

第 1 章 序論

1.1 緒言

2015 年は光学の歴史上、画期的な発明・発見の記念年であった。例えば、イブン・アル・ハイサムの光学研究から 1000 年、アインシュタインの一般相対性理論から 100 年、カオの光ファイバーの提唱から 50 年などが挙げられる。このため、国際連合は 2015 年を光と光技術の国際年（国際光年：IYL2015）と宣言し、世界各地で光の重要性や魅力を啓蒙するイベントが開催された。また、光技術の産物である LED や光通信は、世界中のエネルギー問題解決や情報通信発展へ導いている。このように、21 世紀は光が主役となり、エネルギーや情報通信に留まらず、環境、医療、セキュリティ、物性、製造等の様々な産業・社会におけるイノベーションの創出が期待されている。

このような背景の中で「光コム」と呼ばれる新しいレーザー光源に注目が集まっている。光コムとはモード同期レーザーのことであり、その出力光は時間領域において非常に安定した超短パルス列を示す一方、フーリエ変換の関係にある周波数領域では多数の光周波数モード列が等間隔に規則正しく並んだ構造を示す。したがって、光コムを構成する光周波数モードの絶対周波数 f_m は、光コムの間隔 f_{rep} とオフセット周波数 f_{ceo} を用い、 $f_m = mf_{rep} + f_{ceo}$ (m : 光周波数モード次数) と表される。さらに、 f_{rep} と f_{ceo} は共に RF 周波数帯であるため、マイクロ波周波数標準に位相同期すれば、周波数標準にトレーサブルな『精確な光周波数の物差し』として利用できる。

光コムを用いた光周波数測定[1]が初めて報告されて以降、光コムは瞬く間に光周波数計測や分光計測の分野に拡がり、光格子時計[3]の絶対周波数計測や超精密分光[4]に用いられてきた。このように、精密計測を中心に科学技術に多大なる貢献をしたことから、2005 年には光コム的发展に寄与した J. Hall, T. Hänsch にノーベル物理学賞が授与された[2]。これは、光コム of 極限的光源としての特徴が、それまでの常識を大きく打ち破ったからである。しかし、光応用計測における光コム of 可能性は、光コムを用いた距離計[5]等あるが未だ十分には開拓されているとは言い難い。

そこで、本研究では光コムが持つ精確な光周波数の物差しという特徴を生かした新たな応用計測法 of 開拓を目指し、光コム共振器[6]独自の『外乱/RF 周波数変換機能』に着目した新しいセンシングセンサー of 開発を行った。光コム共振器は、光ファイバーベース of リング型共振器構造を有しており、そのコム間隔 f_{rep} は c/nL (c : 光速、 n : 屈折率、 L : 共振器長) で与えられる。ここで、 f_{rep} が十分に安定な状態で、光学的共振器長 nL を変動させるような外乱 (温度、振動、

歪みなど) が加えられると、それに対応して f_{rep} が高感度かつ高速に変化する。すなわち、ファイバー共振器の外乱として機能するような測定物理量を、高精度かつ高感度に周波数に変換することが可能になる。さらに、周波数は極めて高精度計測が可能な物理量であるので、従来に比べ高精度で高ダイナミックな計測手法であると期待される。

本論文では、光音響イメージングセンサーへの応用を目的とした超音波センシングへ焦点を当てた。光音響イメージングは光と超音波のハイブリッドなイメージング法であり、分子選択性を可能とする光の特性と、生体深部観察を可能とする超音波の特性を両立させる生体イメージング法として期待されている[7]。しかし、光音響波の検出に用いる電氣的音響トランスデューサーの感度と周波数応答により、生体深部における空間分解能が制限されていた。

近年、電氣的音響トランスデューサーによる制限を回避する手法として、光学的音響センサーが注目されている。干渉計測[8]、表面共鳴プラズモン[9]、マイクロリング共振器[10]などの光学的アプローチを用いることにより、ノイズ軽減や高速化に向けた試みがなされている。しかし、これらの計測ではいずれも光信号の強度情報というアナログ量を計測しているため、その高精度化や広ダイナミックレンジ化に限界があった。そこで、光強度よりも高精度かつ広ダイナミックレンジで計測可能な別の物理量を介して、光音響波を計測できれば、更なる高感度化が可能になり、生体深部の空間分解能向上に期待できる。

そこで、ファイバー光コム共振器の外乱/RF 周波数変換機能により、光音響波を RF 周波数信号として高精度・高速・高ダイナミックレンジで検出することができれば、光音響イメージングの空間分解能向上に期待できる。

1.2 本論文の構成

本論文では、ファイバー光コム共振器の構築と、それを応用したひずみ/超音波計測を行った。

第 1 章では、研究背景として、光コムの現状と応用計測について述べる。さらに、ファイバー光コム共振器の外乱/RF 周波数変換機能に着目し、ひずみや超音波センシングへの具体的な応用展開を述べる。

第 2 章では、モード同期ファイバーレーザー共振器と光コムの基礎的な原理について説明する。

第 3 章では、電気光学変調器(EOM)を共振器中に組み込んだ、高速制御型ファイバー光コム共振器の開発について述べる。これは、第 4 章で述べる繰り返し周波数安定化制御について、周波数応答特性を高速化($\sim 1\text{MHz}$)する狙いがある。第 4 章では、ファイバー光コム共振器の繰り返し周波数を PZT で安定化制御し、

安定な状態から外乱(歪み)を加えた場合の制御電圧変化を計測することで歪みセンシングを行った。

第 5 章では、第 4 章で述べたひずみセンシングの高速化を目指し、超音波センシング用ファイバー光コム共振器を構築した。さらに、超音波トランスデューサから発生した超音波を共振器中のファイバーへ与え、原理確認を行った。

第 2 章 ファイバー光周波数コム

2.1 モード同期レーザー

モード同期とは、レーザー共振器内の各定在波(縦モード)の位相を互いに同期させる意味で用いる。また、モード同期レーザーとは、ピコ秒～フェムト秒オーダーの周期的な超短パルス列を発生する光源のことである。一方、Qスイッチレーザーも周期的なパルス列を発生する光源である。しかし、Qスイッチレーザーによるパルス列の位相は、コヒーレントでない。これは、Qスイッチレーザーでは、レーザー共振器の Q 値を変化させることでパルスを取り出すため、各定在波の位相関係には着目していないからである。

モード同期の発生原理について、利得媒質を含んだ共振器をモデルとして説明する。レーザー遷移の帯域幅が比較的大きい利得媒質中では、図 3.1 のように数百から数千の縦モードが同時に励起されることがある。

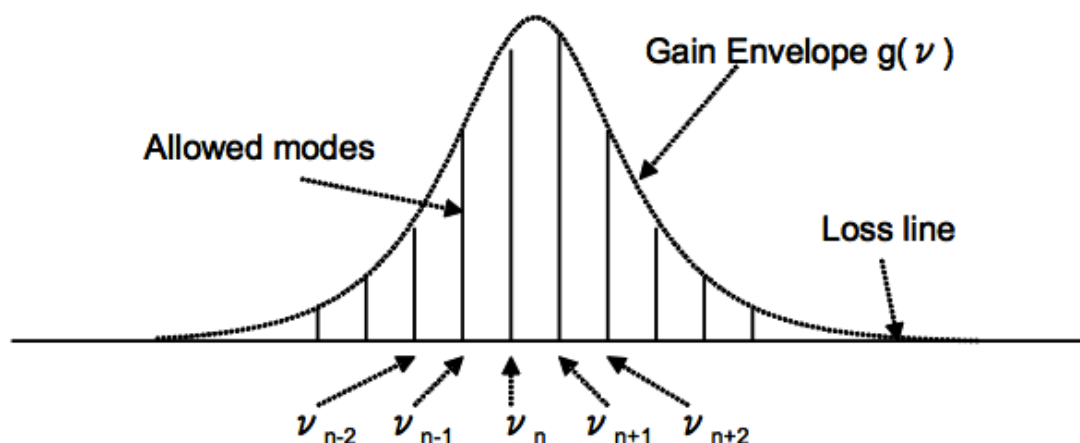


図 3.1 レーザー共振器中の縦モードと利得媒質のスペクトル帯域

それぞれの縦モードの間隔はレーザー共振器内で、

$$\nabla^2 E(\mathbf{r}) + k^2 E(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.1)$$

の方程式の解として表される。そのため、縦モード間隔は、共振器無いを往復する定在波で決定される。例えば、ファブリーペロー型の共振器で、縦モード間隔は $c/2nL$ (c :光速、 n :屈折率、 L :共振器長) となる。一般的にレーザーからの出力は、ランダムな位相を持ったいくつかの縦モードの重ね合わせであり、CW 出力ではおおよそ一定の出力を持つ。レーザー出力全体の電場の強さは、各縦モードの重ね合わせなので、

$$E(t) = \sum_n E_n e^{i((\omega_0 + n\omega)t + \phi_n)} \quad (2.2)$$

となる。ここで、包絡線が搬送波よりも十分に遅いと仮定すると、式(2.2)は

$$E(t) = A(t) e^{i\omega_0 t} \quad (2.3)$$

となる。ここで、 $A(t)$ は

$$A(t) = \sum_n E_n e^{i(n\omega t)} \quad (2.4)$$

である。全てのモードがほぼ同じ振幅と位相を持っていると仮定すると、レーザーはモード同期する。モード同期状態になると、レーザー出力が CW 状態に比べて著しく大きくなる。

2.2 モード同期ファイバーレーザー

2.2.1 非線形偏波回転モード同期法

ファイバーレーザーから短パルスを発生させるために、ファイバー中の非線形偏波回転 (Nonlinear Polarization Rotation : NPR) によるモード同期を用いた。NPR とは光強度に依存して伝播光の直交する 2 つの成分間に位相差が生じ、両者の成分から構成される楕円偏波面が自分自身で超高速に回転する現象である。図 2.6 に NPR を用いたモード同期を示す。光ファイバーを伝播したパルス成分は NPR が生じるのに対し、CW 成分は NPR を生じないので、両者間で偏光面の回転度合いが異なる。ファイバーから出力された光は、パルス成分のみが偏光子を透過し、CW 成分は透過できないよう、 $\lambda/4$ 波長板と $\lambda/2$ 波長板を使って偏光調整を行う。その結果、パルス成分のみが偏光ゲートを通過することが出来る。厳密には、パルス成分の中でもピークパワーの強い成分のみが偏光子を透過できるので、パルスの狭窄化が行われる。

2.2.2 エルビウムモード同期ファイバーレーザー

エルビウム添加光ファイバーを利得媒質として用いているエルビウムモード同期レーザーの原理を説明する。本研究では Tamura 型のファイバーレーザー構成を利用した。

このファイバーレーザーはリング型共振器構造を有しており、エルビウム添加光ファイバー、シングルモードファイバー、波長分割多重カップラ、アイソレータ、出力分岐カップラ、および波長板と偏光子で構成している。励起光源には、

波長 1480nm または 980nm のファイバーカップリング型半導体レーザーを用いる。NPR は、光 Kerr 効果による非線形位相変調によって生じる、そこで、波長板と偏光子で実効的な過飽和吸収効果を引き起こし、モード同期が起きやすいように調整する。共振器はオールファイバーで構成されるため、外乱に強く、アライメントフリーであり、安定なモード同期動作を実現することができる。

2.3 周波数安定化制御法

フェムト秒モード同期レーザーから出力される超短パルス光は、時間領域において非常に安定した高繰返しのモード同期超短光パルス列（繰り返し周波数=モード同期周波数= f_{rep} ）を示す一方で（図 2.2 上側）、フーリエ変換の関係にある周波数領域では、多数の安定な光周波数モード列が f_{rep} 間隔で規則的に櫛（コム）の歯状で並んだ超離散マルチ・スペクトル構造を示す（図 2.2 下側）。

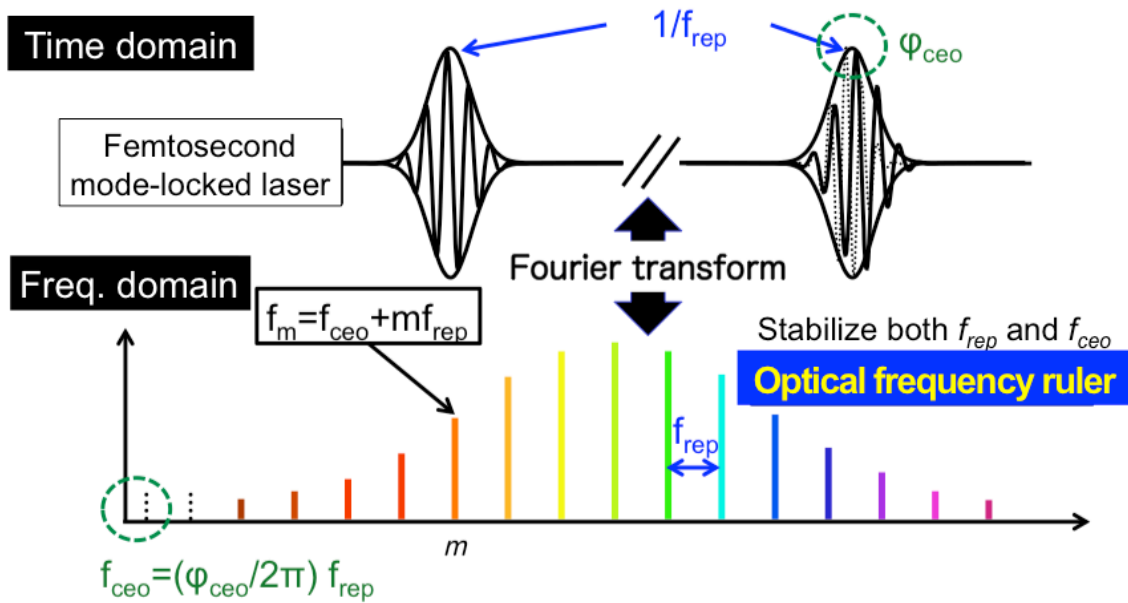


図 2.2 光周波数コムの概念図

時間軸上に並ぶパルス列を拡大してみると、パルス形状を決める包絡線（エンベロープ：Envelope）と内部の光搬送波（キャリア：Carrier）が異なる速度で進行するため、パルス毎にキャリア位相が一定量だけずれていく。ここで、位相速度 v_p は

$$v_p = \frac{c}{n_p} \quad (2.5)$$

群速度 v_g は以下のように与えられる。

$$v_g = \frac{c}{n_p - \lambda \frac{dn}{d\lambda}} = \frac{c}{n_g} \quad (2.6)$$

このズレはキャリア・エンベロープ・オフセット位相 Φ_{CEP} (Carrier Envelope Offset : CEO) と呼ばれ、 Φ_{CEP} の周波数領域描写をキャリア・エンベロープ・オフセット周波数 f_{CEO} という。 f_{ceo} , f_{rep} , Φ_{CEP} の関連性は、 $1/f_{rep}$ 秒間にキャリアに対するエンベロープの位相が Φ_{CEP} だけずれていくと解釈できるので、

$$f_{ceo} = \left(\frac{\phi_{CEP}}{2\pi} \right) f_{rep} \quad (2.7)$$

となる。これより、 m 番目のコム・モードの光周波数 $f(m)$ は f_{CEO} と f_{rep} を用いて下記のように表すことができる。

$$f(m) = f_{ceo} + mf_{rep} \quad (2.8)$$

実際に発振している光コムの周波数は数百 THz 付近に分布しており、実際は 0 Hz まで分布していない。モード間隔を f_{rep} とし、周波数軸上でコム・モードを光周波数領域から仮想的にゼロ周波数付近まで伸ばしていくと、端数の周波数成分が存在する。このオフセット成分が f_{CEO} に相当する。したがって、 f_{CEO} と f_{rep} を原子時計に位相同期させた状態で、波長計を用いて m を決定すると、 $f(m)$ の値が一義的に決定できる。すなわち、光コムが光周波数の物差しとして利用できる。

f_{rep} と f_{CEO} を周波数基準信号に位相同期することにより、光コムは光周波数の物差しとして利用できる。位相同期制御とは、基準信号と被制御信号の位相差を検出し、それらの位相差がゼロとなるようにフィードバックを行う手法のことをいう。位相同期を行うためには、 f_{rep} と f_{CEO} の抽出方法と制御方法を考える必要がある。具体的には、モード同期レーザー光からどのように光コムに関連したパラメーターを抽出し、どの要素にフィードバックするかを考える必要がある。

リング型共振器の場合を考えると、モード同期周波数 f_{rep} は以下の式で与えられる。

$$f_{rep} = \frac{c}{n_g L} \quad (2.9)$$

ここで、 n_g は共振器内の群屈折率、 L は共振器長である。つまり、 f_{rep} の安定化には共振器長を制御すれば良い。これはレーザーの縦モード間隔がレーザーの共振器長に依存していることから容易に理解できる。共振器中に PZT や EOM などを挿入することにより、共振器長を制御する。 f_{rep} はレーザー光を高速光検出

器で検出することにより容易に検出でき、その安定化制御も確立されている[32].

