

「ICTによる安全・安心を実現するためのテラヘルツ波技術に関する研究開発」

(1) 研究の目的

テラヘルツ波（周波数 0.1～10 THz 帯の電磁波）技術の研究開発は、近年のレーザ技術やエレクトロニクス技術の発展のもと、テラヘルツ帯パルス電磁波の発生と検出、非線形光学素子による周波数可変光源をはじめとするいくつかのブレークスルーがきっかけとなって著しく進展し、いよいよ産業応用への展開が可能なレベルに達してきた。

テラヘルツ波の大きな特長は、マイクロ波帯や準ミリ波帯（1～30 GHz）電波に比べ一桁以上の高周波数（短波長）であるため高空間分解能力を有すること、赤外線や可視光に比べると波長が長いこと、伝搬において塵、煙、炎などによる散乱が少ないこと、テラヘルツ帯に存在する物質固有の吸収スペクトルによって有毒ガス、危険物質を検知できること、などである。

そこで、このテラヘルツ波の特長を、大規模地震などの災害発生時におけるイメージング（画像化）やセンシングに活用すれば、従来技術（X線、赤外線、マイクロ波、ミリ波）では困難であった新しい情報収集が可能となり、さらに得られた情報の迅速な流通と利用によって、被災者救援や二次災害防止などに役立て、災害被害を最小限に抑えることに貢献できると考えられる。

本研究は、災害現場において、離れた場所からの遠隔計測（スタンドオフ計測とも呼ぶ）により、テラヘルツ帯の映像を取得するためのシステム（遠隔テラヘルツ帯イメージャ）と、災害時に発生するCOなどの危険ガスを検出するためのシステム（遠隔テラヘルツ帯分光センサ）を開発し、さらに、これらのシステムによって得られたテラヘルツ帯固有の情報を処理することにより災害現場の状況を正確に把握し、災害時に役立つ情報を提供するための技術を開発することを目的としている。

また、ここで研究開発するテラヘルツ帯のイメージング技術、センシング技術、ならびに情報処理技術は、テラヘルツギャップと呼ばれる、未だ未成熟なテラヘルツ波利用技術の発展に広く寄与するものであり、食・農業、自然環境モニタリング、セキュリティなど、様々な分野における新しい製品の開発、新市場の開拓に結びつく可能性がある。さらに、テラヘルツ波技術は、ほとんどの分野で標準的な計測技術や手法が整備されておらず、テラヘルツ波技術の産業化のためにはその確立が焦眉の急である。したがって、本研究開発が災害時だけでなく以上のような分野にも波及効果を有しその発展に少なからず貢献できることを念頭において基盤技術を構築していく。

(2) 研究期間 (全期間)

平成18年度から平成22年度 (5年間)

(3) 受託者

日本電信電話株式会社<幹事>、国立大学法人東京大学、
日本電気株式会社 (平成18年度は株式会社東芝)、
国立大学法人名古屋大学、有限会社スペクトルデザイン、
日本ガイシ株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所

(4) 研究予算 (百万円)

平成18年度	209
平成19年度	194
平成20年度	170

(5) 研究開発課題と担当

課題ア：テラヘルツ帯遠隔イメージング技術の研究開発

1. テラヘルツ帯イメージャ技術
(日本電気株式会社)
2. イメージャ評価用テラヘルツ帯固体光源技術
(東京大学)
3. 災害環境下テラヘルツ帯分光による生命体データ取得技術
(東京大学)

課題イ：テラヘルツ帯高速分光センシング技術の研究開発

1. テラヘルツ帯遠隔分光センシングシミュレータ技術
(名古屋大学)
2. テラヘルツ帯遠隔計測スペクトル解析技術
(有限会社スペクトルデザイン)
3. テラヘルツ波発生用光サイドバンド制御技術
(日本ガイシ株式会社)
4. テラヘルツ帯遠隔分光用超高感度受信器構成
(独) 産業技術総合研究所)
5. テラヘルツ帯遠隔分光用高出力テラヘルツ波発生技術
(日本電信電話株式会社)

(6) これまでの主な研究成果

特許出願： 14件
外部発表： 63件

具体的な成果

(1) 非冷却赤外センサをベースにした THz 帯イメージャについて、画素部を再設計し、梁の熱コンダクタンスを半減させることで従来比 2 倍の高感度化が可能であること、誘電体カバーによる干渉効果でセンサの更なる感度向上が実現できる可能性があることを示すことができた。また、試作完了した THz イメージャ 1 号機を用いて、パッシブイメージング（距離 2.5m 先の半田ゴテ）、実時間アクティブイメージング（ブラックポリエチレンの向こうにある球体の認識）に成功した。

(2) 平成 19 年度に作製した機械式冷凍機システムへのマイクロストリップラインの実装及び高速トランジスタスイッチング回路の開発を行い、一体化型 p-GeL システムによる発振を実現した。

