

# テラヘルツセンシングシステム基盤技術の研究開発

## Development of a Compact, Lightweight, Low Power Terahertz Sensing System for Microsatellite

### 研究代表者

笠井康子 国立研究開発法人 情報通信研究機構  
Yasuko Kasai National Institute of Information and Communications Technology

### 研究分担者

笠松彰史 関根徳彦 山田崇貴 中川真秀  
Yasuko Kasai Norihiko Sekine Takayoshi Yamada Maho Nakagawa  
佐藤滋 奈良誠大 前澤裕之  
Shigeru Sato Seidai Nara Hiroyuki Maezawa  
国立研究開発法人 情報通信研究機構  
National Institute of Information and Communications Technology  
西堀俊幸 垣見征孝 植松明久 岡田望  
Toshiyuki Nishibori Yukitaka Kakimi Akihisa Uematsu Nozomi Okada  
国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency  
笠原亮一 松崎秀昭 野坂秀之 杉山弘樹  
Ryoichi Kasahara Hideaki Matsuzaki Hideyuki Nosaka Hiroki Sugiyama  
堤卓也 濱田裕史  
Takuya Tsutsumi Hiroshi Hamada  
日本電信電話株式会社 NTT 先端集積デバイス研究所  
NTT Device Technology Labs, NTT Corporation

研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度

### 概要

世界的にテラヘルツ波の利用に向けた研究が進んでおり、我が国においても実用化に資するテラヘルツ基盤技術の確立が急がれるところ、テラヘルツ波は、システムの小型軽量化の実現性が高いといった優位性があることから、小型衛星のセンシングシステム等への利用が期待されている。また、気象観測の分野においては、他周波数からの干渉が少ない帯域として、水蒸気や酸素の観測への利用が期待されている。そこで、本研究では既存のテラヘルツ電波有効利用のために開発してきた要素開発の成果を取り入れ、世界で初めてとなる 500GHz 帯のテラヘルツセンシングシステムを開発すると共に、同周波数における小型高利得増幅素子の開発を行う。これにより、小型衛星におけるテラヘルツ波の利用を実現し、新宇宙産業における、我が国の革新的イニシアティブを促進する。

### Abstract

Terahertz waves are expected to be used in sensing systems for microsatellites because of their advantages such as the high feasibility of compact and lightweight systems. In the field of meteorological observation, terahertz sensors are expected to be used for water vapor and oxygen observation with less interference from other frequencies. In this research, we developed the world's first terahertz sensing system in the 500-GHz band with lightweight, small size, and low power consumption, and a small high-gain amplifier device in the same frequency. This will realize the utilization of terahertz waves in small satellites and promote Japan's innovative initiative in the new space industry.

### 1. まえがき

テラヘルツ波による衛星リモートセンシングは「システムの小型軽量化・低電力の実現」、「大気物質センシング観測における高周波数分解能の実現」といった点において優位性を持つ。特に低軌道に配置した超小型衛星群による水蒸気や氷雲観測のためのリモートセンシング衛星網を実現するために、受信機の小型化が狙えるテラヘルツ波の利用促進が期待されている。テラヘルツ波帯のうち、500GHz 帯、700GHz 帯、800GHz 帯の周波数については、高層雲を含む水蒸気、酸素濃度を正確に把握可能な電磁的特性を有しており、地球温暖化の影響で激甚化している大型台風の予報等に有効であると考えられている。

本研究では、世界的に周波数分配が行われていない 486GHz 帯のテラヘルツ波を用いた超小型衛星に搭載可

能な形状（一片 50cm の立方体より小型・重量は 10kg 以下・消費電力は 30W 以下）を持つ、水蒸気と気温（酸素）の同時スペクトル観測が可能なテラヘルツセンシング用のスペクトロラジオメータの研究開発を行った。本研究は総務省の電波資源拡大のための研究開発「テラヘルツセンシングシステム基盤技術の研究開発」の受託研究により進められ、課題ア)の「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」を情報通信研究機構と宇宙航空研究開発機構が、課題イ)の「500GHz 帯電磁波増幅素子の高度化・広帯域化」を日本電信電話株式会社が受託して研究が進められた。

## 2. 研究内容及び成果

### 2.1 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

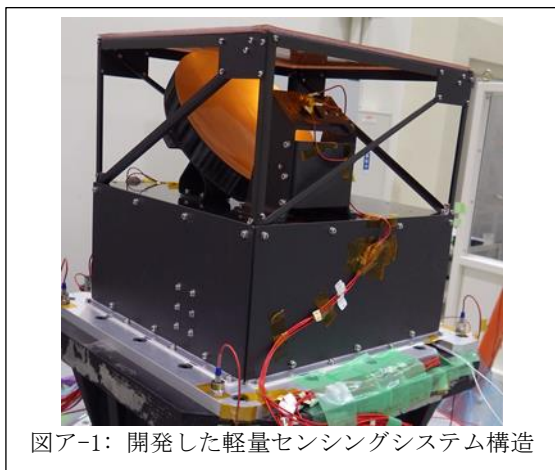
本課題については、宇宙航空研究開発機構が、軽量センシングシステムの開発、軽量高精度テラヘルツアンテナ光学系の開発と小型軽量テラヘルツ帯校正源の研究開発を分担し、情報通信研究機構が受信機とIF部の開発、分光器の開発、計算機構成サブシステム、テラヘルツ観測シミュレータの開発を分担した。

