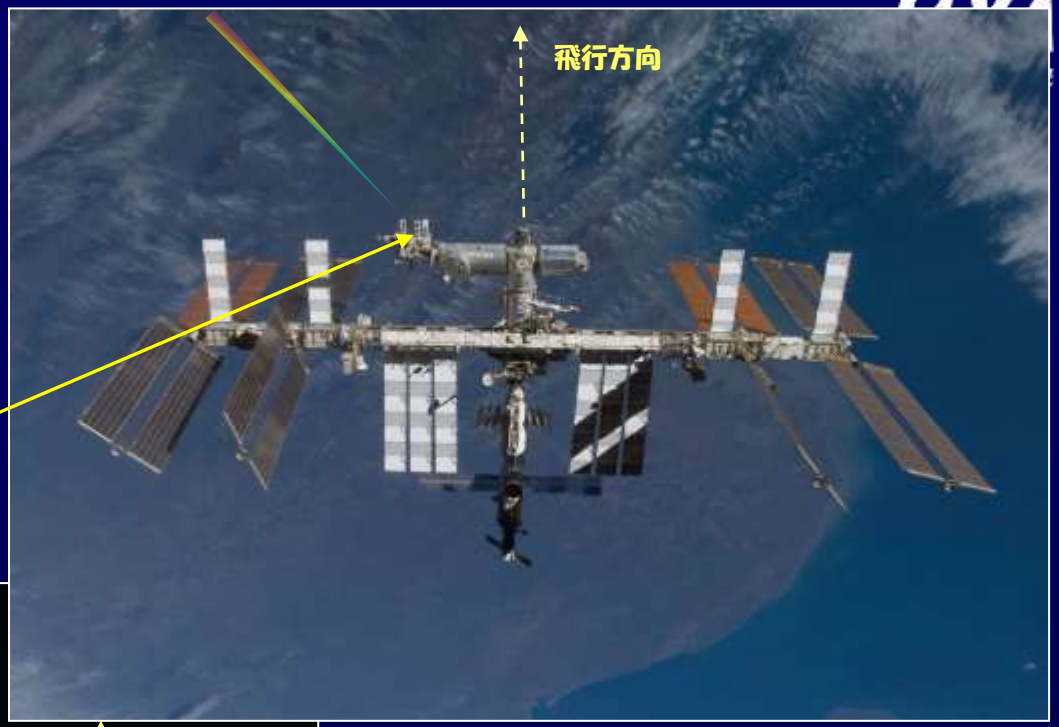


スマイルズ内部の秘密を公開！？

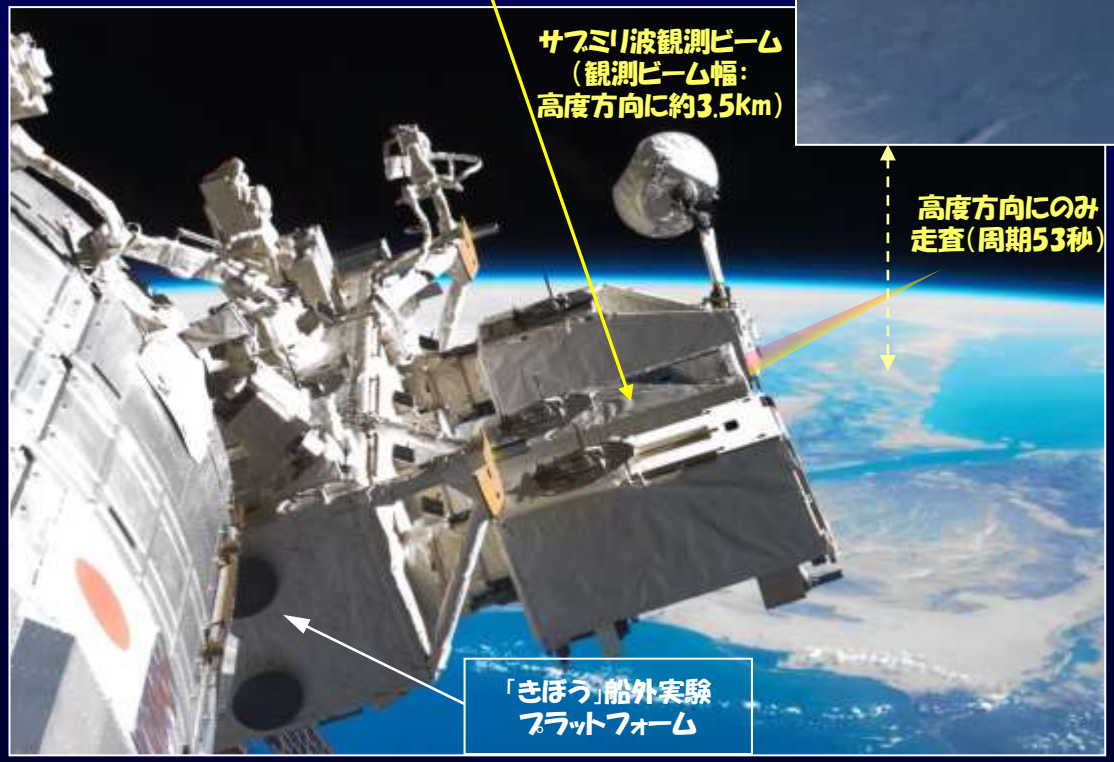


新型のH-IIBロケット試験機にスマイルズを搭載

宇宙ステーションに取り付けられていたスマイルズ



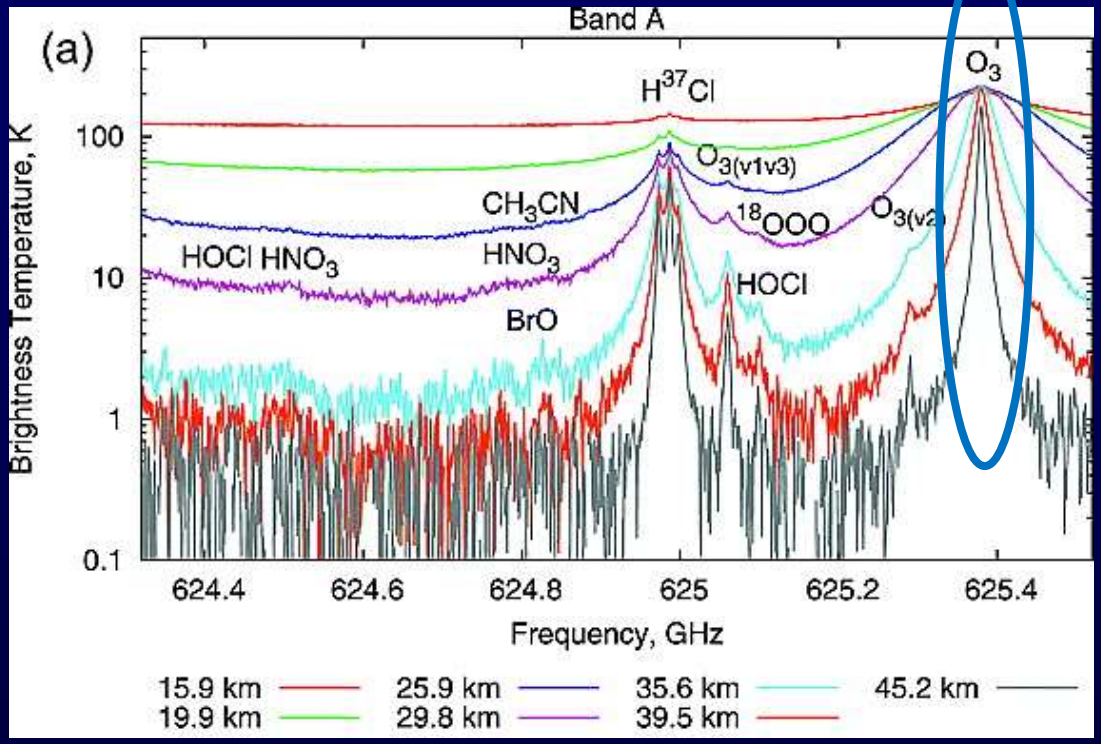
スマイルズ



- SMILESの主な特徴
  - 構成：超伝導SISミクサを持つ640GHz帯リム放射サウンダ
  - 大きさ：0.79m (W) × 1.07m (H) × 1.85m (L)
  - 質量：475 kg （実測）
  - 軌道上寿命：1年以上（機械式冷凍機の動作保証）
  - 開発期間：概念設計から13年

SMILES（超伝導サブミリ波リム放射サウンダ）

- サブミリ波： “周波数300 -3,000 GHz” (”波長1 mm – 0.1 mm”)の電波



（観測スペクトル）

Kikuchi et al. (2008)

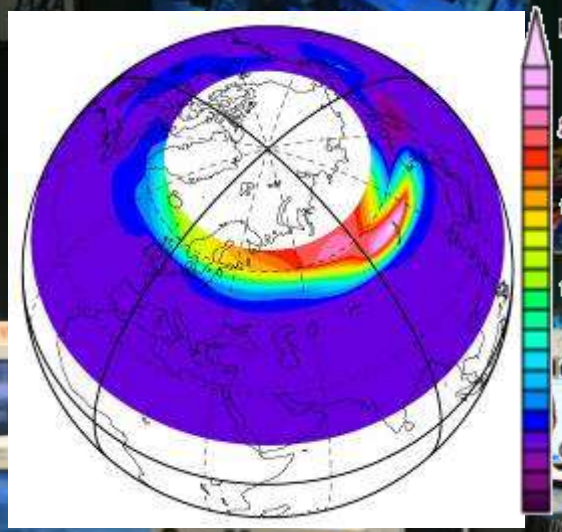
- SMILES バンドA で2009 年10 月12 日に北緯23.3 度・東経173.83 度(ハワイ島西方 約2,000km)を観測した輝度温度スペクトル

- 地球大気から発せられる微弱な**サブミリ波**を捉える高感度な検出器（**超伝導ミクサ**）
- 検出器の雑音を理論限界近くまで抑えるための**機械式冷凍機(-> 4K)**

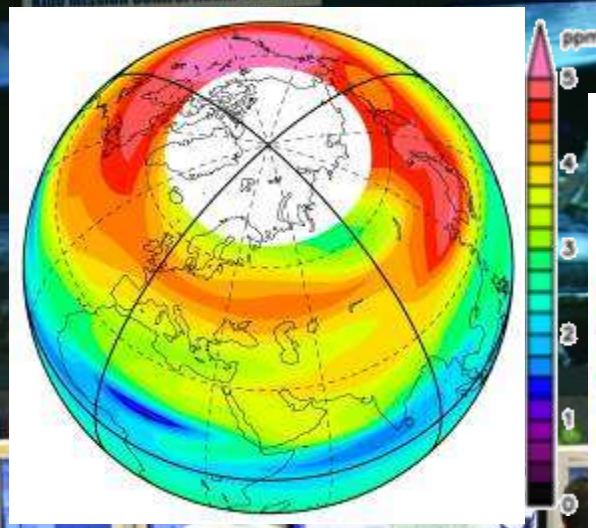
- **これまでの衛星観測に比べて一桁高い観測精度**（~1%)を実現!
- ISSが太陽非同期であるため、**異なるローカル時刻を観測**可能!

