

# 1.5 μm 帯デュアルコム分光装置の開発

武者研究室 高田 大樹

## 1. はじめに

分光とは、原子や分子の電磁波の吸収特性を調べることである。分光の歴史は古く、1666年にニュートンがプリズムを用いて分光実験を行ったことから始まる。その後、1970年代にレーザーを用いた分光が行われ、2000年頃に光周波数コムを用いた分光実験が行われた。

光周波数コムとは等間隔に縦モードが並んだ光のことである。光周波数コムの発生方法には、EOM 光変調やモードロックレーザーがあるが、我々の研究室ではモードロックレーザーを用いて光周波数コムを発生させた。現在、光周波数コム発生のためのモードロックレーザーには主に可視域での Ti:sapphire レーザー、1 μm 帯の Yb:ファイバレーザー、Er:ファイバレーザーの 3 種類ある。我々の研究室では Er:ファイバレーザーを用いてモードロックレーザーを開発した。Er:ファイバレーザーは共振器を全ファイバー化することができるため、長期安定動作が可能という利点がある。その反面、全ファイバー化することによって共振器長を変えようとしたとき、一回ファイバーを切つてまた融着しなければならないので共振器長の微調整が難しいという難点がある。

光周波数コムは周波数軸上のものさしとして用いられる (図 1)。光周波数コムの中の  $n$  番目の周波数は(1)式で表される。

$$f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep} \quad (1)$$

$f_{rep}$  とは光コムの縦モード間隔、 $f_{ceo}$  とは次数  $n$  を 0 次まで外挿したときのオフセット周波数、 $n$  とは次数を表している。よって、(1)式から  $n$  番目の周波数も決定することができる。この性質から、光コムはときに用いられ、1 回の計測で広帯域の周波数情報を得ることができる。

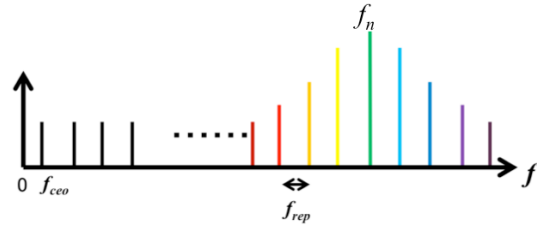


図 1 光周波数コム

しかし、一つの光コムで得られた情報は光周波数領域であるため直接計測が不可能である。よって、二つ(デュアル)の光コムを用いるデュアルコム分光法を用いることで光周波数領域からマイクロ波領域への変換が可能となった。本研究の目的は二台の光コムを作成し、デュアルコム分光システムを開発することである。

## 2. 原理

### デュアルコム分光法

デュアルコム分光の原理は図 2 のようになっている。

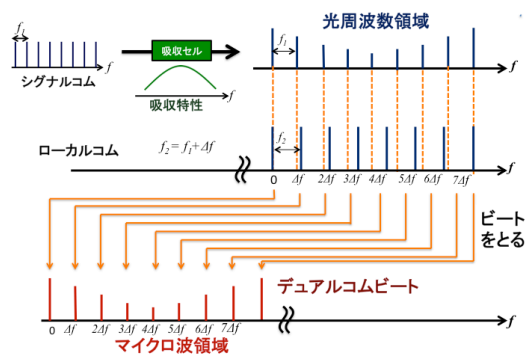


図 2 デュアルコム分光法

繰り返し周波数  $f_1$  のシグナルコムを吸収セルに入れ、分光情報は光周波数領域に現れる。光周波数は周波数が高すぎるため、直接計測することができない。よって、ローカルオシレーターとして繰り返し周波数が  $\Delta f$  異なる光コムを用意する。二つの光コムのビートをとると、それぞ

れの縦モード間のビート周波数は  $\Delta f$  ずつずれていく。よって、ビート周波数はマイクロ波領域に繰り返し周波数  $\Delta f$  のデュアルコムビートを観測できる。このように分光情報を光周波数領域からマイクロ波領域に変換する方法をデュアルコム分光法という。デュアルコム分光法のメリットは光周波数領域からマイクロ波領域に1ショットで変換できることである。デュアルコム分光を行う上で注意すべき点は分解能と可測定域である。