一方、 f_{CEO} の制御はパルス列の位相速度および群速度の差に起因していることから、共振器の位相屈折率 n_p および群屈折率 n_g を励起レーザー光強度で制御することにより達成できる。 f_{CEO} は式 (2.7) からわかる通り、 Φ_{CEP} と関係している。そこで、群速度と位相速度にうまく変調を与えることができれば、 f_{CEO} をコントロールすることが可能になる。モード同期レーザー中には光カー媒質(光ファイバーもしくは Ti:S 結晶等)が挿入されていることから、パルス光の強度を変化させると、非線形屈折率 n_2 が変化する。そのため、励起レーザーの強度を変化させることにより、共振器中での群速度および位相速度が調節し、 f_{CEO} の制御を行う。モード同期ファイバーレーザーの場合、励起 LD の駆動電流に制御信号を与えれば良い。

第 3 章 高速制御型ファイバー 光コム共振器の開発

3.1 研究背景

ファイバー光コム共振器の繰り返し周波数 f_{rep} は、 c/nL (c :光速、 n :ファイバーの屈折率、 L :ファイバー共振器長) で与えられる。ここで、 f_{rep} が十分に安定な状態で、光学的共振器長 nL を変動させるような外乱 (温度、振動、歪みなど) が加えられると、それに対応して f_{rep} が高感度かつ高速に変化する。すなわち、ファイバー共振器の外乱として機能するような測定物理量を、高精度かつ高感度に周波数変換することが可能になる。この変換機能を用い、我々はファイバー光コム共振器を用いたセンシングセンサーを提案している。提案手法の 1 つに、次章で述べる f_{rep} を周波数安定化制御する手法がある。しかし、この手法は計測信号の周波数が f_{rep} を周波数制御帯域によって制限され、制御素子に PZT を用いているため高速な外乱を計測することが難しい。一方、 f_{rep} 周波数制御帯域を高速化した、高速制御型ファイバー光コム共振器が報告されている。この共振器を用いることができれば、数百 kHz 程度の高速な外乱を計測することが期待される。

そこで、高速制御型ファイバー光コム共振器を開発している電気通信大学美濃島研究室へ内地留学を行い、センシング応用を目的とした高速制御型ファイバー光コム共振器の開発を行った。

3.2 共振器セットアップ

3.2.1 共振器構成

開発した高速制御型ファイバー光コム共振器の概略図を図 3.1 に示す。まず、将来的にセットアップ全体を電気通信大学から徳島大学へ移動するため、光学系はブレッドボード上に組んだ。さらに、温度変化や振動等の環境変動から共振器を保護するために、縦 539mm、横 539mm、高さ 120mm のアルミ箱の中に共振器を組んだ。また、ファイバーの温度制御を行うために、銅板をブレッドボードへ固定した。この銅板の下には、断熱のために発砲スチロールを敷いている。発砲スチロールの一部をペルチェ素子の大きさに切り抜き、そこに放熱用シリコングリスを用いてペルチェ素子を銅板へ接着する。ペルチェ素子と発砲スチロールの厚さが等しくない場合、適当な厚みの銅板をペルチェ素子下部へ張りつけ、スペーサーとする。銅板温度モニタリング用のサーミスタは、ペルチェ素子の上部に位置する銅板にカプトンテープで固定する。最後に、ペルチェ素子とサーミスタを温度制御器に接続し、温度制御を行う。

高速制御型ファイバー光コム共振器は、光ファイバー部と自由空間(EOM モジュール内の一部)からなるリング型共振器を有している。波長 980nm の LD から出射したポンプ光は、IWDM カプラを介して、EDF(最大吸収 150dB@1530nm)を前方励起する。励起された EDF は誘導放出を起こし、波長 1.5 μ m 光を共振する。この時、1.5 μ m 光と EDF に吸収しきれなかったポンプ光は、共振器内を双方向に進むが、IWDM カプラによって一方向に制限される。EOM モジュール内に入射した光は、光ファイバー内伝搬から自由空間伝搬に変わり、偏光子、 $\lambda/2$ 波長板を通った後 EOM に入射される。その後、 $\lambda/2$ 波長板、 $\lambda/4$ 波長を通り、再び光ファイバー内伝搬へ戻る。この $\lambda/2$ 波長板 2 枚と $\lambda/4$ 波長板の角度を変更することで、光ファイバー中での非線形偏波回転量を調整する。リング共振器内の光は、出力分岐カプラを用いて 30%を取り出し、70%を共振器内に戻している。

表 3.1 に今回用いた構成部品の一覧をまとめた。

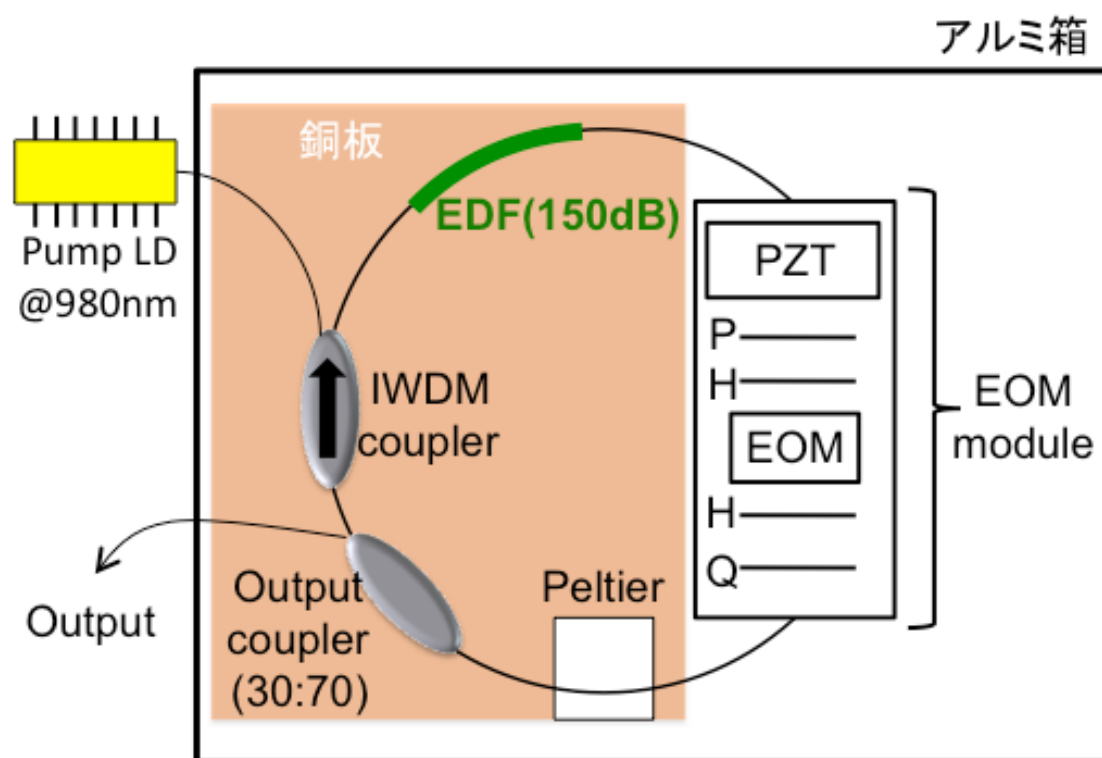


図 3.1 高速制御型ファイバー光コム共振器の構成、EDF: Erbium-doped fiber, EOM: Electro-optic phase modulator, H: Half-wave plate, IWDM: Isolating Wavelength Division Multiplexer, P: Polarizer, Pump LD: Pump laser diode, PZT: Piezoelectric transducer, Q: Quarter-wave plate

表 3.1 高速制御型ファイバー光コム共振器パラメータ

品名	規格等	備考
エルビウム添加光ファイバ (150dB)	OFS、EDF150	吸収 150dB/m @1530nm
Pump LD	Gooch&Housego、 AC140107000976SM	波長 980nm、 最大出力 700mW
バタフライ型 LD マウンタ	YHTC、KJG-14eBP	はんだ付けタイプ
IWDM カプラ	AFR、 IWDM-98-1-2-1-N-B-1	1W(保証品)、前方励起、 PMD 0.05ps
分岐カプラ(30:70)	AFR、 SBC-1-55-30-N-B-1	300mW or 500mW (要確認)
EOM	New Focus、4004	DC-100MHz、 1000-1600nm、納品後、オ プトクエストへ送付し モジュールに組み込み
カートリッジ式 EOM モジュール	オプトクエスト	特注品
3ch LD ドライバー	YAMAKI、 KLD-1ALT-3iL	fceo 制御時にサイドバン ドが発生したため、以降使 用中止
LD ドライバー	YAMAKI、KLD-1ALT	fceo 実験以降使用
ブレッドボード	Thorlabs、MB60120/M	600×1200 mm
ペルチェ	秋月、TEC1-12708	40×40 mm
サーミスタ	YHTC	

3.2.2 共振器パラメータの設計

共振器パラメータを設計する上で、まず、共振器に用いた各ファイバーおよび素子の分散値を推定する必要がある。SMF の群速度分散値は、分散パラメータ -18 [ps²/nm/km]と、分散パラメータ D と群速度分散 β_2 の関係式を用いて、 -0.02286 [ps²/m]@1550nm とした。EDF の分散値や分散パラメータは、データシートに記載が無い事が多く実験的に推定しなければならない。今回は電通大美濃島研究室で用いている値 0.05 [ps²/m]を参考にさせて頂いた。EOM の分散値は、LiNbO₃ 結晶の群速度分散が 0.1 [ps²/m]であり、LiNbO₃ 結晶の大きさが 2 (縦)× 4 (横)× 40 (長さ)[mm]であることから、分散値を 0.004 [ps²]と推定した。以上、各素子の推定分散値を用いて、共振器トータル分散値が -0.02 [ps²]

付近となるよう設計した。この値にした理由は、既に美濃島研究室にて開発された 2 台の高速制御型ファイバー光コム共振器を参考にした結果である。開発された共振器の内、1 台は分散値が 0 [ps²] 付近、もう 1 台は -0.02 [ps²] 付近であったが、分散値が 0 [ps²] 付近の共振器光スペクトル波形には、EOM に起因する干渉波形が強く現れていた。この干渉波形が、今後の応用計測においてどのような影響を与えるかは不明であるので、極力干渉波形が出ない条件である分散 -0.02 [ps²] を目標とした。なお、共振器開発時点において、共振器トータル分散値とフリーラン時の f_{ceo} 線幅や SN 比の関係が明らかでなかったため、考慮しなかった。

また、市販モード同期ファイバーレーザ(Menlo)とのデュアルコム化を見越して、繰り返し周波数は 100MHz 前後を目標にした(参考 Menlo A: 99.794,278 ~ 100.210.636 周波数可変範囲 415kHz, Menlo B: 99.807,141 ~ 100.192.416 周波数可変範囲 385kHz)。

3.3 共振器特性評価

3.2.2 で推定した分散値を用いて、共振器トータル分散値及び繰り返し周波数が目標値付近になるよう、EDF 長を 0.28 [m]、SMF 長を 1.56 [m] とした。この時、SMF 長を長く見積もっておき、カット & トライによって繰り返し周波数の合わせ込みを行っていく。

図 3.2 にモード同期動作時の共振器光スペクトルを示す。図 3.2 において、共振器スペクトルの形状はソリトンライクであり、推定共振器分散値 -0.02 [ps²] 付近と合わせて妥当な結果と言える。さらに、SMF を 7 [cm] 毎にカットしていった時の共振器光スペクトルを図 3.2 に合わせて示す。SMF をカットしていく毎に、共振器トータル分散値が正に近づくことによる半値幅の増大が現れている。SMF を 14 [cm] カットした時、繰り返し周波数は 100.386889 [MHz] となり、目標値を達成するとともにガウス形状の光スペクトルを得た。そのため、このパラメータで共振器の開発を終えた。表 3.3 に最終的な光コム共振器パラメータを示す。

図 3.3 に、図 3.2 で示した光スペクトル(トータル分散値 -0.0153 [ps²]) の拡大図を示す。図 3.3 において、0.7 [nm] 間隔の周期的な強度変化が現れている。これは、EOM モジュール内 EOM と自由空間部との相互作用によって発生していると考えられる。そこで、EOM モジュール発注時にオプトクエスト社へ、CW レーザーを使った干渉波形発生の確認をお願いした。その結果、EOM の配置角度と干渉波形の発生に関係性があることがわかり、干渉波形が発生しない EOM 配置角度になるよう調整していただいた。図 3.3 では光スペクトル波形にまだ干渉波形があるが、EOM の角度調整をしていない EOM モジュールを使用した共

振器の光スペクトルと比較すると、干渉波形の振幅は弱いため、EOMの配置角度調整が光スペクトルの干渉波形抑制に効果があると言える。図3.4はPump LDの電流値を300 [mA]から700 [mA]まで変化させ、共振器の光スペクトルを計測した結果である。Pump LDの電流値が上がるにつれ、波長1550 [nm]から1560 [nm]付近の干渉波形が強く現れている。

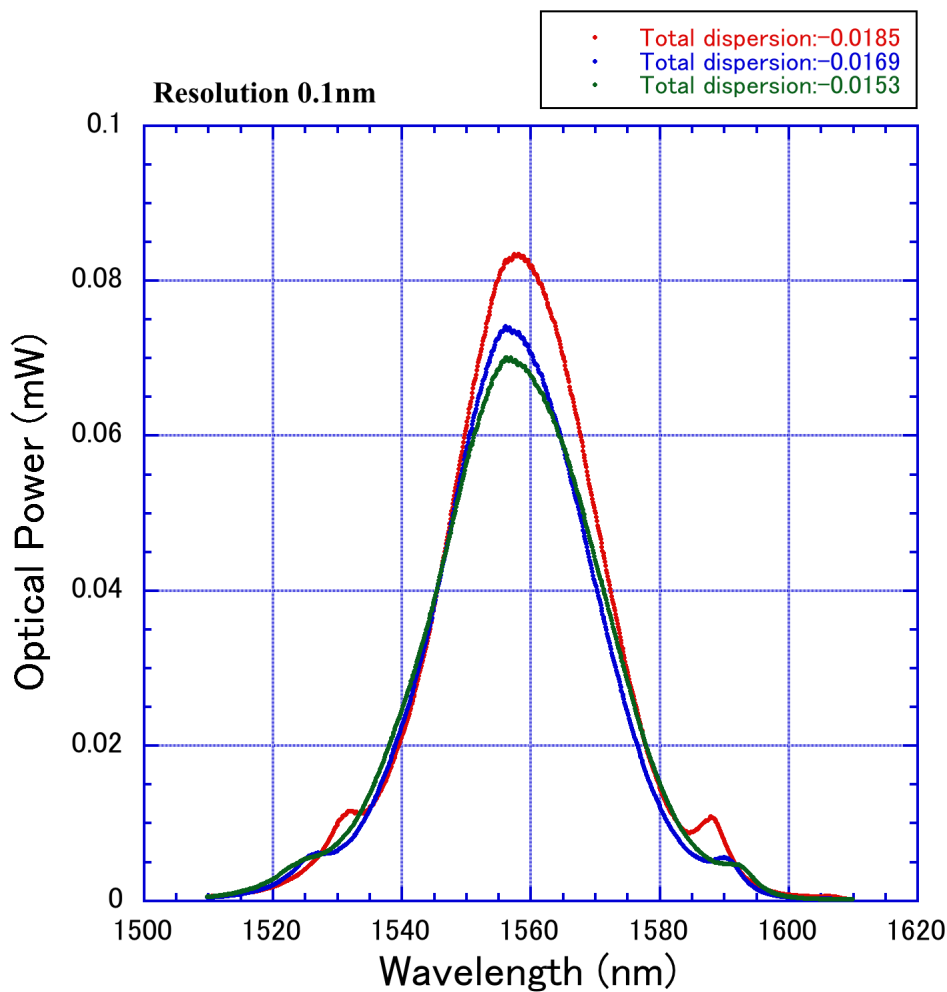


図 3.2 共振器光スペクトル

表 3.3 分散値毎の計測結果

共振器トータル分散値 [ps ²]	繰り返し周波数 [MHz]	半値幅 [nm]	平均パワー [mW]	LDカレント [mA]	セルフスタート
-0.0185	94.153091	25.96	7.162	271	○
-0.0169	97.029893	26.29	6.3	325	○
-0.0153	100.386889	28.94	6.65	297	○

表 3.3 高速制御型ファイバー光コム共振器パラメータ

オシレータ条件	長さ [m]	分散値 [ps^2/m]	分散値 [ps^2]	屈折率	光学的長さ [m]
SMF	1.42	-0.02286	-0.03246	1.48	2.10
EDF(150dB)	0.28	0.05	0.014	1.48	0.414
素子(IWDM,30:70カプラ)	0.102	-0.02286	-0.002332	1	0.102
EOMモジュール	0.25	0	0	1	0.25
LiNbO3	0.055	0.1	0.0055	2.2	0.121
合計	2.107		-0.01529		2.989