宇宙ステーションから地球大気のオゾン層などを監視する装置を開発しました

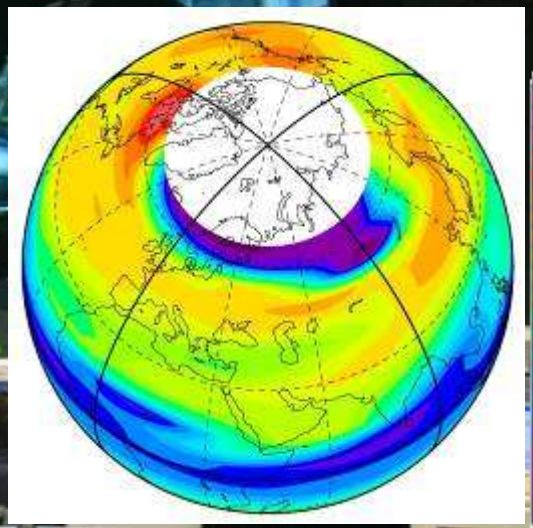
「地球のオゾン層を破壊する仕組みがわかります」



一酸化塩素



オゾン



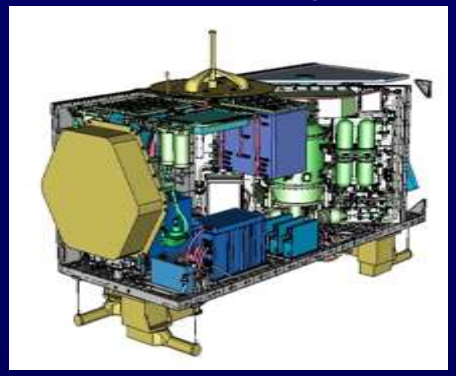
塩化水素

観測後はX線天文衛星のために
宇宙用の冷凍機の寿命試験をしました.

JAXAにおけるサブミリ波観測と技術

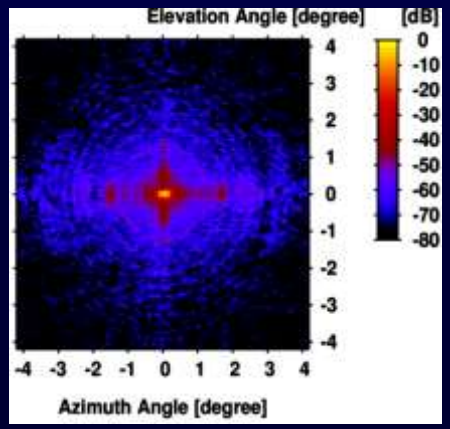
国際宇宙ステーションから高層大気のオゾン等を観測し、大気環境変動を解明するために超伝導センサを持つ高感度なサブミリ波（640GHz帯）受信機を搭載するJEM/SMILESを開発した。その性能を地上で検証のためにJAXAでは以下の新しい測定技術を開発する必要があった。

① サブミリ波帯アンテナやミラーの反射損失から生じるジュール損失によるシステム雑音の実測評価
② サブミリ波帯アンテナ放射特性の実測評価、集束ビーム給電系伝送ビームの実測と評価



JEM/SMILES

サブミリ波帯検証技術は実用としては世界初



SMILESで実施したサブミリ波性能試験の様子（受信機性能、近傍界測定）

ミリ波・テラヘルツ波衛星ミッションと高精度アンテナ

【獲得すべきキー技術】
・長期形状安定な軽量高精度鏡
<10μm rms@80cmの精度
・テラヘルツ波観測機器の技術成熟度向上

640GHz

JEM/SMILES(JAXA)
ISS/JEM/EF Payload

アルミニウム合金
A7075-T7351

190, 562GHz

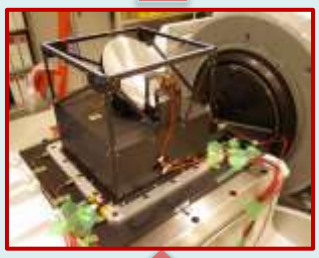
Rosetta/MIRO
彗星(NASA)

600, 1200GHz

惑星大気
分光観測

JUICE/SWI
(ESA/MPS/NICT)

アルミニウム合金
(RSA-443:過共晶Al-Si合金)



500GHz

テラヘルツセンシングシステム基盤
技術研究（総務省受託研究）

CAGOME(JAXA ISAS/R&D/NICT/府大)
（カーボン鏡技術材料の宇宙技術実証）

テラヘルツ観測機器
の宇宙実証

<2THz

AMSR後継機テラヘルツバンド,
SMILES2,
火星宇宙天気・気候・水環境
探査(MACO)計画
/IceMapper サブペイロード,
超小型リモセン衛星群

カーボン鏡
(CFRP)

89GHz

AMSR-E (JAXA)
（マイクロ放射計）

94GHz

EarthCARE (JAXA)
（雲、エアロゾル観測）

国内の宇宙用カーボン鏡(CFRP)の技術はミリ波まで

テラヘルツに対応させるため
にさらなる高
精度化

アルミニウム合金

50-400GHz

極低温
冷却鏡

LiteBIRD (JAXA/ISAS)
（宇宙マイクロ波背景放射CMB偏光観測）

4. テラヘルツ波観測技術実証の意義(1/6)

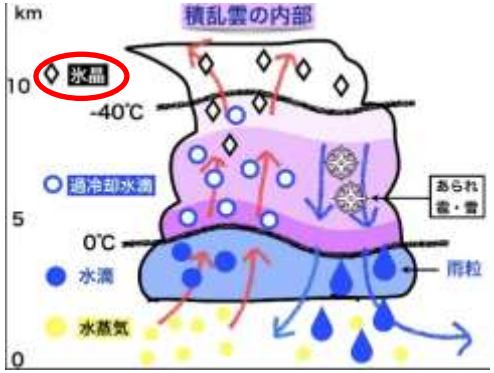
【テラヘルツ氷雲観測による気候モデルの精緻化への貢献】

- 地球温暖化の影響で頻発する集中豪雨による洪水被害軽減の必要性は近年一層高まっている. そのため, 数値気象モデルによる降水予測情報も洪水被害軽減には欠かせない. 降水予測の精度向上にはリモートセンシング観測より得られる広範囲な水蒸気等の分布と時間変動情報が有効である.

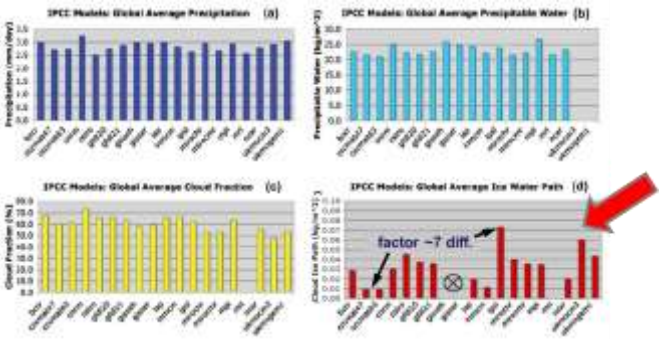
- 特に積乱雲は激しい気象現象を引き起こすため, 防災の観点からは警戒が特に必要な雲である. 積乱雲の雲頂部は成層圏下部にまで上昇し, 水蒸気は水雲から氷晶(氷雲)となる. 積乱雲が持つ全水蒸気量の推定にはこれら氷晶も無視することが出来ない.

- 一方で, 気候変動予測の高精度化における主要課題は雲のフィードバック機構の解明である. 特に定量的評価が不足で<u>モデル間相違が大きい(7倍の差)上部対流圏の氷雲の働きを解明する必要</u>がある.

発達した積乱雲の例



積乱雲の内部



Waliser et al. (2009), based on IPCC AR4 GCM simulations 1970-1994

IPCCモデルにおける氷雲循環のモデル依存性

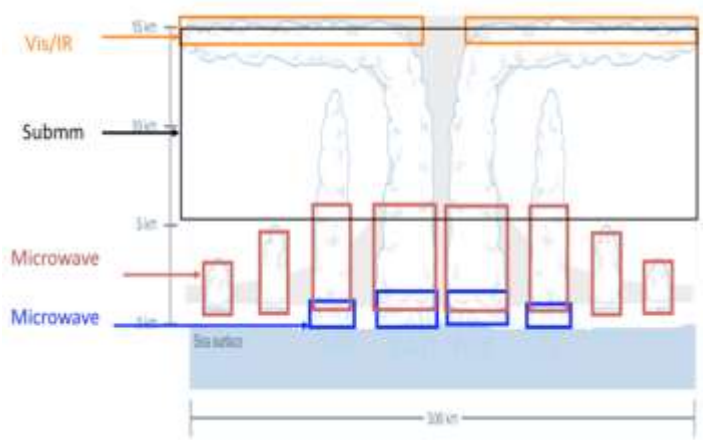
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/tenki_chuui/tenki_chuui_p2.html
http://irokata7.com/wp/2019/07/16/m2-raiu2/

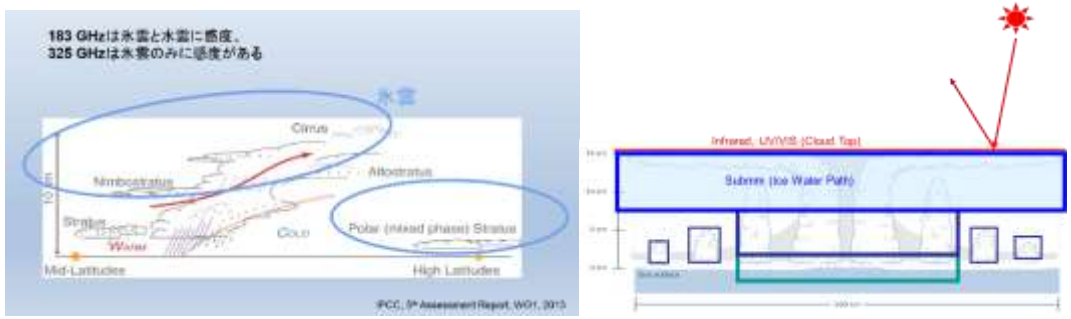
4. テラヘルツ波観測技術実証の意義(2/6)

- AMSR等のマイクロ波放射計(パッシブセンサー)は，大気中の積算水蒸気量や積算雲水量の推定に用いられている．従来のマイクロ波の観測は，上層雲をほぼ透過し，赤外・可視の波長帯で観測が困難な厚い上層雲に覆われた熱帯擾乱の下層の構造について観測している．

- TRMM等のマイクロ波の降雨レーダ(アクティブセンサー)は厚い雲の下の降雨(雨滴)観測に適した周波数を選択している．また，雲レーダ(アクティブセンサー)は水雲に対して散乱するより高い周波数のマイクロ波を選択している．そのため，対流圏上部の氷晶に対して感度が無い．

