

# 広帯域光周波数基準のための超狭線幅光源の開発

武者研究室 長久 敦史

## 1. はじめに

現代において、周波数は計量標準における長さや時間の定義に関して非常に重要な役割を担っており、度量衡の中心に存在すると言っても過言ではない。それ故に周波数を安定化させたレーザ(周波数基準)は、精密分光・精密測距(重力波検出)といった物理学の分野だけに留まらず、通信の分野など幅広い分野で活躍を果たしている。従って周波数安定化レーザは、更なる安定度の向上や様々な波長域での普及が望まれている。そこで我々は、光周波数領域における広帯域かつ高精度の周波数基準を作製し、他レーザの安定度の評価や位相安定化光ファイバを用いて遠方の研究機関へ基準レーザを伝送する、高精度信号分配システムの構築を計画した(図1)。広帯域光周波数基準は周波数帯域を1オクターブ以上広げたモードロックレーザに、線幅が非常に狭窄化された周波数安定化レーザを位相同期させることによって実現される。そこで本研究では、Fabry-Perot 共振器(F.P.共振器)を周波数基準に用いて、線幅1 Hz 以下(周波数安定度が $10^{-15}$ 台 at 1秒)を目標とした超狭線幅光源の開発を行った。

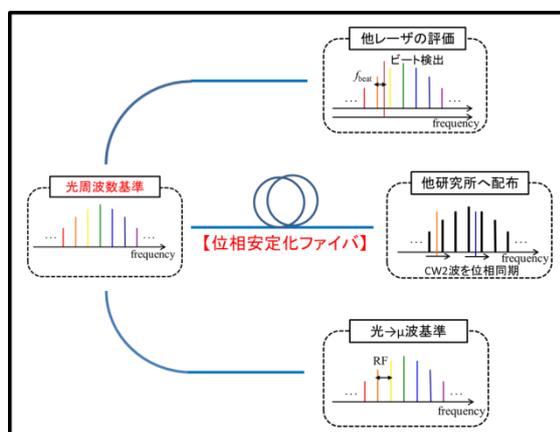


図1：光周波数基準の精密分配

## 2. 原理

ここでいう超狭線幅光源とは、線幅が非常に狭窄化されたレーザのことを指す。線幅の狭窄化は、F.P.共振器の共振周波数を基準としてレーザの発振周波数を安定化させることで可能となる。この場合周波数安定度は共振周波数の変動に直結し、共振周波数を $f_r$ 、その変化量を $\Delta f_r$ 、共振器長を $L$ 、その変化量を $\Delta L$ とすると、

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{\Delta L}{L} \quad \dots(1)$$

と表される。従って、周波数の基準となるF.P.共振器の共振器長を制御することが線幅の狭窄化において一番の重要な要素となる。

F.P.共振器を周波数基準として用いた場合、原理的にはF.P.共振器のスペーサや鏡自身の熱雑音によって周波数安定度が制限されると報告されている[1]。しかし対策を施していない状態であると、地面振動によって励起される機械的振動や熱膨張といった外乱によって引き起こされる共振器長の変動の影響の方が大きい。そこで本研究では、フィネス値が50万と非常に高く周波数弁別に優れたF.P.共振器を周波数基準として採択した。更にF.P.共振器は熱膨張が非常に小さく、Zero-Crossing 温度と呼ばれる熱膨張率が0になる温度点が存在するULE(Ultra Low Expansion)ガラス製のスペーサによって構成されている。またこのF.P.共振器は、図2のようにカットアウト型と呼ばれる形状をしており、小球によって4点を支持している。この支持位置や支持方法を最適化することによって地面振動に由来する共振器長の変動を相殺すること

が出来、その支持位置は Airy Point と呼ばれる[2]。従ってこれらを実測し、熱雑音レベル以下に外乱を抑制する必要がある。

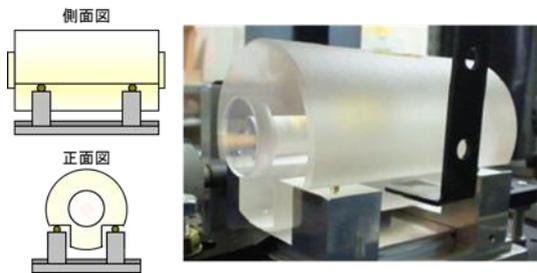


図 2 : ULE ガラス F.P.共振器

### 3. ECLD の周波数安定化

Pound-Drever-Hall(PDH)法による周波数安定化の光学系セットアップを図3に示す。光源には、発振波長  $1.55 \mu\text{m}$  の外部共振器型半導体レーザ(ECLD)を採択した。EOMによって  $15 \text{ MHz}$  の位相変調をかけ、F.P.共振器からの反射光を同じ  $15 \text{ MHz}$  で復調することで誤差信号である周波数弁別曲線を得ている。この誤差信号をサーボ回路によって増幅させ、LD ドライバへと負帰還制御をかけることで ECLD の励起電流を制御し、発振周波数を安定化させている。