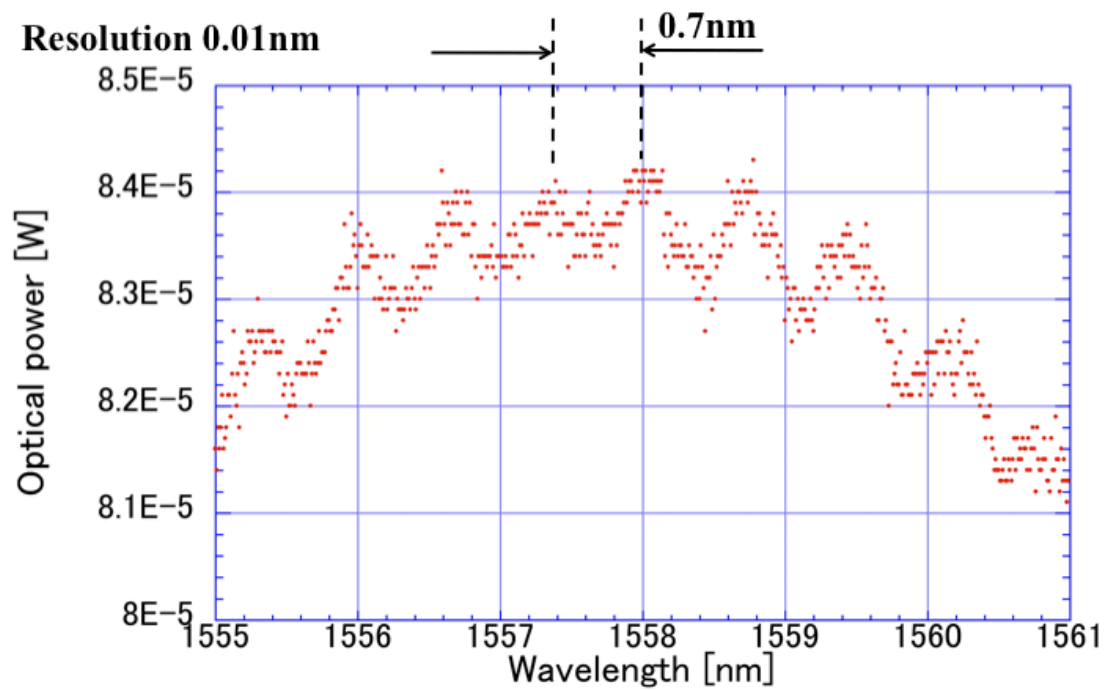


図 3.3 共振器光スペクトル拡大

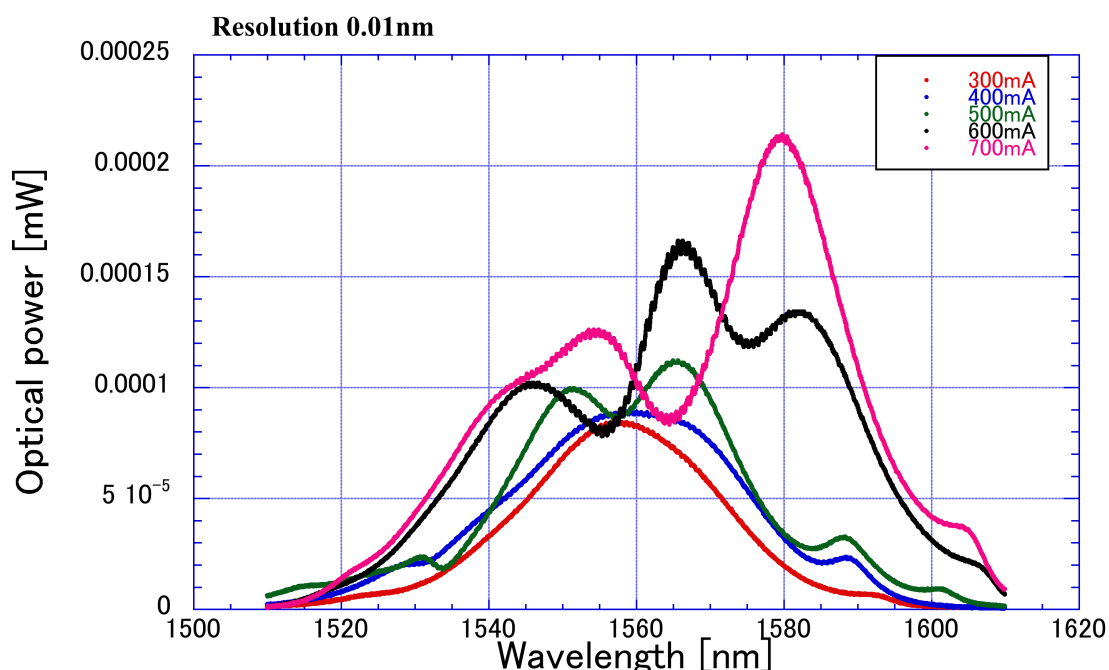


図 3.4 共振器光スペクトル(LD カレント 300~700 [mA])

共振器完成後、共振器からの出力を目的別に使用するために、共振器出力のマルチブランチ化を行った。図 3.5 にマルチブランチ化の構成を示す。まず、共振器内分岐カプラ(30:70)の 30%ポートに、戻り光防止用の偏波無依存アイソレータを接続する。その後、出力モニター用の分岐カプラ(1:99)、出力マルチブランチ用の分岐カプラ(50:50)を 2 つ接続していく。マルチブランチ化を行った結果、共振器の出力を 4 つのポートに分けた。図中の長さは、分岐カプラ間の SMF 長さである。

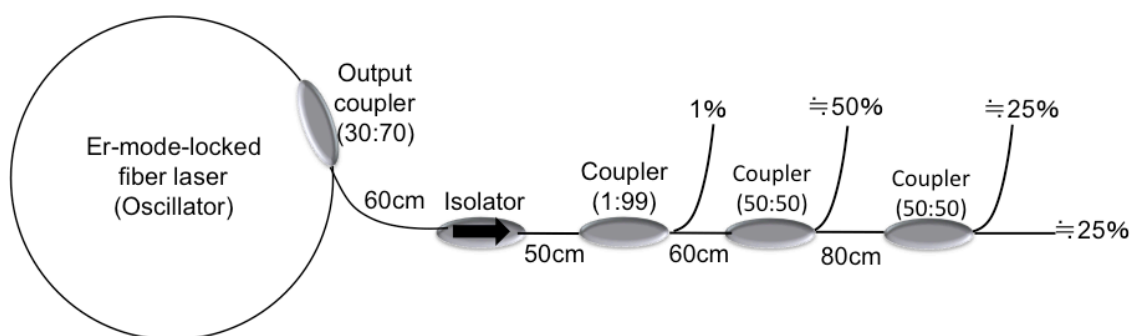


図 3.5 マルチブランチ化構成図

3.4 f_{ceo} 安定化制御のための EDFA による超短光パルス増幅

前項で開発した共振器を光周波数コムとして用いるためには、 f_{ceo} 及び f_{rep} の周波数安定化制御が必要である。本章では、まず f_{ceo} 信号検出および周波数安定

化制御法について述べ、その後 f_{rep} 信号検出および周波数安定化制御法について述べる。

f_{ceo} の信号検出は、光コム共振器の光スペクトルを高非線形ファイバーで 1 オクターブ以上に広帯域化し、 $f-2f$ 干渉系を用いる方法がある。しかし、共振器からの出力平均パワーは数 mW と、広帯域光を発生するためには不十分なパワーである。そこで、エルビウム添加光ファイバー増幅器(Erbium-Doped Fiber Amplifier:EDFA)による平均パワーの増幅を行う。

図 3.6 に EDFA の構成を示す。共振器出力の 25%成分は、コントローラに取り付けられた 2 枚の波長板を通り、EDF に伝送される。EDF は最大吸収が 30dB/m@1530nm の物を 3 [m]用いた。この EDF を、波長 980 [nm]、カレント 900 [mA]の LD により WDM カプラを介して後方励起する。

EDFA における光パルスの高効率増幅法によると、EDFA のゲインは入射パルスの分散量に依存し、入射最適チャープ量があることが見出されている。そこで、EDFA 平均出力パワーが最大となるよう、EDF 前の SMF 長さをカットしていった。この時の SMF 長は、共振器内分岐カプラ(30:70)から EDF までの SMF 長のことである。図 3.7 に SMF 長による EDFA 平均出力の変化を示す。SMF 長が 310 [cm]の時、最大平均出力パワー90 [mW]を得た。図 3.8 に、EDFA 後の光スペクトルを示す。パワーが最大となった SMF 長 380 [cm]の場合とパワーの低い SMF 長 310 [cm]を比較すると、スペクトル拡大が起こっている。このスペクトル拡大は EDF 中での断熱圧縮として知られている。

表 3.4 に EDFA 開発に用いた構成部品の一覧をまとめた。

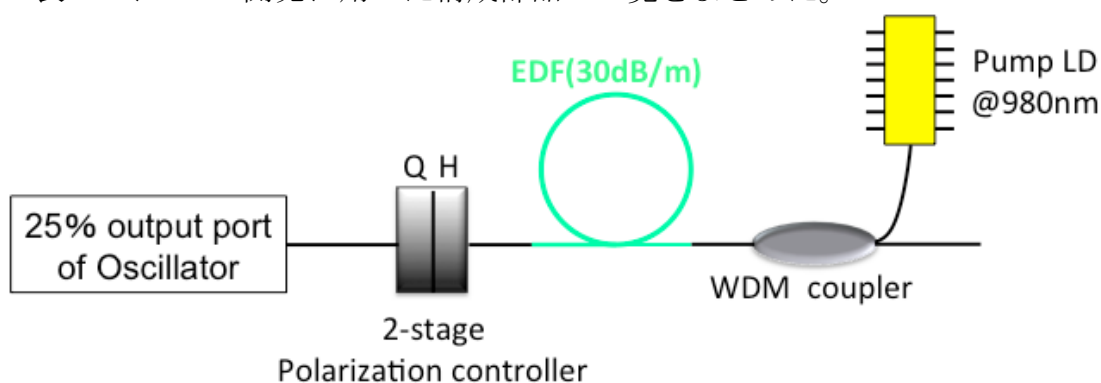


図 3.6 EDFA の構成

H: Half-wave plate, WDM: coupler Wavelength Division Multiplexer coupler, Pump LD: Pump laser diode, Q: Quarter-wave plate

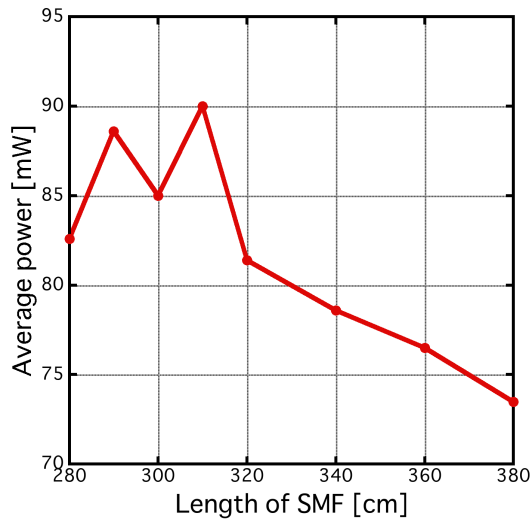


図 3.7 SMF 長による平均出力の変化

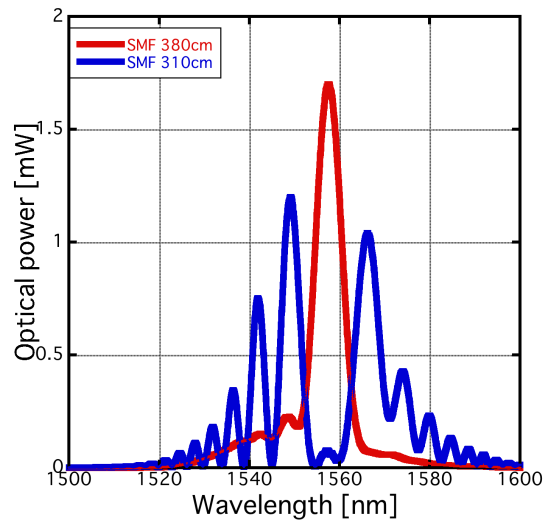


図 3.8 SMF 長による光スペクトルの変化

表 3.4 エルビウム添加光ファイバー増幅器構成部品

品名	規格等	備考
エルビウム添加光ファイバ (30dB)	LIEEKI E30-4/125	吸収 30dB/m @1530nm
Pump LD	Gooch&Housego、 AC140107000976SM	波長 980nm、 最大出力 700mW
バタフライ型 LD マウンタ	YHTC、KCG-14BP	チャック型
WDM カプラ	AFR、 WDM-98-1-2-1-N-B-1	後方励起、
2 軸偏波コントローラ	オプトクエスト PCMA-15-S/N	使用波長:1550nm ファイバ:両端 SMF、 φ 0.25mm 素線、1m
LD ドライバー	YAMAKI、KLD-1ALT	

3.5 f_{ceo} 検出および周波数安定化制御

3.5.1 f_{ceo} 検出

f_{ceo} 検出には、共振器の光スペクトルを 1 オクターブ以上に広帯域化する必要がある。そこで、前節で増幅された光パルス HNLF に入射することにより、光スペクトルの広帯域化を行った。HNLF は美濃島研究室を通して、住友電工様より提供していただいた。

図 3.9,10 は、HNLF 後の光出力を光スペクトラムアナライザにより計測した結

果である。1 オクターブ以上の光スペクトルを計測するために、2 台のスペクトラムアナライザ(AQ6375 および AQ6370D、YOKOGAWA)を用いて計測した。結果として、950nm から 2100nm までの 1 オクターブ以上に広帯域化された光スペクトルを得た。また、HNLF までの SMF 長を変化させ、光スペクトルを計測した。そして、SMF230cm の時、光スペクトルは最も広帯域化された。以上より、SMF 長を 230cm に戻して以降の実験を行った。しかし、 f_{ceo} 検出に利用する波長は、PPLN の位相整合波長条件によってあらかじめ 1000~1030nm と 2000nm~2060nm と決まっている。したがって、その波長域の信号強度に注目し、SMF 長を決定すべきであった。

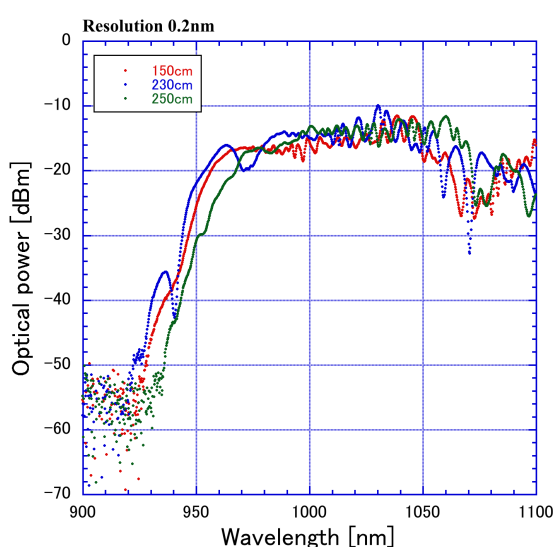


図 3.9 広帯域光スペクトル(短波長側)

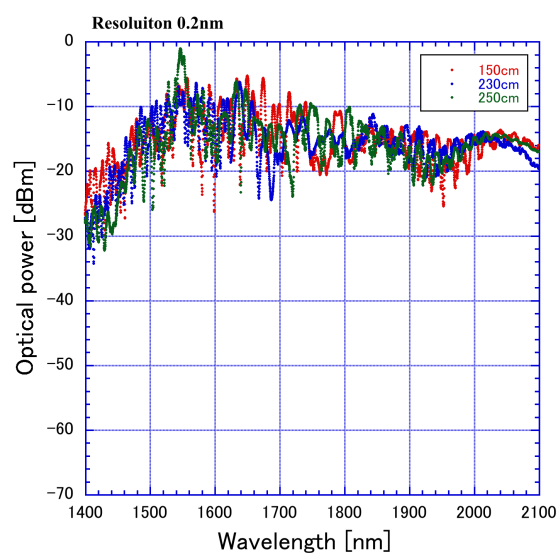


図 3.10 広帯域光スペクトル(長波長側)

図 3.11 に f-2f 干渉計の構成を示す。HNLF で広帯域化された光は、SMF を介して非球面レンズに入射する。入射した光は、非球面レンズによって周期分極反転 LiNbO₃(Periodically Poled Lithium Niobate: PPLN)中で集光される。PPLN で発生される第 2 高超波と、広帯域光コムの 1 μ m 帯のパルスが空間的に重なり合うことで、干渉が起こる。この光は、バンドパスフィルタを通して、PD に入射される。図 3.12 に検出した f_{ceo} 信号の RF スペクトルを示す。 f_{ceo} の SN 比は 25dB(RBW:300kHz)となり、制御に必要な最低限の SN 比を確保することができた。さらに、オシレータポンプ LD カレント値やオシレータのモード同期の調整、EDFA ポンプ LD カレント値や偏波状態の調整を行う事で、最終的に SN 比 30dB の f_{ceo} 信号を検出した。