(3) 水蒸気測定、木片チップ、またポリスチレン、ポリエチレンなど高分子材料を燃焼源としてガス測定を実施した。結果、木片から発生する白煙スペクトルは水蒸気と一致することを確認した。

(4) 1~10 THz における大気窓減衰率の測定に成功した。また、サブテラヘルツ領域での評価に向けて、チェレンコフ型位相整合による差周波混合方式 THz 波発生をおこない、ビーム整形によってスペクトルの広帯域化に成功した。また、銅板を用いてコーナーリフレクタの試作を行い、平板アルミミラーの場合と比較して THz 波の反射率が入射角度に大きく依存せず、実用上の利用可能性を実験的に確認した。

(5) 遠隔センシング実験環境の設計において、テラヘルツ波帯で吸収ピークが存在する 5 種の有毒性ガスを特定し、遠隔分光センサでの測定の可能性を示唆した。また、スペクトルデータ解析アルゴリズムの開発では、アクティブセンシングを想定して、ランベルトベールの法則が成り立つと想定した環境下で、危険ガスの濃度の定量アルゴリズムを確立した。解析アルゴリズムに基づきソフトウェアを開発し、シミュレーションおよび実測のガススペクトル解析を通してソフトウェアの動作検証を行った。

(6) 広帯域テラヘルツ波発生に向けて、最大入力周波数 30 GHz、駆動電圧 V_{π} が 2V@DC の光位相変調器を実現した。現状の Ti 熱拡散光導波路スポットサイズを電極ギャップよりも小さくすることで光過剰損失増大を抑制しつつ、最終目標の低駆動電圧化が実現できた。

(7) 超伝導ミキサとフォトニック局部発振器により 200~500 GHz 帯をカバーする受信器に、ガスセルと 2 つの温度定点にある熱輻射源を組み合わせたガスの放射分光計を構築し、亜酸化窒素から放射する 100 fW 程度の微弱

テラヘルツ波スペクトルを、周波数分解能 500 MHz、電力分解能約 10 fW、測定時間 40 秒で検知することに成功した。

(8) 高出力テラヘルツ波発生器実現にむけ、チップ構造の改良により 200～500 GHz 帯モジュールにおいて最高出力 535 μ W (@350 GHz) を実現した。また、前年度開発した遠隔分光センシングシステムに超伝導ミキサヘテロダイン受信器を導入し、システム高感度化を実現するとともに、平成 19 年度の反射プロファイル測定の結果をもとに、目標物でのテラヘルツ波の反射をモデルに取り込んだ伝搬特性シミュレーションから受信電力とアンテナ開口径の関係を明確化し、これを元に中距離センシングを実現するためのアンテナを設計・試作した。

(7) 研究開発イメージ図

① THz帯遠隔イメージング技術の主な成果

煙や埃等の災害現場における状況把握

A ポータブルなTHzカメラの研究開発

- 2次元THzアレイセンサの開発
- THz透過材料の開発
- 画像処理技術の開発
- アクティブ・パッシブTHzカメラの開発

B ポータブルなTHz固体光源の研究開発

- 波長可変レーザと機械式冷凍機の一体型光源の開発
- 外部共振器型分光源の実現

C 災害環境下THz分光による生命体データ取得の研究開発

- THz分光測定装置(災害模擬環境)の開発
- 生命体等のTHz分光のデータ蓄積と特定方法の提案

A 非破壊検査技術“テラヘルツ帯画像計測”の大幅な高感度化に成功

改良前 → 改良後

世界トップクラス

NICT報道発表(2008年4月28日)

信号雑音比を2桁改善(左図)

- チップの高感度化(3THz)
- 高透過率材料の開発

画像処理による更なる感度向上達成(1~2桁)

検出感度1000倍に

THz光源の実時間画像

THz吸収膜(金属薄膜)

保護膜 空気 電気配線

ダイヤモンド ポロメータ薄膜 反射膜

チップの高感度化(要素断面図) 高透過率材料の開発

320x240THzアレイセンサ THzカメラの試作

透過率向上

今回(Si上にパルシ)

従来(Ge)

[THz]

B 波長可変P-Geレーザの開発

- 分光手段を提供する簡便な波長可変固体テラヘルツ波源
→イメージャ評価、大気のテラヘルツ波伝搬特性把握に必須
- 本研究開発では、波長選択フィルタ組込型p-Geレーザシステムの機械式冷凍機による冷却(世界初の試み)で、波長可変固体テラヘルツ波源の実現にアプローチ