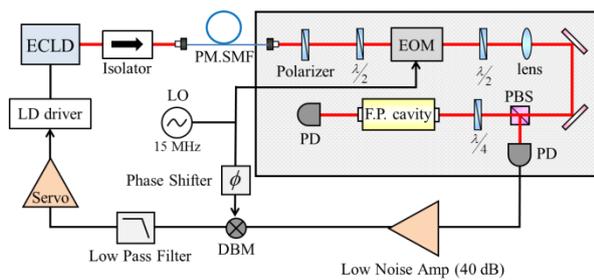


図 3 : 周波数安定化実験系

誤差信号から取得した、周波数安定化時における周波数雑音スペクトルを図4に示す。青線で示された無制御時の周波数雑音に対し、赤線で示された周波数安定化時の周波数雑音は大きく抑制されていることが分かる。また制御帯域は  $4 \text{ kHz}$  であり、目標とするフーリエ周波数  $1 \text{ Hz}$  において周

波数雑音  $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下を達成している。

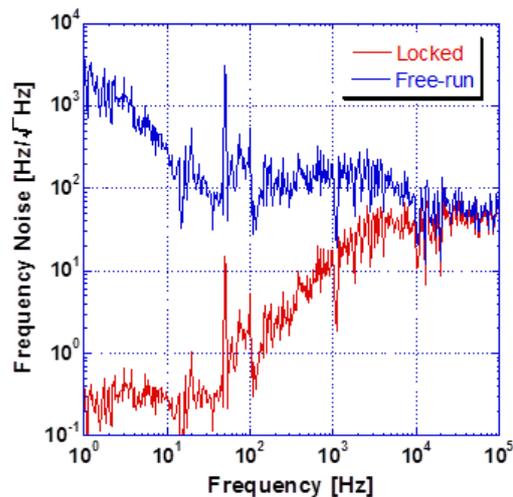


図 4 : 周波数雑音スペクトル

### 4. 加振実験による F.P.共振器の地面振動に対する特性評価

地面振動による共振器長の変動を評価するために、図5のような縦方向の振動を与え、F.P.共振器の傍に設置された加速度計によって加速度を測定出来る加振実験システムを構築した。実験は F.P.共振器を含めた PDH 法による安定化の実験系を ECLD とは独立した加振台の上に構築し、制御利得を低くした状態による周波数安定化をかけた状態で、加振器によって振動を与える。評価は振動によって励起された周波数雑音スペクトルのピーク値を加速度で割った値で示される伝達関数を、様々な条件下で求めることで行う。

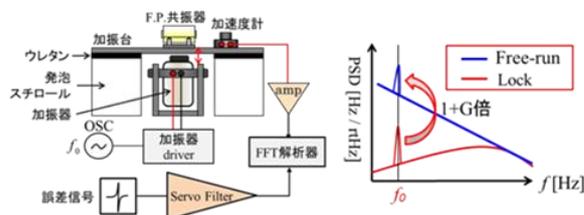


図 5 : 加振実験セットアップ

まず F.P.共振器の支持位置  $d$  を対称に変化させ、伝達関数の値を求めた結果を図6に示す。加振周波数  $10 \text{ Hz}$ 、 $15 \text{ Hz}$  において同等の傾向を示し、伝達関数の値が最も小さくなったのは  $d = 21 \text{ mm}$  の位置であ

