

呼吸分析に向けた超高速かつ超高分解能なデュアルコム分光に関する研究

日大生産工（院）○竹蓋大騎

日大生産工 野邑寿仁亜 石澤淳

1. まえがき

呼吸分析とは、呼吸中に含まれるアンモニアやアセトンといった病気に相関関係のあるバイオマーカーのガス濃度を測定することで、糖尿病や肝性脳症などの疾患の早期発見や診断時間の短縮が見込める診断方法である。我々は、分光法の一つであるデュアルコム分光法に着目した。Fig. 1 にデュアルコム分光の概略図を示す。デュアルコム分光は分光法の一つであり、繰り返し周波数が異なる 2 台の光周波数コム(光コム)のうち信号コムにサンプルを透過することで、測定対象のスペクトル情報を取得し、局発コムが信号コムの各コムモードの情報を分離することで、正確な周波数目盛を持つ精密な吸収スペクトルを得ることができる。従来のデュアルコム分光は、繰り返し周波数が f_{rep} と $f_{rep} + \Delta f_{rep}$ の様にわずかに異なる 2 台のモード同期レーザー(ML)を用いていたため、測定の分解能と測定時間がトレードオフの関係にあった。この課題克服に向けて、ML ベース光コムと電気光学変調(EO)コムの 2 台の異なる種類の光コムを用いることで、呼吸分析に向けた超高速かつ超高分解能なデュアルコム分光法の実現を目指す。

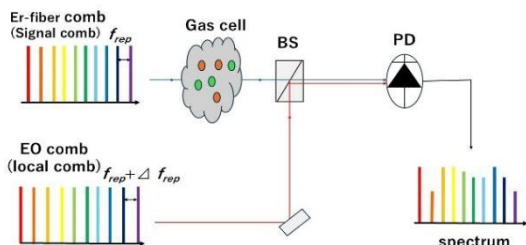


Fig. 1 デュアルコム分光

2. 提案手法

本研究の実験系を Fig. 2 に示す。信号コムに高速制御 Er ファイバレーザークムを用いる。Er ファイバレーザークムの製作には、東邦大学の中島研究室と協力し、約 63 MHz の繰り返し周波数の Er ファイバレーザークムを構築している。一方で局発コムにはキャリアエンベロープオフセット(CEO)制御した 12.5 GHz の繰り返し周波数の EO コムを用いる。これらの繰り返し周波数の大きく異なる光周波数コムを用いて、高周波数分解能と計測時間の短縮化を両立させたデュアルコム分光の実現を目指す。

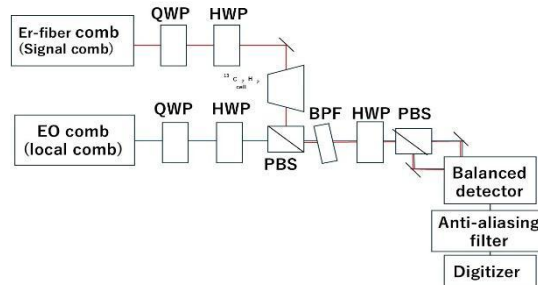


Fig. 2 デュアルコム分光の実験系

QWP: Quarter Wavelength Plate., HWP: Half Wavelength Plate. PBS: Polarizing Beam Splitter.

3. 実験方法および測定方法

Fig. 3 に実験系を示す。本研究では、Er ファイバレーザークムの f_{ceo} 信号を $f \cdot 2f$ 自己参照干渉計を用いて検出した。 $f \cdot 2f$ 干渉計では、1000 nm から 1 オクターブ広がった広帯域光を利用して、PPLN 結晶を用いて 2000 ~ 2060 nm 成分の第 2 次高調波を発生させることで、自己参照法を行い、 f_{ceo} 信号を検出する。その後、検出した f_{ceo} 信号を自作の PID 制御回路に入力し、制御信号を励起 LD の注入電流に帰還することで、制御することを実現した。

また、50/50 カプラで分岐した Er ファイバ

Ultra-fast and ultra-high resolution dual comb spectroscopy
for breath analysis
Daiki TAKEFUTA
Junia NOMURA, and Atsushi ISHIZAWA

