

広帯域光周波数基準の開発と評価

武者研究室 村井 陵輔

1. 研究背景

レーザー光は白色光源などと比較し、時間的・空間的ともにコヒーレントな光である。そのため、単色性、指向性に優れるという特徴を有する。この特徴をさらに追求し、単色性を高める制御を施し、発振周波数を安定化したレーザーは、周波数安定化レーザーと呼ばれる。

周波数安定化レーザーは、計測分野で応用されるが、周波数安定化レーザーを他レーザー光源の周波数安定化・周波数安定度評価に用いる場合においては、評価対象となる光源と同程度か、それ以上の周波数安定度が必要となる。これは、周波数基準となるレーザーと評価対象のレーザー2台の光源のヘテロダインビートとして、光周波数領域の情報をマイクロ波周波数領域に落とし込み、フォトディテクターなどの検出器で信号の検出を行うためである。この時、検出される信号は周波数安定度の低いレーザーの周波数揺らぎが支配的となる。従って、周波数基準レーザーの周波数安定度の更なる向上は、重要な課題となっている。具体的な要求値は、観測帯域 1 Hz において絶対周波数に対する周波数揺らぎが 10^{-15} 以下である。この値は、光共振器を周波数基準として周波数安定化レーザーを構

築する場合においては、スペーサーやミラーのコーティングの熱雑音限界に由来する数値である。

また、周波数基準レーザーと被評価レーザーの発振周波数が大きく離れていては、ヘテロダインビートをマイクロ波周波数領域に落とし込むことはできない。すなわち、1つの周波数基準レーザーで評価できるのは、その近傍の波長のレーザーのみとなる。任意の波長のレーザーの評価には、周波数基準レーザーが複数台必要となる。しかし、前述の通り、そのような高い周波数安定度を持つ光源を、評価波長ごとに複数構築するのは、非常に困難かつ高コストである。

この課題を解決するため、本研究では、まず、周波数基準レーザーとして、線幅を極限まで狭窄化した超狭線幅光源の開発を行う。そして、モード同期レーザーから発生される光周波数コム of 全縦モードに、超狭線幅光源の周波数安定度を移乗した、広帯域光周波数基準の開発を目的とする。広帯域光周波数基準は、ひとつの光源で様々な波長の周波数基準レーザーとして代用できる。さらに、広帯域光周波数基準を、ファイバーにより精密に伝送することで、他の研究室の光源評価に利用することも可能となる。

2. 超狭線幅光源の開発

本研究では、広帯域光周波数基準の開発を目標としているが、そのための光領域の基準周波数となる光源開発が最初のステップとなる。この基準となるレーザーは発振線幅 1 Hz を目標値としているため、超狭線幅光源と呼ぶ。図 2.1 に超狭線幅光源の実験系の全体図を示す。

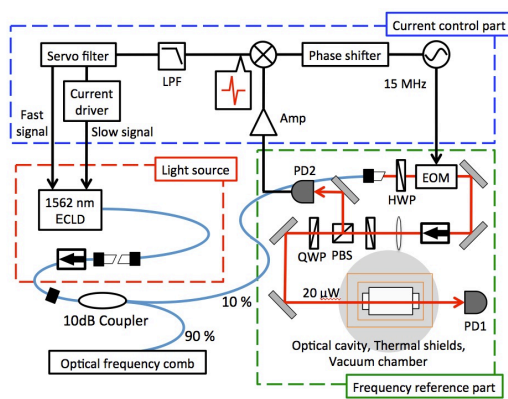


図 2.1. 超狭線幅光源実験セットアップ

図 2.1. に示すように、この実験系は周波数基準部・光源部・信号取得部からなる。まず、光源部の発振波長 1562 nm の外部共振器型半導体レーザーの出力は、10 dB カプラーにより 1:9 に分割される。ここで 9 割の出力が光周波数コムとの位相同期実験系に送られる。残りの 1 割は電気光学変調器 (Electro Optical Modulator: EOM) で 15 MHz の位相変調を受けた後、Polarizing Beam Splitter (PBS) に入射する。PBS により S 偏光の光は全て捨てられ、P 偏光のみ透過する。その後、 $\lambda/4$ 板を透過し、真空チャンバー内の光共振器へと入射す