#### ・オールCFRP製センシングシステム全体構造

本研究の軽量センシングシステム構造は、ピッチ系高弾性炭素繊維で製作し、全体としてアンテナ光学系の熱歪みも抑える構造とした。複合材の光学ベンチ構造の上にアンテナ光学系を配置し、その裏面にテラヘルツ受信機、校正源、電源、計算機、分光計を搭載する構成とした(図ア-1)。

搭載予定機器を含む全質量は8.65kgとなり、全体構造はD384×W384×H357mmに包絡する構造となった。全体構造の構造数学モデルを作り、構造解析を実施して最低固有振動数を求めたところ、224.27Hzとなり、衛星搭載機器の剛性要求(一般的に120Hz程度)を充分満足し、衛星搭載機器としての構造設計として問題ないことが確認できた。また、全体構造の構造数学モデルを使って静荷重解析を行った結果、最小MS(安全余裕)は86(最小部:支持部アングルファスナ穴部)となり、十分安全な構造である。

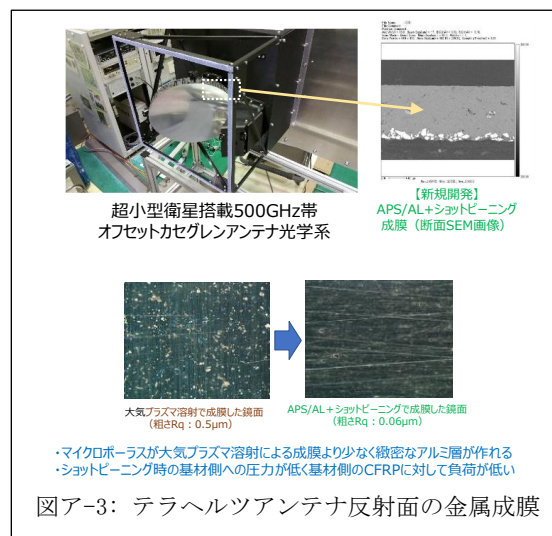
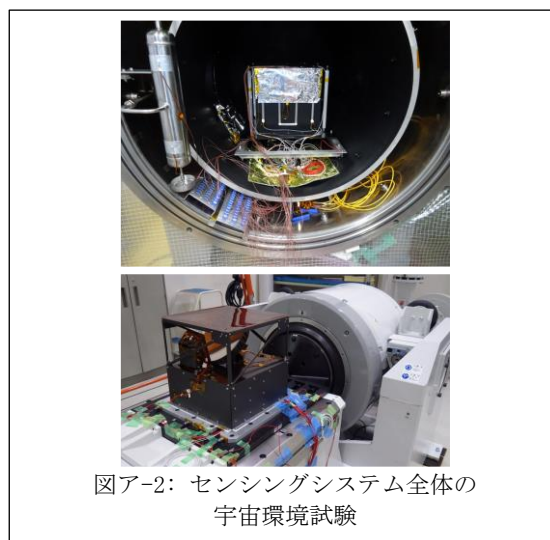
アンテナ光学系とテラヘルツ受信機を組み合わせた全体構造を用いて、熱真空試験を行い、想定バス側から提示された軌道上環境を模擬し、熱平衡試験、熱容量確認、熱サイクル、電気試験などを実施し、機器の機能性能が維持されていることを確認した(図ア-2)。



#### ・テラヘルツセンシングシステム光学系の開発

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の組み合わせとし、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)を開発した。また、表皮の積層は疑似等方積層として面内のCTEの方向性を少なくした。なお、同一材料と鏡面の部分試作品は国際宇宙ステーション(ISS)の船外実験で長期間宇宙空間に曝露させた後、地上に回収して宇宙環境での劣化(電気性能の変化を含む)を確認済である。

電磁波反射面は特殊なアンダーコート(酸化セラミックと樹脂などの混合)をCFRP表面に塗布して、大気プラズマ溶射によるアルミニウム層の成膜で実現させた【特許出願済】。アルミを溶射後に70 $\mu$ m径の炭素鋼ビーズによるショットピーニングを施し、アルミニウム表面に改質硬化を与え、再び溶射による大気プラズマ溶射による成膜とショットピーニングを繰り返しながら、アルミニウム層をさらに積層形成(APS/ALショットピーニング成膜法)した後に、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製作した(図ア-3)。製造後の検査において、主鏡の鏡面精度<6 $\mu$ mRMS、粗さ<0.7 $\mu$ mRMSを達成した。

