

1.5 μm 帯光周波数コムを用いたデュアルコム分光装置の開発

武者研究室 齊藤洋平

1 序論

未知の試料を特定する手段として、光を用いた分光という手法がある。これは試料を構成する原子・分子が特定の周波数を持つ光を吸収・放出することを用いた方法で、原子・分子ごとに固有の吸収スペクトルを持つために精密な試料の解析が可能であり、様々な分野で利用されている。特に赤外の波長域は高分子のタンパク質や大気ガスなどと有用な分光対象があり、近年注目を集めている。様々な分光方法があるが、その中でも光周波数コムを用いたデュアルコム分光が注目を浴びている。デュアルコム分光はフーリエ変換分光の一種である。フーリエ変換分光の手法として広く知られているのは赤外分光法 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) である。FT-IRはその分解能がミラーの掃引距離と掃引精度で決まるため装置が大掛かりになるという欠点を持つが、デュアルコム分光は繰り返し周波数 f_{rep} がわずかに異なる2台の周波数コムを用いることで自動で周波数掃引が可能であるため、装置の安定性に優れ、高分解能、高堅牢性、そして Δf_{rep} の逆数で一回分の測定情報が取得できる高速性をもつ分光手段である。

我々は1.5 μm 帯光周波数コムをエルビウムドープトファイバー (EDF) を用いて作成したが、その共振器のほとんどをファイバーで構成することで長期安定動作が得られるようにした。さらにもう1台のコムに共振器長を変化させる機構を組み込むことで、2台の繰り返し周波数差 (Δf_{rep}) を精密に変化できるようにした。このときの2台のコムの f_{rep} は約54MHzであった。今回の研究では、まず光周波数コム f_{rep} をマイクロ波基準に位相同期しているが、そのさらなる安定化のためにサーボフィルター回路の高利得・広帯域化をおこなった。また、分光をするうえで重要になってくる長時間の位相同期を実現する

ために、温度変化の抑制による一時間以上の f_{rep} 安定化を行った。さらに、実際にデュアルコム分光を行う準備としてまず、1.5 μm 帯に吸収を持つ $H^{13}C^{14}N$ の回転振動遷移の吸収を、ECLD(外部共振器型半導体レーザー)を用いて分光した。さらに、分光を行う上で重要な f_{ceo} の安定化のために f-2f 干渉計の開発を行った。

2 デュアルコム分光の原理

2.1 光周波数コム

光周波数コムとは周波数軸上で等間隔に並ぶ確定された縦モードをもち、精密測定や安定度の同期、分光など様々な応用を持っている。光周波数コムを実現する方法の一つにモード同期レーザーがあり、モード同期レーザーの共振器長や励起LDの電流を安定化することにより各縦モードを確定させることで光周波数コムとして使用することができる。光周波数コム n 番目の縦モードは繰り返し周波数 f_{rep} とそのオフセット成分 f_{ceo} (Carrier Envelop Offset: CEO) を用いて次の式で表すことができる。

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

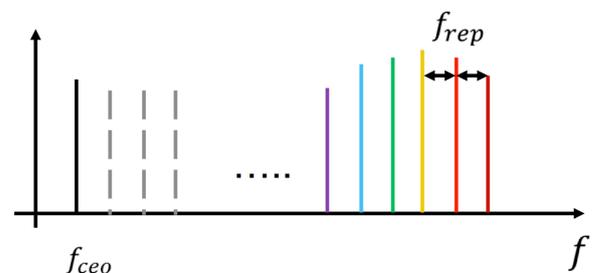


図1: 光周波数コム

我々の光周波数コムはErを利得媒質としたファイバーによって構成されたモード同期

レーザーを利用しており、強度依存の複屈折を利用した非線形偏波回転を利用している。それぞれの f_{rep} は約 54MHz であり、一方はオールファイバー化することにより長期安定動作を実現している (以下固定コム) が、もう一方は一部分を自由空間にだすことにより共振器長を大きく変化させられるようになっている (以下可変コム)。

2.2 デュアルコム分光法

光の周波数は現在直接間接できないため、別の光源とのビートをとることで周波数を RF 領域まで落とし込んでやることにより観測を行っている。光周波数コムは周波数軸上で広いスペクトルをもち、ワンショットで複数の吸収を測定できるため分光に有利である一方、単純にビートによる差周波を観測するだけでは、その膨大な次数 n のためにフォトディテクター (PD) の帯域で一度に全ての分光結果を得ることが困難であった。そこで光周波数コムの利点を十分に引き出すために考案されたのがデュアルコム分光である。この手法はわずかに f_{rep} が異なる 2 台の光周波数コムを用意してやることで、その 2 台の光周波数コムの繰り返し周波数差 Δf_{rep} をビートとして観測してやることにより実現できる。こうすることで f_{rep} を圧縮することができるため、PD の帯域でより多くの情報を一度の測定で得ることができる。

