

## 呼吸分析に向けた高速かつ高精度なデュアルコム分光法の開発

日大生産工 (学部) ○佐藤 優成 佐藤 幹  
久保 将皓  
日大生産工 石澤 淳

## 1. まえがき

従来の分光法は、プリズムや回折格子等の分散型素子を利用して光スペクトルを空間上で分離して各波長の強度を順次計って行くというものであったが、分散素子の制限により高い波長分解能が得られず、波長毎に強度を計っていくので広いスペクトル帯域の計測には時間を要するという問題があった。この問題点を克服する為に、赤外スペクトルを測定するためのフーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) が開発された。FTIR では光源から出射される赤外光をビームスプリッタ (BS) で2つの光路に分け、一方の光は移動鏡側に、もう一方の光は固定鏡側に進ませる。ここで移動鏡はレーザーの進行方向に一定速度で移動させる。移動鏡および固定鏡でそれぞれ反射した光は再びBSに戻り合成され、両方の光の光路差が時間に伴って変化することにより干渉する。この干渉波を単一の検出器で検出し、PC を用いてフーリエ変換することで赤外スペクトルを得る。分散型の分光器と比較して広帯域高分解能の計測が高速で可能となり、各メーカーから様々な計測装置が製品化され広く普及している。しかしながら、さらに波長分解能や計測時間の高速化を図るには、移動鏡の移動速度と移動距離が制限要因となっていた。そこで、この制限を克服する為に、移動鏡の代わりに、繰り返し周波数が  $f_{\text{rep}}$  と  $f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}$  のように僅かに異なる2台のモードロックレーザーを用いたデュアルコム分光法がマックス・プランクのHänsch教授のグループにより考案された<sup>1)</sup> (Fig. 1)。2台のレーザーからの光は繰り返し周波数と同じ間隔で等間隔に並んだ輝線スペクトルから成る光周波数コム光<sup>2),3)</sup>を形成する (Fig. 2)。両者の僅かな輝線スペクトル間隔の違い  $\Delta f_{\text{rep}}$  により、二つのコムを構成する各輝線スペクトルの光周波数差によって生じるビート周波数は、元の光周波数と線形関係になるので、回折格子等を用いずに光の周波数をRF領域のビート信号に変換して計測する事が可能となる。本手法は、移動鏡が不要なので、FTIRよりさらに高分解能な分

光をより高速に行う事が可能となる。しかしながら、従来のデュアルコム分光は、周波数分解能と測定時間がトレードオフの関係にある。

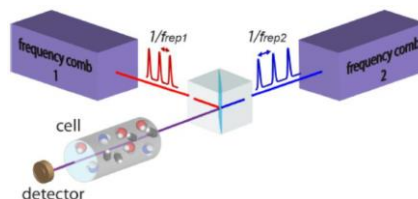


Fig. 1 デュアルコム分光法

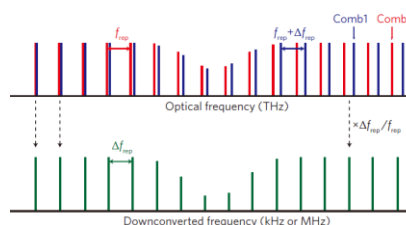


Fig. 2 デュアルコム分光の原理

## 2. 提案手法

我々は、繰り返し周波数の大きく異なるファイバーレーザーコムと電気光学変調 (EO) コムをそれぞれ、信号コムと局発コムに用いることで、高い周波数波数分解能かつ高速測定可能なデュアルコム<sup>4)</sup>に着目している。この先行研究ではEOコムはファイバーコムとの共通のCWレーザー光を基準としている。EOコムの線スペクトルの狭窄化の為に、高非線形ファイバー (HNLF) を用いた広帯域光と参照光源と干渉信号を計測し、RF基準信号を基にフィードバック制御を行っている。我々はEOコムのキャリアエンベロップオフセット (CEO) 信号計測技術を用いたEOコムの線スペクトルの狭窄化を行うことで、高い信号対雑音比 (SNR) でデュアルコム分光できることから、より高周波数分解能かつ高速分光できる手法を提案実証することで、呼吸分析に応用する<sup>5)</sup>。呼吸分析とは、呼吸に含まれる酸素や二酸化炭素などの濃度を分析することである。

Development of high-speed and highly accurate dual-comb spectroscopy  
for breath analysis