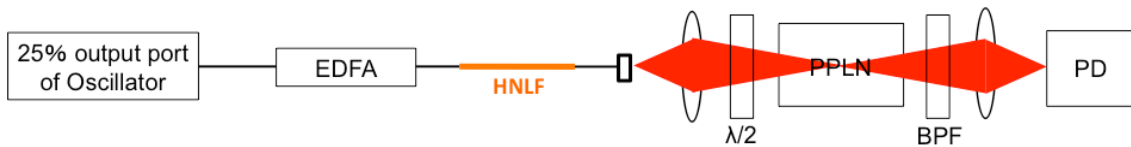


図 3.11 f-2f 干渉計

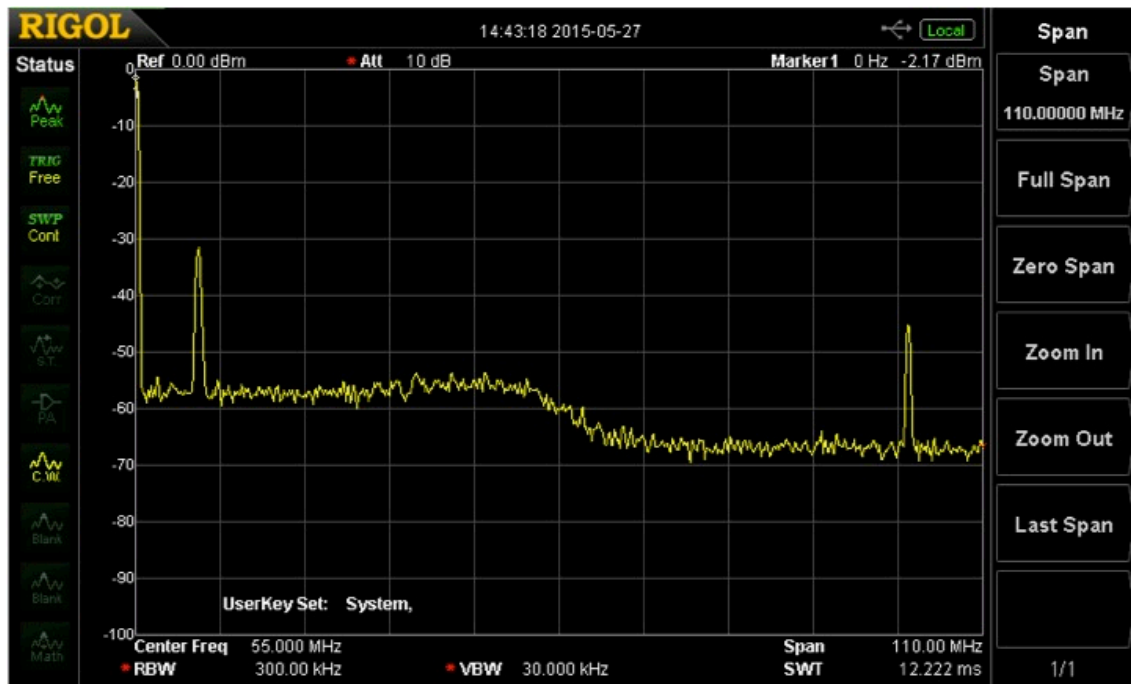


図 3.12 f_{ceo} 信号の RF スペクトル(フリーラン、LD カレント 473mA)

3.5.2 f_{ceo} 周波数安定化制御の周波数制御

f_{ceo} の周波数制御は、ファイバー光コム共振器の励起 LD パワーを変化させることで行う。図 3.13 に f_{ceo} 周波数安定化制御系を示す。f-2f 干渉系で検出された f_{ceo} 信号を、高速光コム用サーボコントローラ(CS-01、産総研) に入力する。入力後、 f_{ceo} 信号は位相比較器(Double Balanced Mixer: DBM)で、ファンクションジェネレータより発生した RF 基準信号との位相差が出力される。この位相差信号が誤差信号としてループフィルタに入力され、PID 制御信号を生成する。制御信号は共振器励起 LD の駆動電流に加算され、RF 基準信号の位相に f_{ceo} 信号の位相が追従するよう、共振器励起 LD のパワーを制御する。図 3.14 に、制御時の f_{ceo} RF スペクトルを示す。図 3.14 において f_{ceo} 信号の左右にサイドバンドが発生している。このサイドバンドの発生原因を、LD ドライバーの電源系など確認していき、3ch LD ドライバー自体に問題があることがわかった。そこで、LD ドライバーを 1ch の物に変更した。図 3.15 は LD ドライバー変更後の制御時の f_{ceo} RF スペクトルを示している。PID 制御回路の時定数を調整することにより、およそ 800kHz

のサーボバンプを持つ制御を実現した。図 3.16 は f_{ceo} 信号の周波数安定性を、基準となる RF 信号と比較した結果である。RF 信号の周波数安定性と比較し、 f_{ceo} 信号の周波数安定性は 1 桁以上悪い結果となっている。これは、 f_{ceo} 信号の SN 比が十分でなく、制御がかかりきっていないと考えられる。

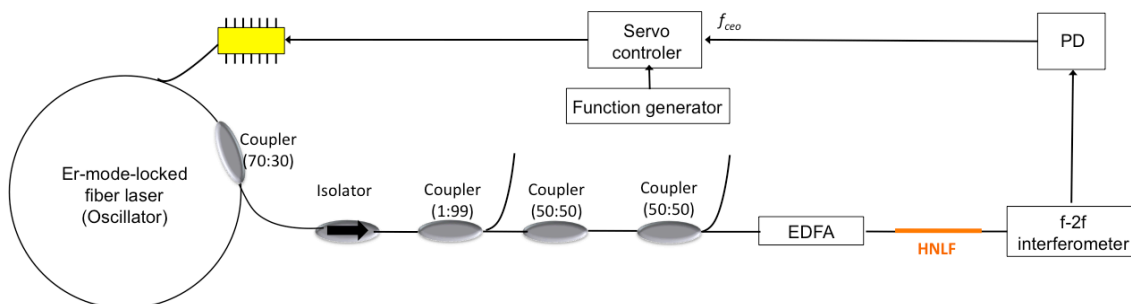


図 3.13 f_{ceo} 周波数安定化制御系

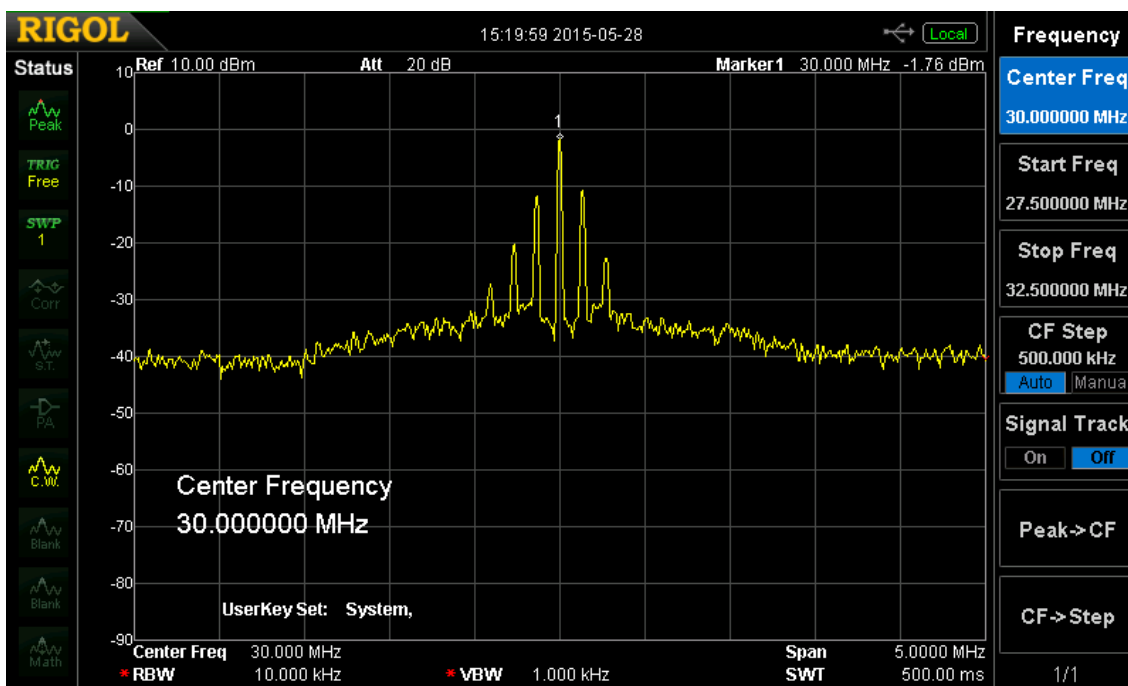


図 3.14 f_{ceo} 信号の RF スペクトル(制御時、KLD-1ALT-3iL)

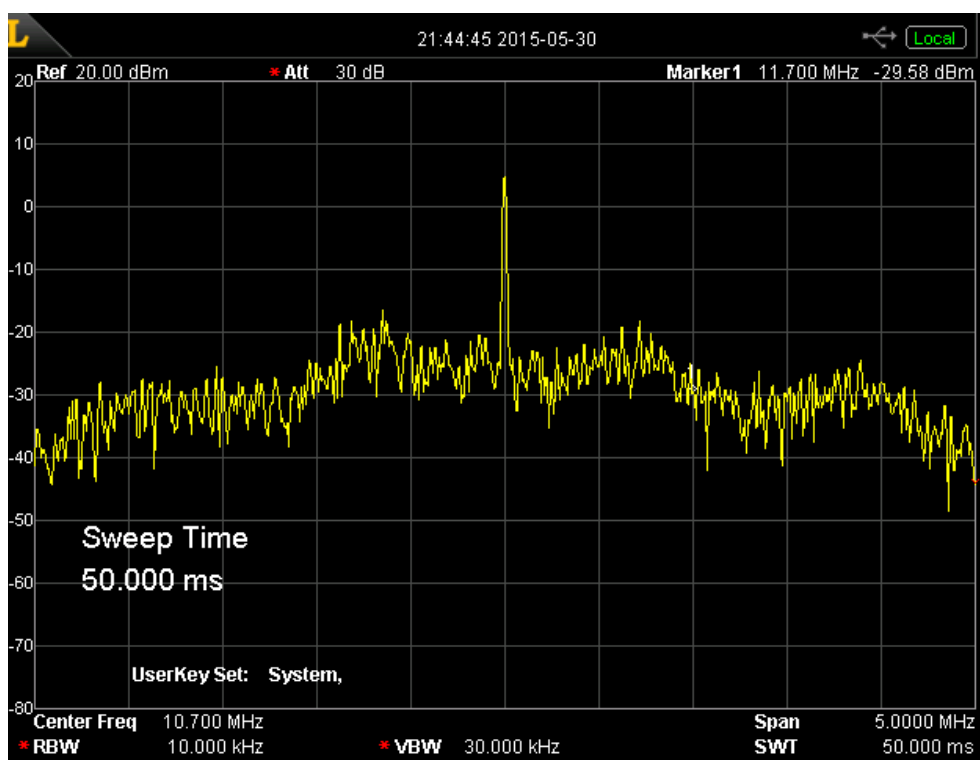


図 3.15 f_{ceo} 信号の RF スペクトル(制御時)

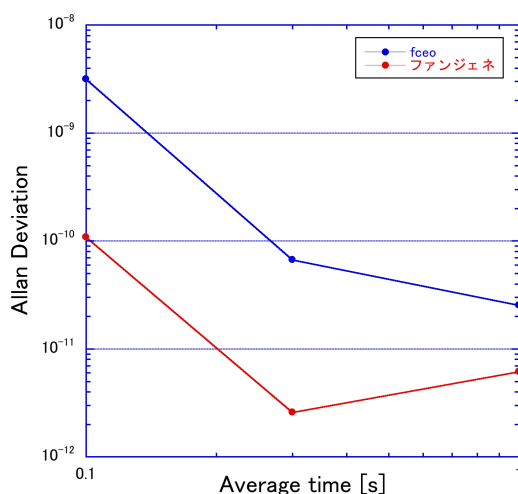


図 3.16 f_{ceo} 信号の周波数安定性(制御時)

3.5.3 徳島大学移動後の立ち上げ

開発したシステムを電気通信大学から徳島大学へ輸送し、 f_{ceo} 信号検出を行った。輸送中に EDFA 内の 2 軸偏波コントローラが破損したため、徳島大学にて別の物に交換を行った。2 軸偏波コントローラ以外、目立った外傷が見当たらなかった。図 3.17 に徳大輸送後の f_{ceo} 信号の RF スペクトル波形を示す。RBW300KHz の時、輸送前と同等の SN 比 30dB を得る事ができた。また、RBW

を 300kHz から 10kHz まで変化させていき、 f_{ceo} 信号の線幅をおおよそ見積もった。RBW を 100kHz から 30kHz に変化させた時、 f_{ceo} 信号線幅は細くなっているが、RBW を 30kHz から 10kHz に変化させた時、 f_{ceo} 信号線幅に変化は見られない。そのため、 f_{ceo} 信号線幅を 100 kHz 以下 30kHz 以上と見積もった。

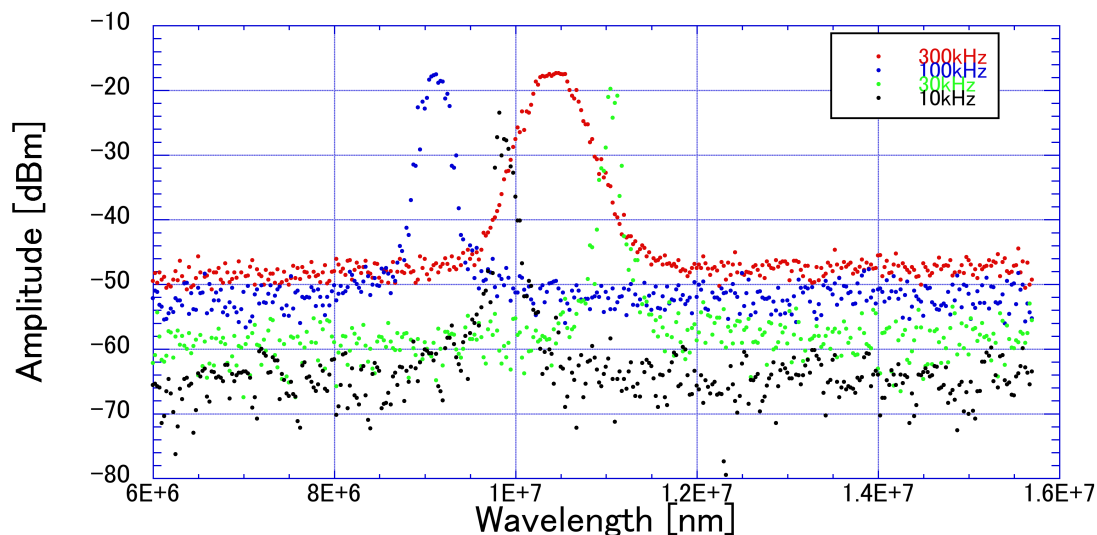


図 3.17 f_{ceo} 信号の RF スペクトル(フリーラン、LD カレント 473mA)

図 3.18 は徳大輸送後に f_{ceo} 信号の周波数安定化制御を行った結果である。サーボポンプは 400kHz となり、電通大におけるサーボポンプ 800kHz を達成していない。また、 f_{ceo} 信号の両端にノイズも発生している。そのため、PID 制御の時定数の調整やノイズ原因の特定をしなければならない。

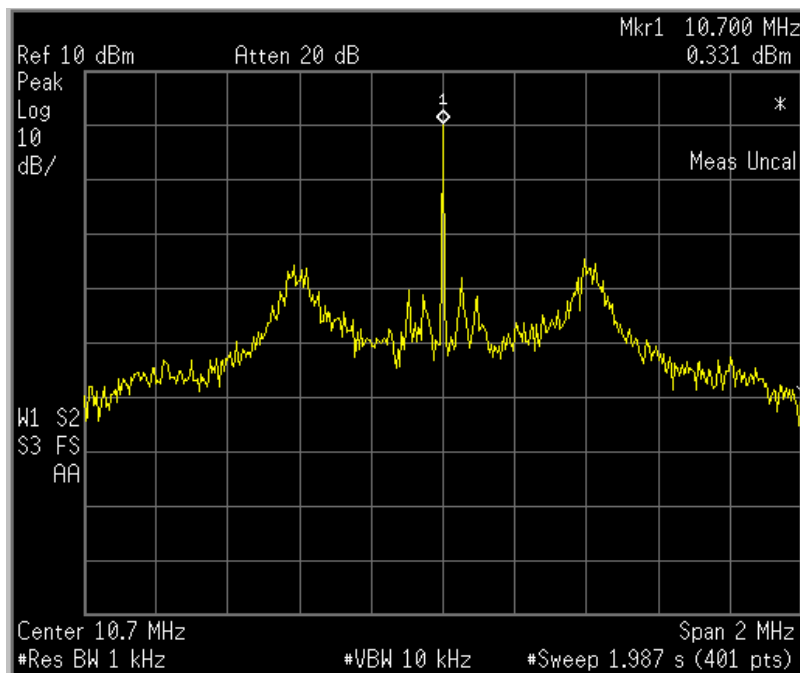


図 3.18 f_{ceo} 信号の RF スペクトル(制御時)

3.6 f_{beat} 検出および周波数安定化制御

3.6.1 f_{beat} 検出および周波数安定化制御

光周波数コムのパラメータの一つである f_{rep} は、共振器長を L 、共振器内の屈折率を n 、真空中の光速を c とすると、 $f_{rep}=c/nL$ と表される。また、 f_{rep} は RF 周波数帯であるため、共振器長を PZT で変化させることで、容易に安定化制御することができる。しかし、 f_{rep} を直接安定化制御すると、光周波数において f_{rep} の揺らぎがモード次数倍されてしまいます。そこで、安定な CW レーザーと光コムとのビート信号 f_{beat} を検出し、 f_{beat} を介して f_{rep} の周波数安定化制御を行う。さらに、電気光学位相変調器 (EOM) を用いて共振器内の実行光路長を変化させることで、制御帯域を広くすることができる。

