

研究状況の概要【中間報告】

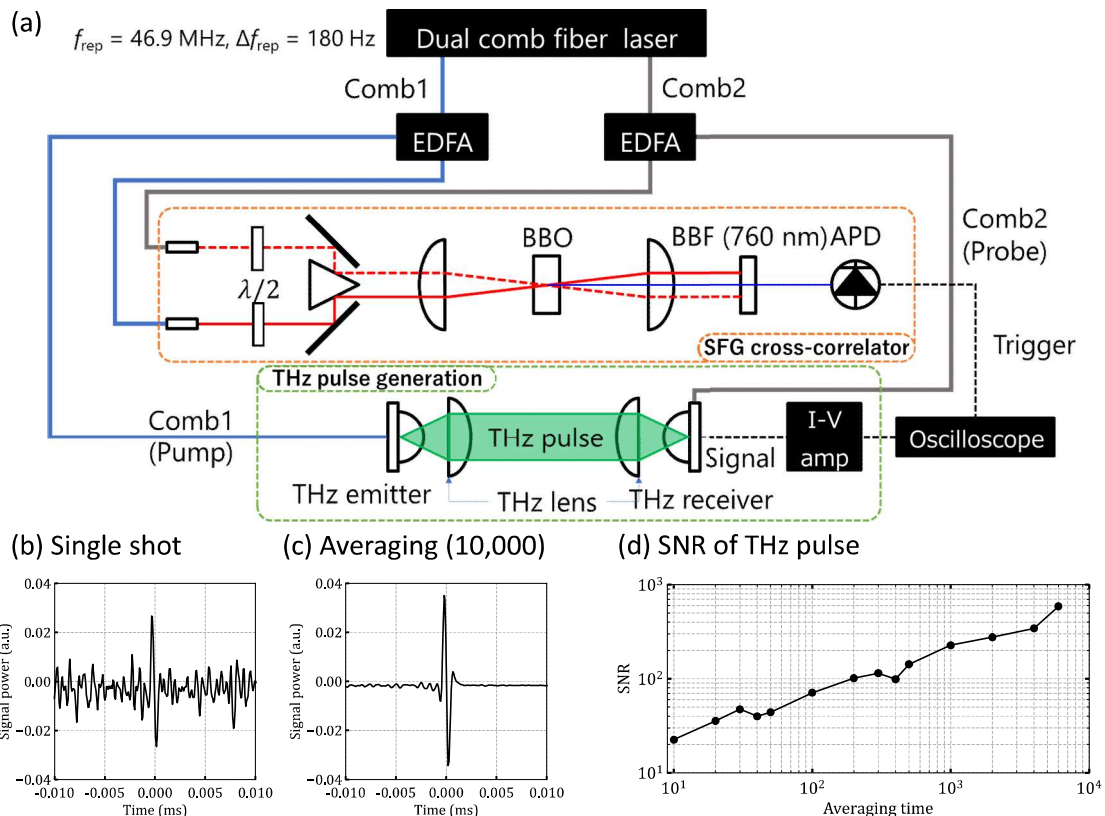
氏 名	中嶋 善晶
1. 研究題目	デュアルテラヘルツ光コム光源によるエアロゾル混在ガス濃度分析計の開発
2. 研究内容	産業分野において、燃焼過程を効率化と環境負荷の小さい工業プロセスを確立するには、煙やススなどのエアロゾルを含む燃焼ガスを、非接触かつリモートで分析する技術が有効である。また、火災現場において二次災害を防ぐためには、煙が充満した閉鎖空間で引火性ガスや有毒性ガスを迅速に検出する必要がある。 テラヘルツ (THz) 波は、ガス分子の回転運動による特徴的な吸収が現れる周波数帯に位置し、THz 波長とエアロゾル粒子サイズの大小関係からエアロゾルの影響を受けにくいと、エアロゾル混在ガスの分析光源として注目されている。一方で、THz 域に回転吸収スペクトルが密集して存在している多成分ガスを正確に識別し分析するには、極めて高いスペクトル精度と分解能を持つ分光手法が求められている。 図に示すように、従来の THz 波分光測定にはフェムト秒レーザー (fs-laser) と光伝導アンテナ (PCA) が用いられている。図 (a) に示す典型的な測定システムでは、レーザー出力を 2 分岐し、一方 (Pump Pulse) を THz 波発生用の PCA (Emitter) に入射し、もう一方 (Probe pulse) を THz 波検出用の PCA (Receiver) に入射する。この際、Probe パルスに移動ステージ (Delay) を用いて時間的遅延 (ΔT) を与えることで、THz 波の時間波形を取得する (図 (b))。しかし、この方法では、<u>分解能と測定時間の間にはトレードオフの関係があるため、課題となっていた。</u> これに対し、図 (c) に示すような、高精度レーザーである光コム (Comb) を 2 台用いたデュアルコム分光法を基にした THz 波の分光法が提案されている。この手法では、2 台の光コムの繰り返し周波数 (f_{r1}, f_{r2}) に差 Δf_r を与えることで、時間的遅延が自動的に付与され、移動ステージが不要となる。この結果、高分解能かつ高速な THz 波の波形取得が可能となる。しかし、<u>2 台の光コムを発生させるための 2 台のレーザー光源と、Δf_r を安定化するための制御系 (Phase lock) が必要となり、測定システムが大型化し、複雑になるという課題がある。</u> これらの課題を解決するため、本研究では、図 (d) に示すデュアル光コム光源を基にした THz 波分光測定システムを開発する。<u>デュアル光コム光源では、Δf_r を有する 2 台の光コムの同時発生が可能であり、安定化制御系も不要である。</u>そのため、<u>THz 分光測定システムの小型化と簡便化が可能となる。</u>本研究では、デュアル光コム光源を用いた THz 波の発生と検出により、エアロゾル混在ガスの濃度分析手法の実現を目指す。