る。光共振器の透過光は PD2 で検出され、反射光は再び $\lambda/4$ 板を透過することにより S 偏光となり、PBS で反射され、PD1 で検出される。検出された電気信号はアンプにより増幅され、LO の復調信号と DBM で乗算された後、LPF で高周波成分を切り出され、サーボフィルターへ入力される。サーボフィルターで最適化された信号は、LD の定電流源のモジュレーション端子及びゲインチップに直接入力され、電流値を変化することにより、発振周波数の最適化を行っている。

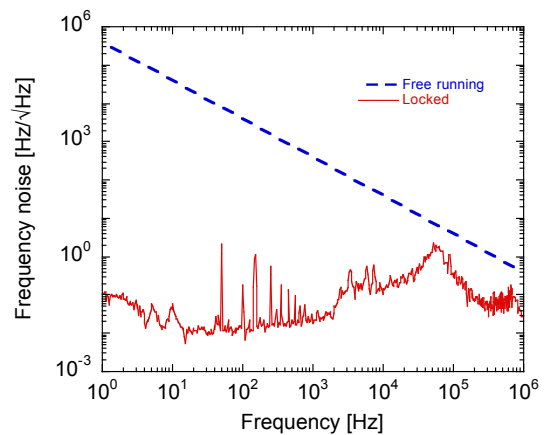


図 2.1. 周波数雑音スペクトル

図 2.1 は周波数安定化を施した際の誤差信号の周波数雑音スペクトルである。青線の無制御時に対し、赤線の制御時は 1 Hz における周波数雑音を $0.1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ まで抑制していることが確認できる。しかし、現状は地震の影響によりこの結果を再現できておらず、制御回路の最適化が必要である。

3. 光周波数コムの周波数安定化

3.1. 光周波数コム

光周波数コムとは、周波数軸上に等間隔に複数の縦モードが並び、その縦モード 1 本 1 本の周波数が確定しているものである。従って、光周波数コムの周波数安定化を行うことで、広帯域光周波数基準の開発が可能となる。光周波数コムの概念図を図 3.1 に示す。

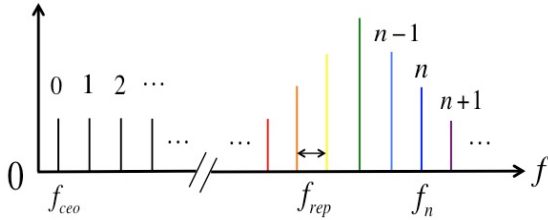


図 3.1. 光周波数コムの概念図

光周波数コムは、モード同期レーザーから発生される超短パルスをフーリエ変換することによって得られ、その性質から『光の物差し』と呼ばれる。光周波数コムの縦モード列のうち、 n 番目の縦モードを f_n とすると、 f_n は、キャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} と各縦モード間隔である繰り返し周波数 f_{rep} を用いて、

$$f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep} \quad (3.1)$$

と表される。(3.1) 式からわかるように、光周波数コムの周波数は、オフセット周波数 f_{ceo} と繰り返し周波数 f_{rep} の 2 つのパラメータで決定される。すなわち、光周波数コムの周波数安定化を行うには、 f_{ceo} と f_{rep} それぞれに対し、周波数安定化を施す