図 3.19 に f_{beat} 検出系および周波数安定化制御系を示す。光コム の 50% 出力と CW レーザーとの出力をカップラ (90:10) により、同一ファイバー内へ導く。その後、ファイバータイプの BPF を通り、光コムと CW レーザーとのビート信号 f_{beat} を PD で受光する。検出した f_{beat} を高速光コム用サーボコントローラ (CS-01、産総研) に入力する。入力後、 f_{beat} 信号は位相比較器 (Double Balanced Mixer: DBM) で、ファンクションジェネレータより発生した RF 基準信号との位相差が出力される。この位相差信号が誤差信号としてループフィルタに入力され、PID 制御信号を生成する。制御信号の出力を EOM と PZT に出力し、 f_{beat} の周波数安定化制御を実現する。

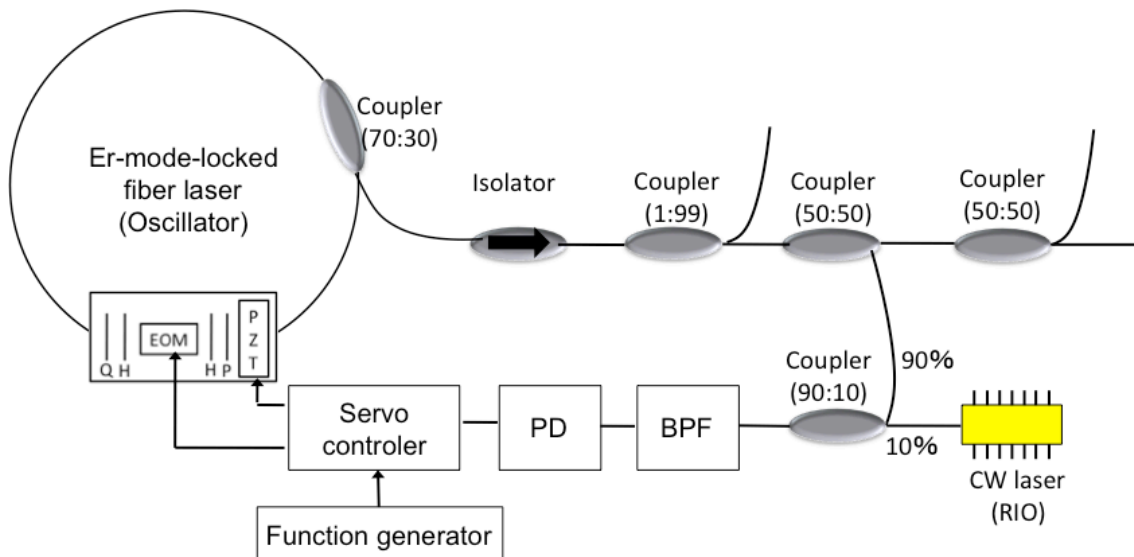


図 3.19 f_{beat} 検出系および周波数安定化制御系

図 3.20 は制御時の f_{beat} RF スペクトルを示している。PID 制御回路の時定数を調整することにより、およそ 700kHz のサーボバンプを持つ制御を実現した。図 3.21 は f_{beat} 信号の周波数安定性を、基準となる RF 信号と比較した結果である。RF 信号の周波数安定性と比較し、 f_{ceo} 信号の周波数安定性は 3 倍~10 倍悪い結果となっている。これは、 f_{beat} 制御回路の時定数の合わせこみをするすることで解消すると考える。

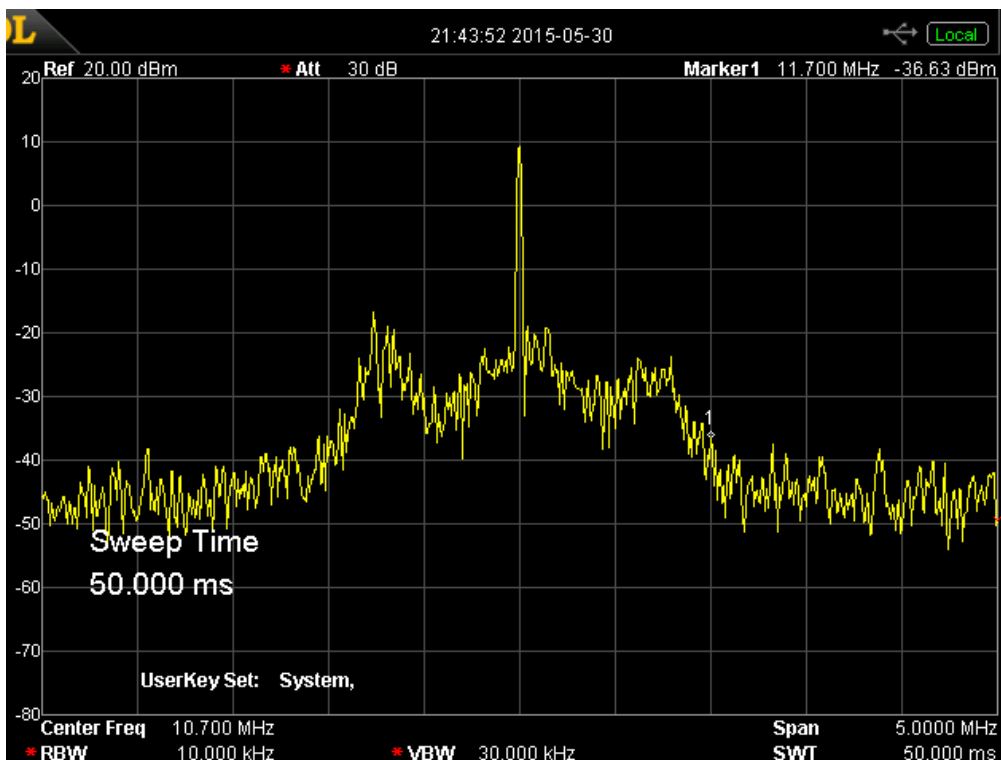


図 3.20 f_{beat} 信号の RF スペクトル(制御時)

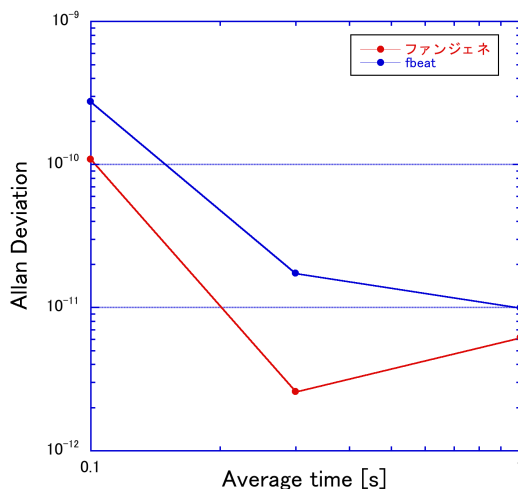


図 3.21 f_{beat} 信号の周波数安定性(制御時)

まとめ

本章では、ファイバー光コム共振器のセンシング応用を目的とした、高速制御型光コム共振器および、光コムのパラメータである f_{beat} と f_{beat} の周波数安定化制御システムを開発した。

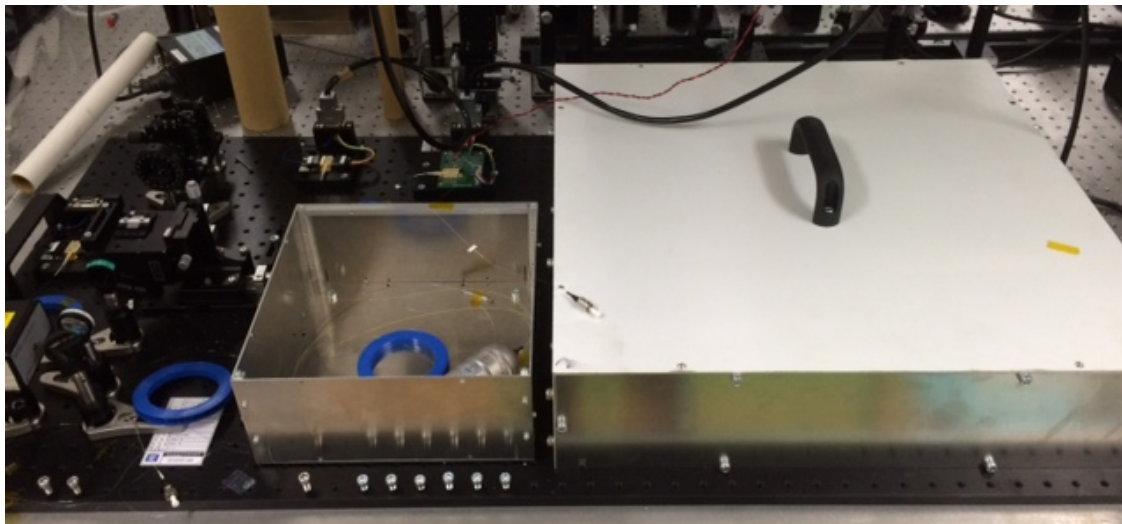


図 3.22 高速制御型ファイバー光コムシステム全体写真

第4章 ファイバー光コム共振器を用いたひずみ計測

4.1 研究背景

ひずみ計測は、機械構造物の機械的性質や安全性評価に用いられており、近年、更なる高感度・高精度・高速応答性が強く望まれている。この要望を達成するため、光ファイバーの光学的、機械的性質を利用したひずみ計測技術の研究が進んでいる[1,2]。しかし、これらの手法は、ひずみを光の波長シフトとして計測するため、高精度化と計測の高速化との両立が難しかった。

そこで、我々はファイバー光コム共振器独自の『外乱/RF 周波数変換機能』を利用した、新しいひずみ計測技術を提案する。この変換機能を利用することで、外乱を高感度かつ高速に周波数へと変換することが可能である。さらに、周波数は、各種物理量の中でも最高精度の国家標準が整備され、離散量（デジタル量）として計測出来るので、極めて高精度な計測が可能である。このようなアプローチを用いることで、ひずみを高感度・高精度・高速に取得することが可能になると期待される。

4.4 ファイバー光コム共振器の外乱/RF 変換機能

4.2.1 ファイバー光コム共振器の外乱/RF 変換機能

図 4.1 に本章で用いる原理図を示す。ファイバー光コム共振器は、光ファイバーベースのリング型共振器構造を有している。共振器外部のポンプ LD によって共振器内の EDF が励起され、波長 $1.55 \mu\text{m}$ のルミネッセンスが放射される。発生した光は EDF で誘導放出を起こしながら、共振器内を周回し発振する。さらに、偏波コントローラを用いて非線形偏波回転によるモード同期を行い、パルス成分のみを増幅する。この時、生成した光パルスの周波数領域におけるモード間隔 f_{rep} は c/nL (c :光速、 n :屈折率、 L :共振器長) で与えられる。ここで、 f_{rep} が十分に安定な状態で、光学的共振器長 nL を変動させるような外乱（温度、振動、歪みなど）を加えられると、それに対応して f_{rep} が高感度かつ高速に変化する。すなわち、ファイバー共振器の一部をセンシングキャビティとして外乱を与えることで、測定物理量を高精度かつ高感度に周波数へと変換することが可能になる。さらに、周波数は極めて高精度計測が可能な物理量であるので、従来に比べ高精度で高ダイナミックな計測手法であると期待される。

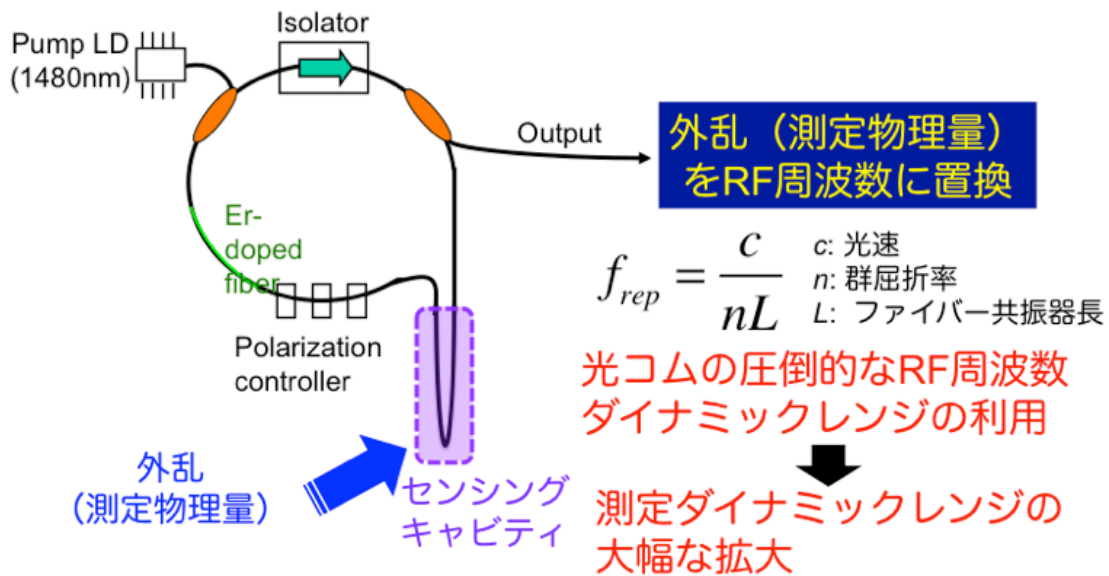


図 4.1 ファイバー光コム共振器の外乱/RF 変換機能

4.2.2 先行研究

本手法の先行研究では、カーボンナノチューブ (Carbon nano-tube, CNT) を用いたモード同期レーザー共振器を用いて、共振器中にひずみと音圧を与え、その時の繰り返し周波数の変化を RF スペクトラム・アナライザによって計測している [参考文献]。図 4.2 に先行研究のセットアップを示す。先行研究では、Optical reflector から OC1 までをリニアキャビティとして使用し、OC1 によって光の一部を共振器へ戻し、一部を外部出力している。共振器中においては、まず、波長 980 nm の LD によって長さ 3 m の EDF を励起し、1.5 μm のルミネッセンスを発生させる。さらに、共振器中に過飽和吸収体である CNT を配置することで、受動モード同期を実現させている。この時、任意のモード間 ($p > q$) の縦モード間隔 f_{pq} は、共振器長を L 、実効屈折率を n 、真空中の光速を c とすると、

$$f_{pq} = \frac{c}{\lambda_p} - \frac{c}{\lambda_q} = \frac{(p - q)c}{nL}$$

として、光検出器 (PD) 上に生成される。ここで、共振器中に外乱を加えると、実効屈折率が変化し、 f_{pq} が変化する。つまり、 f_{pq} の変化を計測することで、外乱の計測を行う事が可能である。

実験は、共振器中のファイバーを固定ステージ (Stationary Stage) と移動ステージ (Translation stage) に取り付け、移動ステージを操作することにより共振器中に既知の静的ひずみを付加している。実験結果を図 4.3 に示す。実験結果では、 f_{pq} (約 6GHz 付近) の周波数シフト量と、与えたひずみとは良好な線形性

を示している。また、著者らは、従来の干渉系を用いたひずみ計測と比較し、良好な安定性、低コスト、周波数での信号計測といった長所を挙げている。一方、共振器長が数 m になることを短所としている。これは、センシングに用いる長さが、共振器全体の長さのごく一部であると感度が悪くなるためだと考える。また、RF スペクトラム・アナライザを用いたピーク信号の周波数計測を行っているので、高精度に周波数を決定するためには計測時間が必要であり、高速な外乱を計測することは難しいと考える。

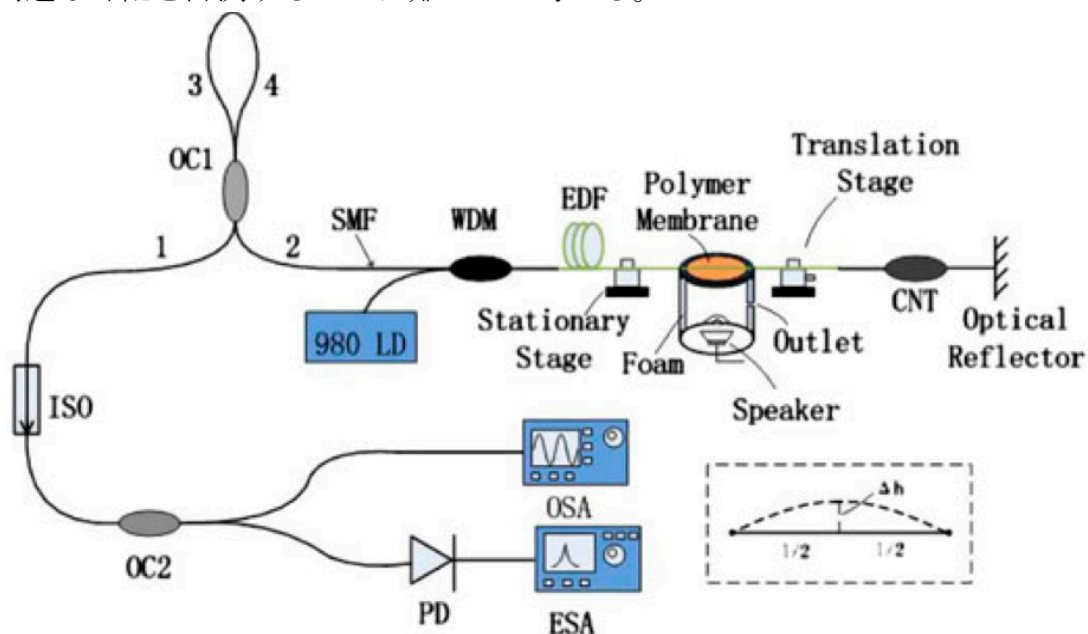


図 4.2 先行研究の実験セットアップ []