レーザの信号と CW レーザ(波長: 1550nm)の信号を 90/10 カプラで合波し、回折格子とレンズを用いて分散、集光したものを受光器で検出することで、 f_{beat} 信号を得た。

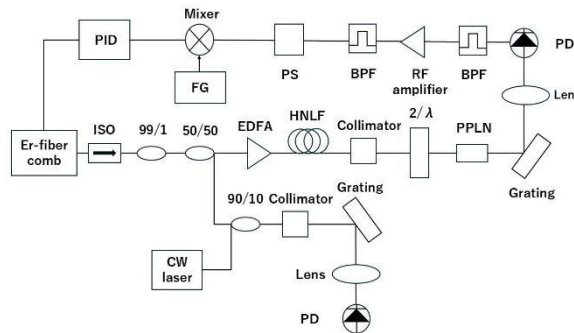


Fig. 3 実験配置図

ISO: Isolator., EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier., HNLf: Highly Nonlinear Fiber., PPLN: Periodically poled lithium niobate., PD: Photodiode., BPF: Band pass Filter., PS: Power Splitter., FG: Function Generator

4. 実験結果および検討

Fig. 4 に S/N 比約 30 dB の f_{ceo} 信号、Fig.5 に制御帯域が約 500 kHz の f_{ceo} 信号を示す。Fig. 6 に S/N 比約 30 dB の f_{beat} 信号を示す。

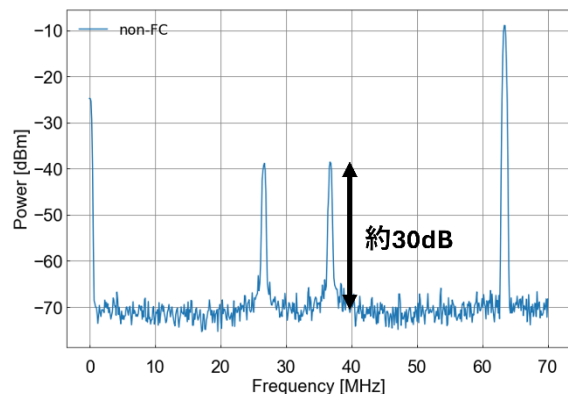


Fig.4 S/N 比約 30 dB の f_{ceo} 信号

Fig.5 制御帯域が約 500 kHz の f_{ceo} 信号

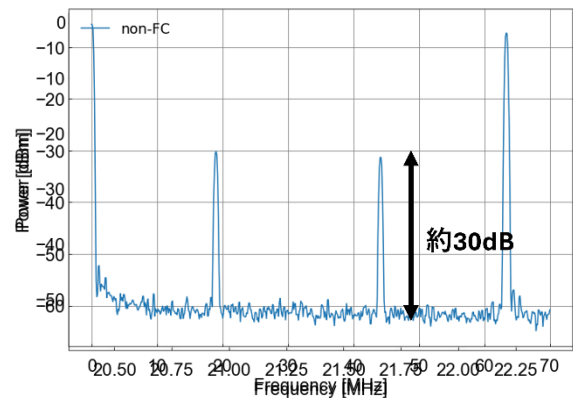


Fig.6 S/N 比約 30 dB の f_{beat} 信号

5. まとめ

本研究では、デュアルコム分光に用いる高速制御ファイバコムの開発に向け、Er ファイバコムの f_{ceo} の検出と制御、 f_{beat} の検出を実現した。

今後は、CW レーザを用いた f_{beat} 信号の周波数安定化を行い、EO コムとのデュアルコム分光による超高速かつ超高分解能なデュアルコム分光法の実現を目指す。

参考文献

- (1)大久保章, 長さの国家標準「光コム」を用いた高精度・高速ガス分析, SAT テクノロジー・ショーケース, (2021), T-4, https://www.science-academy.jp/showcase/20/pdf/T-004_showcase2021.pdf, (参照 2025-10-13)
- (2) 大久保章, 稲場肇
超広帯域デュアルコム分光法の開発, (2016)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/85/12/85_1028/pdf
(参照 2025-10-13)
- (3) 柏木謙, 大久保章, 稲場肇 2 種類の光コムを組み合わせたデュアルコム分光の測定スペクトル範囲の拡大, 応用物理学会秋季学術講演会, (2024), 19a-A37-