

# 光コムのための figure-8 レーザーの繰り返し周波数制御

武者研究室

齋藤 瞭太

## 1 研究背景

レーザーが開発されて以来、様々な面で多くの工夫や改良が加えられながら、光技術に関する分野は進歩してきた。現在では、光格子時計や精密分光といった科学分野だけではなく、光通信やライフサイエンスなどでもレーザーが用いられ、人間には必要不可欠な技術になりつつある。本研究室では、主に、レーザーの周波数安定化ということを軸に、その関連技術も含めた研究を行なっている。レーザー自体、他のインコヒーレント光源に比べれば制御もしやすく、安定度の高いものであるが、精密なものを要するような分野においては、適切な制御が行われていないレーザー光源は、安定的なものであると言いはない。広帯域にわたる周波数の基準として様々な分野に用いられ始めているのが、光周波数コムである。光コムは、光のものさしという呼ばれ方をすることから分かるように、安定して、容易には変化しないような基準であることを求められる。現在、本研究室では外乱に強い宇宙用光コムの開発を行っている。光コムの元となるモードロックレーザーは光ファイバーを用いて共振器を構成するファイバーレーザーの一種であるが、光路が固体中の導波路であるため、宇宙空間のような真空中であっても、温度による共振器長の変動を受けやすく、実際に運用するためには適切な対策を行わなければならない。開発中の光コムは偏波保持ファイバー (Polarization Maintaining Fiber, PM ファイバー) を用いて作られた非線形ファイバー増幅ミラーを構成することによって、モードロックを行い、超短パルスを生成している。偏波保持ファイバーは外乱に対する強みを持ち、非線形ファイバーループミラーは共振器をオールファイバー化した場合のモード

ロック手法として扱いやすいものである。光コムを広帯域の光周波数基準として用いるには、光コムの縦モードのオフセット周波数 (Carrier Offset Envelop,  $f_{ceo}$ ) および繰り返し周波数 ( $f_{rep}$ ) が安定であることが求められる。オフセット周波数も繰り返し周波数も、基準からのずれを電氣的にフィードバックすることによって安定化を実現することができる。本研究では、ピエゾ素子をアクチュエータとした高速制御とペルチェ素子を用いた温度コントローラによる低速制御の同時動作を用いて、本研究室において開発中である光コムの繰り返し周波数制御システムの開発とその安定度の評価を行う。

## 2 光周波数コム

光周波数コム (光コム) とは、John L. Hall 博士と Theodor W. Hansch 博士らによって開発された、周波数軸上に縦モードが等間隔に並び、櫛 (comb) のようなスペクトル形状を持つレーザーのことである。光周波数コムは光のものさしとして周波数基準に用いられるだけではなく、距離計測、天体観測、形状検査、分光など、様々な科学・産業分野に用いられ始めている。当研究室では宇宙空間で周波数基準として用いることを目的とした光コムの開発を行っている。図 1 に光コムの周波数軸上における縦モードの様子の模式図を示す。光コムでは、周波数の低い側に縦モードを延長していき、原点周辺における仮想的な縦モードの周波数を carrier-envelope offset 周波数 ( $f_{ceo}$ ) と呼ぶ。また、光コムにおける縦モード間隔はパルスの繰り返し周波数  $f_{rep}$  に等しい。光コムにおいて  $n$  番目の縦モードの光の周波数は次式で表される。

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

この式は、 $f_{ceo}$  と  $f_{rep}$  を制御することで、広帯域周波数基準を作り出せるということを意味している。光コムを用いて任意の光源の周波数を評価する場合、光コムの出力と対象となる光源の出力を同時に光検出器 (Photo Detector) に入れることによって実現する。光検出器では二乗検波を行っており、出力情報は二つの光源の光の周波数差 (ビート信号) となる。このビート信号と、オフセット周波数および縦モードの次数を決定することによって、未知の被測定レーザーの周波数を決定することができる。

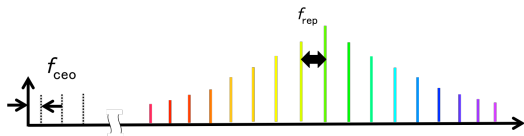


図1 光コムの縦モードの模式図

### 3 繰り返し周波数制御

#### 3.1 $f_{rep}$ 制御の手法

パルスレーザーにおける繰り返し周波数は、共振器の光路長に依存し、本研究で用いたようなファイバーで構成した共振器の場合には、固体である光ファイバーの熱による内部屈折率の変化および共振器の物理長の変化が繰り返し周波数に大きく寄与する。そのため、外乱の影響を受けにくい光コムを開発するにあたっては、繰り返し周波数の制御を行うことが必須要件となる。本研究では、繰り返し周波数の制御に小型の piezoelectric (PZT) および温度コントローラー (TEC) を用いることとした。PZT は、印加電圧に応じて力を生じさせる圧電素子で、実用的には、印加電圧に応じるそのサイズの変動を利用する。PZT は制御帯域が広く、高速応答を行うことができる。また、機械的駆動部が無いため、使用による劣化が無いアクチュエータとして、宇宙での用途を検討する光コムにおいては適したものと言える。一方で、大型の PZT を用いた場合には、低周波域に共振点を持ち、制御帯域的性能が悪くなってしまうため、本研究では小ダイナミックレン