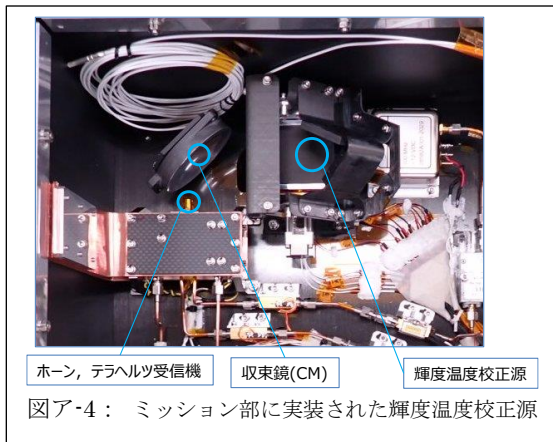


#### ・磁気損失材料装荷の電波吸収体による輝度温度校正源

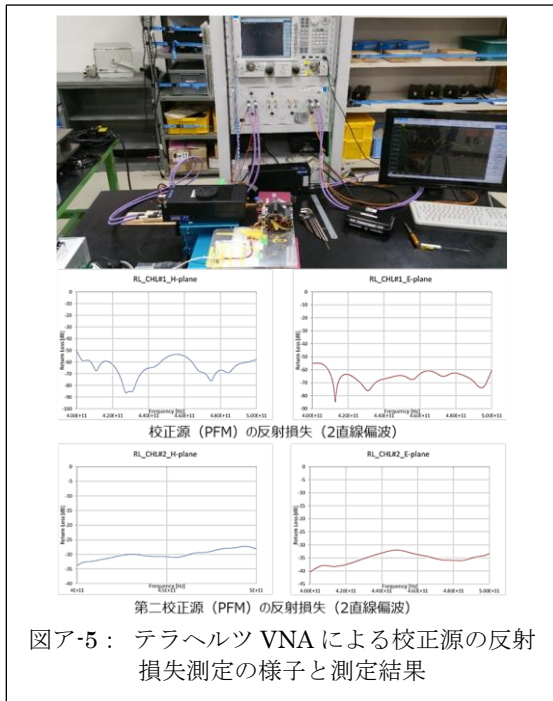
衛星軌道上におけるテラヘルツ受信機の高精度な輝度温度校正を実現するために、小型軽量の校正源を新たに開発した。観測される電磁波の右旋と左旋の円偏波に対して校正源の反射損失を確保する仕様を設定し、磁気損失材料装荷の電波吸収体(E&Cエンジニアリング社製のMF-110)を円偏波に対してブリースター角になるように配置し、鏡面反射となる成分はテラヘルツ波のピラミダル電波吸収体(英国 TK 社製の RAM)に終端する設計とした。

校正源の筐体は全て CFRP 製で軽量化を図り、観測ビームの切り替えを行う切替鏡(SWM)とそれを駆動するためのアクチュエータ部も校正源に組み込んだ(図ア-4)。

開発した校正源の 490GHz 帯における反射損失をテラヘルツのベクトルネットワークアナライザで測定したところ、約 60dB の以上(要求 60dB 以上)の性能が確認出来た。また、第二校正源の反射損失は 25dB 以上あることを確認した(図ア-5)。



図ア-4: ミッション部に実装された輝度温度校正源

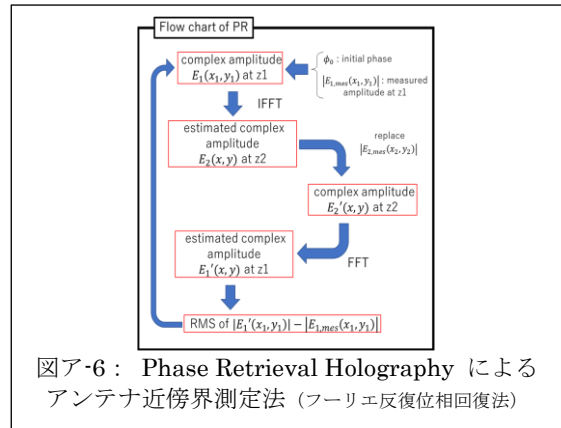


図ア-5: テラヘルツ VNA による校正源の反射損失測定の様子と測定結果

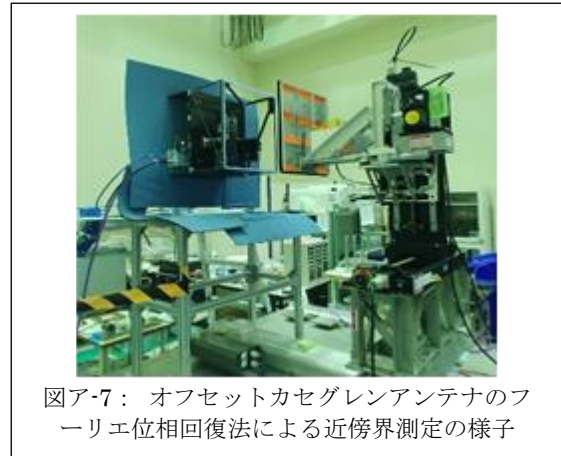
・フーリエ反復位相回復法による複素電界分布の推定

テラヘルツ帯では、アンテナ近傍界測定装置の送受信機システム単体で生じる温度変動やケーブル屈曲による位相変動(遅延時間変動)が無視できないため、試験設備の環境温度制御や送受信機の位相変動補償を行う必要があ

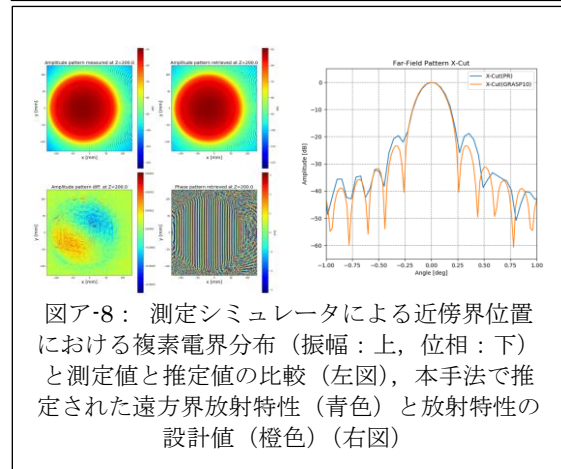
る。



図ア-6: Phase Retrieval Holography によるアンテナ近傍界測定法(フーリエ反復位相回復法)



図ア-7: オフセットカセグレンアンテナのフーリエ位相回復法による近傍界測定の様子



図ア-8: 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(左図),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)(右図)