電圧パルス(青)と発振パルス(赤)波形

冷凍機本体

レーザ部

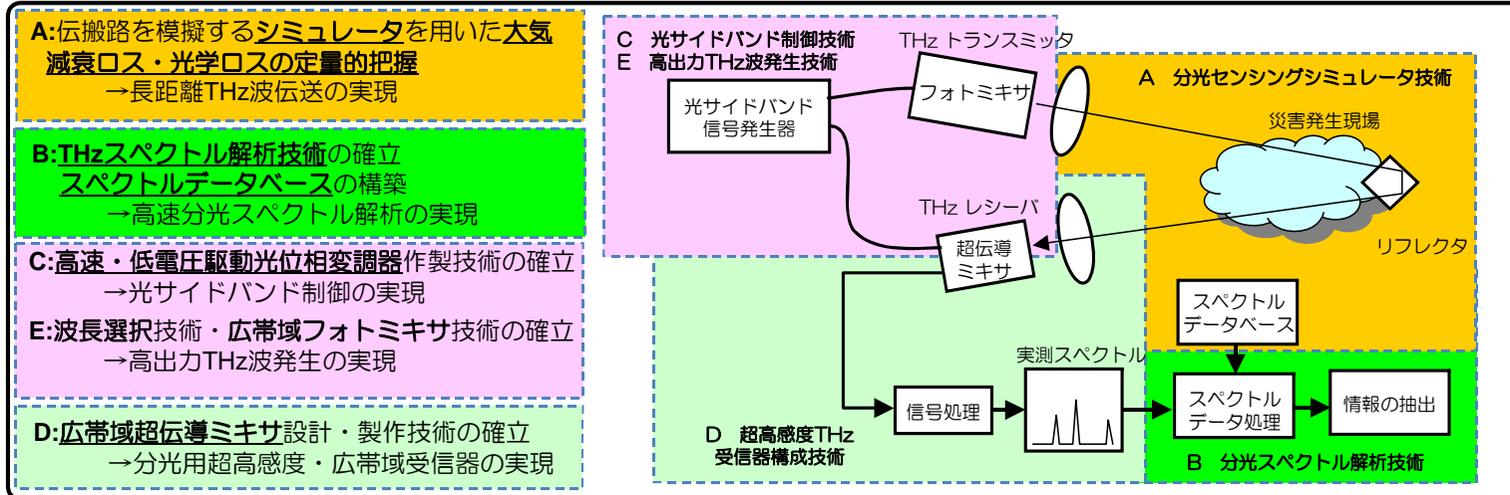
C 災害環境下THz分光による生命体データ取得技術

- 黒煙・白煙など赤外線が透過しない災害模擬環境下でのTHz波の透過性・物質識別能の評価が課題。
- 本研究開発では、黒煙・白煙などの発生システムをTHz装置と合体し、煙の測定を実施した。また被災者特定に必要な情報として人体を①着衣②皮膚③頭髮④負傷想定の上四つに分け、様々な素材や生体試料の分光基礎データを収集した。
- THz帯電磁波に対する煙の透過特性に対する測定研究例は殆どなく、今後様々な条件下での測定を実施。

①白煙ガス測定
②高分子材料測
③タンパク質測定

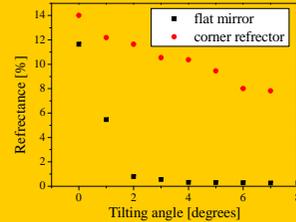
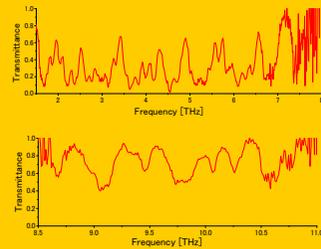
テラヘルツガス測定システム

② THz帯遠隔分光センシング技術の主な成果 その1



A 大気の透過特性を実験的に検証

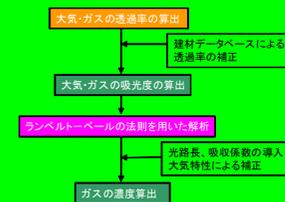
- 高周波領域における大気透過率を実測しイメージングカメラの観測帯域を決定
- 実用的リフレクタを試作し特性を評価



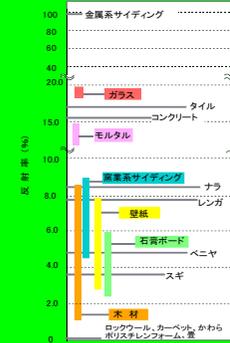
B 危険ガス検知のための解析アルゴリズムの設計

- 背景として想定される建材のスペクトルデータベースの構築
- THz分光センシングシステムやTHz帯イメージャによる危険ガスおよび濃度検知のためのアルゴリズムの設計

ガス濃度検知アルゴリズム



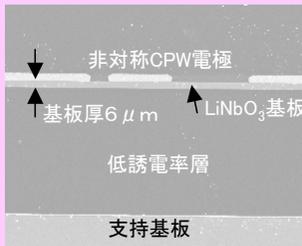
様々な建築材料のTHz帯反射特性 (建材データベースより)