- <u>テラヘルツ帯の電波は氷雲と水雲に感度があり，適切に観測周波数を選ぶことでそれらを識別することが可能</u>である。



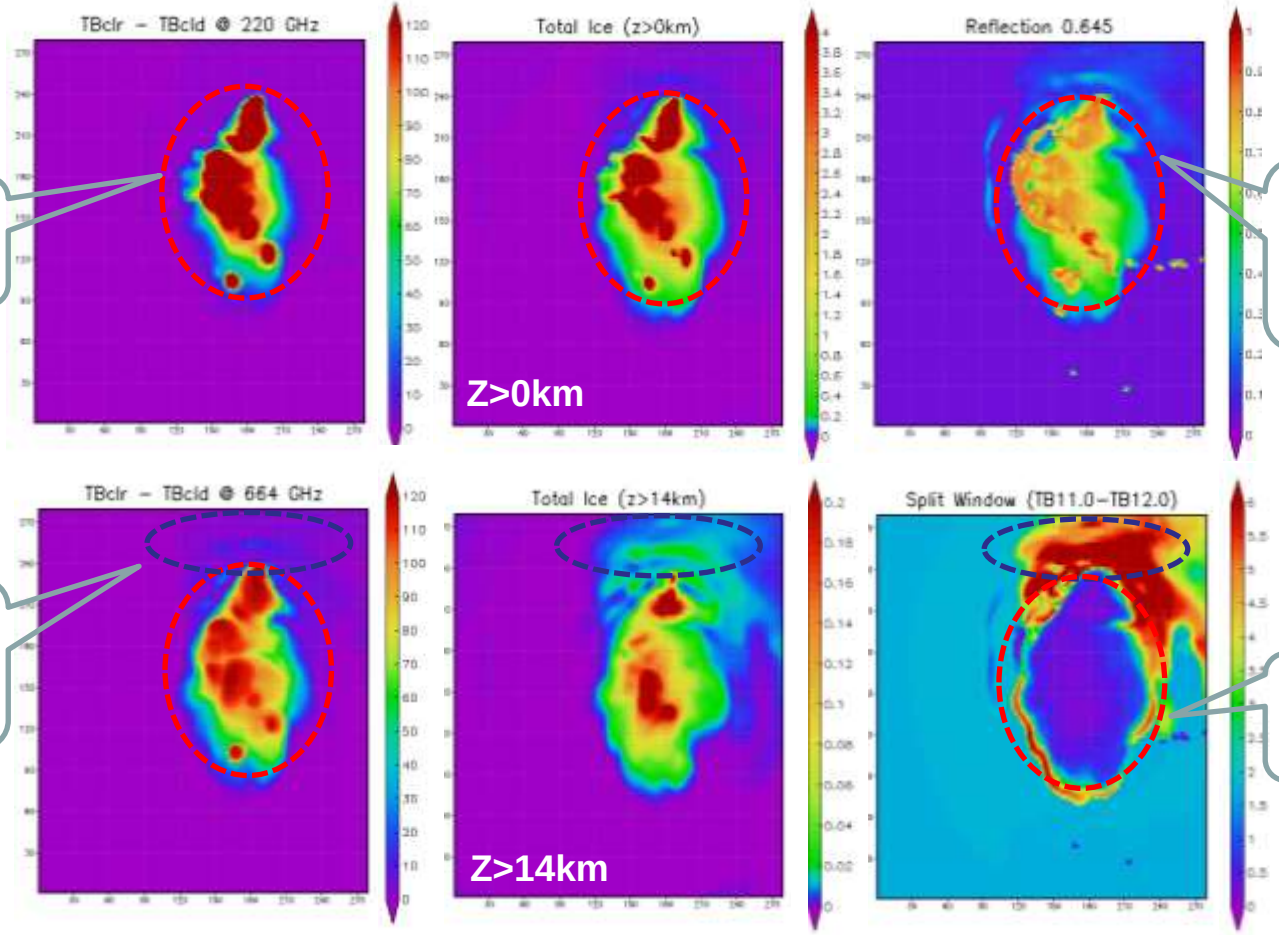


テラヘルツ帯による氷雲と水雲の識別
(サブミリ波の観測により上層雲の氷雲の鉛直カラム量が推定できる)

4. テラヘルツ波観測技術実証の意義(3/6)

（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）

テラヘルツ波で見た場合　←【雲氷量(真値)】→　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

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

薄い上層雲はテラヘルツと赤外で観測可能

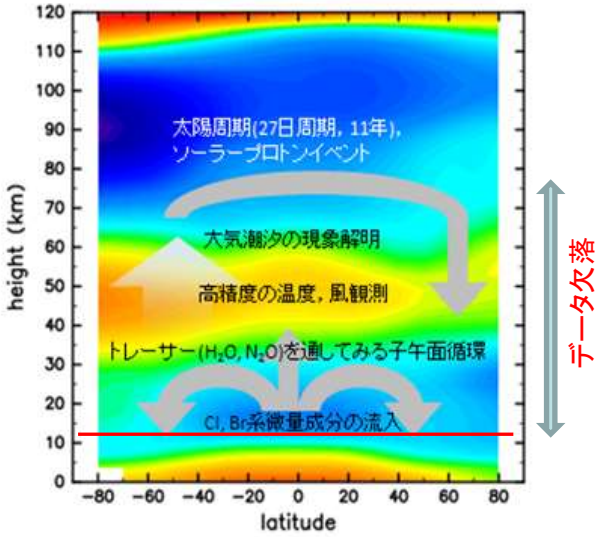
赤外は厚い氷雲に対しては飽和

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．

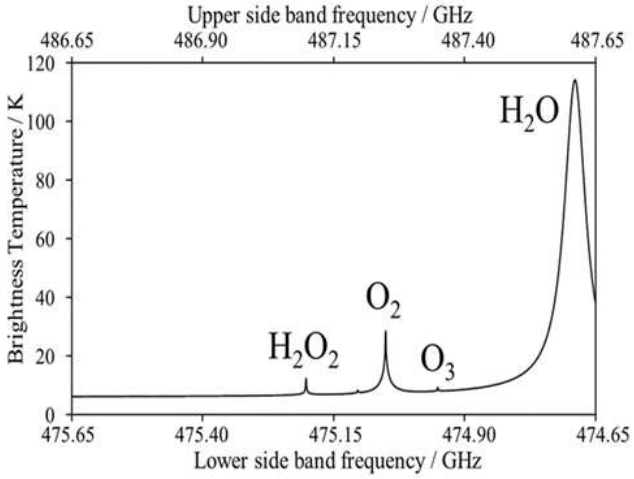
4. テラヘルツ波観測技術実証の意義(4/6)

【テラヘルツ分光観測】

- 高度約15kmから80kmに広がる中層大気(成層圏，中間圏)領域は，天気予報や将来予測のための道具として構築されている数値モデルにおいても重要な役割を果たしている．しかし，上部成層圏から中間圏にかけては信頼に足るデータが存在しておらず，温度場，風速場，微量成分分布に関するデータが欠落している．そのため，オゾンアセスメントレポートで将来のオゾン層予測に使われている化学気候モデルあるいはIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)で使われている一部のハイエンド将来予測モデルでさえも上部成層圏から中間圏にかけて大きな不確定性をもったまま気候トレンドの論議がなされているのが現状である．大気のスペクトル観測により，大気の各分子種を識別して分光パラメータを導出することで，観測点における温度場，風速場の導出が可能である．



1月の平均的な温度場の緯度・高度断面図



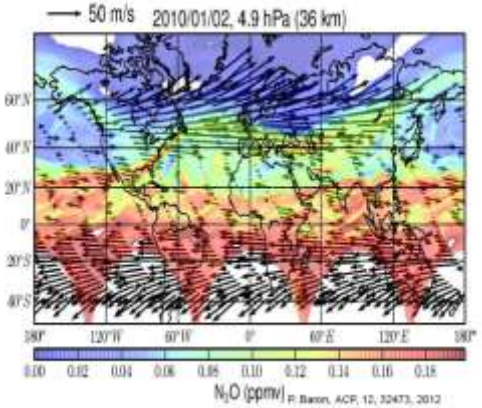
観測バンドの500GHz帯での輝線スペクトル(例)

4. テラヘルツ波観測技術実証の意義(5/6)

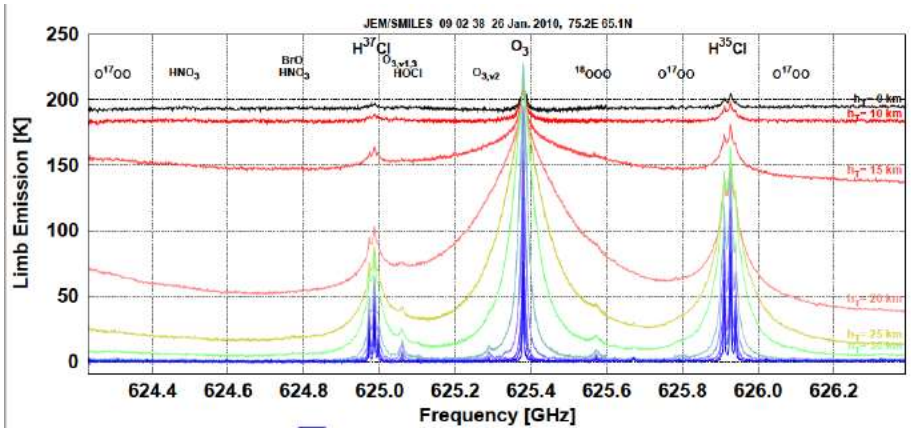
【成層圏風速場の観測】

- 中層大気の鉛直構造と観測するために有効な観測手段はテラヘルツ帯のリムサウンディングである．大気分子の吸収線スペクトルは，大気圧によって広がった線幅をもつため，観測する視線方向を鉛直に走査しながら分子スペクトルの形状をヘテロダイン技術による周波数分解能を利用して正確に測定する．

- 適切に観測周波数(大気分子種毎の輝線スペクトル)を選択して分光し，そのドップラー周波数から大気の視線方向速度(精度5m/s)を求め，線幅から圧力(高度)が求められる．また，リトリーバル処理により，大気分子の存在量や温度が高度毎に求められる．

