

# 繰り返し周波数 325 MHz 光周波数コムを用いた絶対周波数計測システムの構築

岩國研究室 4年 酒井直人

## 1. 背景・目的

絶対周波数計測では、SI系の1秒の定義であるセシウム133原子の基底状態 $F$ (全角運動量) $=3$ 、 $F=4$ の2つの超微細準位間の遷移周波数9.2 GHzを基準として数100 THzの光周波数を決定する[1]。光周波数コムは、周波数軸上で多数のモードが等間隔に並んだ楕型のスペクトルをもつ超短パルスレーザーである。各モードの間隔は、数十 MHz~数 GHzのマイクロ周波数領域であり、これを基準マイクロ波に安定化すれば全てのコムモードに絶対周波数が値づけられる。したがって、光周波数コムのあるモードと測定対象のCWレーザーとの差の周波数を測定すれば、CWレーザーの絶対周波数をマイクロ周波数の精度で決定することができる。このことから、光周波数コムは周波数のものさしと呼ばれることがある。本研究では、繰り返し周波数325 MHz 光周波数コムを用いたCWレーザーの絶対周波数計測システムの開発を目指して、CWレーザーと光周波数コムのビート信号 $f_{beat}$ を検出する干渉計の構築を行った。

## 2 光周波数コムを用いた絶対周波数計測

図2.1は、時間領域と周波数領域で見た光周波数コムの出力を示す。光周波数コムの出力は、時間領域ではパルス列で、これをフーリエ変換して周波数領域で見ると等間隔の多数のモードからなる楕型のスペクトルになっている。光周波数コムの $n$ 番目のモード周波数 $f_n$ は図2.1の周波数領域の図より、 $f_n = nf_{rep} + f_{ceo}$ と表せる。ここで $f_{rep}$ は繰り返し周波数、 $f_{ceo}$ は仮想的に0 Hzまで光周波数コムのスペクトルが広がっているとした時に、もっとも0 Hzに近いモードの周波数であり、オフセット周波数と呼ばれている。 $f_{ceo}$ は、搬送波の伝搬速度である位相速度と包絡線の伝搬速度である群速度の差のため生じる。 $n$ は、モード番号で100万程度の整数である。

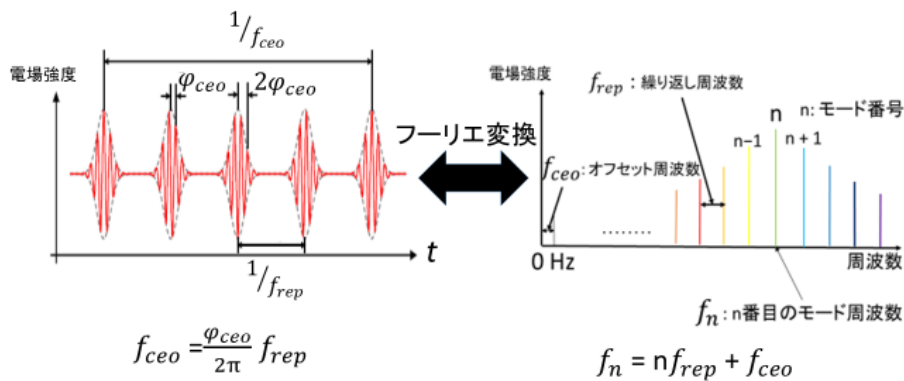


図 2.1 光周波数コム(左図: 時間領域、右図: 周波数領域)[2]

図 2.2 は、光周波数コムを用いた CW レーザー周波数計測の方法を示す。CW レーザーの周波数  $f$  は  $f_{rep}$  と  $f_{ceo}$  を用いて、 $f = nf_{rep} + f_{ceo} + f_{beat}$  と表せる。ここで  $f_{beat}$  は、CW レーザーの周波数とその周波数にもっとも近い光周波数コムのモードとの差の周波数である。符号を含めたそれぞれのパラメーターを計測することで CW レーザーの周波数を決定する。 $f_{rep}$ 、 $f_{ceo}$ 、 $f_{beat}$  を RF 基準信号にロックし、周波数カウンターで計測する。モード番号  $n$  の決定方法はいくつもあるが、そのうちの一つに波長計を用いる方法がある。その測定方法は、波長計で測定する CW レーザーの波長を計測し、 $f_{rep}$  の値から  $n$  を決定する方法である。しかし、汎用的な市販の波長計では測定精度が 7 桁にとどまるため、繰り返し周波数が数 10 MHz 程度の場合繰り返し周波数と波長計の精度が同程度となり、モード番号  $n$  を正確に決定できない。だが、本研究で使用する光周波数コムは、325 MHz と繰り返し周波数が十分高いため、モード番号を波長計だけで決定することができる。他の測定方法としては、繰り返し周波数の変化量に対するビート信号の変化量から見積もる方法や 2 台の異なる繰り返し周波数の光周波数コムを用いて  $n$  を決定する方法などがある[2]。