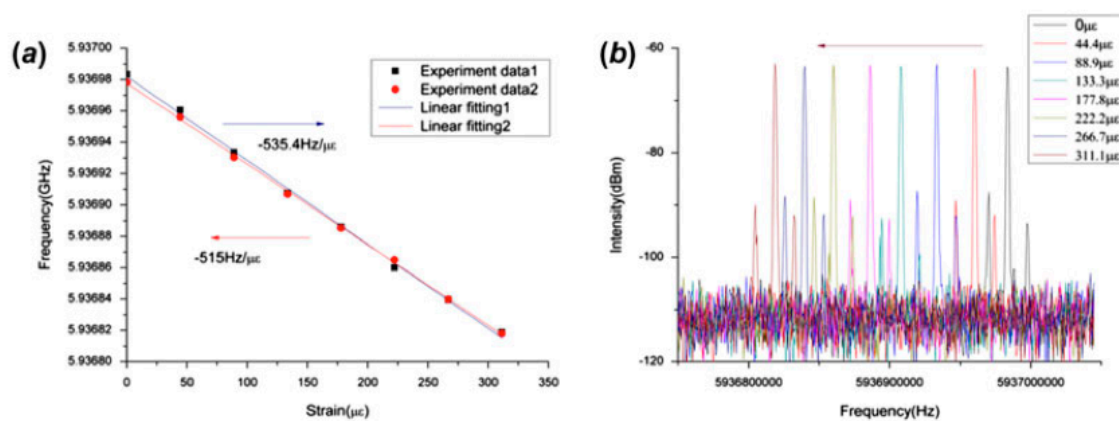


図 4.3 実験結果[]

左図: 与えたひずみと、RF スペアナで計測したピーク信号周波数依存性
 右図: 左図の元となった RF スペクトラム波形

4.4 実験セットアップ

4.3.1 f_{rep} ピーク周波数変化を用いたひずみ計測

まず、ファイバー光コムの外乱/RF 周波数変換機能の原理確認のため、先行研究[参考文献]の再現実験を行った。実験セットアップを図 4.4 に示す。ファイバー光コム共振器には、非線形偏波回転に基づいたモード同期 Er ファイバーレーザー（中心波長 1550 nm、平均パワー10 mW、 f_{rep} =40.7 MHz）[参考文献]を利用した。また、ファイバー光コム共振器は温調箱の中に収め、温調箱中の温度が一定になるよう制御を行った。

実験では、共振器中のファイバーの一部を温度箱から取り出し、静的ひずみ付加用のステージに取り付けた。この時、固定ステージと移動ステージ間のファイバー長は 30 cm であった。また、共振器からの光出力を InGaAs-PD (DET08CFC Thorlabs) で検出し、RF スペクトラム・アナライザ (E4402B Agilent) で光コム間ビート信号 (2.93GHz) を計測した。

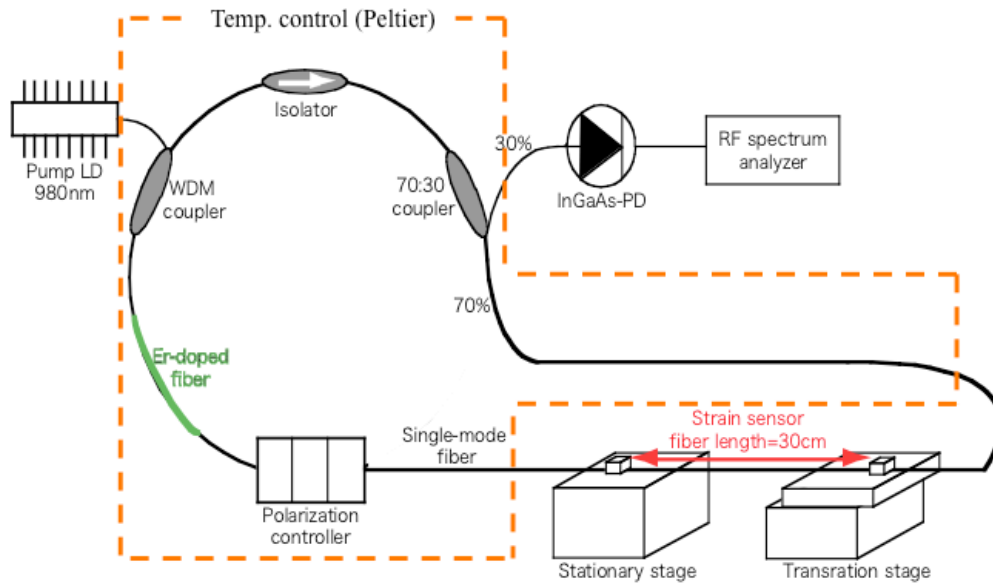


図 4.4 実験セットアップ

4.3.2 f_{rep} 制御電圧変化を用いたひずみ計測

図 4.5 に f_{rep} 制御電圧モニタリングセンシング光コムのセットアップを示す。ファイバー光コム共振器には、非線形偏波回転に基づいたモード同期 Er ファイバーレーザー（中心波長 1550 nm、平均パワー10 mW、 f_{rep} =43.4 MHz）[参考文献]を利用した。また、ファイバー光コム共振器は温調箱の中に収め、温調箱中の温度が一定になるよう制御を行った。さらに、 f_{rep} を周波数安定化制御するために、共振器中のファイバーをリング型 PZT 素子へ 4~5 巻き程巻き付けた。

また、共振器からの光出力を InGaAs-PD (DET08CFC Thorlabs) で検出し、その後パワースプリッターによって、制御信号用と f_{rep} モニタリング用とに分岐した。制御信号は、ミキサーで基準信号とミキシングされ、制御信号と基準信号との位相差が出力される。さらに位相差信号を誤差信号として PID コントローラへ入力し、誤差信号が 0 となるようリング型 PZT へ電圧が加えられる。

実験では、共振器中のファイバーに静的ひずみ付加用のステージに取り付け、移動ステージに取り付けたマイクロメータを操作することにより、既知のひずみを与えた。この時、固定ステージと移動ステージ間のファイバー長は 10cm であった。また、先ほどとは別の場所へ、動的/微小歪み用積層 PZT をファイバーにエポキシ接着剤で接着した。そして、この PZT に電圧を与える事で、共振器中のファイバーへ動的/微小歪みを与えた。与えたひずみ変化は、PZT ドライバーの制御電圧へと変換され、この電圧をモニタリングすることで、ひずみ計測を行った。

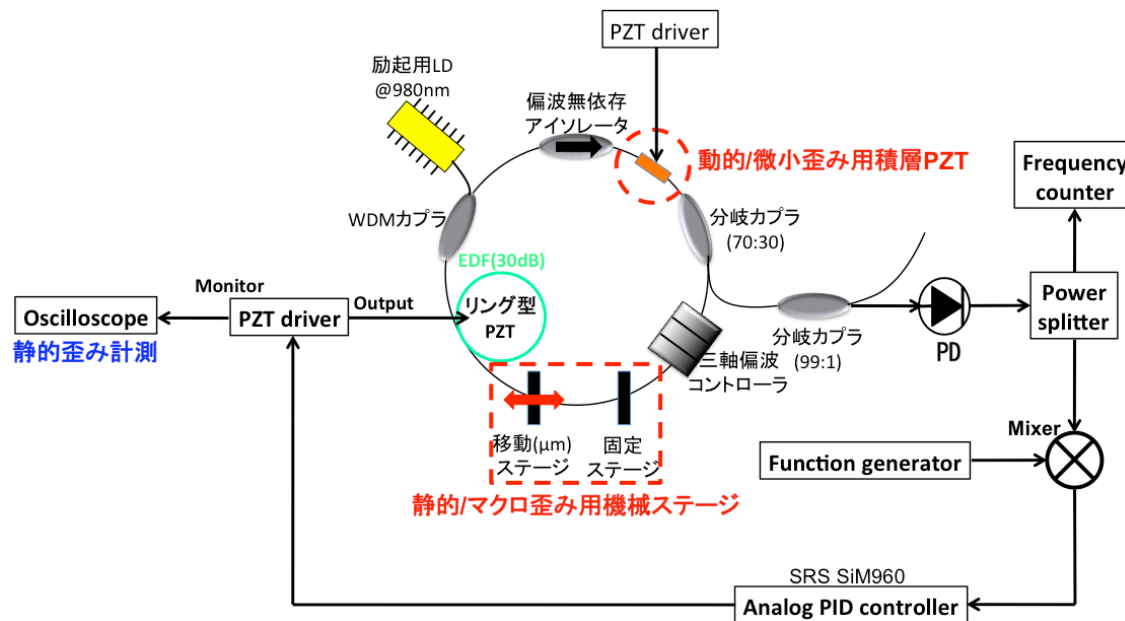


図 4.5 制御電圧モニタリングセンシング光コム(静的ひずみ計測)

図 4.6 に、共振器中に与えるひずみと、PZT 制御電圧との関係性を示す。まず、図上部は f_{rep} を周波数安定化制御し、十分安定な状態になっている場合を示す。この時、 f_{rep} と基準信号である f_{ref} との位相差は 0 となっている。従って、 f_{rep} と f_{ref} との周波数差も 0 となっている。したがって、PZT ドライバーが出力している電圧 V_{ref} でほぼ一定に安定している(外気温の変化によって多少の変化はある)。次に、共振器中のファイバーへひずみを加えると、共振器の光学的長さ nl が変化する。その結果、 f_{rep} は $f_{rep} - \Delta f_{rep}$ へ瞬時に変化する。そして、ミキサーで $f_{rep} - \Delta f_{rep}$ と f_{ref} とのミキシングがおこり、両者の位相差が DC 電圧として PID

コントローラへ出力される。PID コントローラは、DC 信号を誤差信号として、PID 制御信号を PZT ドライバーへ出力する。その結果、PZT ドライバーの電圧は $V_{ref} - V_c$ となる。以上より、PZT ドライバーの電圧値変化を計測することで、ひずみ計測が可能となる。

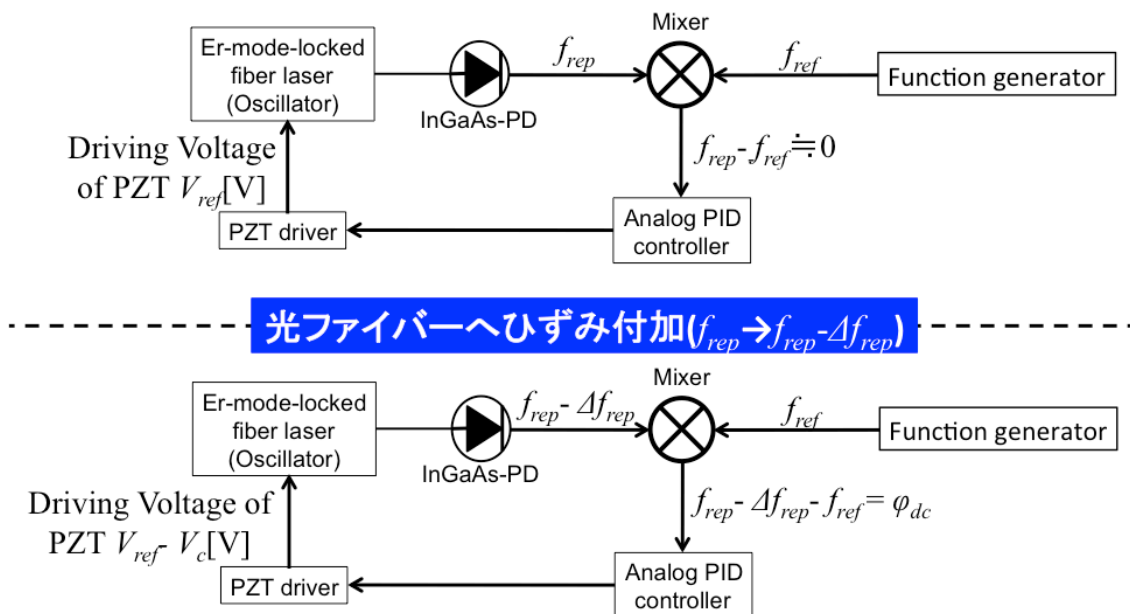
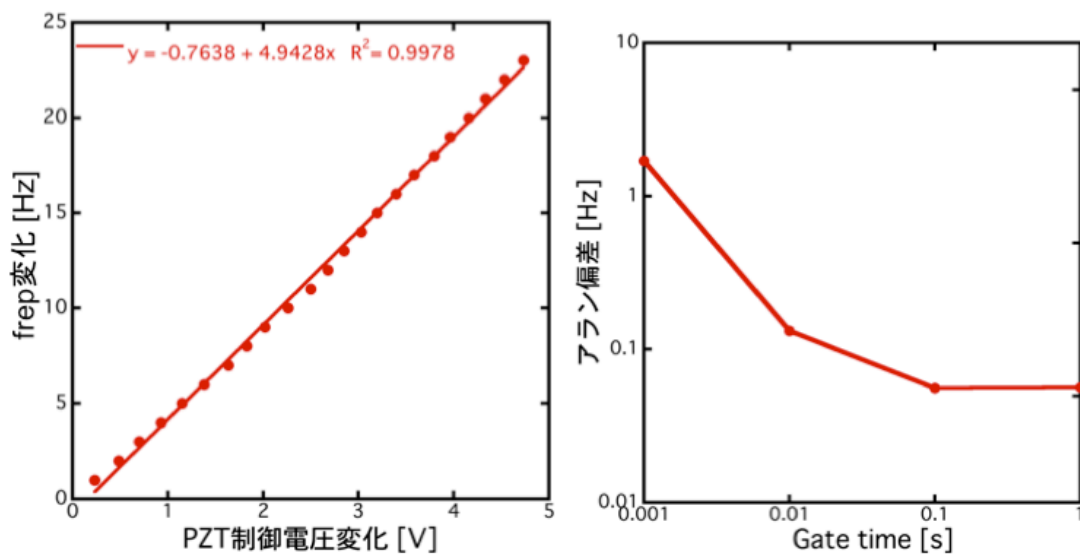


図 4.6 計測原理

4.4 共振器特性評価

共振器基本特性として、まず、 f_{rep} 周波数安定化制御時において、 f_{ref} 周波数を変化させた時の PZT 制御電圧変化を計測した。図 4.7(a) に実験結果を示す。この実験は f_{ref} の周波数を 1 Hz ずつ増加させ、増加毎に PZT 制御電圧を計測した。実験結果から、 f_{rep} と PZT 制御電圧とで良好な線形性があることを確認した。さらに、 f_{rep} 周波数安定性を周波数カウンターにより計測した。図 7(b) に実験結果をい示す。実験は、周波数カウンターの Gate time を 1ms から 1s まで変化させ、Gate time 毎に周波数測定を 100 回行い、標準偏差を算出した。実験結果より、 $f_{rep} = 43.4\text{MHz}$ に対して、Gate time が 1 ms の時 2 Hz、Gate time が 1 s の時 0.1 Hz 未満の標準偏差となった。このグラフより、計測可能な最小ひずみ量を求める予定であった。計測可能な最小ひずみ量は、標準偏差/ f_{rep} で表すことができる。Gate time 1s の時の標準偏差を用いると、計測可能な最小ひずみ量は $0.1\text{Hz}/43.4\text{MHz} = 2.3\text{nH}$ となる。しかし、PZT 制御電圧を計測するオシロスコープと、周波数カウンターとの間で、ゲートタイムの整合性があるか疑問が残ったため、計測可能な最小ひずみ量は PZT 制御電圧の標準偏差、分解能から求めることとした。



(a) PZT 制御電圧- f_{rep} 変化特性

(b) 周波数安定度

図 4.7 歪みセンシング光コム基本特性

4.6 静的ひずみ計測

図 4.8 に静的ひずみセンシングコムセットアップを示す。基本的には図 4.5 と同じ構成である。ファイバー光コムからの出力は Low noise PD(New focus) で検出後、 f_{rep} の信号強度をアッテネータにより調整した。これは、ミキサーへの入力パワー限界が 0 dBm だからである。その後のパワースプリッターは、 f_{rep} を RF スペアナや周波数カウンターで計測するために分岐し、必要に応じて使用した。 f_{rep} 制御用信号はミキサーに入力し、ファンクションジェネレータからの基準信号とミキシングされる。この時、 f_{rep} の周波数(43.4 MHz)を発生させる適当なファンクションジェネレータがなかったため、30 MHz まで対応しているファンクションジェネレータの出力を、周波数ダブラーを通して 43.4 MHz にした。ミキサーのからの出力は制御信号として PID コントローラに入力される。この時、PI の時定数は $P=180$ 、 $I=50 \text{ s}^{-1}$ とした。なお、D 制御は行っていない。PID コントローラからの信号は PZT ドライバー(TPZ 001 Thorlabs)に入力され、リング型 PZT に電圧が付加させる。PZT ドライバーにはモニター出力(PZT 出力の 1/15 の電圧値)がついており、モニター出力を SCOPE CORDER(DL850 YOKOGAWA、縦軸分解能 12bit)で計測した。