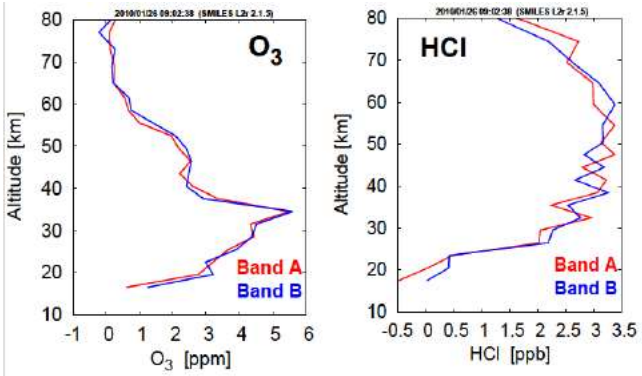


輝線のドップラー周波数から速度場を高度毎に算出



JEM/SMILES(640GHz)観測の例

リトリーバル処理



「超小型テラヘルツリモートセンシングのための基盤技術研究」技術課題及び到達目標（基本計画書より）

開発目標とするテラヘルツセンシングシステム

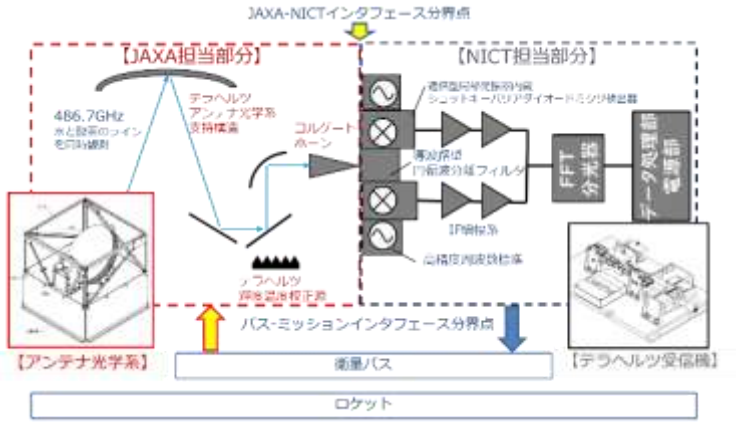
【技術課題】

ア）小型・軽量・低電力な衛星搭載テラヘルツセンシングシステム開発

小型衛星への搭載に向け、小型（一辺50cmの立方体以下）、軽量（10kg以下）、低電力(30W以下)であって、水蒸気と酸素スペクトルの同時観測が可能なヘテロダイン検波等を用いたテラヘルツセンシング分光システムを開発する。既存の類似の日本保有技術では国際宇宙ステーション搭載の超伝導サブミリ波サウンダ(平成21年打上げ)があるが、サイズ1.85m×1m×0.8m、質量は475kg、電力340Wであり、いずれも1/10倍程度となる大幅な改善が必要となる。

【到達目標】

・一辺50cmの立方体より小型、重量10kg以下、消費電力30W以下
・500GHz帯付近の電磁波を用い、衛星軌道から水蒸気と酸素スペクトルの同時計測が可能なヘテロダイン検波等による分光システム
・センシングシステムのシステム温度は10K以下
・衛星搭載品として必要な各種耐性を備えている
・得られる酸素と水素の存在量高度分布の解析シミュレーションが可能

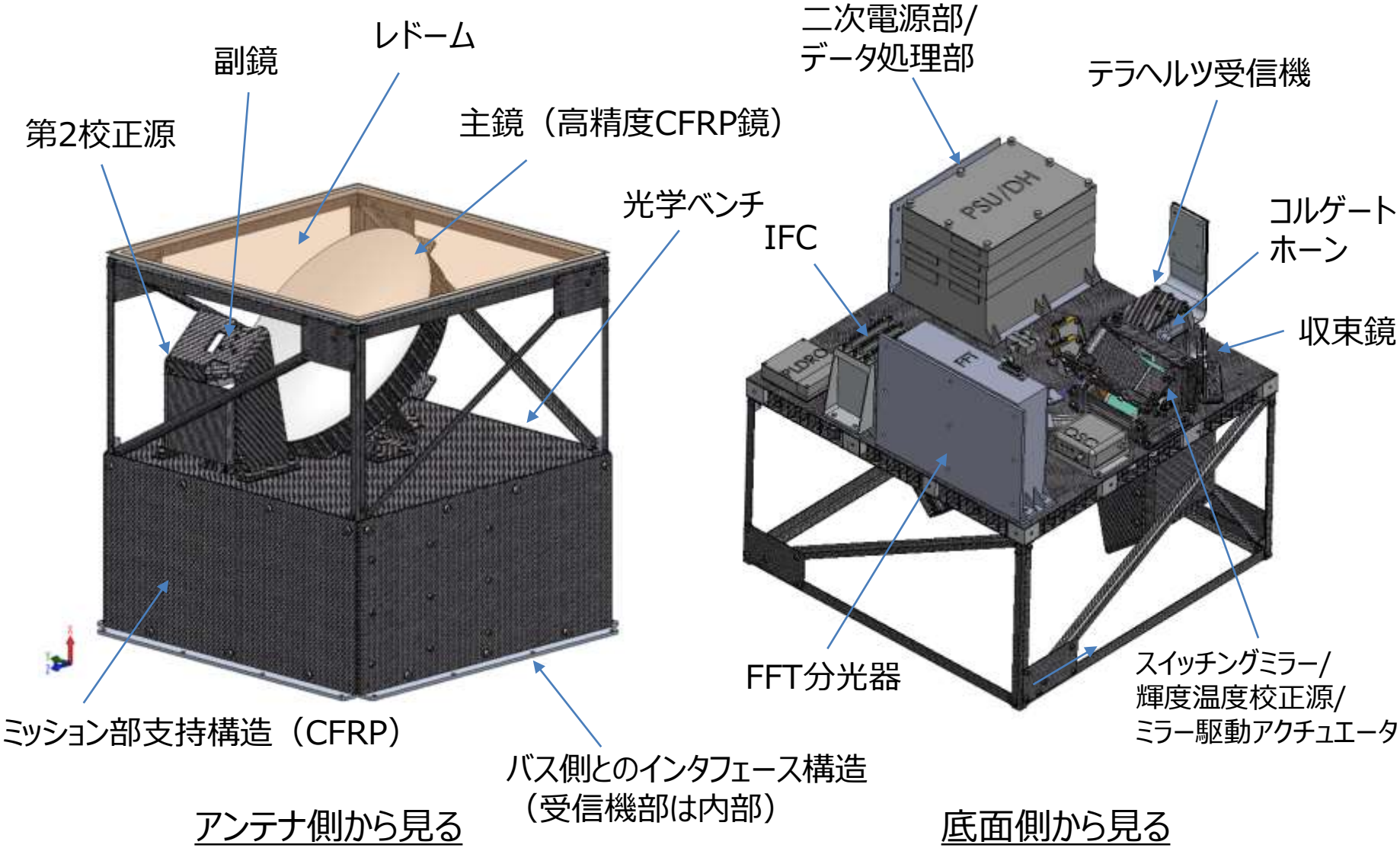


年次計画及び今年度の進捗状況

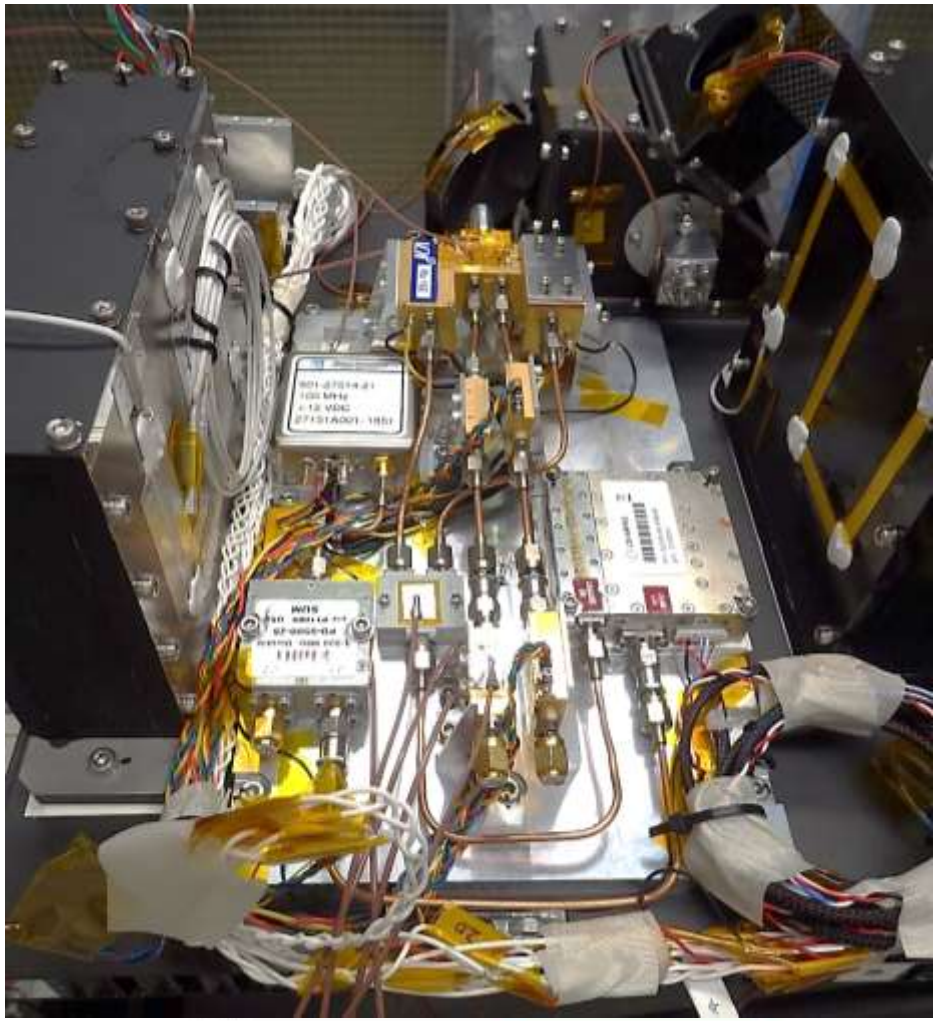
	2018年度		2019年度		2020年度
	BBM		**STM**		**PFM**
目的	**BBMの設計，製造を行い，CFRPによる高精度なアンテナ製造の実現性を確認する.**		**BBM結果をSTM設計に反映し，環境試験、RF系試験により，設計及び製造工程の妥当性を確認する.**		STM結果をPFM設計に反映しフライトに供することができるモデルを製造する.
設計・製造	**アンテナ光学系** **校正源** **光学系ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ** **バス部I/F構造** **全体構造**	**結果をSTM設計へ反映**	**アンテナ光学系** **校正源** **光学系ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ** **バス部I/F構造** **全体構造**	**結果をPFM設計へ反映**	アンテナ光学系 校正源 光学系ﾍﾞｰｽﾌﾟﾚｰﾄ バス部I/F構造 全体構造
	BBM製造		**STM製造**		PFM製造
試験・検証・評価	**寸法・質量測定** **BBM熱ひずみ測定** **鏡面ﾃｽﾄﾋﾟｰｽ測定**		**寸法・質量測定** **STM熱ひずみ測定** **振動試験，ｺﾘﾚｰｼｮﾝ** **熱真空試験，ｺﾘﾚｰｼｮﾝ** **衝撃試験** **アンテナ近傍界測定** **長期高真空さらし** **校正源反射損失測定** **電気性能試験(支援)**		寸法・質量測定 振動試験，ｺﾘﾚｰｼｮﾝ 熱真空試験，ｺﾘﾚｰｼｮﾝ 衝撃試験 アンテナ近傍界測定 EMC試験（支援） 分光試験（支援） 校正源特性測定 電気性能試験(支援)