必要がある。図 3.2 に広帯域光周波数基準の実験セットアップを示す。

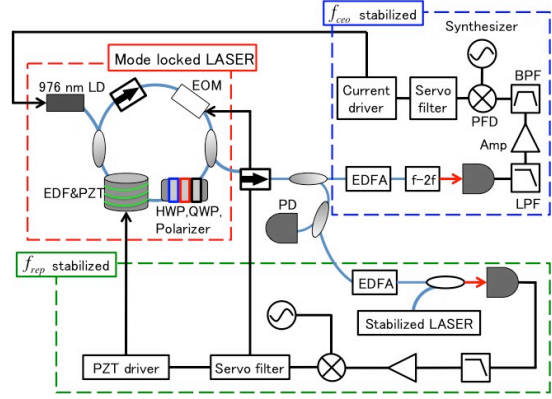


図 3.2. 広帯域光周波数基準実験セットアップ

図 3.2 赤線部はモード同期レーザーのオシレーター部であり、青線部は f_{ceo} の周波数安定化部、緑線部は f_{rep} の周波数安定化部を示している。次項より f_{ceo} の周波数安定化部について述べる。

3.2. f_{ceo} の周波数安定化

f_{ceo} の周波数安定化のステップとして、まず仮想的なオフセット周波数である f_{ceo} を検出する必要がある。 f_{ceo} の代表的な検出方法に $f-2f$ 干渉計を用いた自己参照法が存在し、本研究では自己参照法を用いて f_{ceo} を検出した。自己参照法は、スペクトルが 1 オクターブ以上広がったスーパーコンティニウム (Super Continuum: SC) 光に対し適用できる手法である。SC 光の長波長側の n 番目の縦モード周波数は (3.1) 式より、 $f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep}$ と記述される。ここで、長波長側の

第二高調波（Second Harmonic Generation: SHG）を発生させると、その周波数は $2fn = 2(f_{ceo} + n \cdot f_{rep})$ となる。ここで、基本波の短波長側の縦モード周波数を f_m とすると SHG と重なる部分でのビート信号 f_{beat} は、

$$\begin{aligned} f_{beat} &= 2(f_{ceo} + n \cdot f_{rep}) \\ &\quad - (f_{ceo} + m \cdot f_{rep}) \\ &= f_{ceo} + (2n - m)f_{rep} \end{aligned} \quad (3.2)$$

と記述できる。(3.2)式の第2項である f_{rep} の定数倍の信号を電気的フィルターで切り落とせば、 f_{ceo} のみを検出できる。

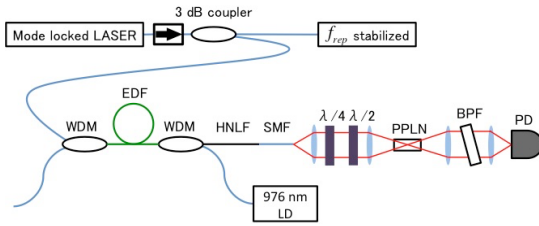


図 3.3. f-2f 干渉計実験セットアップ

図 3.3 は、図 3.2 青線部内に示す f-2f 干渉計部分を詳細に示したものである。図 3.5 を用いて f-2f 干渉計の説明を行う。まず、オシレーターからの出力は 3 dB カプラーにより 2 つに分けられ、そのうちの一方を f_{ceo} の周波数安定化部に入射する。その出力は、波長 976 nm の LD をポンプ光とした、後方励起型 Er-doped Fiber Amplifier (EDFA) に入射することによって出力が増幅される。増幅されたパルスは、その直後の高非線形ファイバー（High Nonlinear Fiber:

HNLF）を透過することにより、自己位相変調、交差位相変調、誘導ラマン散乱、四光波混合などの非線形光学効果によりスペクトルが広がる。HNLF は、通常のシングルモードファイバーに比べ、コアとクラッドの屈折率差と、非線形屈折率が大きく、それに伴う非線形係数も大きいファイバーである。そのため、上述の非線形光学効果が起こりやすい。HNLF により、1 オクターブ広がった SC 光は、自由空間に出射し、 $\lambda/4$ 板、 $\lambda/2$ 板を通り、非線形結晶の 1 つである Periodically Poled Lithium Niobate (PPLN) に入射する。PPLN は非線形光学効果により、入射した SC 光の長波長側である 2 μm の光の SHG を発生させる媒質である。SHG の変換波長域は 1925 nm から 2250 nm である。発生した SHG と基本波は、PD 受光時のショット雑音を低減するため光バンドパスフィルターを透過したのち、PD でビート信号として検出される。検出した f_{ceo} は、RF 領域の信号であるため、電気信号として制御できる。 f_{ceo} は、基準信号である Rb 原子時計に安定化されたシンセサイザーからの信号との位相差を PFD により電圧差として出力され、制御回路によってフィルタリングした後、モード同期レーザーの励起 LD に接続されている定電流源のモジュレーション端子及び LD のゲインチップに直接フィードバックすることにより制御す