ったため、Airy Point は  $d=21\text{ mm}$  であると特定できた。

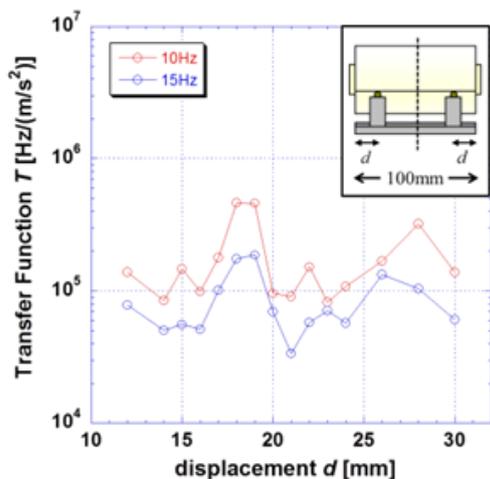


図 6：伝達関数の支持位置依存性

続いて支持方法に関しても支持用の小球をステンレス球とテフロン球の 2 種類を用意し、それぞれにおいてバイトンゴムを敷くか敷かないかの計 4 種の方法について伝達関数の測定を行った。図 7 に加振周波数ごとに伝達関数を示した結果を示す。加振周波数 10 Hz と 15 Hz の場合においてはテフロン球よりもステンレス球、バイトンゴム無しよりもバイトンゴム有りの方が伝達関数  $T$  は低いという結果になった。低周波数における伝達関数の値のほうが重要であるため、支持方法はステンレス球+バイトンゴムを採択することにした。

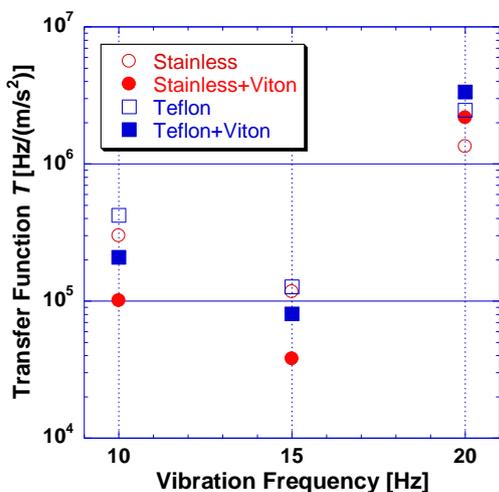


図 7：支持方法ごとの伝達関数

最後にこれらの支持方法において目標とする周波数雑音  $1\text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  を達成し得るかどうかを考察する。測定によって求めた伝達関数から周波数雑音の下限值  $S_{\text{noise}}$  を求める式は、

$$S_{\text{noise}} = T \times S_a \quad \dots(2)$$

と表される。ここで  $S_a$  は加速度のパワースペクトル密度である。これを元に求めたフーリエ周波数 10 Hz、15 Hz、20 Hz における周波数雑音の下限値を図 8 に示す。結果より青線で示された Airy Point ではない点で支持した場合に比べ、赤線で示された Airy Point に支持した場合の下限値は低い値をとり、赤の点線で示された目標値を下回っている。また最終的に受動除振台 (minus-k) に設置することを考えた場合は 40 dB 以上の抑制効果があるため、20 Hz 以降においても十分に目標を達成できると考えられる。また今回実測が出来なかったフーリエ周波数 1 Hz においては逆に、 $S_{\text{noise}} = 1\text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  を満たすための伝達関数の値を見積もると  $T = 250\text{ kHz}/(\text{m}/\text{s}^2)$  以下でなければならないと逆算できる。この値はフーリエ周波数 10 Hz における伝達関数の値に比べても高い値であり、minus-k による抑制が 10 dB あることを考慮すると、十分に目標値は達成出来ると考えられる。

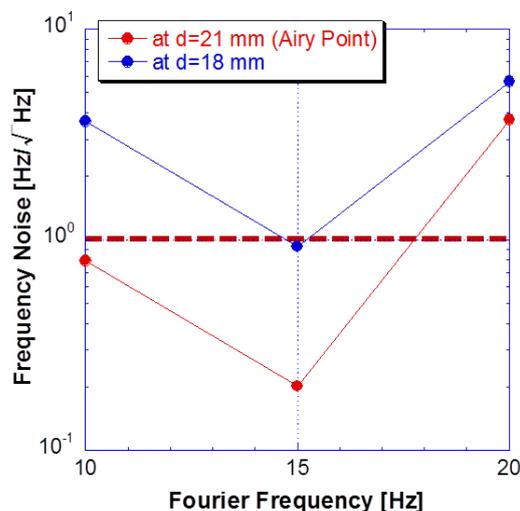


図 8：周波数雑音の下限值

## 5. F.P.共振器の Zero-Crossing 温度の測定

熱膨張率が 0 になる温度 Zero-Crossing 温度を実測するために、F.P.共振器の温度変化による共振周波数の変動を測定する。Zero-Crossing 温度測定のための実験系を図 9 に示す。まず ECLD からのレーザ光を 10 dB coupler によって、10%を ECLD 安定化の実験系へ、残り 90%を本測定において絶対周波数を安定化させた基準として用いる、 $f_{ceo}$  と  $f_{rep}$  を安定化させたモードロックレーザとのビート周波数を測定するための 3 dB coupler へとそれぞれ分配する。モードロックレーザ及びその安定化に関しては詳細を次章にて述べる。また F.P.共振器の温度制御は、アルミ製の共振器台の下に設置したペルチェ素子による温調を用いて行う。