※**太字**は実施済
赤字は実施中

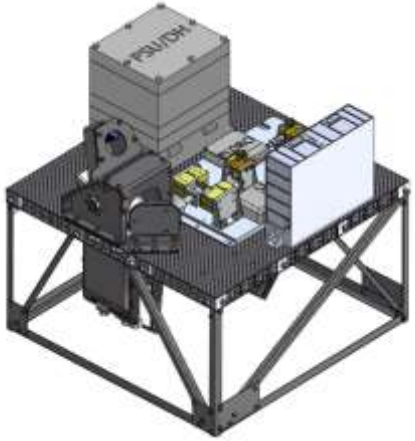
3.2.ミッション部全体構造と配置

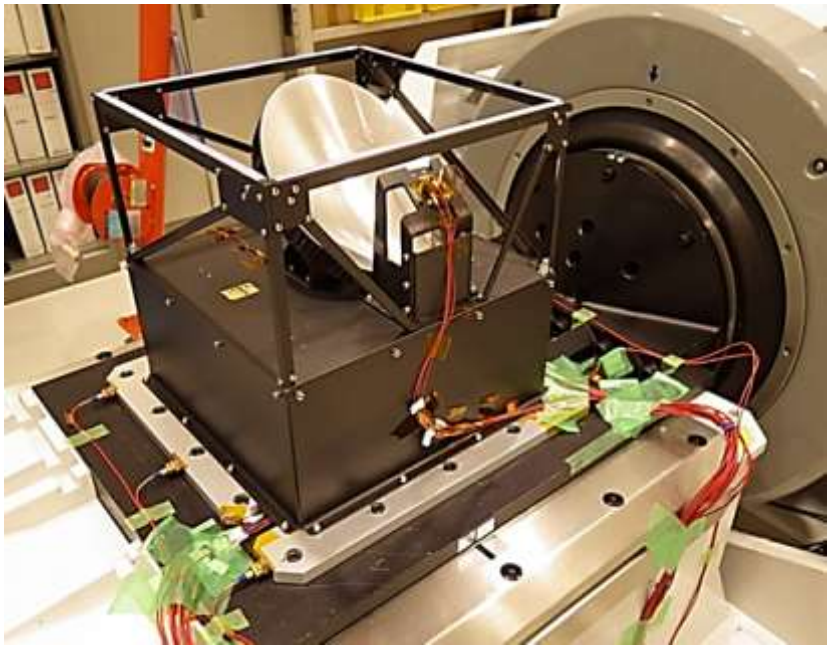


テラヘルツセンシングシステム基盤技術の研究開発



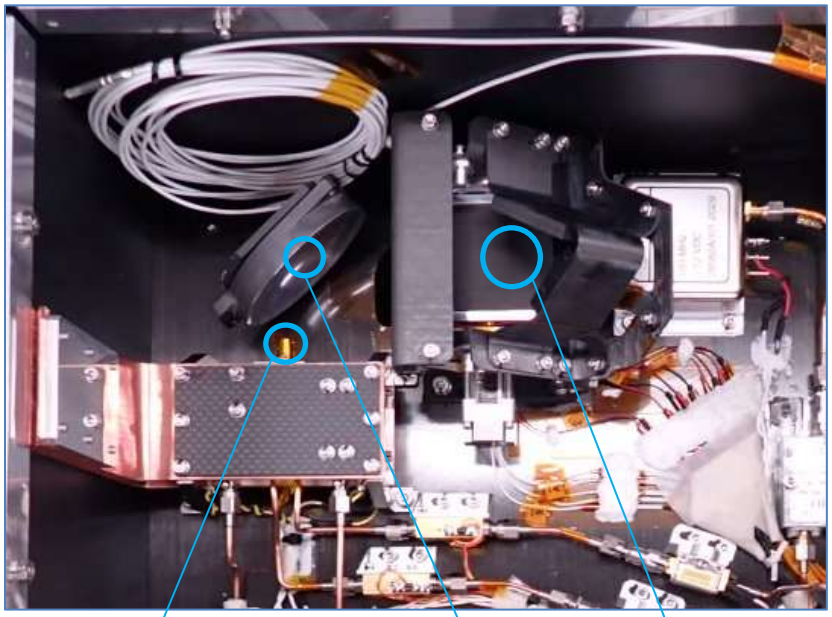
500GHz帯テラヘルツ受信機と輝度温度校正源

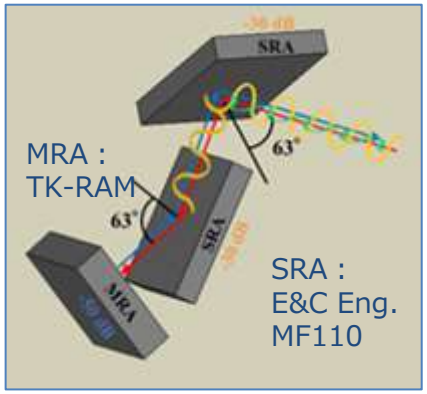


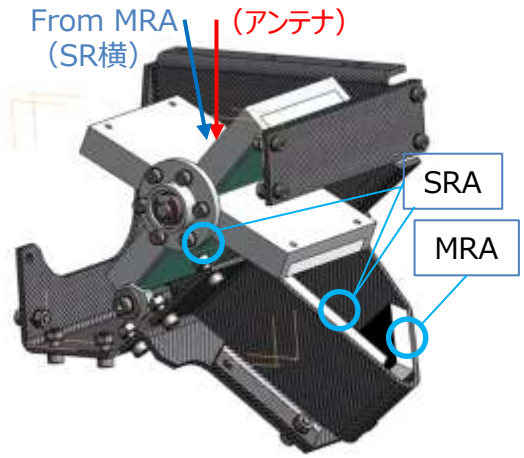


テラヘルツアンテナとミッション部構造全体

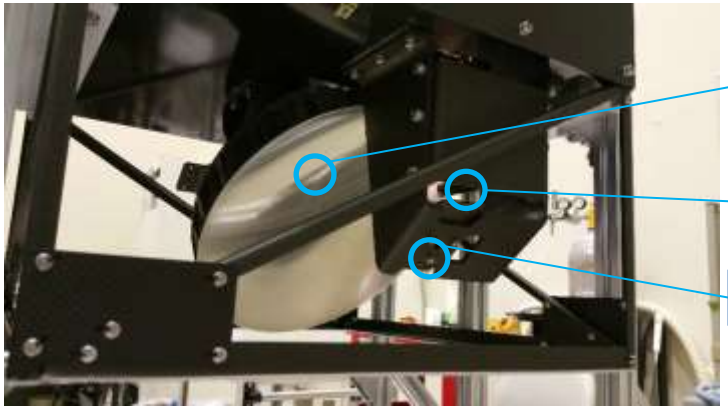
4.3.テラヘルツ輝度温度校正源の開発



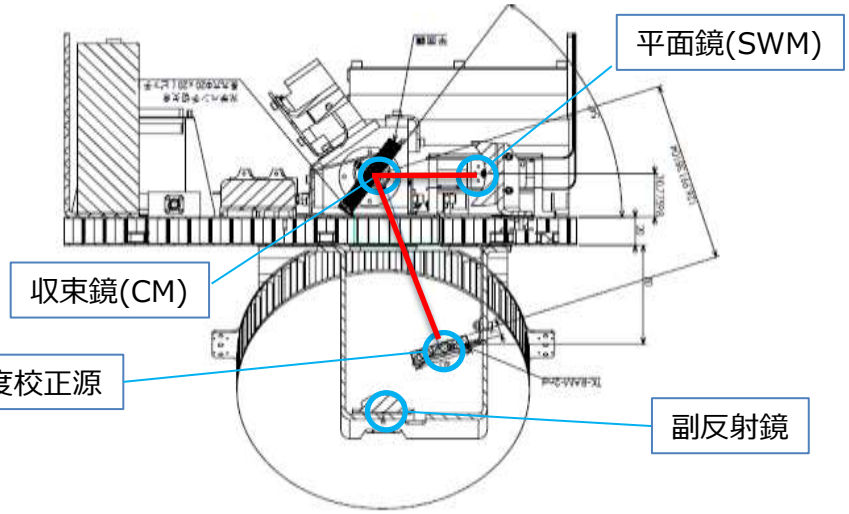




・輝度温度校正源の両偏波対応 → STMで対応済
・PFMでは第2輝度温度校正源を搭載 → 副反射鏡横に配置したMRAを校正源として使う．MRAには物理温度センサを配置．設計結果は下図の通り．



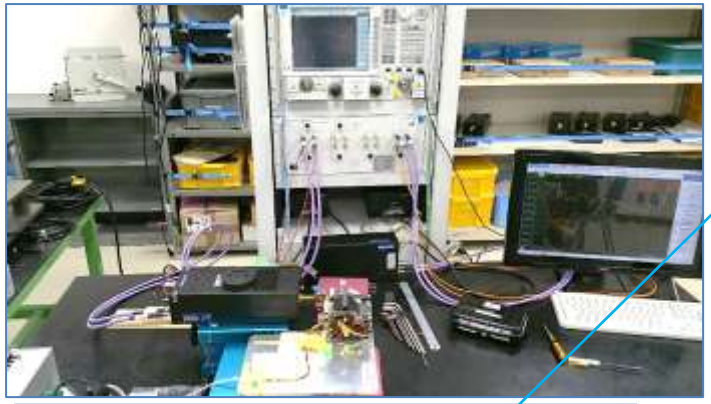
第2輝度温度校正源

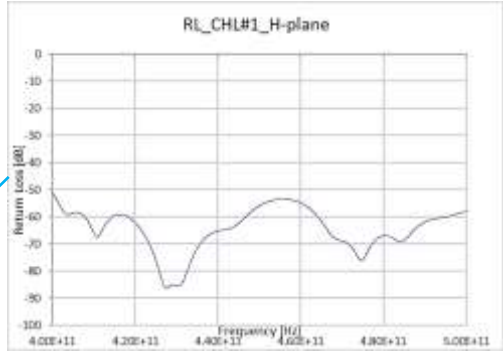


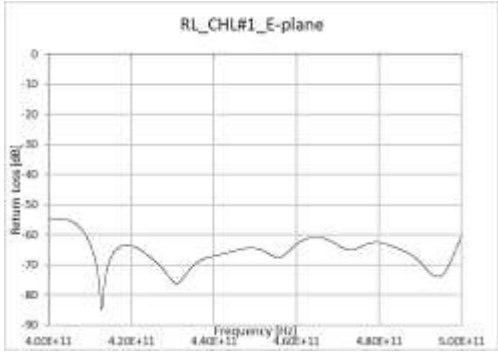
【第2輝度温度校正源の配置】
物理温度が異なる電波吸収体（TK-RAM）を第2校正源として副反射鏡横に配置．