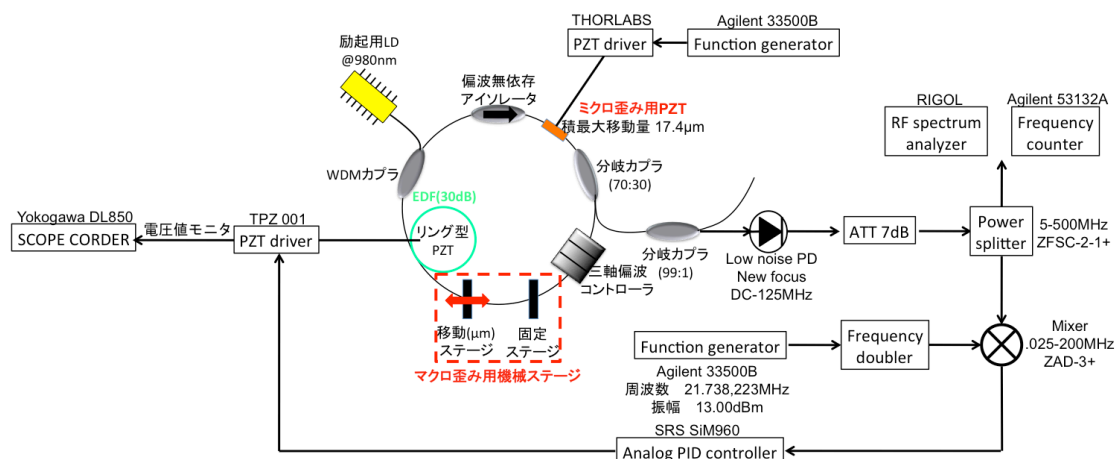


図 4.8 静的ひずみセンシングコムセットアップ

図 4.9 に静的ひずみ計測実験結果を示す。左図は、機械ステージによるマクロ歪みを与えた結果である。ファイバーの機械ステージへの固定は、機械ステージ上にカプトンテープをしっかりと張り付け、その上にエポキシ接着剤を数滴、滴下しファイバーを固定した。そのため、ひずみ付加範囲は、エポキシ接着点間の距離であり、距離 100 mm は物差しで計測した。また、分解能 10 μm は、機械ステージに取り付けたマイクロメーター 1 目盛りである。実験結果より、変位量と PZT 制御電圧とで良好な線形性を得ている。また、図 4.9 右図は、積層 PZT による微小ひずみを与えた結果である。ファイバーの固定は、PZT の端にエポキシ接着剤を数滴、滴下しファイバーを固定した。そのため、ひずみ付加範囲は、エポキシ接着点間の距離であり、距離 20 mm は物差しで計測した。また、分解能は PZT のデータシートの値とした。実験結果より、変位量と PZT 制御電圧とで良好な線形性を得ている。以上より、マクロひずみと微小ひずみを与えた場合、PZT 制御電圧変化は良好な線形性を示した。また、両者の傾きがほぼ一致していることから、本手法の妥当性を示すことができた。両者の傾きの差は、マクロ歪み用機械ステージの分解能が積層 PZT に比べ大きいためと考える。今後は、マイクロメータステージを PZT によって操作するタイプへ変更し、両者のグラフの傾き一致を目指す。さらに、図 4.9 右図を線形フィッティングした結果、傾きを表す変位感度は 281 $\text{mV}/\mu\text{m}$ となった。この値を用いて、検出可能な最大変位量と、最小変位量を求めた。図 4.10 に計算結果をまとめる。最小変位量は 0.036 μm 、最大変位量は 36 μm となった。ここで、一つ反省点がある。それは、PZT 制御電圧揺らぎを 10 mV としたことである。これは、制御電圧を計測した SCOPE CORDER の縦軸の分解能を使用した。しかし、使用した SCOPE CORDER の縦軸分解能は 12bit あるので、10 mV 以上の分解能に設定することができる。しかし、図 4.9 において PZT 制御電圧変化が 0 V～

2.5 Vであったため、SCOPE CORDERの縦軸フルスパンを3 V程度にしていた。したがって、縦軸の分解能10 mVで計測をしていた。したがって、より高い分解能でPZT制御電圧を計測することにより、検出可能最小変位量がより小さくなる可能性がある。

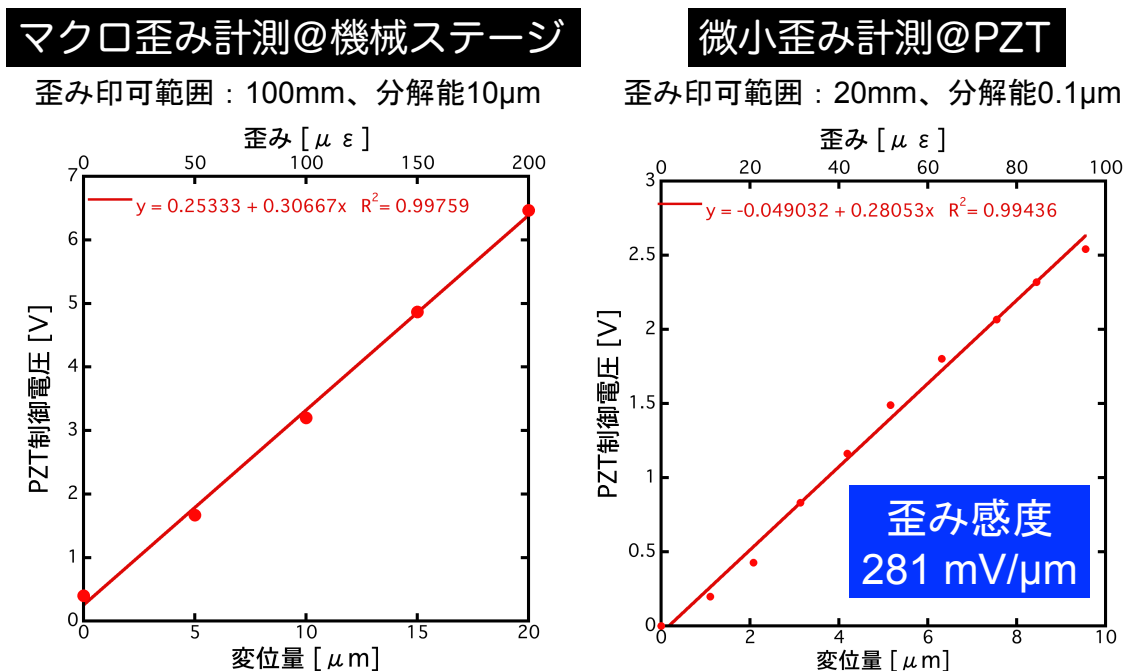


図 4.9 静的ひずみ計測実験結果

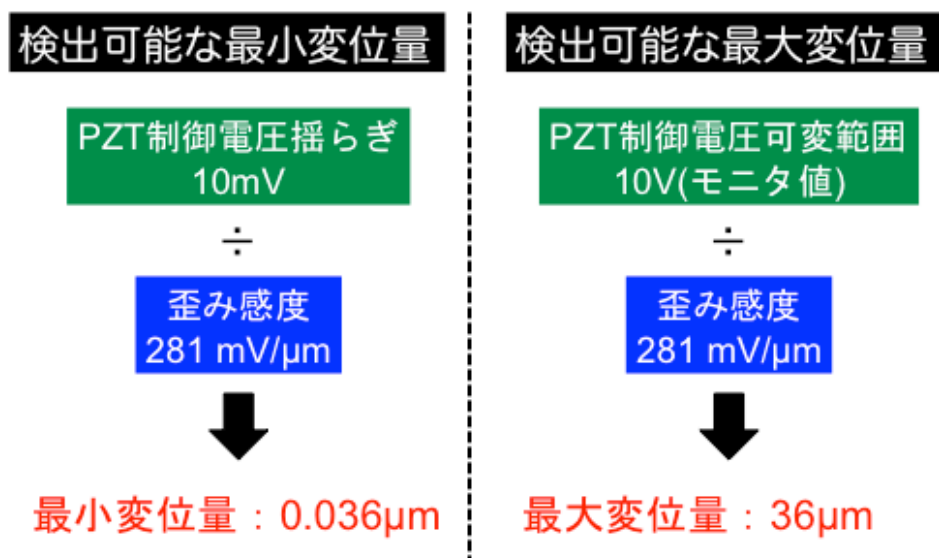


図 4.10 静的ひずみ計測実験結果まとめ

4.6 動的ひずみ計測

動的ひずみを計測する前に、まず、共振器(制御時)、制御用PZT、ひずみ付加用PZT、共振器(制御時)の周波数応答特性を評価した。図4.11に制御用PZTとひずみ付加用PZTの周波数応答評価系を示す。ファイバー光コム共振器からの出力と狭線幅CWレーザー(RIO)は、分岐カプラを介してPDに導かれる。PDに入射されると、CWレーザーとCWレーザーに最隣接する光コムのモードとのビート信号が、RF領域の最低次の信号として現れる。ここで、 f_{rep} 周波数安定化制御した上で、基準信号をsin関数的に変化する。すると、制御系によって、 f_{rep} もsin関数的に変化する。この時、光領域において、光コムの周波数は f_{rep} の次数倍拡大されて揺らいでいる。したがって、ビート信号も f_{rep} の次数倍拡大されて揺らいでいる。このビート信号の様子をRFスペクトラム・アナライザーで計測した結果を図4.11に示す。図4.11において、ビート信号の本来の線幅は数10kHzであるが、sweep timeを1sとすることでビート信号の揺らぎを変調幅として計測できる。この手法を用いて、基準信号を20Hzから2kHzまで変調し、ビート信号の変調幅を計測した。図4.12に計測結果を示す。計測結果より、 f_{rep} 制御系の応答周波数は180Hzであった。

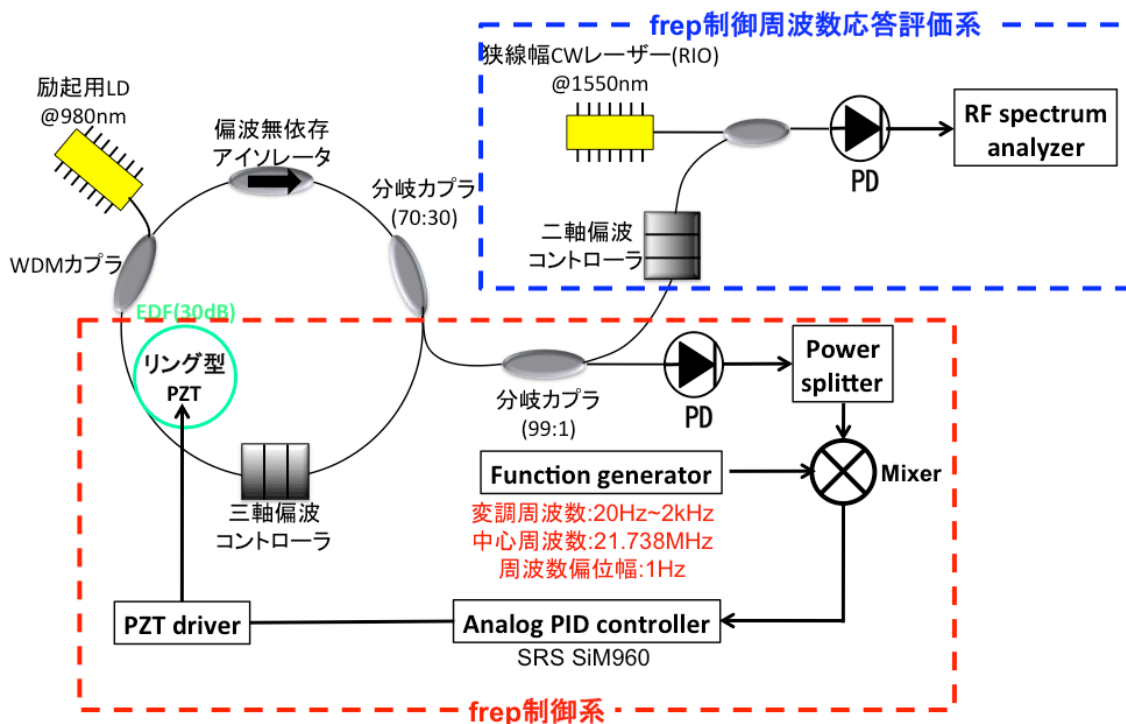


図 4.10 f_{rep} 制御周波数応答評価系

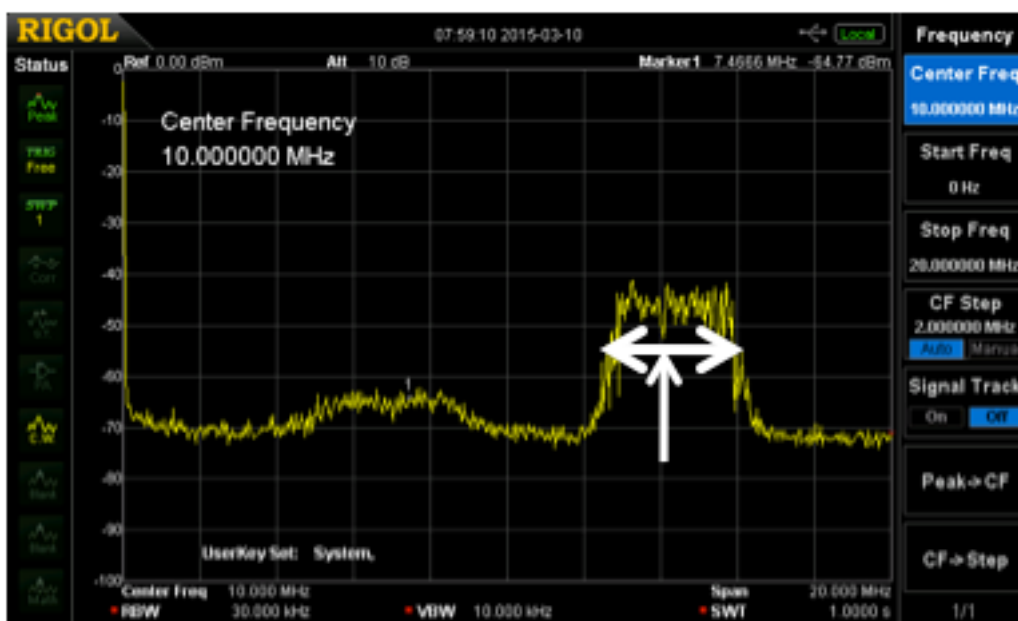


図 4.11 光コム共振器出力と CW レーザーとのビート信号

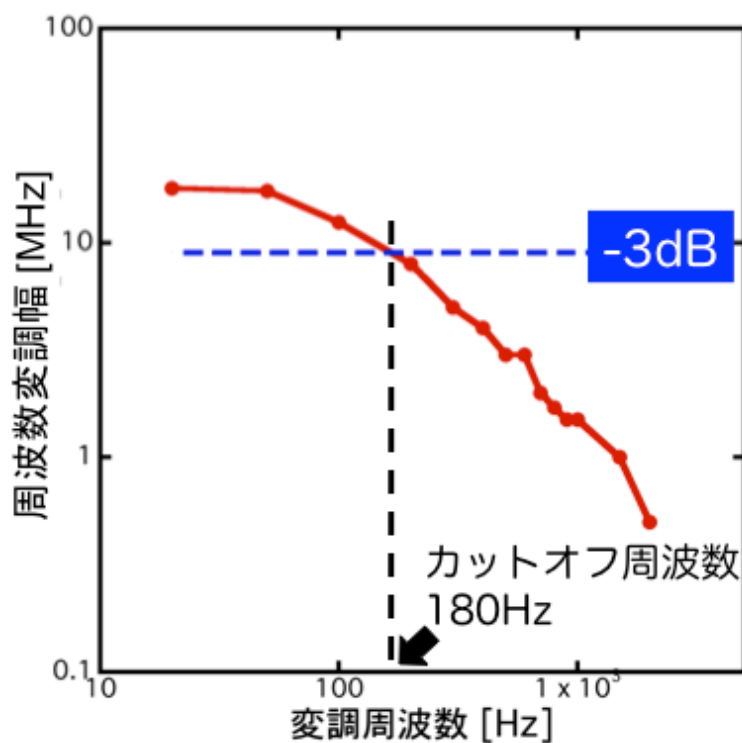


図 4.12 光コム共振器周波数応答特性

図 4.11 に制御用 PZT とひずみ付加用 PZT の周波数応答評価系を示す。計測原理は図 4.10 とほぼ同じである。違いは、 f_{rep} 周波数安定化制御を行わない点である。図 4.12 に計測結果を示す。図 4.12 より、制御用 PZT の応答周波数は 1kHz であった。無負荷状態の制御用 PZT の共振周波数は 35kHz であるが、PZT に

ファイバーを巻き付けてエポキシ接着材で固定しているため、負荷が発生し、応答周波数が減少している。また、ひずみ付加用 PZT の応答周波数は、周波数 5kHz の時に共振が起こったため、5kHz 以上とした。本実験では、5kHz 以上のひずみを与えないため、ひずみ付加用 PZT の応答周波数による影響は考慮しなくてよいことがわかった。