ジではあるものの高速応答性が利用できるということで、小型の PZT を採用した。そして、大きなダイナミックレンジを持つ制御を実現するために、温度コントローラーを併用した。温度コントローラーは応答性という意味では小型 PZT には及ばないが大きなダイナミックレンジを有するため、本研究では高速な制御を小型 PZT によって行い、低速な制御を TEC によって実現した。

#### 3.2 光基準を用いた制御

本研究では、研究室において開発中の波長 1030 nm のヨウ素安定化レーザーとのビート信号を用いたフィードバック制御の実現を最終的な目標とした。まず、1550 nm 中心のスペクトルを 1030 nm 付近まで広帯域化させるために、ファイバー増幅器を作製した。作製したエルビウム添加型ファイバー増幅器 (EDFA) の増幅特性を図 2 に示す。EDFA では最大で約 70 mW の出力を得ることができた。

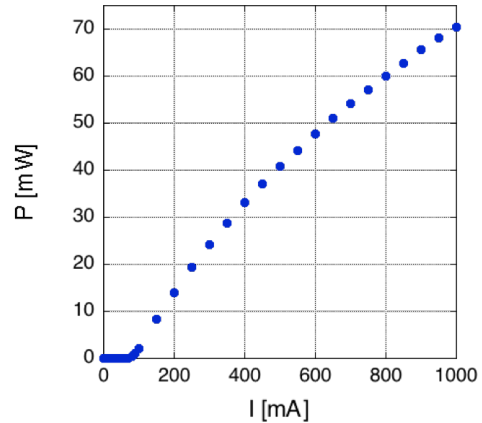


図2 EDFA の増幅特性

増幅後の光を高非線形ファイバー中を伝搬させ、スペクトルを広帯域化させることによって得たスペクトルを図 3 に示す。図より、目的としていた 1030 nm 近辺までのスペクトル広がりを得られていることが確認できる。実際に、制御に必要な帯域までのスペクトル広がりを得られたため、実際に 1030 nm の CW レーザーとのビート信号の取得を行った。

なお、今回の実験においては、CW 光源にヨウ素安定化レーザーではなく Fiber DFB レーザーを用いた。結果として、制御に対して適当とされる SN 比 30 dB には至らず、15 dB ほどの SN 比しか得ることができなかった。これは、スペクトル拡大によって得た SC 光のパワーが弱かったことが原因と考えられる。今後の改善方法としては、ファイバー増幅器の特性改善などが挙げられる。

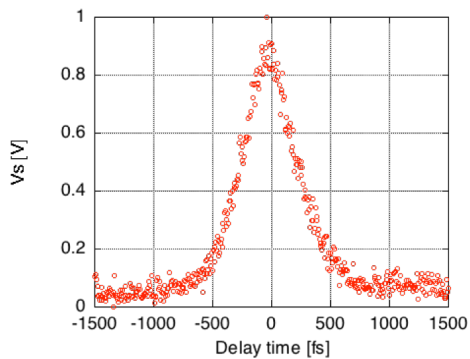


図3 取得したビート信号の RF スペクトル

### 3.3 マイクロ波基準を用いた制御

光基準を用いた制御は、ビート信号の SN 比が不十分であり、改善が必要であるという結果となったが、同時に作製していたアクチュエータの性能評価を行うために、二つのアクチュエータを用いてマイクロ波基準を用いた制御を行った結果に関して報告する。先述した通り、アクチュエータにはペルチェ素子とピエゾ素子を併用しており、これはそれぞれのアクチュエータの持つ特性の欠陥部分を補うためのものである。マイクロ波基準を用いた制御系の概略図を図4に示す。以下ではそれぞれのアクチュエータに対して個別の評価を行う。

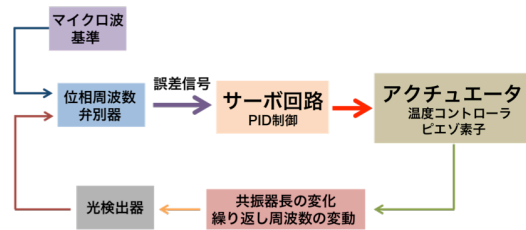


図4 マイクロ波基準を用いた制御系の概略図

#### 3.3.1 ペルチェ素子による制御

実際に作製したペルチェ素子を用いた温度コントローラの概略図を図5に示す。ペルチェ素子の冷却面には縦横約 10 cm の銅板が貼り付けてあり、その銅板の上に光ファイバーが載った構造をしている。銅板上には直径約 7 cm の円状に 3 回ほど巻いた長さのファイバーが載っている。フィードバック制御を行うにあたっては、サーボ回路を作製した。作製したサーボ回路の回路図を図6に示す。サーボ回路には比例・積分・微分の各要素が実装されている。構築した制御系によって実際に制御を行った結果を図7に示す。図より、繰り返し周波数のドリフトが抑制できていることが分かる。ペルチェ素子による制御の結果には振動が残っているが、これは温度制御の応答性の遅さによって生じているものであると考えられる。しかし、振動の振幅も数 Hz 程度であり、この振動はピエゾ素子での制御により抑制できると判断した。