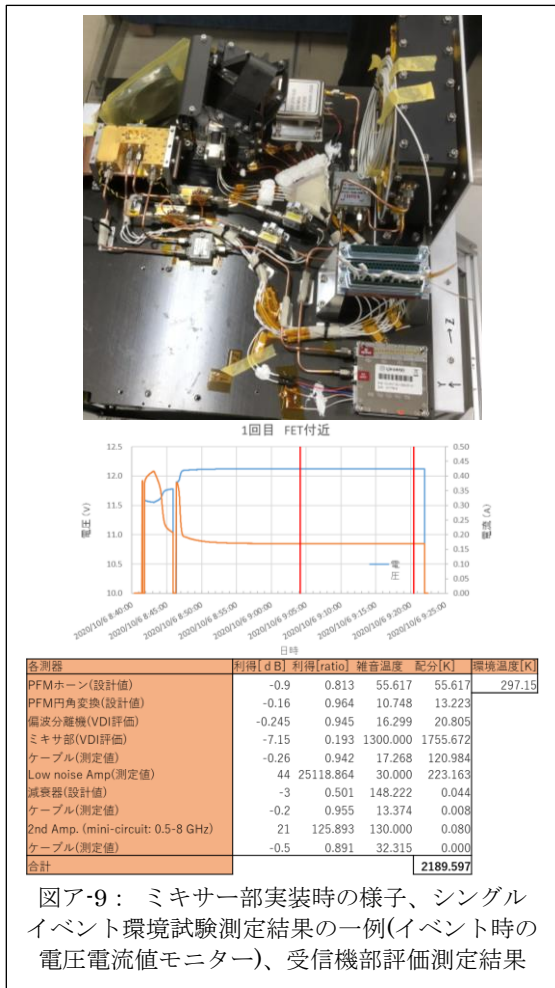
アンテナの遠方界放射特性を得るためにはアンテナ開口における複素電界分布が必要である。開発した方式はアンテナ近傍の異なる観測距離における2面の格子面で測定された2次元振幅パターンから、Gerchberg-Saxtonのアルゴリズム(error-reduction algorithm)によって、各観測距離における空間波数スペクトルと複素電界分布の推定を離散フーリエ変換と離散逆フーリエ変換を繰り返すことで、アンテナ近傍界における複素電界分布を推定する方式である(図ア-6)。アンテナ電磁界解析ソフトウェアの GRASP を用いて予測された近傍界電磁界分布を用いて、本推定法のテラヘルツ近傍界測定シミュレータを開発して推定結果の健全性を確認(図ア-7)するとともに、本研究で開発した 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、アルゴリズムの適用性検証に成功した(図ア-8)。今後、位相を直接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予定である。

### ・サブミリ波受信機部

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の開発を実施した。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となるよう設計した。基準信号周波数は位相同期ループにより安定化される。バス部設計により受信機部の動作環境温度は-20 から+50 度で設計された。

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。

上記ミキサー及び LO 部と中間周波数帯増幅部、接続 RF ケーブルについて受信機部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 (図ア-9)。中間周波数 6GHz にて、ミキサー部の雑音温度は 1300 K 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およそ 1600 K であった。目標である 2000 K 以下を達成した。

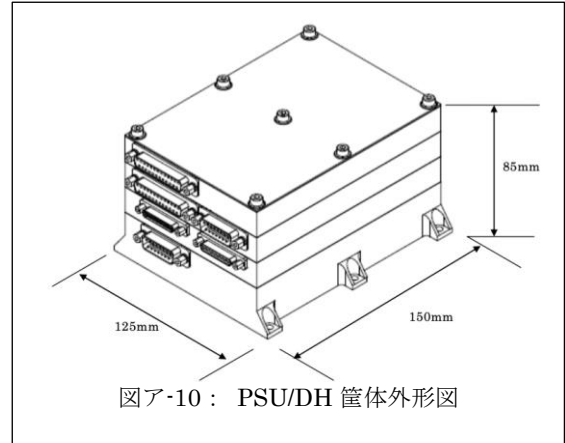


図ア-9： ミキサー部実装時の様子、シングルイベント環境試験測定結果の一例 (イベント時の電圧電流値モニター)、受信機部評価測定結果

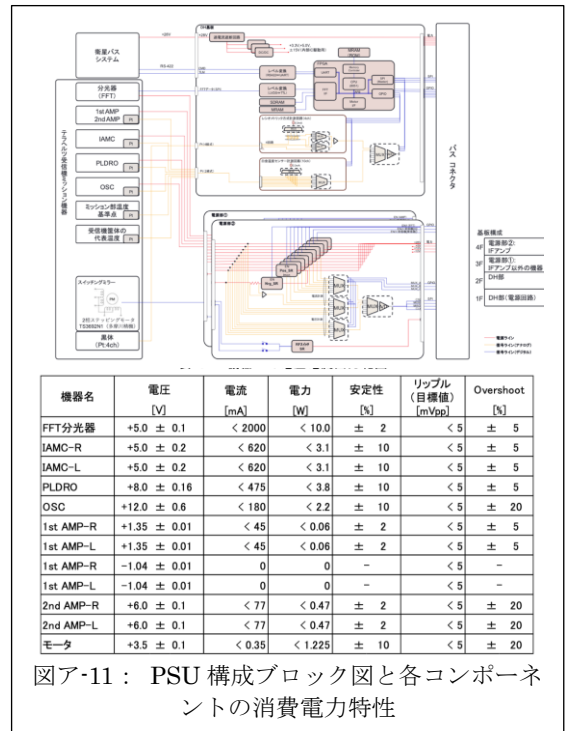
### 電源供給部及びデータハンドリング部 (PSU/DH)