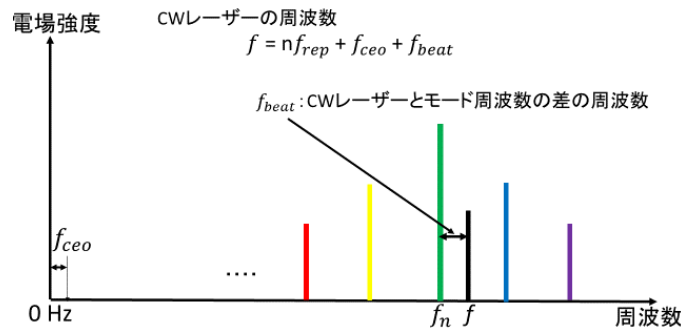


図 2.2 CW レーザーの絶対周波数計測

### 3 実験結果

#### 3.1 モード同期の確認

図 3.1.1 は、本研究で用いた光周波数コムを示す。図 3.1.1 のレーザー共振器はリング型共振器になっている。レーザー媒質は、 $Er^{3+}$  で外部共振器型半導体レーザー (LD1、LD2、LD3: 980 nm) で励起している。モード同期は、非線形偏波回転を利用し、 $\lambda/2$  波長板、 $\lambda/4$  波長板、偏光ビームスプリッターで信号光の偏光を調節することで実現する。非線形偏波回転は、自己位相変調や相互位相変調によりファイバー中を伝搬する光パルスの偏光状態が光強度によって変化することを利用してモード同期をかける手法である[2]。 $f_{rep}$  は共振器長で決まり、325 MHz である。光ファイバー共振器は、ほとんどがファイバーで構成されているため自由空間がなく外的影響を受けにくい、アライメントをする必要がないことから安定したモード同期を維持することができる。本研究では、レーザー共振器から出力された光は BS で分けられ、反射光を受光器に入射させている。本研究ではこの受光器で  $f_{rep}$  ビート信号を観測し、モード同期されていることを確認した。 $f_{rep}$  ビート信号は、光周波数コムの隣り合うモード同士のビート信号として検出される。図 3.1.1 の右下は、RF スペクトラムアナライザー (KEYSIGHT、E4411B) で観測した  $f_{rep}$  ビート信号を示す。

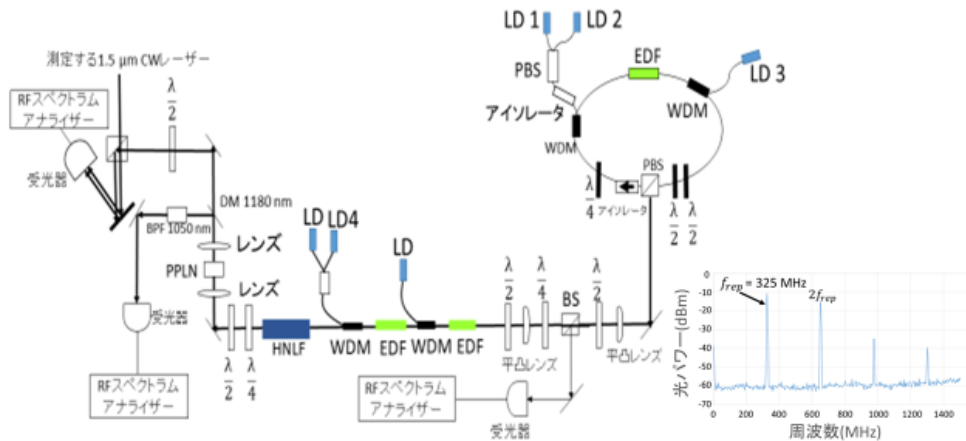


図 3.1.1 使用した光周波数コム(LD: 外部共振器型半導体レーザー、EDF: エルビウム添加ファイバー、WDM: 波長分割カプラ、HNLF: 高非線形ファイバー、PBS: 偏光ビームスプリッター、BS: ビームスプリッター、PPLN: 周期分極反転二オプ酸リチウム、DM: ダイクロイックミラー、BPF: バンドパスフィルター、 $\lambda/2$ :  $\lambda/2$  波長板、 $\lambda/4$ :  $\lambda/4$  波長板) [2] 右下の図: 観測した  $f_{rep}$  ビート信号