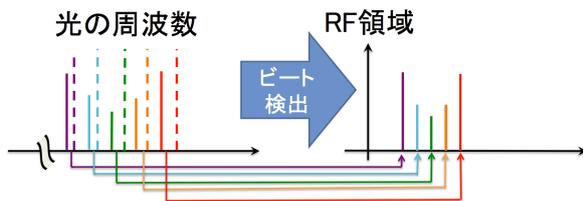


図 2: デュアルコムビート

しかしながらデュアルコム分光には、光の周波数領域における折り返し周波数のために、一度に測定できる範囲に限界が存在する。このときの測定範囲 f_{dyn} は次の式で表せる。

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

式 2 から測定限界を拡大するためには 2 つの光周波数コムの Δf_{rep} を小さくしてやれば

よいということがわかる。ここからデュアルコム分光において、 f_{rep} の安定化が重要であることがわかる。また、コムの周波数軸上の線幅より狭い Δf_{rep} に設定した場合にはビートがコムの線幅に埋もれてしまい観測できなくなってしまうため、コムの安定度を高め線幅を十分に細くしてやるのが、結果的に測定限界の拡大につながるのである。

3 f_{rep} の安定化

今回 f_{rep} の制御は圧電素子 (PZT) にファイバーを巻き付けることにより行っている。具体的には基準信号と検出した f_{rep} の信号の差を打ち消すようにフィードバック制御系を構築することで安定化を行っている。そのうえで制御回路の高利得、広帯域化を行うことでより安定な制御を行えるように改良を加えた。次の示すのはそれぞれの制御系のオープンループゲインである。

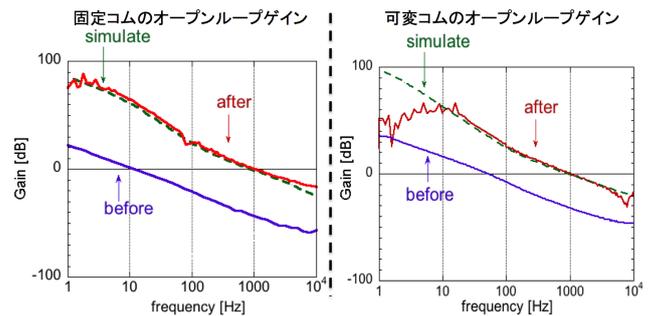


図 3: 2 台のコムのオープンループゲイン

図 3 から、回路の最適化以前の制御帯域はゲインが 0dB まででありそれぞれ数十 Hz 程度であった。その後、制御回路に改良を施すことによりそれぞれの制御帯域を 1 kHz までに拡大できたことが分かる。今回制御帯域を 1 kHz としたのは、PZT による機械共振を避けるためである。また、分光を十分に行える時間制御をかける必要があったため、それぞれの f_{rep} を長時間安定化できるようにした。制御信号の時間経過を観測することにより、制御を阻害する原因が熱にあることを特定しそれを抑制することでそれぞれのコムの f_{rep} 制御を一時間以上実現することに成功した。

また、それぞれのコムの f_{rep} のアラン分散を測定した結果が次のようになった。

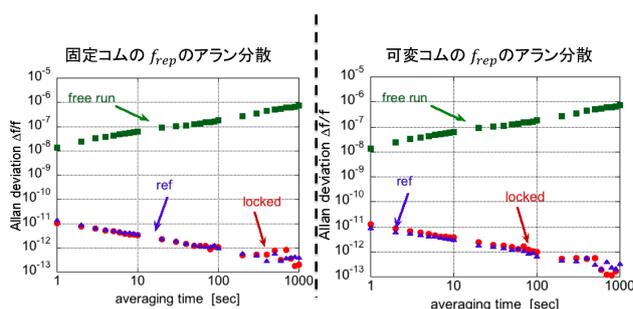


図 4: 2 台のコムの周波数安定度

図 4 からそれぞれの安定度は、制御をかけることにより 3 桁ほど向上しており、一秒で 10^{-11} を達成している。また、今回用いた参照信号の安定度で制御した際の f_{rep} の安定度が制限されていることから、制御回路の最適化を十分に行うことができたと言える。

4 HCN の ECLD を用いた分光

デュアルコム分光を行う上で、最初の分光対象として Er の中心波長である $1.55\mu\text{m}$ 付近に強い吸収を持つ HCN を選択した。デュアルコム分光の準備段階として、HCN セルの状態が不明瞭であったため、ECLD を用いて分光を行った。次にその光学系を示す。

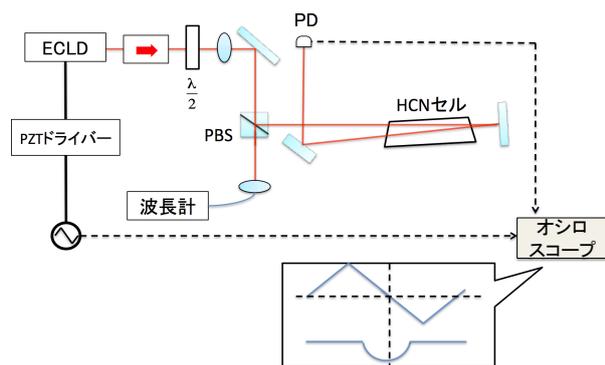


図 5: ECLD を用いた HCN 分光光学系

ECLD から出射された光は戻り光防止のアイソレーターを通過し、 $\lambda/2$ 板を通過した後、レンズによってコリメートされる。その後 PBS (Polarization Beam Splitter) によって光は 2 つに分けられる。このとき $\lambda/2$ 板によって PBS で分ける光のパワーをコント