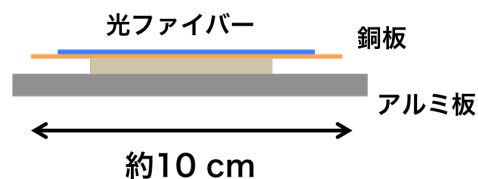


図5 作製した温度コントローラの概略図

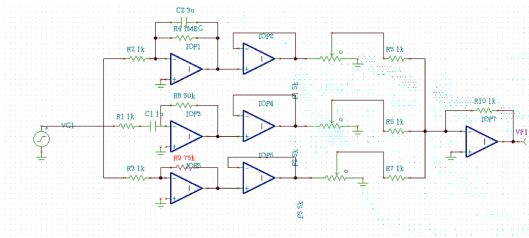


図 6 作製したサーボ回路の回路図

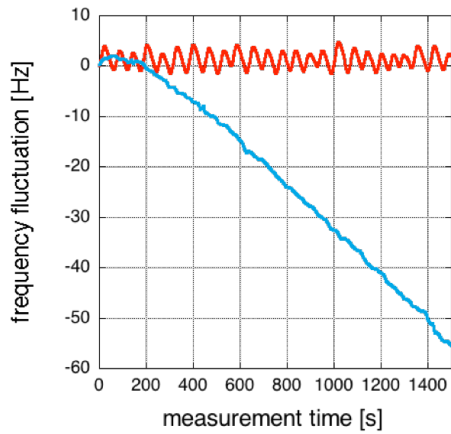


図 7 温度制御時の周波数変動量

### 3.3.2 ピエゾ素子の性能試算

使用する piezo 素子の変位量が実際の周波数変動にどれほど寄与するのかについての試算を行った。用いた piezo 素子は最大変位量が  $4.6 \mu\text{m}$  のものであるが、安全に使用できる範囲では  $2.4 \mu\text{m}$  ほどの変動量が得られると期待される。この変位量に対応する周波数変動量は  $24 \text{ Hz}$  である。これは、先述の温度制御による振動を抑制するには十分な値である。そこで、実際に piezo 素子を系に組み込んで周波数の変動量の測定を行った。その結果を 8 に示す。測定では piezo 素子にオフセットの  $DC50 \text{ V}$  を印加し、加えて振幅  $40 \text{ V}$  の  $\sin$  波を印加し測定を行った。理想的にはこの場合に  $24 \text{ Hz}$  の変動が得られるはずであるが、実際には  $0.9 \text{ Hz}$  の変動しか得ることができなかった。これは、piezo 素子表面の皮膜に素子の変位が吸収されることで、光ファイ

バーに対して変位が上手く伝達しなかったためであると考えられる。今後は、素子へのファイバーの接着方法の改善等の検討を行う必要がある。

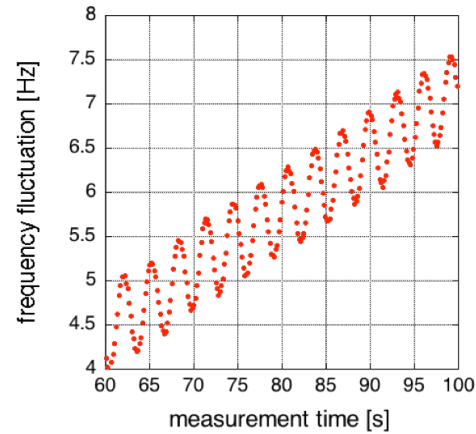


図 8 ピエゾ素子による周波数変動

## 4 結論

本研究においては光基準を用いた繰り返し周波数制御を行うことを最終的な目標としていたが、現状の実験系においては制御をするのに適したビート信号の SN 比  $30 \text{ dB}$  を得ることができなかった。これについては、ファイバー増幅器の特性改善などによって SN 比も改善できると考えている。アクチュエータの評価に関しては、ペルチェ素子を用いた温度制御においては、繰り返し周波数のドリフトを抑制することができ、期待していたような性能を得ることができた。一方で、piezo 素子を用いた制御においては、試算された繰り返し周波数変動量の  $1/20$  程度の性能しか得られなかった。これは、piezo 素子表面に被膜があり、それによって素子の変位が直接的にファイバーに伝達しなかったことが原因であると考えられる。今後は、piezo 素子へのファイバーの接着方法等を改良することによって性能が改善できると考えている。