### 3.2 $f_{ceo}$ 信号の観測

次に、自己参照法で  $f_{ceo}$  が検出されていることを確認した。自己参照法とは、基本波の  $2n$  番目のモード周波数  $f_{2n}$  と  $n$  番目のモード周波数の第二次高調波  $2f_n$  のビート信号を検出することで  $f_{ceo}$  を得る方法である。図 3.2.1 は自己参照法の原理を示す。基本波の  $2n$  番目モード周波数は、 $f_{2n} = 2nf_{rep} + f_{ceo}$ 、 $n$  番目のモード周波数の第二次高調波は、 $2f_n = 2f_n + 2f_{ceo}$  となる。基本波と第二次高調波のスペクトルが重なるとき、ビート信号として  $f_{ceo}$  を観測できる。そのため、 $f_{ceo}$  を観測するためには、基本波のスペクトルが 1 オクターブ以上広帯域化される必要がある。そこで、図 3.1.1 で示めすように光周波数コムのレーザー共振器の出力パワーを 2 段階の  $E_r$  ファイバーアンプで増幅した後、高非線形ファイバー(HNLF)で光周波数コムのスペクトルを広帯域化している。図 3.1.1 の HNLF 後は、PPLN (Periodically Poled Lithium Niobate: 周期分極二オプ酸リチウム)で第二次高調波を発生させ中心波長 1050 nm、半値全幅  $25 \pm 3$  nm のバンドパスフィルターで  $2f_n$  と  $f_{2n}$  の光を取り出し、受光器で干渉させている。これは、 $f - 2f$  干渉計と呼ばれる光学系で基本波と第二次高調波が同軸で伝搬することが特徴である。

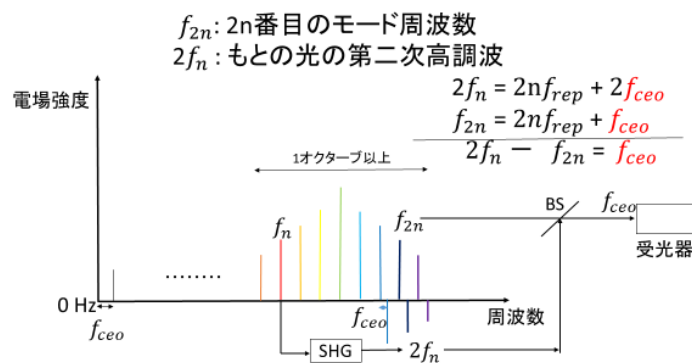


図 3.2.1 自己参照法の原理

### 3.3 $f_{beat}$ 信号の観測

図 3.1.1 の左上は開発した $f_{beat}$ 検出系を示す。 $f_{ceo}$ 検出に必要な波長成分は DM(ダイクロイックミラー)を反射し、それ以外の光は透過するように DM を配置している。CW レーザーは波長が  $1.5\ \mu\text{m}$  の ECLD(外部共振器型半導体レーザー)を用いた。ECLD のパワーは、 $3.0\ \text{mW}$  である。これを SMF(シングルモードファイバー)にカップルさせ $f_{beat}$ 検出系まで伝搬させた。光周波数コムと CW レーザーを BS(ビームスプリッター)で重ね合わせた。この時 BS 後の CW レーザーのパワー $1.3\ \text{mW}$ 、光周波数コムのパワーは、 $227\ \text{mW}$  であった。BS 後は回折格子まで空間的に光周波数コムのスペクトルを分散させた。これは、測定に必要な波長帯域のみを受光器に入射して、スペクトルの S/N 比を上げるためである。また、光周波数コムの光の偏光の向きを CW レーザーの偏光と合わせるために図に示す位置に  $\lambda/2$  波長板を挿入した。1 次回折光のうち、CW レーザー光と光周波数コムの光が重なっている部分を受光器に入射し、RF スペクトラムアナライザー(アンリツ 型番 MS2661C)で観測を試みた。しかし、信号観測に至らなかった。その原因は、受光面の直径  $0.5\ \text{mm}$  よりも測定するレーザーのビーム径が大きくなっていることが考えられる。今後は、CCD カメラを用いてそれぞれのレーザーのビーム径の測定を行い、測定するレーザーのビーム径を小さくするために光学系に光学素子を追加する必要がある。受光器の前にレーザー光を絞るためのレンズや、光の量を調節するためにアイリスを用いるなどして $f_{beat}$ 信号の観測を試みる。

## 4 まとめ

本研究では、まず $f_{rep}$ を観測することでモード同期をしていることを確認した。次に、 $f - 2f$ 干渉計で $f_{ceo}$ が検出されていることを確認した。さらに、CW レーザーの絶対周波数測定に必要な $f_{beat}$ の観測を行うため、光周波数コムと CW レーザーの干渉計の構築を試みた。しかし、測定するビーム径がフォトダイオードの受光面の直径よりも大きかったため、 $f_{beat}$ 信号の観測に至らなかった。今後は、光学系の見直しを行い、レンズを用いて受光する光を集光させ、 $f_{beat}$ の観測を試みる。 $f_{rep}$ 、 $f_{ceo}$ 、 $f_{beat}$ を RF 基準信号にロックし、周波数カウンターで測定、波長計でモード番号  $n$  を決定し、近赤外領域で発振する CW レーザーの絶対周波数を計測する。

## 5 参考文献

- [1] R. Holzwarth, Th. Udem, and T.W.Hänsch, "Optical Frequency Synthesizer for Precision Spectroscopy," *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2264-2267 (2000)
- [2] 渡邊 直登, "光周波数コムを用いた高精度レーザー分光計の開発," 博士論文, 電気通信大学 (2018)