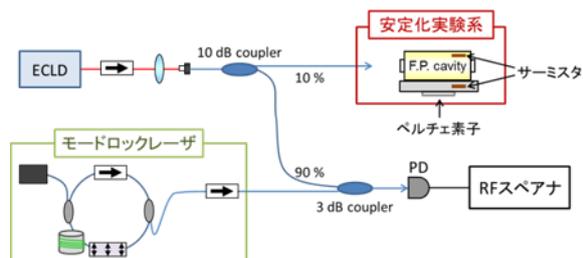


図 9 : Zero-Crossing 温度測定セットアップ

測定は F.P.共振器の温度を 1 °C ずつ温度を変化させながら、25~33 °C の範囲においてビート周波数の測定を行った。またそれぞれの測定温度点で 1 時間程度のインターバルを置き、F.P.共振器の温度は出来る限り均一になるように考慮した。サーミスタの値を温度に変換し、横軸を温度、縦軸をビート周波数とした結果を図 10 に示す。このように 29 °C 付近でビート周波数の値が折り返す、二次関数に近い曲線が得られた。従ってこの極大値こそが熱膨張の方向が反転する、言い換えると熱膨張率が 0 になる Zero-Crossing 温度ということになる。Zero-Crossing 温度を精密に求めるために、得られた結果を熱膨張率に変換する。ここ

で熱膨張率  $\alpha$  は、

$$\alpha(T) = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad \dots(3)$$

と表される。式(1)と(3)を用いて共振周波数の温度依存性を熱膨張率の温度依存性に変換した結果を図 11 に示す。赤線で示されたラインが熱膨張率 0 であるため、 $T_{zc} = 29.5$  °C であると求められた。また  $T_{zc}$  付近の熱膨張率は  $10^{-8}$  オーダーの値であると求められた。

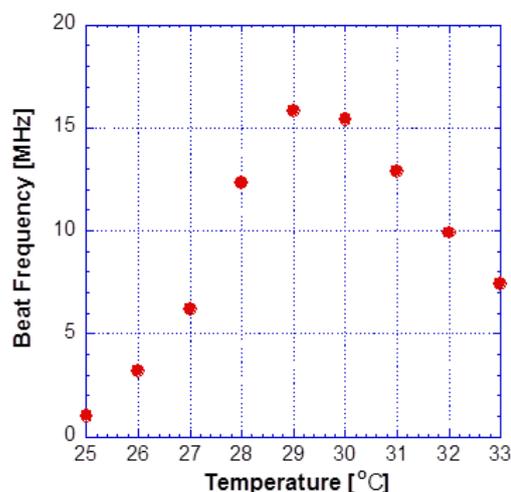


図 10 : ビート周波数の温度依存性

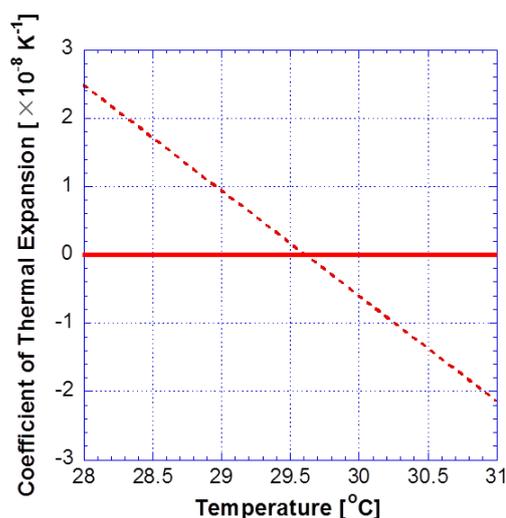


図 11 : 熱膨張率の温度依存性

続いて、目標とする線幅 1 Hz 以下を到達するために許容される  $T_{zc}$  のゆらぎ  $\Delta T_{zc}$  を見積もる。図 10 の極値付近のプロット点を二次関数でフィッティングした式