る。図 3.5 に制御時の f_{ceo} の周波数安定度のアラン分散を示す。

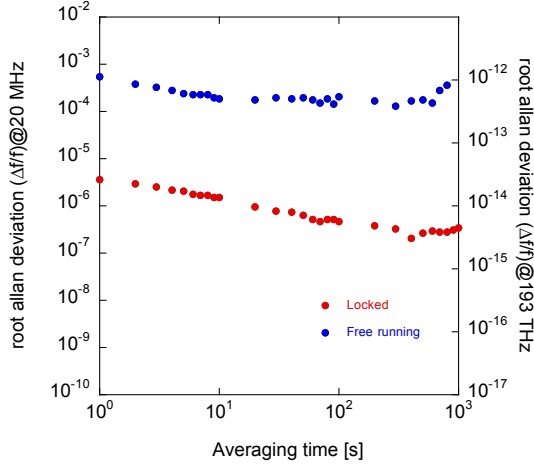


図 3.5. f_{ceo} の周波数安定度のアラン分散

図 3.5 において、左側の縦軸はマイクロ波領域での周波数安定度、右側の縦軸は光領域に換算した場合の周波数安定度をそれぞれ表す。制御時は無制御時に対して 1 sec での周波数安定度が 2 桁程度良く、光領域の周波数に換算した場合の安定度は 1 sec で 10^{-14} に達している。しかし、目標値である 10^{-15} @1 sec にはあと一桁足りていないことが確認できる。

3.3. f_{rep} の周波数安定化

(3.1) 式の通り、光周波数コムの周波数安定化にあたり、 f_{ceo} に続き、もう 1 つのパラメータである f_{rep} の周波数安定化が必要である。本項では、ECLD による f_{rep} の周波数安定化について述べる。