5.2.校正源（PFM）の反射損失測定

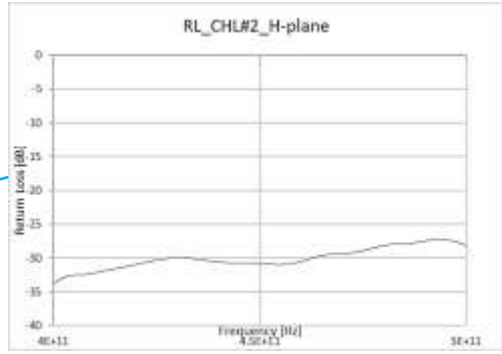
校正源（PFM）の反射損失測定の様子

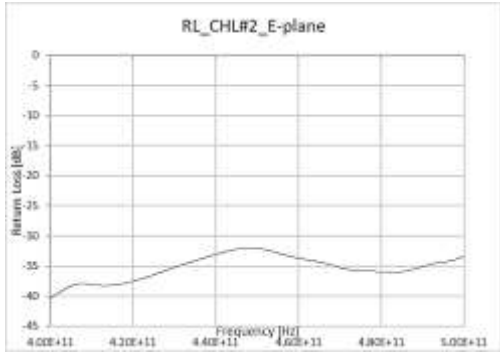






校正源（PFM）の反射損失（2直線偏波）





第二校正源（PFM）の反射損失（2直線偏波）

NICTミリ波棟のVNAにて輝度温度校正源（CHL#1）と第二校正源(CHL#2)の反射損失を測定した．測定は新規に製作した試験用光学系（アルミ）治具を用いて，全反射基準に対する反射損失を求めた．結果を右の表に示す．輝度温度校正源の反射損失は60dB以上あることが確認できた．また，第二校正源の反射損失も25dB以上あることが確認された．

校正源（PFM）の反射損失測定結果

反射損失/周波数	474.65GHz	481.15GHz	487.65GHz
CHL#1/H偏波	-76.2dB	-67.2dB	-64.5dB
CHL#1/E偏波	-64.6dB	-62.8dB	-66.6dB
CHL#2/H偏波	-29.0dB	-28.1dB	-27.8dB
CHL#2/E偏波	-35.8dB	-36.0dB	-35.6dB

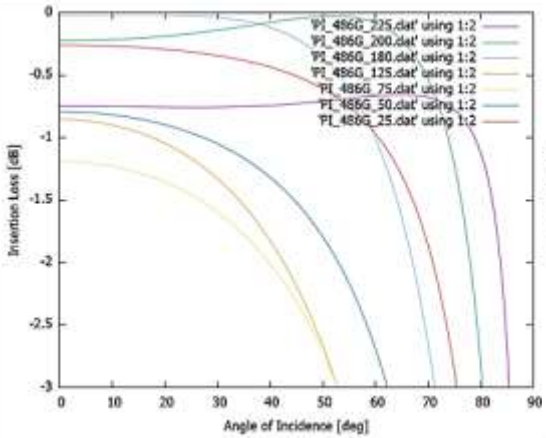
5.3.アンテナPFM用レドーム材料の透過損失測定

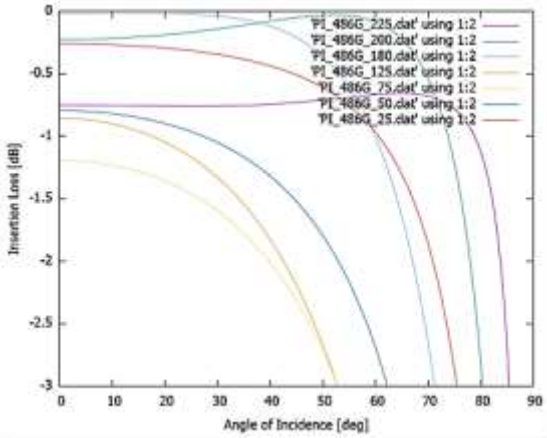
THz-TDSによるアンテナレドーム材料の透過損失の再測定

NICTのTHz-TDSを用いて，アンテナPFM用レドーム材料として製造した積層ポリイミドフィルム（東レ・デュポン社特注）の透過損失と複素誘電率を測定した．計算により損失が少ないと予想される180μmの厚さに近い製品Kapton 700Hは厚さが175μmであるが，現在は製造されていない．そこで，融着で175μm厚のポリイミドフィルムを試作し，その透過損失を実測して評価することにした．（STMで使用したフィルムは中国製であり，誘電率から見て，ポリイミドではない可能性が高いため，PFMでは使用しない）

写真1: 試料取り付け装置

写真2: THz-TDS装置





ポリイミドフィルムの厚さの違いによる透過損失と入射角
（486GHzにおける計算値）

THz-TDSによる複素誘電率（ε）の決定

テラヘルツ時間領域分光法

(Tera Hertz-Time Domain Spectroscopy, THz-TDS)

THzパルス波をサンプルに入射させ，サンプルを透過した後のTHzパルス波の波形を時間分解計測し，その波形をフーリエ変換することにより周波数ごとの振幅と位相を得る分光法

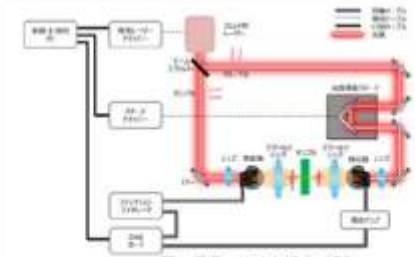


図 標準システム構成（例）

ポリイミドフィルムの
複素誘電率と透過損失（TDSによる487.9GHz実測値）

ポリイミド フィルム厚 [μm]	複素誘電率	透過損失[%] @487.9GHz	備 考
225	2.529-j0.147	9.665±1.379	アズワン製（STM用）
125	3.539-j0.014	19.838±0.325	Kapton 500H
175	3.591-j0.004	9.433±0.597	Kapton 700H
積層175	3.463-j0.002	11.584±0.468	Kapton 積層試作

・STMのレドームは225μm厚のポリイミドフィルム（中国製）を使用した．

・積層175μmはKapton 700Hより1%ほど損失が大きいが，本製品をPFM用のレドーム用材料とする．

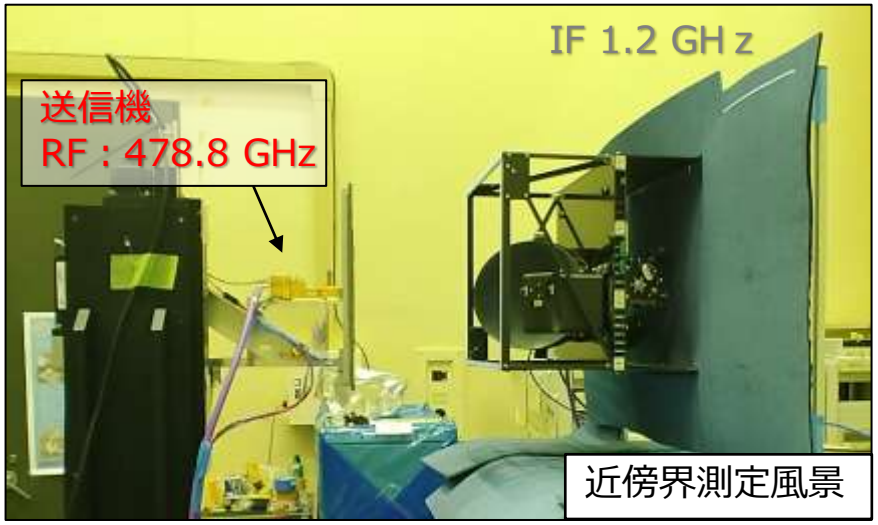
5.4.アンテナ光学系の損失

アンテナ光学系PFMの鏡面精度測定結果，レドーム透過損失の測定結果，試作鏡面の反射損失測定結果，ミスアライメント（設計値）から予測されるアンテナ光学系の損失計算を以下の表に示した．予測されるアンテナ光学系の損失は0.84dBであった．一方で，アンテナ光学系と受信機を結合した状態で測定されたシステム雑音温度の上昇分から推定されるアンテナ光学系の損失は1.16dBであった．