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 DH/PSU を開発した (図ア-10)。衛星バス

システムから+28V±2V を給電することで PSU/DH は動作を開始する。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 (図ア-11)。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。



図ア-10： PSU/DH 筐体外形図



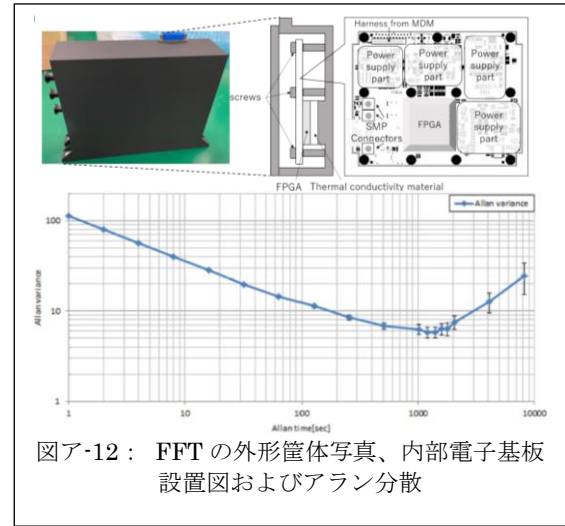
図ア-11： PSU 構成ブロック図と各コンポーネントの消費電力特性

FPGA に CPU として Core8051s を搭載する。衛星バスとは RS422 で通信を行いテレメトリ、コマンドの送受信を行う。FFT 分光器からの FFT 分光データは SPI で受信し、SDRAM に保存する。衛星バスから、RS422 通信で受信したコマンドは FPGA で受信する。RS422 から UART へのレベル変換は実績回路とし、通信速度も実績のある 57,600bps とした。コマンドの処理は CPU 上

で動作するソフトウェアにより処理を行う。ソフトウェアは、衛星バスからのコマンドで指定された機器に対応する FPGA の I/O ピンを Hi とすることで電源供給を開始する。

### ・小型高性能 FFT 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 100 kHz 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、消費電力の要求値は、それぞれ約  $150 \times 120 \times 40 \text{ mm}^3$  (マージン 5 mm 以下)、1.0 kg 以下、5 W 以下で、先行研究からも、小型衛星に搭載できるほどの高分解能で小型・省電力・軽量の設計を開発した分光器はほとんどない。同じようなコンセプトで JPL にて開発された FFT 技術を使用した Compact Adaptable Microwave Limb Sounder (CAMLs) と比べても、機械的に優れたパッケージのシンプルな構成であり、体積は CAMLS の約 14 分 1 ( $1.0 \times 10^7 \text{ mm}^3$ ) なおかつ分解能が 2 桁以上よい。FFT は 2 つのチャンネル入力を持ち、周波数範囲は 5.5-6.5 GHz に対応する。分解能は 82 kHz で、各パワースペクトルは周波数チャンネル数 32,768 で取得される。データは 1 秒ごとにデジタル化、蓄積、DH 部を介してバス部に送信される。最終的な全体のサイズは  $154 \times 124 \times 42 \text{ mm}^3$ 、重量はわずか 700 g 以下の開発に成功した (図ア-12)。窓関数は、ハニング、ブラックマン、無しから観測に応じて選択でき、ソフトウェアではなくハードウェアで FFT を計算することで非常に高速になり、リアルタイムでの信号処理が可能になる。表ア-1 に FFT の仕様をまとめた。消費電力は、間欠運転により 5 W から 10 W まで選択可能であり、間欠運転の各種モードを示す。現在開発した分光計に関して学術論文として投稿している。



図ア-12： FFT の外形筐体写真、内部電子基板設置図およびアラン分散

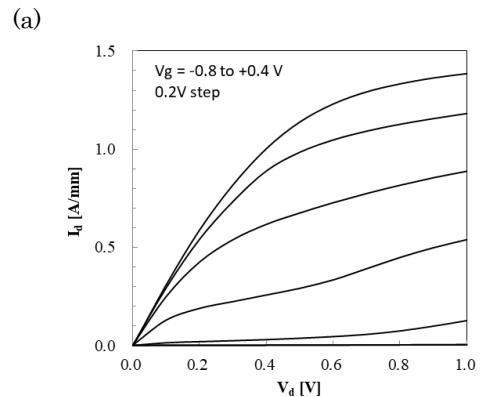
## 2.2 課題 イ) 500 GHz 帯電磁波増幅素子の高度化・広帯域化

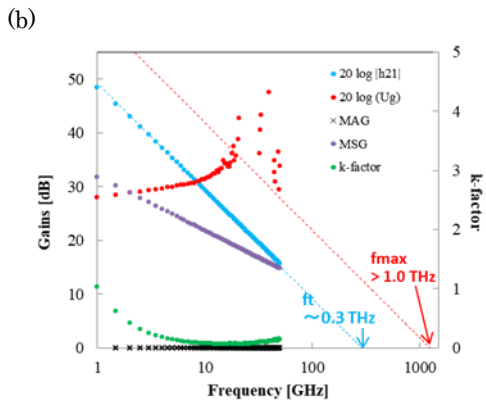
本課題では、半導体技術を活用することで、将来の小型リモートセンシングシステム実現に資する、増幅素子の小型・高性能化を目指した研究開発を行った。具体的には、高周波特性に優れた InP (インジウムリン) 系の材料を適用したトランジスタ (以下、InP-HEMT、HEMT:高電子移動度トランジスタ) の広帯域化・集積技術と、回路 (モデリング・設計) 技術、評価技術の研究開発を進めた。