分解能は図 3 のように吸収させたときの周波数間隔で決まるため分解能は  $f_{rep}$  で決定する。 $f_{rep}$  が小さい方が分解能は高くなる。

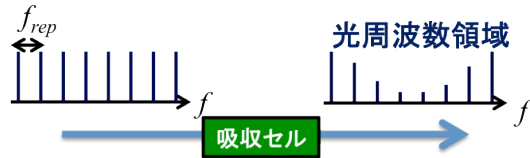


図 3 分解能

可測定域は図 4 のように二つの光コムの繰り返し周波数差  $\Delta f$  が繰り返し周波数の半分になったときまでである。可測定域を超えると同じ周波数のビートが観測され、信号が混ざってしまう。よって、可測定域は(2)式で表すことができる。

$$f_{dyn} = \frac{f_{rep}^2}{2\Delta f} \quad (2)$$

(2)式より、 $\Delta f$  が小さければ小さいほど可測定域は広がることになる。よって、可測定域は繰り返し周波数差  $\Delta f$  で決定する。

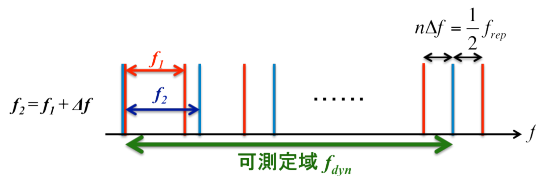


図 4

### 3. モードロックレーザーの開発

本研究で作製したモードロックレーザーは図 5 のような非線形偏光回転の原理を用いたリング共振型モードロックレ

ザーである。975 nm の励起用 LD を用いて 1550 nm の光をモードロック発振させている。また、共振器長は 3.6 m で繰り返し周波数は 54 MHz になるように構成した。

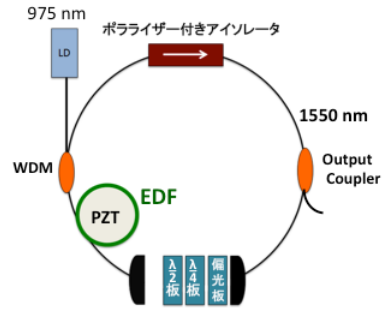


図 5 モードロックレーザー

デュアルコムには二台の光コムを作製する必要があるが、一つは共振器長固定の全ファイバー型である光コムである。もう一方は共振器中の一部を空間中に出すことで自由空間で Delay line を構成した共振器長可変の光コムである。Delay Line は図 6 であり、ラックピニオンによる粗動とマイクロメータによる微調により共振器長を最大 50 mm 動かすことが可能である。共振器長固定の光コムを固定コム、共振器長可変の光コムを可変コムと名付ける。

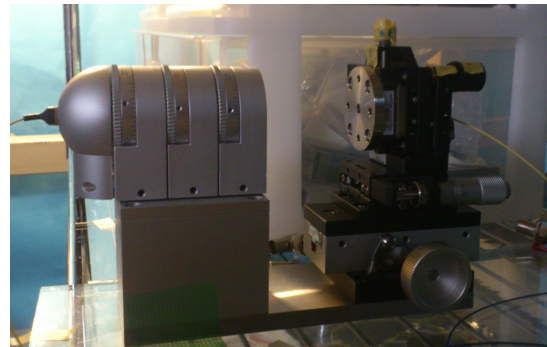


図 6 Delay Line

可変コムをモードロック発振させたときのスペクトルと時間波形は図 7, 図 8 のようになった。図 7, 図 8 よりスペクトル幅は 60 nm、パルス間隔は 18 ns、平均パワーは 2.105 mW であることが分かる。