アンテナ光学系の損失（予測値）

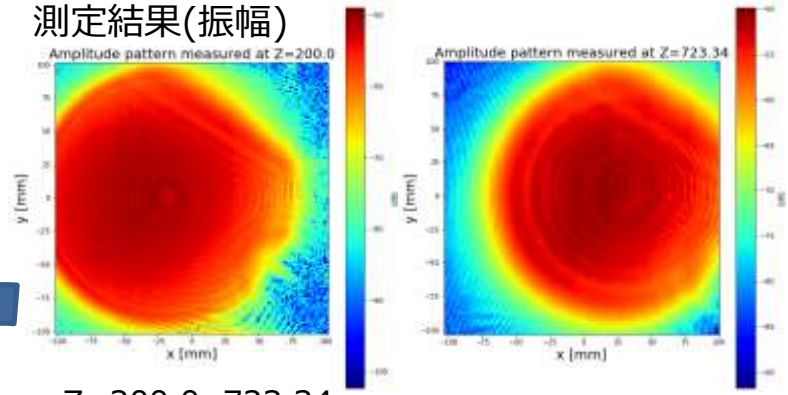
Signal Band (REF-TRN)		Origin of Noise	Conditions	For Each Origin					Accumulated		
				Gain [dB]	Transmission	T(phys) [K]	T(b) [K]	Noise [K]	Gain [dB]	Noise [K]	
FOV	ATMOS	Illumination Efficiency	90.00%	-0.25396	0.94320	215	203.6	11.56462	-0.25396	203.60	
	LN2	Illumination Efficiency	90.00%	-0.25396	0.94320	77.3	######	3.76435	-0.25396	66.27	
	Radome	Surface Error Loss	N/A	0.00000	1.00000	320	308.5	0.00	0.000	66.27	203.60
		Diffraction Loss	N/A	0.00000	1.00000	320	308.5	0.00	0.000	66.27	203.60
		Insertion Loss	PI: THz-TDS, 積層t:0.175mm -> 11.58%	-0.53469	0.88416	320	308.5	35.74	-0.535	94.34	215.76
		Mode Matching Loss	N/A	0.00000	1.00000	320	308.5	0.00	-0.535	94.34	215.76
		Polarization Coupling Loss	N/A	0.00000	1.00000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		Spillover Loss	EL: -40dB	-0.00043	0.99990	320	308.5	0.03	-0.535	94.36	215.77
		Coupling Loss	N/A	0.00000	1.00000	320	308.5	0.00	-0.535	94.36	215.77
	MR	Surface Error Loss	5.7um(rms)	-0.05715	0.98693	310	298.5	3.89	-0.592	97.01	216.83
		Diffraction Loss	PSL:-40dB	-0.00043	0.99990	310	298.5	0.03	-0.593	97.03	216.84
		Ohmic Loss	Al_APS:0.363%	-0.01579	0.99637	310	298.5	1.08	-0.609	97.77	217.14
		Mode Matching Loss	N/A	0.00000	1.00000	310	298.5	0.00	-0.609	97.77	217.14
		Polarization Coupling Loss	N/A	0.00000	1.00000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		Spillover Loss	EL: -40dB	-0.00043	0.99990	310	298.5	0.03	-0.609	97.79	217.15
		Coupling Loss	dz:0.05mm , dx:0.05mm , dth:0.01deg, w:8.26mm	-0.00009	0.99998	310	298.5	0.01	-0.609	97.79	217.15
	SR	Surface Error Loss	4.07um(rms)	-0.02914	0.99331	310	298.5	1.99	-0.638	99.12	217.69
		Diffraction Loss	PSL:-40dB	-0.00043	0.99990	310	298.5	0.03	-0.639	99.14	217.69
		Ohmic Loss	Al_APS:0.363%	-0.01579	0.99637	310	298.5	1.08	-0.654	99.87	217.99
		Mode Matching Loss	N/A	0.00000	1.00000	310	298.5	0.00	-0.654	99.87	217.99
		Polarization Coupling Loss	N/A	0.00000	1.00000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		Spillover Loss	EL: -40dB	-0.00043	0.99990	310	298.5	0.03	-0.655	99.89	218.00
		Coupling Loss	dz:0.05mm , dx:0.05mm , dth:0.01deg, w:5.5mm	-0.00009	0.99998	310	298.5	0.01	-0.655	99.89	218.00
	SWM	Surface Error Loss	2.6um(rms)	-0.01189	0.99727	300	288.5	0.79	-0.667	100.40	218.19
		Diffraction Loss	PSL:-40dB	-0.00043	0.99990	300	288.5	0.03	-0.667	100.42	218.19
		Ohmic Loss	Al_5052:0.28%	-0.01218	0.99720	300	288.5	0.81	-0.679	100.95	218.39
		Mode Matching Loss	N/A	0.00000	1.00000	300	288.5	0.00	-0.679	100.95	218.39
		Polarization Coupling Loss	N/A	0.00000	1.00000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		Spillover Loss	EL: -40dB	-0.00043	0.99990	300	288.5	0.03	-0.680	100.97	218.40
		Coupling Loss	dz:0.05mm , dx:0.05mm , dth:0.01deg, w:5.7mm	-0.00009	0.99998	300	288.5	0.01	-0.680	100.97	218.40
	CM	Surface Error Loss	9um(rms)	-0.14247	0.96773	300	288.5	9.28	-0.822	106.99	220.63
		Diffraction Loss	PSL:-40dB	-0.00043	0.99990	300	288.5	0.03	-0.823	107.01	220.64
		Ohmic Loss	Al_APS:0.363%	-0.01579	0.99637	300	288.5	1.05	-0.839	107.67	220.88
		Mode Matching Loss	Plane Mirror(Neg.)	0.00000	1.00000	300	288.5	0.00	-0.839	107.67	220.88
		Polarization Coupling Loss	N/A	0.00000	1.00000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		Spillover Loss	EL:-40dB	-0.00043	0.99990	300	288.5	0.03	-0.839	107.69	220.89
		Coupling Loss	dz:0.05mm , dx:0.05mm , dth:0.01deg, w:2.36mm	-0.00058	0.99987	300	288.5	0.04	-0.840	107.71	220.90
CHL	HOT	Reflectivity	0.0000005	-62.8	0.00000	300	288.5	288.54	-62.8	288.54	

5.8.アンテナ放射特性測定



測定

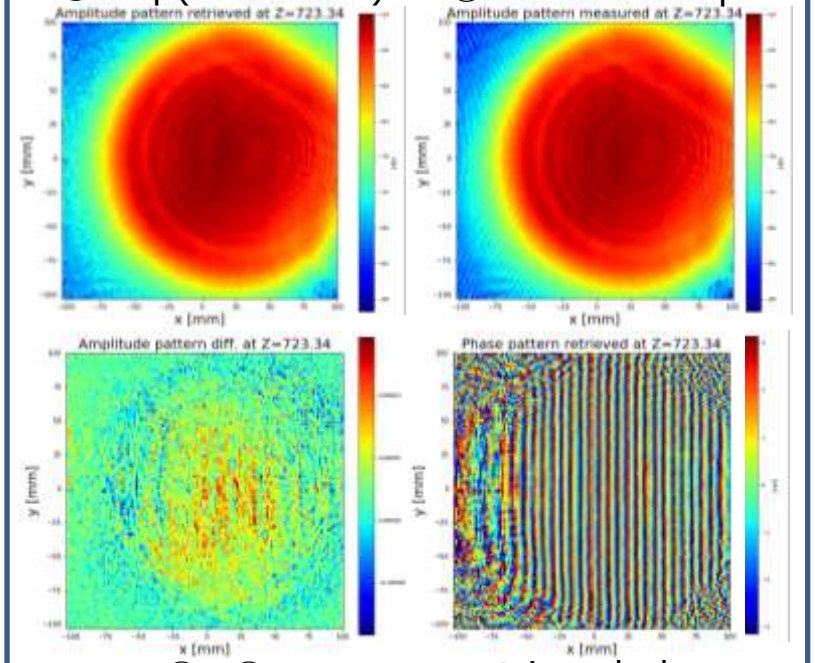
測定結果(振幅)



Z=200.0, 723.34 mm
Plane size　203.2 x 203.2 mm
Δx, Δy　1.6 mm

位相回復

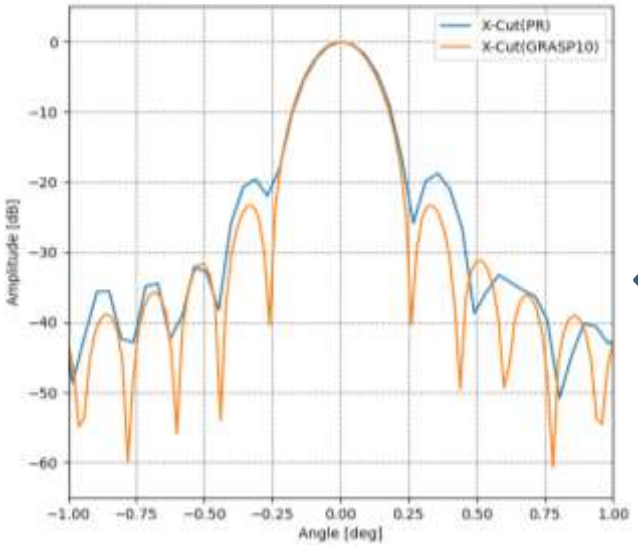
①amp(measured)　②retrieved amp



②−①　retrieved phase

近傍界→遠方界変換

遠方界 X-Cut

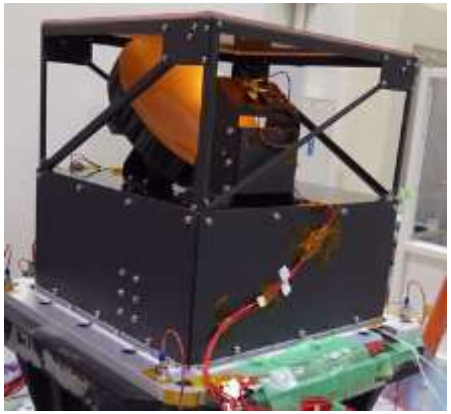


サイドローブがシミュレーションより高めの結果

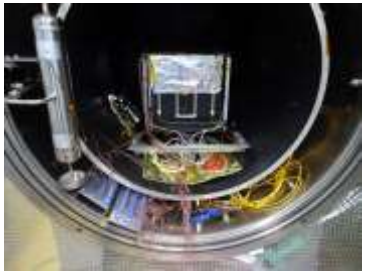
軽量センシングシステム構造の開発

オールCFRPで製作された軽量で高剛性なセンシングシステム全体構造

- 軽量センシングシステム構造をピッチ系高弾性炭素繊維で製作
  → 全体としてアンテナ光学系全体の熱歪みを抑える構造
- 搭載予定機器を含む全質量：8.65 kg
- ミッション部全体構造：D384 x W384 x H357mm
- 全体構造の最低固有振動数：224.27 Hz
  →衛星搭載機器の剛性要求を満足
- 静荷重に対する最小MS（安全余裕）：86
  → 十分安全な構造
- 受信機を搭載した状態で宇宙環境試験を実施し、試験前後で機器の機能性能が維持されていることを確認



超小型衛星搭載用
軽量センシングシステム構造

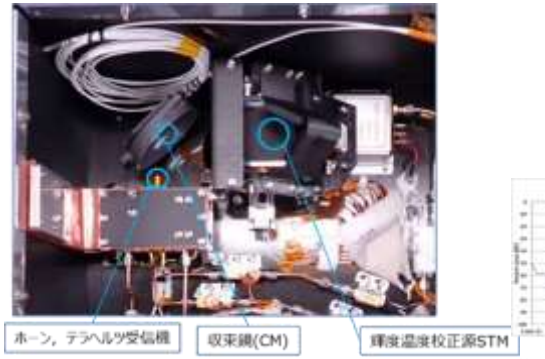


テラヘルツセンシングシステムの宇宙環境試験
（上：熱真空試験，下：振動試験）

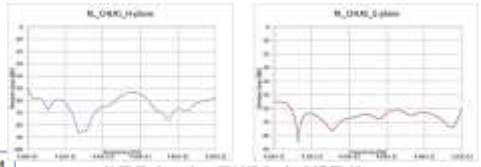
小型軽量テラヘルツ帯校正源の研究開発

磁気損失材料装荷の電波吸収体による輝度温度校正源

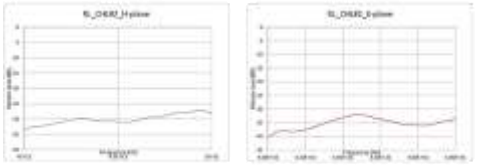
- 円偏波分離された2チャネルの受信機入力に対応する490GHz帯輝度温度校正源を開発
- 受信機校正のために第一校正源と異なる物理温度を持つ第二校正源も開発
- 校正源に使用した電波吸収体は、E&Cエンジニアリング社製の磁気損失材料装荷型のMF-110を機械切削したものを使用
- 開発した校正源の490GHz帯における反射損失：60dBの以上（要求60dB以上）
- 第二校正源の反射損失：25dB以上



↑開発した校正源と490GHz帯受信機の配置
（軽量センシングシステム構造内部）



校正源（PFM）の反射損失（2直線偏波）



第二校正源（PFM）の反射損失（2直線偏波）

テラヘルツVNAによる校正源の反射損失測定の
様子と測定結果→

軽量高精度テラヘルツセンシングシステム光学系の開発

高精度CFRPを用いたテラヘルツアンテナ光学系の特徴

・**熱変形の抑制**：ハニカムコア、アンテナ支持構造を含めて全て宇宙用の高精度CFRPアンテナ用に特注したプリプレグ（ピッチ系高弾性炭素繊維YSH-60Aとポリシアネートエステル系の樹脂NM-31の組み合わせて炭素繊維の体積含有率と弾性率をCTEが最小になるように調合したもの）を開発