### ・InP-HEMT 広帯域化技術

500 GHz 帯で増幅性能を有する集積回路の実現には、トランジスタ性能として最大発振周波数  $f_{\text{max}} \sim 1 \text{ THz}$  が求められるとともに、トランジスタ特性の再現性、均一性の確保が求められる。電子線露光技術等を用いて試作を行った結果、設計ゲート長 52 nm の素子において、最大ドレイン電流 1.35 A/mm (図イ-1(a))、最大伝達コンダクタンス 2.0 S/mm、電流利得遮断周波数  $f_t \sim 0.3 \text{ THz}$ 、 $f_{\text{max}} \sim 1 \text{ THz}$  (図イ-1(b)) の良好な特性を得るとともに、ウェハ上の特性確認用素子全てが良好に動作し、特性の偏差が約 10% と、良好な均一性が実現されていることを確認した。以上のとおり、500 GHz 帯集積回路実現に資する InP-HEMT 広帯域化技術を確立した。

表ア-1： FFT の仕様と各モードの消費電力	
項目	仕様
Platform sensor	THzSens
Total Mass	800 g (THzSens < 10 kg)
Volume	$154 \times 124 \times 42 \text{ mm}^3$
IF input number	Ch 1 and/or 2
Frequency channel	16,384
Channel separation	82 kHz
Acquisition time per spectrum	12 $\mu\text{s}$
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 $^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range	-40 - +100 $^{\circ}\text{C}$

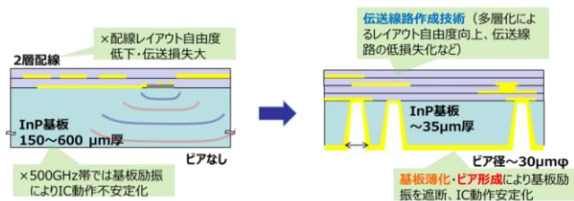




図イ-1： 試作した InP-HEMT の  
(a)静特性、(b)高周波特性

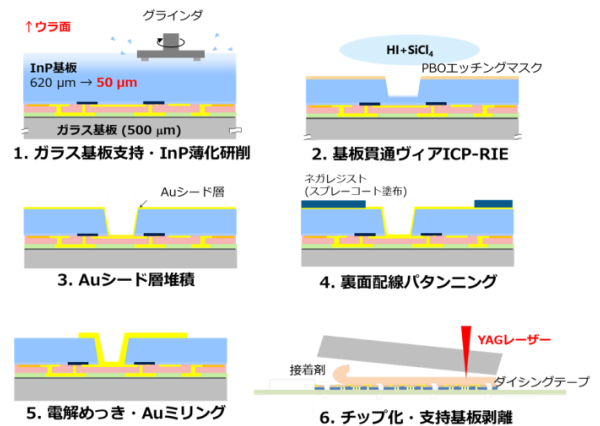
### ・集積技術（基板薄化・裏面加工技術）

500 GHz もの高周波では、回路チップやモジュールキャビティ内の不要電磁波伝搬・共振が問題となる。これを解決するには InP 基板の薄層化と稠密なグラウンドビア形成が必要となる。薄化に関する要求は、集積回路伝搬信号の周波数により決定され、500 GHz では 35  $\mu\text{m}$  までの薄層化が求められる（図イ-2）。モジュールは基板厚に応じて設計されるため、基板薄化には高い制御性が求められる。

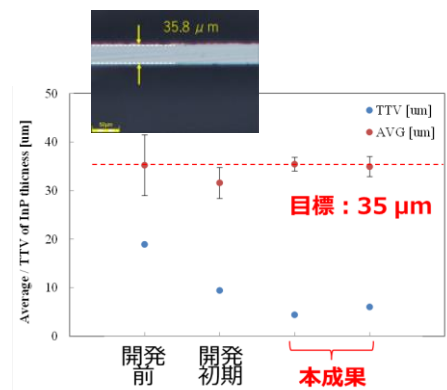


図イ-2： 高周波 IC チップにおける基板薄化の必要性

そこで図イ-3 に示すような、基板薄化・裏面加工技術の高精度化に取り組んだ。工程フローを説明する。回路形成済み InP 基板の表面をガラス支持基板と接着する。基板裏面より、所望の基板厚（35  $\mu\text{m}$ ）まで研削したのち、基板貫通ビアをエッチングにより形成する。続いて Au めっきを行い、基板貫通ビアの底面に露出した（すなわち、InP 基板表面に形成済みの）IC 配線層との電気的接続を得る。最後にダイシングによりチップ化し、支持基板を剥離する。本開発においては、ガラス基板支持の際の接着剤塗布厚のばらつき低減、接着剤薄化により、InP 基板とガラス支持基板の並行度を向上させ、薄化後の基板厚さの面内均一性と基板厚制御性を改善した。図イ-4 内に 35  $\mu\text{m}$  まで薄層化したチップ断面写真を示す。加工寸法 35.8  $\mu\text{m}$  と極めて高精度な加工を実現した。基板厚の最大面内差（TTV: Total Thickness Variation） $\sim 5 \mu\text{m}$ 、出来上がり基板厚の面内偏差  $< 2 \mu\text{m}$  が得られるとともに、ロット間揺らぎもほぼない、安定性・均一性に優れた加工技術を確立した。