3. 研究成果、課題等

【研究成果】本年度は、デュアル光コム光源（Dual-comb fiber laser）を基にした THz 波の発生と検出の原理実証を目指した。図 (a) に実験構成の概略図を示す。デュアル光コム光源の出力（Comb1, Comb2）に対して、Er 添加光ファイバ増幅器（EDFA）を構築し、光コムの平均パワーを 20 mW 程度まで増幅した。次に、EDFA の出力を 2 分岐し、各分岐において分散補償ファイバなどを用いて分散調整を行い、光コムの時間幅を 100 fs 程度まで圧縮した。その後、Comb1 と Comb2 の片方を、BBO 結晶、光バンドパスフィルタ（BBF）、およびアパランシェ受光器（APD）で構成された和周波発生相互相関計（SFG Cross Correlator）に送り、THz 波検出のための時間原点（Trigger）信号を検出した。もう片方の Comb1 を THz 波発生用の PCA（THz emitter）に、Comb2 を THz 波検出用の PCA（THz receiver）にそれぞれ入射した。図 (b) は、シングルショット測定（測定時間 6 ms）において取得した THz 波の時間波形である。この測定では、完全に制御がないデュアル光コム光源を用いながら、THz 波特有のモノサイクルの時間波形を高速に取得することに成功した。また、図 (c) に示すのは、10,000 回積算平均した場合の THz 波の時間波形である。ランダムノイズ成分が積算平均によって抑制され、信号成分のみが抽出されていることが確認できた。さらに、図 (d) は、積算平均回数（Averaging time）に対する信号対雑音比（SNR）を示している。積算回数 N に対して $\sqrt{N}$ の割合で SNR が向上しており、積算平均が正確に行われていることが確認できた。これらの結果より、小型・簡便な構成でのデュアルテラヘルツ光コム光源の開発と THz 波の高感度検出を実現した。

【研究発表および成果の公開状況】OPJ2024（報告済）、レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会（投稿済）、CLEO2025（投稿済）、ALPS2025（投稿予定）、論文・特許（準備中）

【課題】本研究で使用した PCA は価格が高く、納期も要するため、共同研究先である徳島大から貸与いただいた。しかし、この PCA が故障したため、今後は新規での PCA の導入が必要である。



4. 今後の予定（助成希望金額とその用途についてもご記入願います）

項目3で述べたように、これまで用いていたPCAが故障した。そのため、2024年12月以降は、当初の研究実施計画に挙げていた「①THz波の分光装置の開発」に加えて、「②新規のPCAの導入」を進める予定である。

①THz波の分光装置の開発

まず、分光装置の周辺システムの構築準備を進める。具体的には、THz波用光学系（約100万円を予定）と、エアロゾル混在ガスを封入するためのガスセルまたはガスフローセル（約50万円を予定）を購入し、装置を構築する予定である。さらに、図(e)に示すように、デジタイザを用いてTHz波の時間波形を取得し、パソコンにデータを取り込む。これまでは、汎用型デジタルオシロスコープを用いて波形を取得していたが、リアルタイム解析が困難であった。デジタイザを導入することで、エアロゾル混在ガスの高感度・高精度測定とリアルタイム解析の実現が期待できる。デジタイザで取得したTHz波の時間波形をパソコン内のプログラムにより高速フーリエ変換し、THz領域におけるガス分子の回転吸収スペクトルを導出する。この方法により、ガスの種類、濃度、温度の分析を迅速かつ正確に行えるようにする。

②新規PCAの導入

PCAの専門家である福井大学遠赤外領域開発研究センターの谷正彦教授と共同研究を行い、これにより、デュアル光コム光源に適した新規PCAの開発を進める（図(d)）。これまで用いていたPCAは海外製品であり、昨今の円安の影響により200万円近くに上昇している。装置の高価格化を抑えるため、国内の半導体基板メーカーに材料を試作依頼し、福井大学でPCAの作成を進める予定である（開発費用約150万円を予定）。高感度タイプと広帯域タイプの2種類をEmitterとReceiverの2セットを開発し、デュアル光コム光源を用いて新規PCAの性能評価を行う。