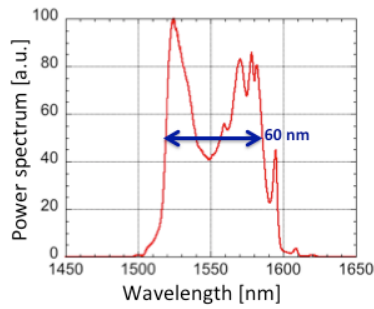


図 7 スペクトル

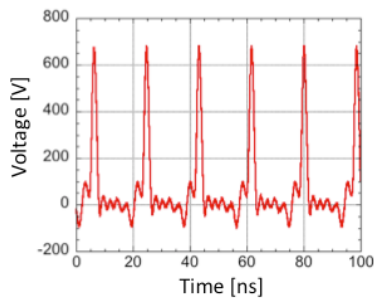


図 8 時間波形

可変コムをモードロック発振させたときの繰り返し周波数は  $54.1796750 \text{ MHz}$  であった。また、同様に固定コムをモードロック発振させたときの繰り返し周波数は  $54.4239886 \text{ MHz}$  であり、二台のコムの繰り返し周波数差は約  $244 \text{ kHz}$  となった。

#### 4. 繰り返し周波数の安定化

外乱などの影響によりファイバーが伸び縮みすることで繰り返し周波数  $f_{rep}$  は変化してしまう。よって、 $f_{rep}$  を安定化する必要があり、そのための実験系は図 9 のようになっている。

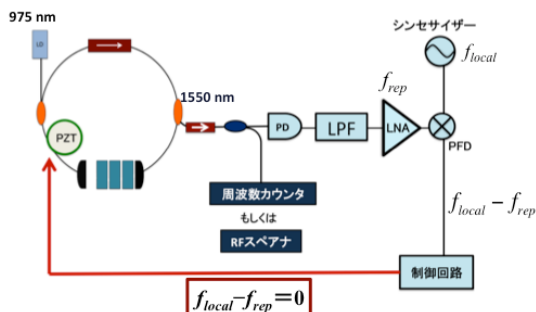


図 9  $f_{rep}$  安定化のための実験系

繰り返し周波数  $f_{rep}$  とシンセサイザーからの信号  $f_{local}$  の差周波数がゼロになるよ

うに制御回路から PZT に制御をかけている。PZT に電圧をかけると PZT の直径が変化し巻き付けてある EDF が伸び縮みすることで繰り返し周波数を変化させている。安定化した結果は図 10 のようになった。

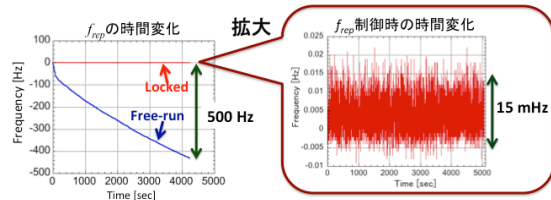


図 10 繰り返し周波数の安定化

無制御時には繰り返し周波数は  $500 \text{ Hz}$  程の変動があったが、制御時には繰り返し周波数の変動を  $15 \text{ mHz}$  以下に抑えることができた。この結果から長期安定度を示すアラン分散を計算すると図 11 のような結果が得られた。図 11 の結果から制御時のアラン分散はシンセサイザーのアラン分散とほとんど同じ値になっているので繰り返し周波数は長期的に安定であるといえる。

