

論文の内容の要旨

論文題目 2 台の Yb ファイバー光周波数コム of 位相同期とデュアルコム分光への応用

氏名 久世 直也

研究の背景：

自然界には存在しないような空間、時間の両面において非常に高いコヒーレンスを持つ人工的な光であるレーザーが 1960 年に初めて実現して以来、光科学の研究は最先端レーザーの開発と共に今なお進化し続けている。特に、不確定性原理からフーリエ変換によって数学的に結ばれる時間、周波数領域のそれぞれの面におけるレーザーの発展は光科学に著しい発展をもたらした。時間領域ではフェムト秒のパルス幅を持つレーザーにより超高速時間分解や、高次高調波発生に代表される非摂動領域の非線形光学を可能とし、周波数領域ではスペクトル幅の狭いレーザー開発技術の進展に伴い、レーザー冷却や精密分光の礎を築いた。そして、時間領域と周波数領域それぞれで培われてきたレーザー技術は 2000 年頃に光周波数コムとして統一された。光周波数コムは時間領域では超短パルス性を持ち、周波数領域では数十万本の高安定 CW レーザーとして表される。初めて実現された光周波数コムはチタンサファイアモード同期レーザーによるものであったが、現在、様々なレーザーゲイン媒質で光周波数コムの開発の研究がなされており、それぞれ独自の特徴をもつ光周波数コムが開発されている。また、新規の光周波数コムの開発の進展に伴い、その応用領域は原子や分子の分光から天文応用まで超精密をキーワードに広がり続けている。本研究でも新規光周波数コムの開発と応用分野拡大を目指して、2 台の光周波数コムを高精度に位相同期する技術開拓の研究を行い、デュアルコム分光に応用した。

研究成果

Yb ファイバー光周波数コムの開発：

本研究で最初に行った研究は Yb ファイバー光周波数コムの開発である。超短パルスモード同期レーザーの出力は周波数領域で考えると図 1 のように繰り返し周波数をモード間隔とした数十万本のモードからなる。これらのモードはオフセット周波数に繰り返し周波数の整数倍の足し合わせとして表される。オフセット周波数、繰り返し周波数を制御することで、全てのモードを完全に制御したものが光周波数コムと呼ばれる。光周波数コムを開発するには最初に超短パルスモード同期レーザーを開発する必要

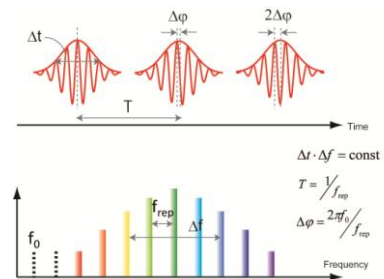


図 1 光周波数コム

がある。本研究で注目した光周波数コムは Yb ファイバーをゲイン媒質とする Yb ファイバー光周波数コムである。Yb ファイバーモード同期レーザーはレーザーの構成要素の大部分がファイバーから成るため長時間動作が可能となり、またファイバーベースのレーザーとしては最短パルスを実現でき、さらに高出力システムの開発が可能という長所を持つ。ただ、Yb ファイバーモード同期レーザーが超短パルスになる理由は不明であり、超短パルスを発生するレーザー構成に関して 2 次分散、3 次分散両方を補償する複雑な構成なもの、2 次分散を補償するだけのシンプルな構成のものがあり、それぞれ同等のパルス幅を実現していた。本研究では 2 次分散を補償するだけのシンプルな構成で超短パルスを実現できる理由を明らかにするため、レーザー内のパルス状態を実験、数値計算の両面から詳細に調べ、非線形効果の自己位相変調が 3 次分散を補償していることを明らかにした。また自己位相変調により 3 次分散を補償する際にはパルス時間波形の非対称性が重要であると考察した。超短パルス発生メカニズムを明らかにした後、繰り返し周波数、オフセット周波数を制御した光周波数コムの開発を行った。今までに実現していた Yb ファイバー光周波数コムは可飽和吸収体を用いたモード同期による Yb ファイバーモード同期レーザーを用いており、超短パルスモード同期ファイバーレーザーで一般的な非線形偏光回転モード同期による Yb ファイバー光周波数コムの報告例はなく、そのようなモード同期レーザーの周波数制御を実現することは重要である。それには低位相雑音のオフセット周波数を実現できるかが鍵であり、モード同期レーザー、スペクトルを広げるための Photonic crystal fiber の最適化を進めることで高精度に制御可能な低位相雑音のオフセット周波数を実現できることを示し、非線形偏光回転モード同期 Yb ファイバー光周波数コムを初めて実現した。