ロールしている。片方は HCN セルを 2 回通過した後 PD で観測される。この時、ECLD の共振器内に組み込まれた PZT に三角波を送ってやることにより、周波数を掃引している。そのため、オシロスコープによって検出された信号は吸収を反映した形になる。このときの三角波を同時にモニターしてやることにより、事前に測定した V-f 特性から電圧を周波数に校正し、ピーク時の電圧をかけたときの波長を波長計から読み取ることで分光データとした。複数の吸収線の測定を行い、それぞれの吸収量の結果が次のようになった。

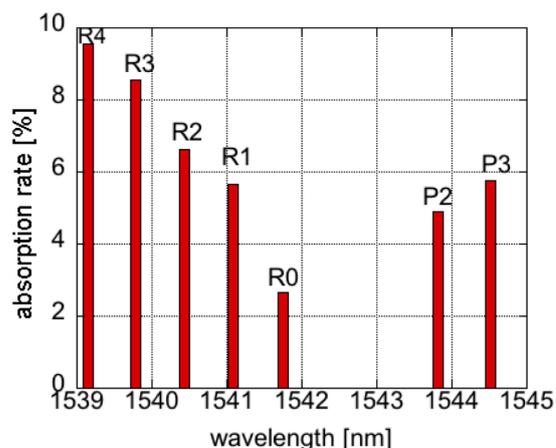


図 6: HCN の分光結果

それぞれの吸収は数 % 程度であった。また、この他にもそれぞれの吸収線の線幅やラインの同定を行った。さらに、今回分光した範囲をワンショットでデュアルコム分光するには式 2 から $\Delta f_{rep} \leq 1\text{kHz}$ である必要があることがわかった。

5 f_{ceo} の検出

次に f-2f 干渉計の光学系を示す。

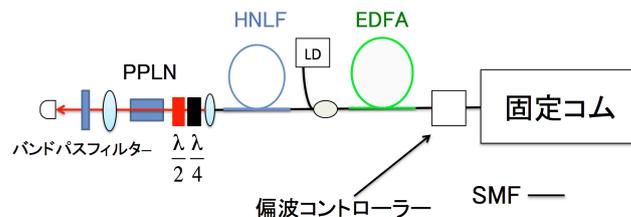


図 7: f-2f

f-2f 干渉計とは基本波と SHG (Second Harmonic Generation) のビートをとることで、

f_{ceo} をビートとしてとりだすための光学系である。系の概要としてはコムからの出力を EDF を用いて増幅した後に、高非線形ファイバー (HNLF) によってスペクトルをオクターブまで広げ、PPLN (Periodically Poled Lithium Niobate) によって SHG を発生させ、そのビートを観測している。これによって得られた f_{ceo} が次のようになった。

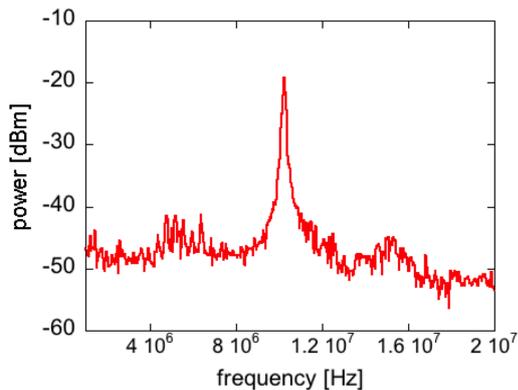


図 8: 観測した f_{ceo}

図 8 から観測された f_{ceo} の SN 比が約 25dB であることがわかる。しかしながら位相同期をかける上では、30dB 以上の SN 比が必要であるだけでなく、モード同期レーザーの LD 電流を変化させることで SN 比が変化することが判明した。 f_{ceo} の安定化が励起用 LD の電流を変化させることで行われることを考えると、安定な位相同期をかける上では最大で 40dB 以上の SN 比が必要であると考えられるため、今後さらなる SN 比の向上が必要である。

6 まとめと展望

デュアルコム分光システムの開発を行った。まず制御回路を最適化することにより f_{rep} を安定に長時間制御できるようにした。安定度を測定したところ一秒で 10^{-11} を達成した。

またデュアルコム分光のために、HCN セルの ECLD による分光を行うことで、複数本の吸収線を測定しその線幅、吸収量、そしてラインの同定をおこなった。

さらに、分光を行う上で必要不可欠な f_{ceo} 安定化のための f-2f 干渉計を構築し、 f_{ceo} を観測した。そのときの SN 比は 25dB であった。

今後の展望としては f_{ceo} の SN 比を向上させることで、安定な位相同期を実現することや 2 台の光周波数コム f_{rep} 、 f_{ceo} を完全に位相同期することでワンショットでの測定帯域を拡大し、今回 ECLD によって分光した範囲を実際にデュアルコム分光することなどが上げられる。