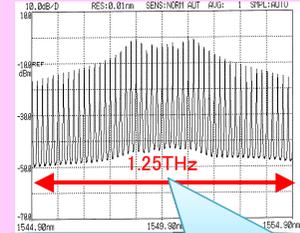
② THz帯遠隔分光センシング技術の主な成果 その2

C 光サイドバンド制御によるTHz帯域の実現

- 0.5~1.0THz帯を発生させるために低駆動電圧で光サイドバンド発生が可能な位相変調素子が必要。
- 本研究開発では、LiNbO₃薄板構造と非対称CPW電極を用いた位相変調器により従来比70%以下の世界で最も低い駆動電圧を達成。



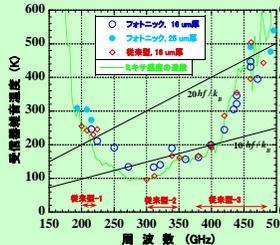
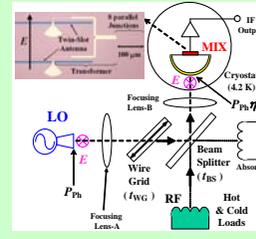
位相変調素子構造



世界で最も低い駆動電圧で1THz帯の光サイドバンドを発生

D 広帯域・低雑音超伝導ミキサ・受信器の実現

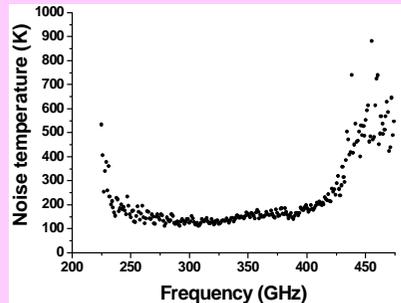
- 高感度・高精度の遠隔分光には広帯域・低雑音ミキサから成るヘテロダイン受信器が重要。既存半導体ミキサは低感度。既存超伝導ミキサは狭帯域。
- 本研究開発では、複数共振回路と低インピーダンスアンテナから成るミキサを開発し、広帯域・低雑音動作に成功。一台のTHz波受信器の占有比帯域としては**世界最高値を得た**。



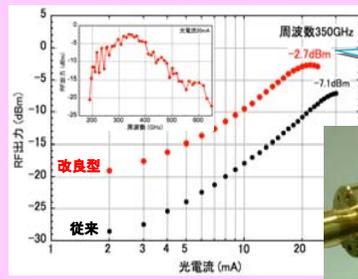
E 光ベース 200~500 GHz帯 周波数可変 連続THz波発生器の開発

- 任意周波数の低雑音光ビート信号を発生させる光局部発振器を開発
- 高速・高出力動作が特徴の単一行きキャリアフォトダイオード(UTC-PD)の素子・モジュール構造をTHz帯動作に最適化、200~500GHzで世界最高出力(-2.7 dBm@350 GHz)を示すフォトミキサを開発
- 超高感度 広帯域超伝導ミキサ(成果 D)の局部発振器に200~500 GHz帯 連続THz波発生器を適用、**超高感度 広帯域受信器を実現**

エレクトロニクスのみでは実現不可能な超広帯域性を光技術の導入により実現



200~500GHz帯フォトミキサ



フォトミキサで世界最高出力

雑誌取材: 超高感度 広帯域受信器によるガス分光
【Laser Focus World Japan. 2009年1月】

本研究の主要な成果は、世界中で初めてテラヘルツ帯を動作域とする光ベースの連続THz波発生器を開発することである。従来の超伝導ミキサは、動作域が非常に狭く、かつ出力が非常に低い。本研究では、単一行きキャリアフォトダイオード(UTC-PD)の素子・モジュール構造をTHz帯動作に最適化し、200~500GHz帯で世界最高出力(-2.7 dBm@350 GHz)を示すフォトミキサを開発した。このフォトミキサは、従来の超伝導ミキサよりも、動作域が非常に広くなり、かつ出力も大幅に向上した。この成果は、超高感度広帯域受信器の実現に大きく貢献している。

本研究の主要な成果は、世界中で初めてテラヘルツ帯を動作域とする光ベースの連続THz波発生器を開発することである。従来の超伝導ミキサは、動作域が非常に狭く、かつ出力が非常に低い。本研究では、単一行きキャリアフォトダイオード(UTC-PD)の素子・モジュール構造をTHz帯動作に最適化し、200~500GHz帯で世界最高出力(-2.7 dBm@350 GHz)を示すフォトミキサを開発した。このフォトミキサは、従来の超伝導ミキサよりも、動作域が非常に広くなり、かつ出力も大幅に向上した。この成果は、超高感度広帯域受信器の実現に大きく貢献している。