注入同期による 2 台の Yb ファイバー光周波数コムの位相同期：

光周波数コムの応用は新規光周波数コム開発と共に進んできた。今後、新規光周波数コムとして超広帯域光周波数コムや高繰り返し光周波数コムの実現が期待される。特に高繰り返し光周波数コムは天文応用の際には重要な役割を果たす。しかし、超広帯域光周波数コムは 1 台のモード同期レーザーではレーザーのスペクトル幅が限定されるため難しく、高繰り返し光周波数コムは直接的にオフセット周波数の制御することが難しい。そこで期待されることがオフセット周波数、繰り返し周波数の制御された光周波数コムを 1 台用意し、その光周波数コムに対して、周波数制御したいモード同期レーザーを同期させる方法である (図 2)。2 台のモード同期レーザーを同期させるためにはオフセット周波数、繰り返し周波数を同期させる必要がある。この 2 つのパラメータを能動的に同期させることも可能だが、受動的な同期が可能であれば簡便さの点から受動同期の方が望ましい。そこで

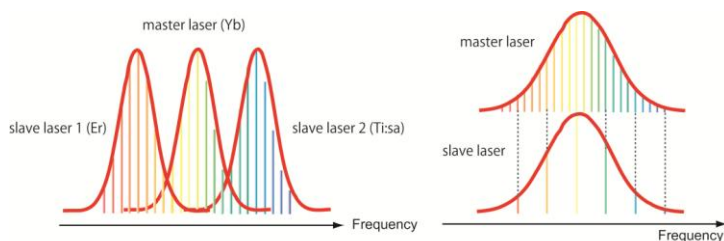


図 2 2 台の光周波数コムの同期による超広帯域光周波数コム (左) と高繰り返し光周波数コム (右) の実現概要図

本研究では 2 台のモード同期レーザー間のオフセット周波数、繰り返し周波数の受動同期が可能かどうかを調べた。受動同期を実現する手段として注入同期に注目した。注入同期では 1 つのレーザーの出力を別のレーザーに注入する。注入同期は縦シングルモード CW レーザーの受動周波数同期によく用いられる方法であり、レーザースペクトルに重ならない 2 台のモード同期レーザーにも応用され、その際には繰り返し周波数が受動同期することが報告されている。本研究ではレーザースペクトルが重なる 2 台のモード同期レーザーに対して注入同期を行った。その結果 2 台のモード同期レーザーの共振器長差が非常に近い時にはオフセット周波数、繰り返し周波数の両方が受動同期することを示した。しかし、オフセット周波数、繰り返し周波数の両方が受動同期する条件は厳しく長時間動作させるには不向きなことが分かった。しかし、繰り返し周波数だけの受動同期なら長時間動作させることが可能であったので、繰り返し周波数は受動、オフセット周波数は能動的に同期させることにより 2 台のモード同期レーザーを長時間同期させることができた。将来的には図 2 のように実際に異なるレーザースペクトルを持つ光周波数コムの同期や、繰り返し周波数の異なる光周波数コムの同期への展開が期待される。