・**金属反射面の成膜**：特殊なアンダーコート（酸化物セラミックと樹脂などの混合）をCFRP表面に塗布し、大気プラズマ溶射によるアルミニウム層の成膜を可能にした【特許出願済】。新しい成膜法（APS/ALショットピーニング成膜法）を開発し、表面の機械加工と鏡面研磨により安定した金属の反射曲面を作る方法を確立

→ 主鏡の鏡面精度<6μmRMS，粗さ<0.7μmRMSを達成

超小型衛星搭載500GHz帯オフセットカセグレンアンテナ光学系

【新規開発】APS/AL+ショットピーニング成膜（断面SEM画像）

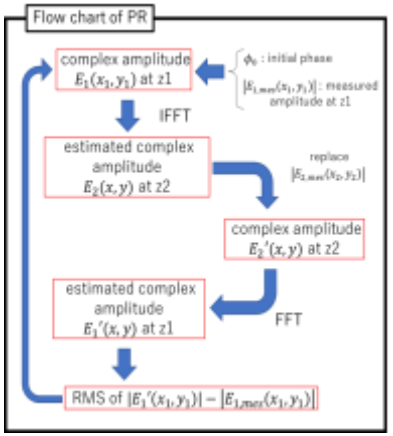
大気プラズマ溶射で成膜（粗さRq：0.5μm）

APS/AL＋ショットピーニングで成膜（粗さRq：0.06μm）

テラヘルツアンテナ光学系の地上検証方法

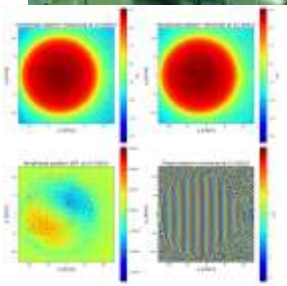
・**テラヘルツアンテナ近傍界測定法における問題**：温度変動や屈曲によるケーブルの位相変動（遅延時間変動）が無視できないため、無試験設備の環境温度制御やテラヘルツ送受信機の位相変動補償が必要

・**フーリエ反復位相回復法による複素電界分布の推定**：アンテナ近傍の異なる観測距離における2面の格子面で測定された2次元振幅パターンから、Gerchberg-Saxtonのアルゴリズムによって、各観測距離における空間波数スペクトルと複素電界分布の推定を離散フーリエ変換と離散逆フーリエ変換を繰り返しで行う手法を開発し、テラヘルツ近傍界測定シミュレータを開発して推定結果の健全性を確認するとともに、500GHz帯高精度CFRP製オフセットカセグレンアンテナを用いての適用性の検証にも成功。今後、位相を測定するコンベンショナルな方法との比較実験を行い、学術論文として投稿する。

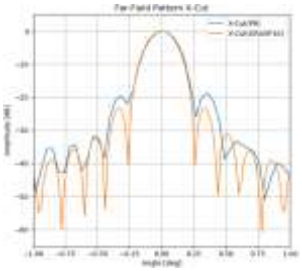


Phase Retrieval Holography によるアンテナ近傍界測定（フーリエ反復位相回復法）

超小型衛星搭載500GHz帯オフセットカセグレンアンテナ光学系構造を用いたフーリエ位相回復法による近傍界測定法の検証



測定シミュレータによる近傍界位置における複素電界分布（振幅：上，位相：下）と測定値と推定値の比較

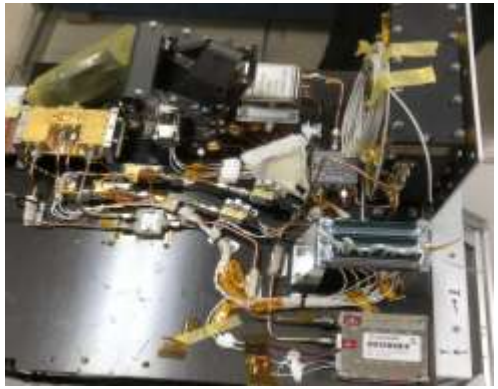


本手法で推定された遠方界放射特性（青色）と放射特性の設計値（橙色）

小型軽量高性能な受信機システムの開発 1/2

両偏波対応の冗長系受信機システムの開発

・**ミキサーシステム部**：ホーンアンテナで受けたテラヘルツ波信号を**円偏波分離器**により右・左円偏向信号に分離し、**両偏波を高精度に測定可能なシステムを開発した。**ミキシングにより上部サイドバンド（USB）と下部サイドバンド（LSB）の大気信号を受信し、**474.640 - 475.640 GHz、486.640 - 487.640 GHz帯をダブルサイドバンド測定が可能。**基準信号周波数は位相同期ループにより安定化。バス部設計により受信機部の動作環境温度は-20から+50度で設計。温度特性取得済み。



インテグレーション時の写真

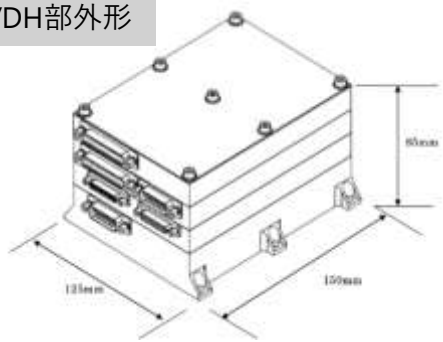
・**IF部**：**IF周波数5.5–6.5GHzに対応するIF系を民生品を用いて開発した。**初段のアンプでは雑音の増幅を抑えるためにLow Noise Factory社の低雑音増幅器を用いた。また、IFケーブルは振動や衝撃、温度変化によって変形等が起きにくいセミリジットケーブルを採用した。2段目の増幅器においては安価な民生品を使用し、放射線や温度変化などの環境変化による性能維持の確認を実施したうえで採用した。対応周波数である5.5から6.5GHzにかけて反射・ゲイン・雑音特性の性能が満たすコンポーネントを採用した。

総合評価：雑音配分

各部品	利得[dB]	利得[ratio]	雑音温度	配分[K]
PFMホーン(設計値)	-0.9	0.813	55.617	55.617
PFM円偏変換(設計値)	-0.16	0.964	10.748	13.223
偏波分離機(VDI評価)	-0.245	0.945	16.299	20.805
ミキサ部(VDI評価)	-7.15	0.193	1300.000	1755.672
ケーブル(測定値)	-0.26	0.942	17.268	120.984
Low noise Amp(測定値)	44	25118.864	30.000	223.163
減衰器(設計値)	-3	0.501	148.222	0.044
ケーブル(測定値)	-0.2	0.955	13.374	0.008
2nd Amp. (mini-circuit: 0.1-8 GHz)	21	125.893	130.000	0.080
ケーブル(測定値)	-0.5	0.891	32.315	0.000
合計				2189.597

・**PSU/DH部**：**観測・校正等の動作及びデータ取得を正常に、安定に駆動するために電源供給部及びデータハンドリング部(PSU/DH)の開発を実施した。**筐体の大きさは85×150×125mm^{3}である。衛星バスシステムからの+28V±2Vの給電に対応。供給された+28V を基に PSU/DH 内部で使用する+3.3V、+5V、±15V を作り出し、各部の回路が動作する。衛星バスシステムからのシリアルコマンドをFPGA が受信すると、搭載ソフトによりコマンドを処理し、接続機器への電力を供給するための スイッチングレギュレータを ON し出力を開始する。スイッチングレギュレータは搭載機器ごとに1つのスイッチングレギュレータを配置しており、FPGA により ON/OFF を行う。

PSU/DH部外形



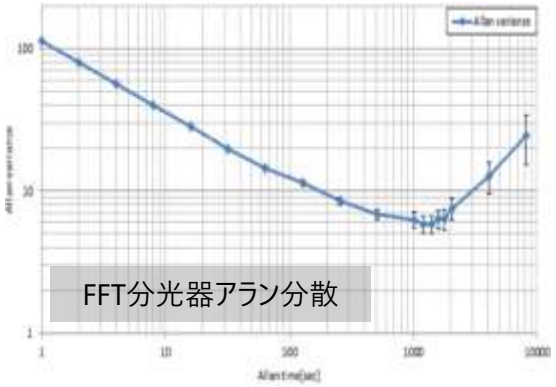
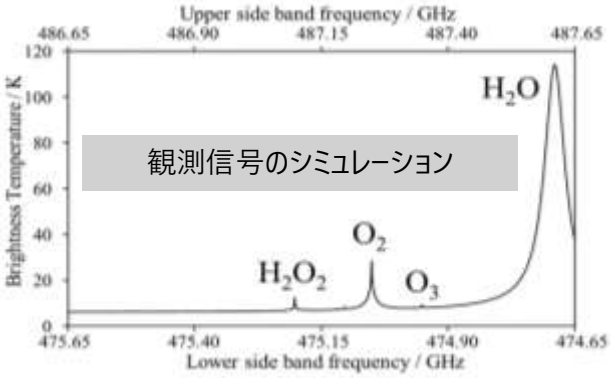
小型軽量高性能な受信機システムの開発 2/2

・**分光計**：超小型衛星の搭載可能な、少ない消費電力、サイズ、重量にて周波数分解能100kHz以下などの高い性能を備えたFFT分光器を開発した。**体積、質量、消費電力は、それぞれ約154×124×42mm^3、800g、5 W(1/6サンプリング時)である。**

・**総合評価**：各種環境試験前後での性能に変動がない事を確認し、常温及び液体窒素温度の電波吸収帯を用いた一般的なy-factor法によりミキサー部雑音温度の評価を行った。中間周波数6GHzにて、**ミキサー部の雑音温度は1300K**と設計値と相違ない値であった。また、光学系を含めた全体評価にて、**受信機雑音温度はおよそ1600K**であった。**アンテナ光学系を含めた全体評価では約2900K**であった。**30W以下(29.4W)での測定が可能であることを確認した。**

・**観測シミュレーター開発**：観測信号のシミュレーションおよび解析を可能とするために、テラヘルツ観測シミュレータ及びリトリーバルアルゴリズムをそれぞれ開発した。逆解析モデル開発のための、観測量から分子濃度等を導出する際に用いるヤコビ行列のプログラムをテラヘルツ観測シミュレータに組み込み、観測する各高度の酸素濃度の変動に対する観測スペクトルの変化量の定量化を可能にし、**測器条件(測定高度や、アンテナ角度、観測時間)から、標準的なリトリーバルアルゴリズムにより、測定誤差の導出を可能にした。**

FFT分光器

FFT分光性能

項目	仕様
Platform sensor	THzSens
Total Mass	800 g (THzSens < 10 kg)
Volume	154×124×42 mm^3
IF input number	Ch 1 and/or 2
Frequency channel	16,384
Channel separation	82 kHz
Acquisition time per spectrum	12 μs
Dynamic range	30 dB <
Frequency range	5.5 - 6.5 GHz
Sampling frequency	2.69 Gsample/s
FFT resolution	12 bit
input power	-23dBm / 1GHz
Operating temperature range	-15 - +50 °C
Storage temperature range	-40 - +100 °C
Power consumption	5W (1/6 sampling mode)