において、おける温度  $T$  が 1 Hz 以下になればよいという考え方をすれば、 $\Delta T_{zc} = 1.6 \text{ mK}$  と求められる。従って最終的には図 12 のように F.P.共振器を 2 段の熱シールド及び真空槽で覆い、真空度  $10^{-8} \text{ Torr}$  以下の真空状態にすることで温度制御を行う。またこれらは外部から完全な断熱をする役割を果たし、音響の変化に伴う音響雑音を低減させることも期待して行う。

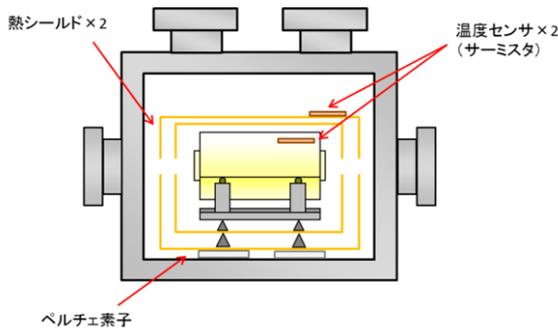


図 12：熱シールドと真空槽による温度制御

## 6. ファイバモードロックレーザの位相同期

前述の Zero-Crossing 温度測定と広帯域光周波数基準の作製を見込んで、本研究室で開発されたエルビウム添加ファイバモードロックレーザの  $f_{ceo}$  と  $f_{rep}$  の安定化を行う。 $f_{ceo}$  と  $f_{rep}$  の安定化はルビジウム周波数基準によるマイクロ波基準を元に位相同期させることで行う。図 13 に  $f_{ceo}$  及び  $f_{rep}$  の位相同期実験系を示した。それぞれの位相同期までの流れについて簡単に述べる。まず  $f_{rep}$  に関しては Er 添加ファイバが巻かれた円筒型のピエゾヘフィードバックすることによって、共振器長を制御することで安定化を行う。 $f_{ceo}$  に関してはモードロックレーザの励起 LD へフィードバックすることによって、励起強度を制御することで安定化を行うという流れである。

また位相同期に必要な信号は、 $f_{rep}$  は出力をそのままビート検出することで、 $f_{ceo}$  は自己参照法によって得ることができ

た。図 14 に  $f_{ceo}$  及び  $f_{rep}$  のビート信号を示す。どちらのビート信号も SN 比が 30 dB 以上と十分な値となっており、線幅も十分に細いものが得られた。

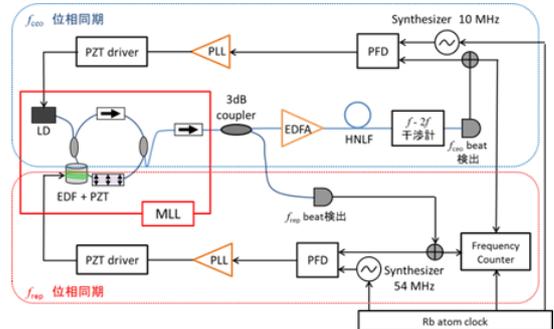


図 13：位相同期実験系

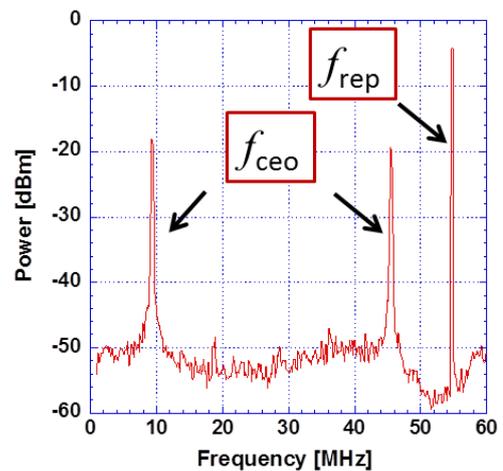


図 14： $f_{ceo}$  と  $f_{rep}$  のビート信号

続いて  $f_{ceo}$  及び  $f_{rep}$  の位相同期の結果を示す。位相同期時のそれぞれの相対周波数ゆらぎをアラン分散によって評価を行った。まず  $f_{rep}$  のアラン分散を図 15 に示す。結果より  $f_{rep}$  の位相同期は 1 時間程度持続し、アラン分散も 1000 秒以上において求めることができた。赤いプロット点が安定化時、青いプロット点が無制御時におけるアラン分散である。結果から制御時は積分時間 1 秒において、安定度は  $10^{-11}$  であると求められた。しかし黒線で示されているように、この結果は周波数シンセサイザの安定度に制限されている。次に  $f_{ceo}$  のアラン分散を図 16 に示す。 $f_{ceo}$  の位相同期も 1 時間程度持続し、アラン分散は 1000 秒まで求