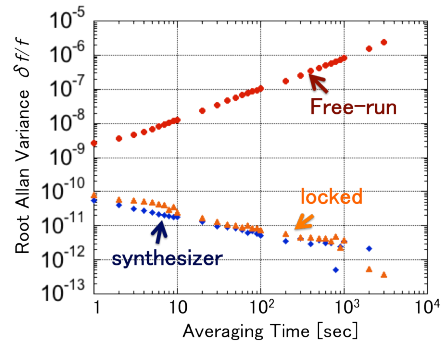


図 11 アラン分散

#### 5. デュアルコムビートの観測

二台の光コムを繰り返し周波数を安定化した状態でデュアルコムビートを観測するための実験系は図 12 のようになる。

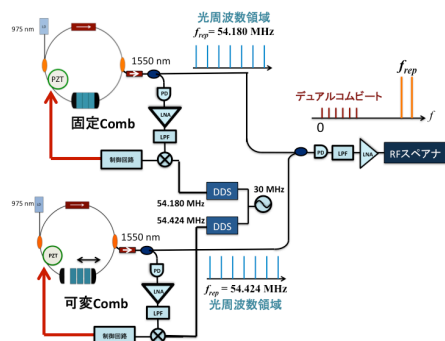


図 12 デュアルコムビート実験系

二台の光コムを 3dB カプラーで合わせると高周波数領域に二つの光コム、低周波数領域にデュアルコムビートを観測することができる。まず、二つの光コムの繰り返し周波数を観測すると図 13 のようになる。図 13 より繰り返し周波数差は 244kHz になっていることが分かる。

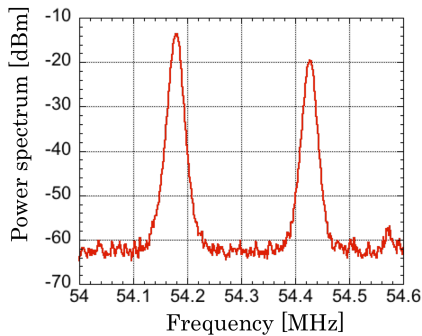


図 13 二つの繰り返し周波数

高周波数域を落とすようにローパスフィルターを用いてデュアルコムビートを観測すると図 14、図 15 のような結果が得られた。

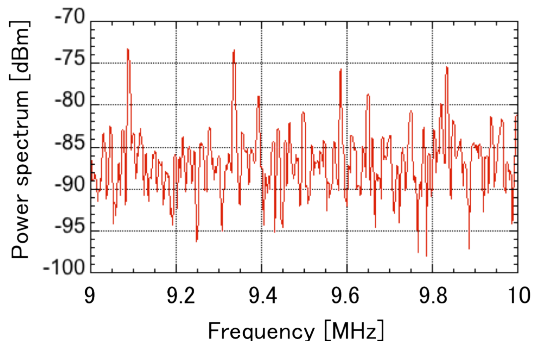


図 14 測定領域 1MHz のデュアルコムビート

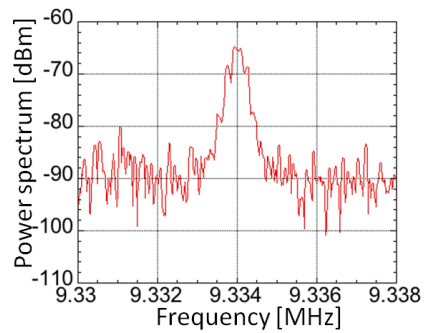


図 15 測定領域 8kHz のデュアルコムビート

測定結果から繰り返し周波数 244 kHz、線幅 500 Hz、S/N 比 12dB のデュアルコムビートを観測できた。前述のようにデュアルコムの繰り返し周波数差は可測定域に影響する。デュアルコムビートの繰り返し周波数は現状では離れすぎている。よって、可変コムの共振器長を変えることで数 kHz まで低下させ、線幅を 100 Hz まで低下させた状態でデュアルコムビートを観測したい。そのためには、まず现阶段で行っていない  $f_{ceo}$  の安定化を行うことで線幅がさらに細くなったデュアルコムビートを観測したい。また、繰り返し周波数安定化のさらなる向上も目指したい。

## 6. まとめと展望

### まとめ

1.5  $\mu\text{m}$  帯デュアルコム分光装置の開発をテーマに二台の光コムを開発し、モードロック発振をさせた。また、繰り返し周波数を安定化させ、その状態でデュアルコムビートを観測した。結果、244 kHz、線幅 500 Hz、S/N 比 12dB のデュアルコムビートを観測することができた。

### 展望

繰り返し周波数差を数 kHz まで低下させるために、可変コムの共振器長を最適化する。また、現在は  $f_{ceo}$  の安定化はまだ行っていないので、 $f_{ceo}$  と  $f_{rep}$  を同時に安定化した状態でのデュアルコムビートを観測した。最終的には完成したデュアルコムを用いて実際に分光を行いたい。