f_{rep} の周波数安定化は、ECLD とその発振周波数の近傍の光周波数コムの縦モードのビート信号をマイクロ波周波数基

準に対し位相同期することにより行った。周波数安定化時のビート信号のスペクトルを図 3.6 に示す。

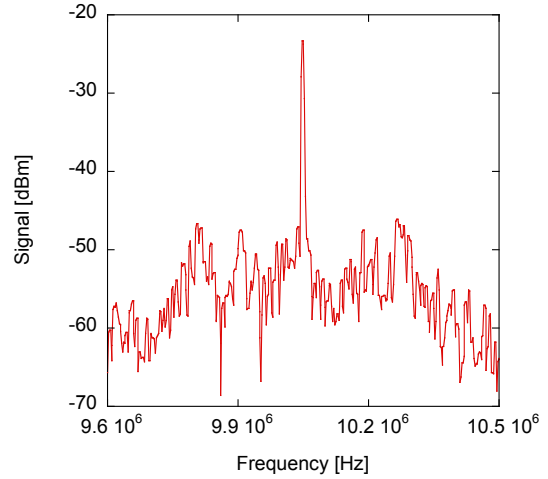


図 3.6. 周波数安定化時のビート信号のスペクトル

制御帯域は約 200 kHz であり、キャリアの SN 比は約 30 dB 程度で、目標達成に十分な値を得られた。

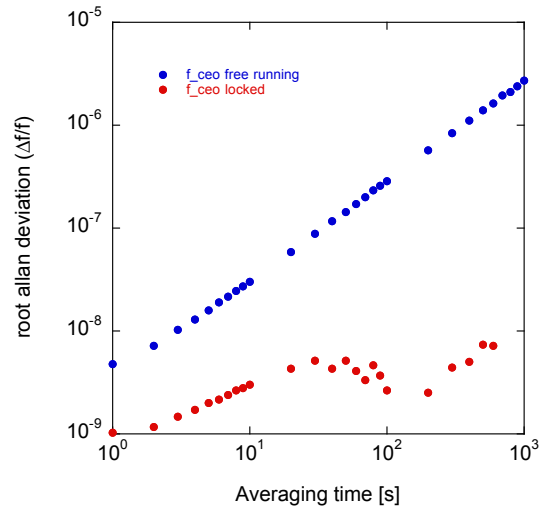


図 3.7. f_{ceo} 、 f_{rep} を同時に周波数安定化した際の f_{rep} の周波数安定度のアラン分散

図 3.7 に f_{ceo} 、 f_{rep} を同時に周波数安定化した際の f_{rep} の周波数安定度のアラン分散を示す。図 3.7 から、 f_{rep} の周波数安定度において短期的には ECLD の周波数揺らぎが支配的であり、長期的には f_{ceo} の揺らぎが支配的だと考えられる。

4. 結論

本研究は光周波数コム f_{ceo} および f_{rep} の周波数安定化を施すことによって、1 秒で 10^{-15} という周波数安定度を有する広帯域光周波数基準の開発を目標とし、実験を行った。そのために、まず光領域の周波数基準である超狭線幅光源の開発を行った。周波数安定化光源には波長 1562 nm の ECLD を用いた。しかし、現状では F.P. 光共振器の共振周波数に ECLD の発振周波数を周波数安定化できてはいるが、十分な制御帯域を得られていないため、ECLD の周波数安定化時の評価は行えていない。制御回路の最適化により制御帯域を拡大し、周波数安定化時の評価を行う必要がある。

次に、光周波数コム f_{ceo} を自己参照法により検出し、検出した f_{ceo} の SN 比を向上させるため、分散補償、HNLF の最適化を行った。その結果、 f_{ceo} の SN 比は電氣的制御に必要な 30 dB まで向上した。さらに、制御回路を設計し f_{ceo} の周波数安定化を行った。制御帯域は 200 kHz 以上、キャリアの SN 比は 25 dB へと向上した。制御時の f_{ceo} の周波数安定度は光領域の

周波数に換算すると $10^{-14}@1 \text{ sec}$ となったが、目標値にはあと 1 桁足りないという結果となった。従って、今後さらなる制御回路の見直しが必要であると考えられる。

また、 f_{rep} に関しては、光領域の周波数基準として ECLD を用いて周波数安定化を行った。その時の周波数安定度のアラン分散は 10^{-8} オーダーであり、無制御時の方が、安定度が一桁良いという結果となった。これは f_{rep} の周波数安定度が、無制御の ECLD の周波数安定度にリミットされていることを示している。

さらに、 f_{rep} の周波数安定度に対する f_{ceo} の周波数揺らぎの寄与を評価するため、 f_{ceo} 及び f_{rep} の周波数安定化を同時に行った際の周波数安定度のアラン分散を測定した。その結果、 f_{rep} の周波数安定度において、 f_{ceo} の周波数揺らぎは長期的安定度に大きく寄与していることが分かり、短期的安定度は ECLD の周波数揺らぎが支配的であることが確認できた。この結果から、本研究の目標達成に最も重要なのは、広い制御帯域で ECLD を F.P. 光共振器に周波数安定化させることことが必要であると分かった。

今後の展望として、超狭線幅光源の制御回路を最適化し、 f_{rep} の周波数安定化を行い、広帯域光周波数基準を実用化する。そして、広帯域光周波数基準を用いて、研究室で他のメンバーが開発を行っている $1 \mu\text{m}$ ヨウ素安定化レーザーの周波数安定度評価を行う。