めることが出来た。結果から制御時は積分時間 1 秒において、安定度は  $10^{-4}$  であると求められた。

ここで  $f_{\text{ceo}}$  及び  $f_{\text{rep}}$  をこの安定度で位相同期した場合における、光周波数領域での安定度を考える。まず  $f_{\text{rep}}$  に関しては周波数揺らぎが直接効いてくるため、光周波数領域における周波数ゆらぎは数 kHz のゆらぎとなる。続いて  $f_{\text{ceo}}$  の周波数揺らぎはモード次数の  $n$  で割った値となるため、 $f_{\text{rep}}$  と同様に数 kHz のゆらぎとなる。従って前章で述べた Zero-Crossing 温度測定の場合においては、十分な安定度であるといえるが、最終的に光周波数基準として用いるには、 $f_{\text{rep}}$  は  $10^{-14}$  程度、 $f_{\text{ceo}}$  は  $10^{-8}$  程度の安定度が求められる。

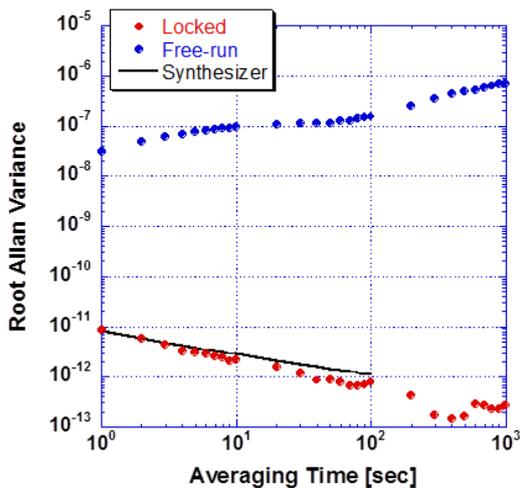


図 15 :  $f_{\text{rep}}$  のアラン分散

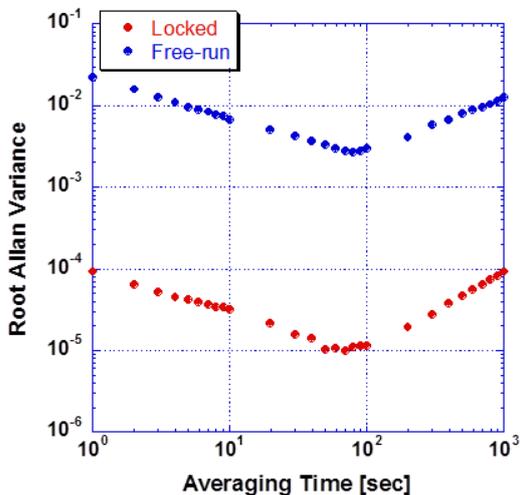


図 16 :  $f_{\text{ceo}}$  のアラン分散

## 7. まとめと展望

本研究では広帯域光周波数基準のための超狭線幅光源の開発を行い、ECLD の発振周波数を安定化させた。更に F.P.共振器の Airy Point 及び Zero-Crossing 温度を実測することにより外乱による共振器長の変動を抑制した。並行してファイバモードロックレーザに関して、マイクロ波基準による  $f_{\text{ceo}}$  と  $f_{\text{rep}}$  の位相同期実験を行った。最終的に安定化 ECLD によって  $f_{\text{rep}}$  を位相同期し、広帯域光周波数基準としての完成を目指す。

超狭線幅光源の今後の展望としては、これまでの結果を踏まえ真空槽等を含めた完全な外乱抑制システムを構築した上で、周波数安定度の評価を行う予定である。また広帯域光周波数基準の作製のため、この安定化 ECLD を用いて  $f_{\text{rep}}$  の位相同期を行うことが求められる。

## 参考文献

- [1] Kenji Numata, Amy Kemery, and Jordan Camp, "Thermal-Noise Limit in the Frequency Stabilization of Lasers with Rigid Cavities" Phys. Rev. Lett, **93**, 250602 (2004)
- [2] S. A. Webster, M. Oxborrow, and P. Gill, "Vibration insensitive optical cavity" Phys. Rev. A, **75**, 011801, (2007)