デュアルコム分光のための位相同期法と分光応用実験：

繰り返し周波数が少し異なる 2 台の光周波数コムを用いる分光法はデュアルコム分光と呼ばれ最近注目を集めている。繰り返し周波数が少し異なるという特徴は周波数領域ではモード間隔の差として現れる。2 台の光周波数コムの隣接するモード周波数差は繰り返し周波数差に対応する。このような 2 台の光周波数コムの干渉を測定すると、隣接するモードのヘテロダインビート信号が RF 周波数領域で観測される (図

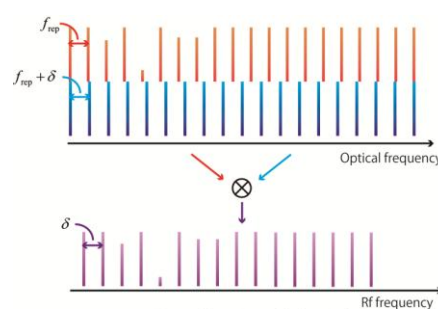


図 3 デュアルコム分光の原理図

3)。光周波数領域から RF 周波数領域に周波数を下方変換することでデュアルコム分光は高分解能を可能とする。さらにデュアルコム分光は広帯域、高速データ取得という利点を持ち、広帯域、精密分光を実現する 1 つの手段として期待される。しかし高分解能デュアルコム分光を実現するために 2 台の光周波数コムの高精度な位相同期が要求される。その手段として主なものに、高フィネス超安定共振器に同期した超安定な CW レーザーを同期源として利用する方法があるが、高フィネス超安定共振器の開発は障壁が高く、デュアルコム分光の普及の大きな障害となっている。

そこで本研究では超安定 CW レーザーを必要とせず 2 台の光周波数コムを位相同期する方法を提案した (図 4)。本研究の方法では CW レーザーを同期源として用いるのではなく、2 台の光周波数コムのモードビート

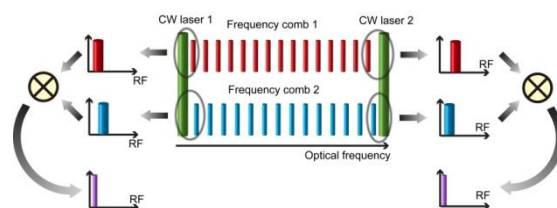


図 4 デュアルコム分光のための 2 台の光周波数コムの位相同期法

を取り出すための仲介手段として用いる。さらにCWレーザーのノイズはコモンモードキャンセル過程でキャンセルされるので安定なCWレーザーを必要としない。オフセット周波数、繰り返し周波数を同期する代わりに、異なる波長領域において 2 台の光周波数コムモードビートを抽出し、それらを安定なRF周波数源に位相同期することで 2 台の光周波数コムを高精度に位相同期した。本研究の方法で位相同期した 2 台の光周波数コムを用いて準安定 He をサンプルとしてデュアルコム分光により吸収分光を行うと、デュアルコムの原理通り、光周波数からRF周波数に下方変換された綺麗なコム構造を観測できた。さらに本研究ではデュアルコム分光を **FBG(Fiber Bragg Grating)**歪センサーに応用した。**FBG**歪センサーで重要なことは小さな変化を捉えること(感度)、小さな変化だけでなく大きな変化も捉えること(ダイナミックレンジ)、そして複数の**FBG**を同時に用いること(多点化)である。高感度、広ダイナミックレンジ、多点が可能となると地震、火山発生メカニズムの研究につながると期待されている。従来高感度な**FBG**歪センサーを実現するために安定なCWレーザーが光源として用いられてきたが、この方法では広ダイナミックレンジ、多点化は難しい。一方デュアルコム分光は光周波数コムに対してCWレーザーを何万本も同期したCWレーザーと考えることができ、高感度、広ダイナミックレンジ、多点化の有力な手段となる。実際にデュアルコム分光を**FBG**歪センサーに応用するとCWレーザーでは不可能なほどの広ダイナミックレンジが可能となり、多点化も十分可能であることを示した。感度の点においては想定される応用に十分な感度を得ることができた。