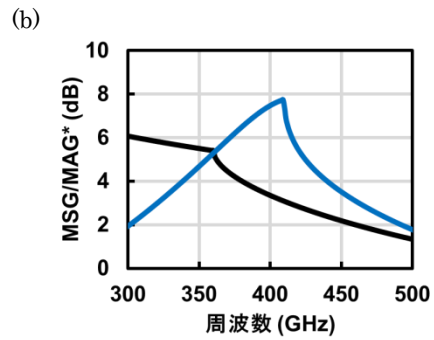
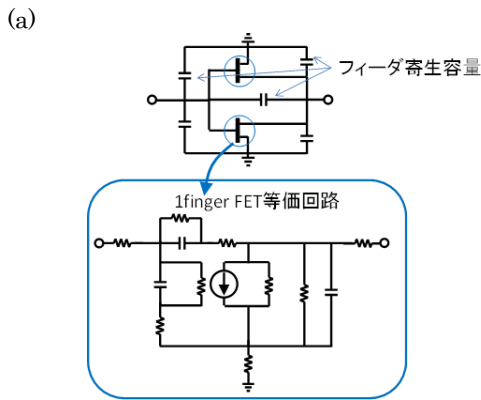
図イ-3： 基板薄化・裏面加工フロー



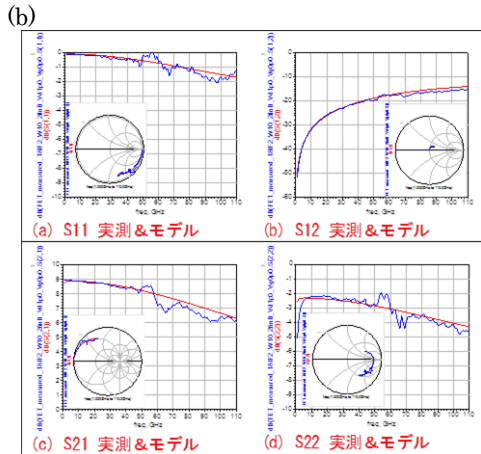
図イ-4： 基板薄化技術の開発結果

### ・デバイスモデリング

トランジスタモデルは、小信号モデルと大信号（非線形）モデルに大別され、一般には両者を用いて回路設計を行う。500 GHz 帯という超高周波数における回路設計を行うには、極めて正確なトランジスタの寄生容量・インダクタの見積もりが要求される。HEMT の小信号モデル作成にあたり、回路内で使用するトランジスタに最も適合した形態（ゲート幅：10  $\mu\text{m}$ ・ゲートフィンガー数：2）を選定し、2finger レイアウトに起因するフィード等の寄生容量を HEMT 単体セルの外部に装荷する構成とした（図イ-5(a)）。DC-110 GHz の範囲でパラメータフィッティングした結果を図イ-5(b)に示す。モデル（赤線）は、実測（青線）と非常に良好に一致しており、モデルの高精度化が実現された。



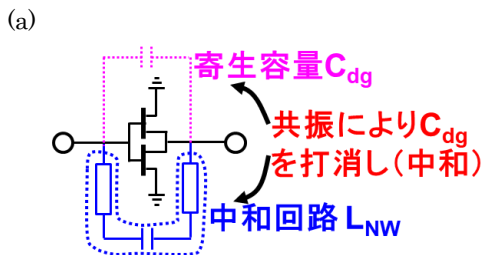
図イ-6： (a)中和回路つきトランジスタモデルと (b)通常トランジスタとの最大利得の比較結果



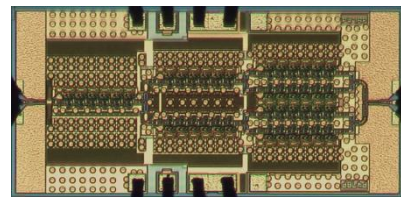
図イ-5： (a)高精度小信号モデルと (b)パラメータフィッティング結果

### ・500 GHz 帯アンプ設計技術と試作結果

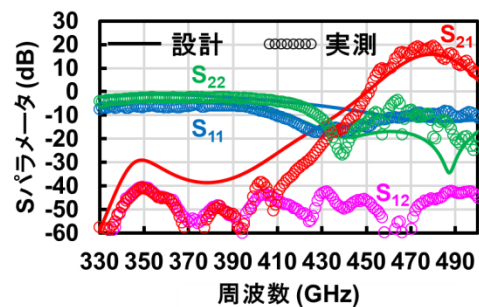
500 GHz 帯もの高周波ではトランジスタの最大有能電力利得は相対的に低下し、集積時の線路損失により利得が得られなくなるといった課題が生じる。そこで図イ-6(a)に示す、トランジスタの入出力をインダクタンスにより接続し、利得低下要因である帰還容量 ( $C_{dg}$ : ゲート-ドレイン間容量) を中和して利得を確保する構成を考案した。これにより、最大有能電力利得をある周波数範囲で増大することができる。ソース接地トランジスタ (Common-source FET; CSF) と、CSF に中和回路 (Neutralized CSF; N-CSF) を適用した場合の 330–500 GHz における利得のシミュレーション比較を行った (図イ-6(b))。その結果、N-CSF により、本開発ターゲットの 480 GHz において、約 1.5dB の利得増大効果が得られることを確認した。



本構成を適用して 500 GHz 帯アンプ (以下 PA) を試作した。CSF 6 段構成を単位アンプとして、これを 3 段縦列接続し、4 並列化することで高利得・高出力化を図った。半導体集積技術の適用により、進行波管等と比較して、増幅素子の大幅な小型化を果たした (図イ-7)。評価の結果、480 GHz において 20.2 dB もの極めて高い利得が得られ、同周波数帯にて世界トップレベルの利得性能を実現した (図イ-8)。尚、450 GHz 以下の周波数領域では利得は負であり、発振など不安定動作の要因となる、帯域外不要利得が十分に抑圧され、高い動作安定性を有している。導波管モジュール実装状態で出力 1 mW を確認しており、本 PA に対して、4 並列のオンチップ/オフチップコンパイナ (6 dB 出力向上) 等を用いた、一般的な電力合成手法を適用することで、4 mW の出力を得ることができる。