Yusei SATO, Motoki SATO, Masahiro KUBO and Atsushi ISHIZAWA

### 3. 提案手法

実験配置図をFig. 3に示す。信号コムには高速制御ファイバーレーザーコムを用いる。東邦大学の中嶋研究室と協力し、線幅7 Hzの狭線幅レーザーを基準に狭線幅化した50~100 MHz程度の繰り返し周波数のファイバーレーザーコムを構築している。一方、ローカルコムはCEO制御した12.5 GHz繰り返し周波数のEOコムを用いる。我々は、これら繰り返し周波数の大きく異なる光周波数コムを用いて、高周波数分解能と短い計測時間を両立させるデュアルコム分光を目指している。

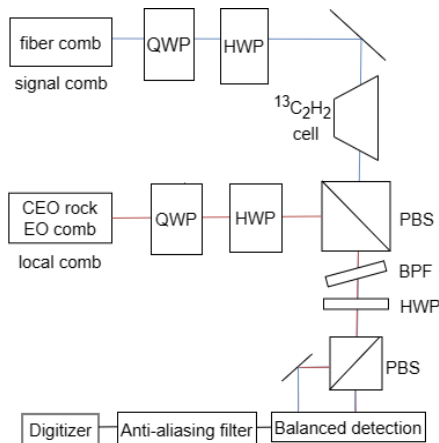


Fig. 3 デュアルコム分光の実験系

### 4. 12.5 GHz繰り返し電気光学変調コム

12.5 GHz繰り返しEOコムの実験配置図をFig. 4に示す。中心波長1531.5 nmのCWレーザーからの出力光に対し、RF信号発生器からの12.5 GHz正弦波信号で駆動する位相変調器で位相変調をかける。この過程により、12.5 GHz繰り返し周期のアップチャープとダウンチャープが生成される。次に、線形なダウンチャープ部を強度変調器で抜き出すことにより、Fig. 5に示すように、半値全幅4 nmの帯域を持つ平坦な光コム発生に成功した。SNRは約60 dBである。位相変調器と強度変調器を駆動するRF信号のタイミングは、RF位相シフターを用いて調整する。位相変調器後のチャープさせた光を単一モードファイバーに通して分散を付与し、光パルス化する。

### 5. まとめ

本研究は、半値全幅4 nmの帯域を持つ12.5 GHz繰り返しEOコム発生に成功した。今後は、CEO制御した12.5 GHz繰り返しEOコムと高速制御ファイバーレーザーを構築し、高周波数分解能かつ高速分光計測を実証する。

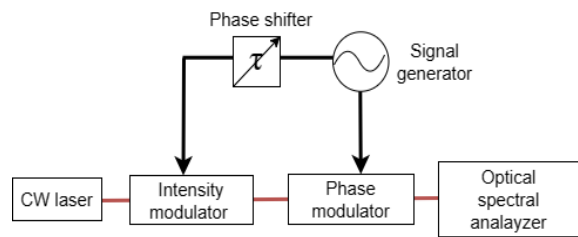


Fig. 4 12.5 GHz 繰り返し EO コムの実験配置図  
赤線：光ファイバー、黒線：RF ケーブルである。

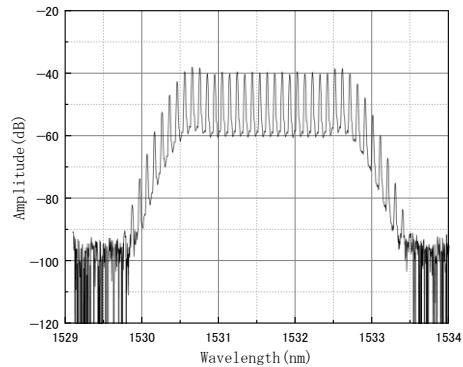


Fig. 5 12.5 GHz繰り返しEOコムの  
光スペクトル

### 参考文献

- 1) B. Bernhardt, *et al.*, “Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy,” *Nat. Photon.* vol. 4 (1), (2010), pp. 55-57.
- 2) 美濃島薫, 光周波数コムの開発の歴史と革新的応用への展開, [https://app.journal.ieice.org/trial/103\\_11/k103\\_11\\_1072/index.html](https://app.journal.ieice.org/trial/103_11/k103_11_1072/index.html), (参照 2023/10/06)
- 3) 佐々田博之, 光周波数コム技術の現状と展開, <https://annex.jsap.or.jp/photronics/kogaku/public/41-09-sougouhoukoku.pdf>, (参照 2023/10/06)
- 4) 柏木 謙, 大久保章, 稲場 肇, 2種類の光コムを組み合わせた高速かつ高分解能なデュアルコム分光, 応用物理学春季学術講演会, 2023年, 16p-A502-12
- 5) 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](https://www.science-academy.jp/showcase/20/pdf/T-004_showcase2021.pdf), (参照 2023/10/07)