図イ-7： 試作した 500 GHz 帯アンプチップ (サイズ：1.9x0.9 mm<sup>2</sup>)



図イ-8： 500 GHz 帯アンプチップ評価結果

### 3. 今後の研究成果の展開

研究開発「テラヘルツセンシングシステム基盤技術の研究開発」で開発されたミッション部を搭載する衛星バスの開発や打上げ、運用は本研究資金に含まれていないが、今後、テラヘルツ受信機に課題イ) で開発された増幅器を組み込むことも含めたミッション部を超小型衛星バスに組み込み、ピギーバック衛星として打上げて宇宙実証を目指して研究開発を継続する。

### 4. むすび

総務省の電波資源拡大のための研究開発「テラヘルツセンシングシステム基盤技術の研究開発」の課題ア) では、超小型衛星に搭載可能な 500GHz 帯テラヘルツスペクトロラジオメータと宇宙用複合材を使った軽量かつ高剛性な構造に熱的安定で高精度なテラヘルツアンテナ光学系と輝度温度校正源が開発された。また、課題イ) では InP 半導体を用いた 500GHz 帯増幅素子 (アンプ回路) の研究が行われた。2018 年度からの 3 年間の研究開発活動により、テラヘルツセンシングシステムは打上げ可能な PFM の開発まで完了させることが出来た。500GHz 帯増幅素子として利得 $\geq 3$  dB、出力 $\geq 4$  mW の性能を実現する半導体集積アンプ技術を確認した。

#### 【査読付き誌上発表論文】

- [1] Maho Nakagawa, Takayoshi Yamada, Shigeru Sato, Ichiro Kato, Toshiyuki Nishibori, Kenichi Harada, Toru Taniguchi, Hiroaki Kawamoto, Kazuyuki Nakamura, Takahiro Kuhara, and Yasuko Kasai, "Development of a Molecular Assessment High-resolution Observation Spectrometer (MAHOS) for Microsatellites", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Submitted for publication).
- [2] Maho Nakagawa, Yuki Uchiyama, Takayoshi Yamada, Toshiyuki Nishibori, Satoshi Ochiai, Maya Mizuno, Akihisa Uematsu, Shigeru Sato, Yukio Nakano, and Yasuko Kasai, "Compact 480 GHz Radiometer Calibration Unit with Specular-Reflection Absorber for Atmospheric Remote Sensor On-Board Microsatellite", IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, (Accepted for publication).
- [3] Richard Larsson, Yasuko Kasai, Takeshi Kuroda, Shigeru Sato, Takayoshi Yamada, Hiroyuki, Maezawa, Yutaka Hasegawa, Toshiyuki Nishibori, Shinichi Nakasuka, and Paul Hartogh, "Mars submillimeter sensor on micro-satellite: sensor feasibility study, Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems", Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 7, 331-341, doi.org/10.5194/gi-7-331-2018 (2018)

#### 【その他の誌上発表】

- [1] 山田崇貴、笠井康子、中川真秀、佐藤滋、加藤一郎、内山由侑基、西堀俊幸、垣見征孝、岡田望、植松明久、早坂絵美、"特集：THz フロンティアーズ、宇宙産業展開の基盤へ。超小型テラヘルツ波リモートセンシング技術"、電波技術協会報 FORN No.337 pp18-21 (2020 年 11 月 10 日)

#### 【査読付き口頭発表論文】

- [1] 濱田裕史、堤卓也、松崎秀昭、杉山弘樹、野坂秀之、"475-GHz 20-dB-Gain InP-HEMT Power Amplifier

Using Neutralized Common-Source Architecture", IEEE International Microwave Symposium (2020 年 8 月 4 日)

#### 【口頭発表】

- [1] 西堀 俊幸、垣見 征孝、植松 明久、岡田 望、早坂 絵美、石田 智大、中川 真秀、山田 崇貴、佐藤 滋、笠井康子、中村 和行、"小型・軽量・低電力な超小型衛星搭載テラヘルツセンシングシステムの開発 —低熱歪み高精度アンテナと校正源の開発—", 第 64 回宇宙科学技術連合講演会 (2020 年 10 月)
- [2] Yuki Uchiyama, "Development of Calibration System of Terahertz Explorer-1 for Mars", Atmospheric Observation Asia Oceania Geoscience Society 2019 (2020 年 7 月発表)
- [3] 濱田裕史、堤卓也、松崎秀昭、杉山弘樹、野坂秀之、"InP-HEMT を用いた THz 帯電力増幅器および高速無線トランシーバ"、電気学会 電子デバイス研究会 (2021 年 3 月 3 日)

#### 【申請特許リスト】

- [1] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、株式会社テクノソルバ、株式会社三協製作所、プラズマ技研工業株式会社、反射面の形成方法、反射部材、2018 年 7 月 2 日
- [2] 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、株式会社テクノソルバ、株式会社三協製作所、衛星搭載用軽量高精度反射鏡型アンテナ、2021 年 3 月 12 日
- [3] NTT、電界効果型トランジスタおよびその製造方法、日本・米国、2020 年 5 月

#### 【報道発表リスト】

- [1] "テラヘルツセンシングに適用可能な 500GHz 帯 20dB 利得の増幅器 IC を実現"、NTT、2020 年 8 月 4 日