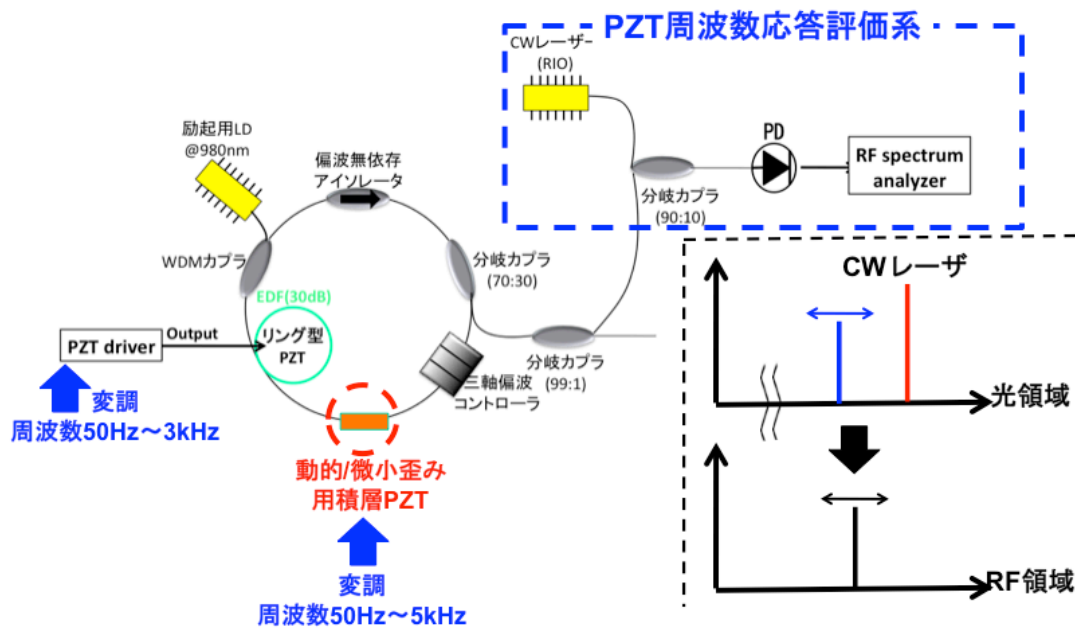


図 4.13 PZT 周波数応答評価系

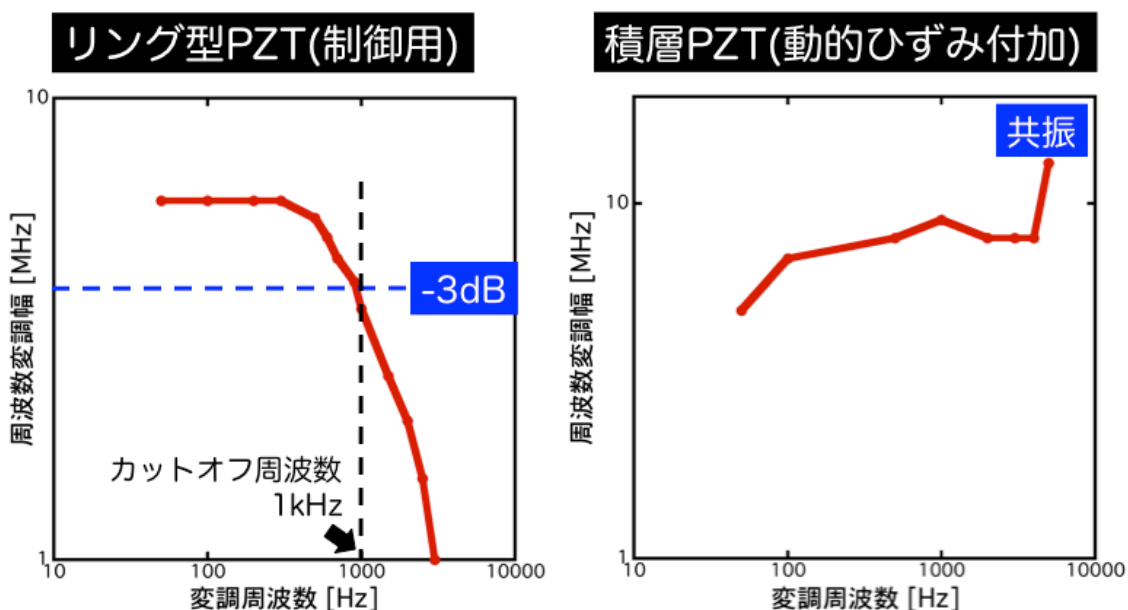


図 4.14 リング型および積層 PZT 周波数応答評価

図 4.15 に動的ひずみセンシングコムセットアップを示す。 f_{rep} 制御系は前述した系と同様である。前述との違いは、制御用 PZT ドライバーのモニタ電圧をロックインアンプ(型番と計測手法確認)を用いて計測する。また、動的ひずみ付加に用いるファンクションジェネレータの信号を 2 分岐し、一つはひずみ付加用 PZT ドライバーへ、もう一つはロックインアンプの参照信号として用いる。このセットアップを用いて、動的ひずみ(1~1kHz)を共振器中のファイバーへ加え、その時の制御電圧をロックインアンプで計測した。図 4.16 に計測結果を示す。図 4.16 より、動的ひずみに対する周波数応答特性は 200Hz となった。これは、光コムの特徴(図 4.12)とほぼ一致するため、 f_{rep} 周波数安定化制御系の制御特性によって制限されていると考える

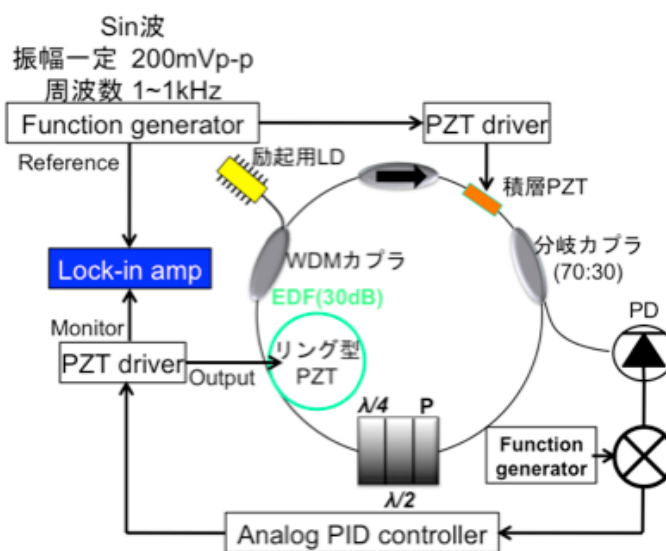


図 4.15 動的ひずみセンシングコムセットアップ

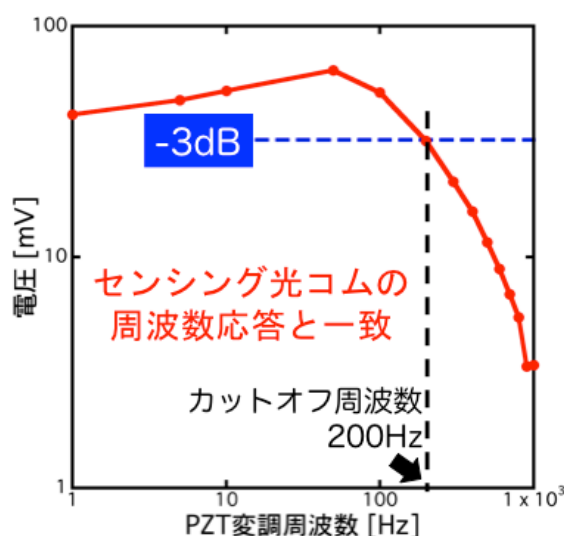


図 4.16 動的ひずみ周波数応答計測結果

まとめと今後の予定

本章では、ファイバー光コム共振器独自の『外乱/RF 周波数変換機能』を用いたひずみ計測を行った。また、従来研究とは異なり、ひずみによる f_{rep} 変化を、零位法の考えに基づく制御電圧の変化によって計測した。その結果、静的ひずみから数百 Hz の動的ひずみ計測に成功した。今後は制御に電気光学変調器 (EOM) を用いた高速制御型ファイバー光コム共振器を用い、ひずみセンシング光コム応答周波数を 1MHz まで高速化を目指す。さらに、応答周波数を高速化することにより、光音響イメージングの音響波センサーとして用いることを検討している。

第 5 章 ファイバー光コム共振器を用いた超音波計測

5.1 研究背景

光音響イメージングは光と超音波のハイブリッドなイメージング法であり、分子選択性を可能とする光の特性と、生体深部観察を可能とする超音波の特性を両立させる生体イメージング法として期待されている[1]。しかし、光音響波の検出に用いる電氣的音響トランスデューサーの感度と周波数応答により、生体深部における空間分解能が制限されていた。

近年、電氣的音響トランスデューサーによる制限を回避する手法として、光学的音響センサーが注目されている。干渉計測[2]、表面共鳴プラズモン[3]、マイクロリング共振器[4]などの光学的アプローチを用いることにより、ノイズ軽減や高速化に向けた試みがなされている。しかし、これらの計測ではいずれも光信号の強度情報というアナログ量を計測しているため、その高精度化や広ダイナミックレンジ化に限界があった。そこで、光強度よりも高精度かつ広ダイナミックレンジで計測可能な別の物理量を介して、光音響波を計測できれば、更なる高感度化が可能になり、生体深部の空間分解能が向上する。

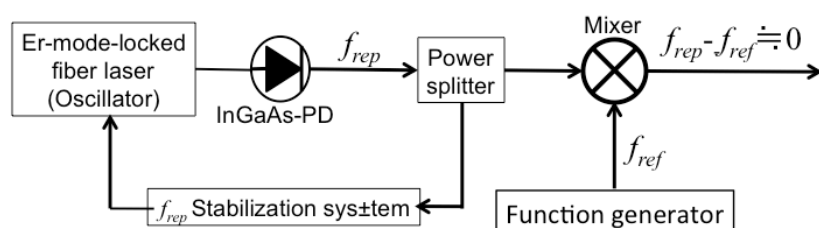
そこで、我々は新たな光学的音響センサーとして、ファイバー光コム共振器の『ひずみ/RF 周波数変換機能』に着目した。光音響波により、光ファイバーコム共振器に微小ひずみが与えられると、光学的共振器長が伸縮し、光コム間隔という RF 周波数信号として、光音響波を計測出来る。また、周波数は、各種物理量の中でも最高精度の国家標準が整備され、離散量（デジタル量）として計測出来るので、極めて高精度な計測が可能である。このようなアプローチを用いることで、光音響波を高感度・高精度・高速に取得することが可能になると期待される。しかし、光音響波の周波数は数 MHz であるため、第 4 章で開発した f_{rep} 制御電圧変化を用いたひずみ計測では、周波数応答特性が不十分である。そこで、 f_{rep} 制御に用いた誤差信号を直接計測することで、計測信号の高周波化を図った。本報告では、音響波センサーへの応用に向けた基礎研究として、ファイバー光コム共振器に印加した超音波に対する基本特性を評価した。

5.2 実験原理

図 5.1 に実験原理を示す。まず、オシレータからの出力を InGaAs-PD で検出する。その後、パワースプリッターを通して信号を 2 分岐し、一方は f_{rep} 周波数安定化制御のために使用し、もう一方はセンシング用のために使用する。 f_{rep} を f_{ref} によって周波数安定化制御した上で、センシング用の系で f_{rep} と f_{ref} とをミキシングする。すると、 f_{rep} と f_{ref} との位相差が DC 信号としてミキサーから出力さ

れる。

次に、共振器中のファイバーへ超音波を付加すると、 f_{rep} に周波数変調、もしくは強度変調がおこる。その結果、 f_{rep} 周波数±超音波の周波数 (f_s) のサイドバンドが発生する。このサイドバンドを、センシング用の系で f_{ref} とミキシングすることにより、ミキサーから $\pm f_s$ の信号が出力される。この f_s は超音波付加によって発生しているので、 f_s を計測する事によって超音波センシングが可能となる。以上から、この計測手法は光コム共振器を『精密な周波数の物差し』として使用しており、超音波の周波数を精密に計測することが可能になると期待される。



光ファイバーへ超音波付加(f_{rep} サイドバンド発生)

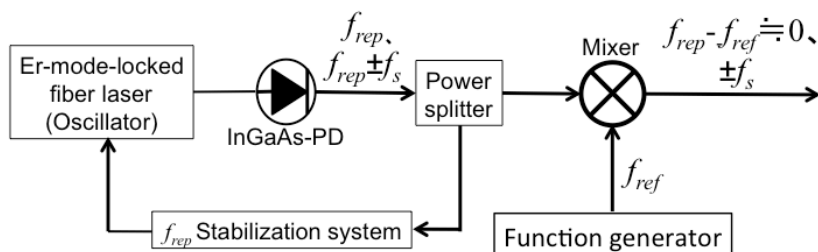


図 5.1 計測原理

5.3 共振器特性評価

5.3.1 共振器構成

まず、今回用いるファイバー光コム共振器を開発した。第 3 章の内容を踏まえ、ファイバー光コム共振器は高速制御型ファイバー光コム共振器を新たに開発した。これは、第 3 章で開発した共振器を別の研究に使用したので、新たな共振器が必要となったからである。開発した高速制御型ファイバー光コム共振器の概略図を図 5.2 に示す。基本的な構成は、第 3 章で開発した物と同一である。高速制御型ファイバー光コム共振器は、光ファイバー部と自由空間 (EOM モジュール内の一部) からなるリング型共振器を有している。波長 980nm の LD から出射したポンプ光は、WDM カプラを介して、EDF (最大吸収 30dB@1530nm) を前方励起する。励起された EDF は誘導放出を起こし、波長 1.5 μm 光を発振する。この時、1.5 μm 光と EDF に吸収しきれなかったポンプ光は、共振器内を双方向

に進むが、アイソレータによって一方向に制限される。EOM モジュール内に入射した光は、光ファイバー内伝搬から自由空間伝搬に変わり、偏光子、 $\lambda/2$ 波長板を通った後 EOM に入射される。その後、 $\lambda/2$ 波長板、 $\lambda/4$ 波長を通り、再び光ファイバー内伝搬へ戻る。この $\lambda/2$ 波長板 2 枚と $\lambda/4$ 波長板の角度を変更することで、光ファイバー中での非線形偏波回転量を調整する。リング共振器内の光は、出力分岐カプラを用いて 30%を取り出し、70%を共振器内に戻している。

温度変化や振動等の環境変動から共振器を保護するために、縦 539mm、横 539mm、高さ 120mm のアルミ箱の中に共振器を組んだ。ファイバーの温度制御を行うために、ファイバーの下へ銅板を敷き、銅板に取り付けたペルチェ素子とサーミスタを用いて温度制御を行う。

開発したファイバー光コム共振器パラメータを表 1 にまとめる。 f_{rep} 制御に用いるファンクションジェネレータの都合から、 f_{rep} の値が 30 MHz 以下になるよう設計した。

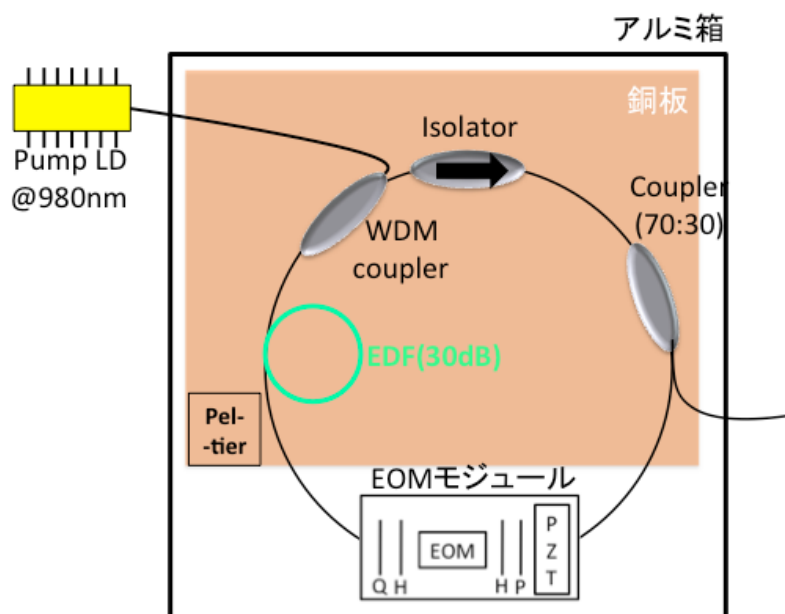


図 5.2 高速制御型ファイバー光コム共振器 2 号機の構成、EDF: Erbium-doped fiber, EOM: Electro-optic phase modulator, H: Half-wave plate, P: Polarizer, Pump LD: Pump laser diode, PZT: Piezoelectric transducer, Q: Quarter-wave plate, WDM: Wavelength Division Multiplexer

表 5.1 共振器パラメータ

オシレータ条件	長さ [m]	分散値 [ps^2/m]	分散値 [ps^2]	屈折率	光路長 [m]
SMF	4	-0.02286	-0.09144	1.48	5.92
EDF(30dB)	3.3	0.01366	0.045078	1.48	4.884
素子(カプラ類)	0.153	-0.02286	-0.00349758	1.48	0.22644
EOMモジュール	0.25	0	0	1	0.25
LiNbO3	0.055	0.1	0.0055	2.2	0.121
合計	7.758		-0.04435958		11.40144

図 5. に f_{rep} 周波数安定化制御系と、安定性評価系を示す。光コム共振器の出力を InGaAS-PD で検出後、一方を f_{rep} 周波数安定化制御系へ、もう一方を周波数カウンターへ分岐する。そして、 f_{rep} 周波数安定化制御系による制御を行った。制御した場合の f_{rep} 周波数安定性評価結果を図 5.4 に示す。基準とした f_{ref} と同等の標準偏差となっていることから、安定化制御できていると言える。また、図 5.5 では、安定化制御した f_{rep} と f_{ref} とのミキシング信号をオシロスコープで計測した結果を示す。信号の振幅は 1 mV 程度であった。

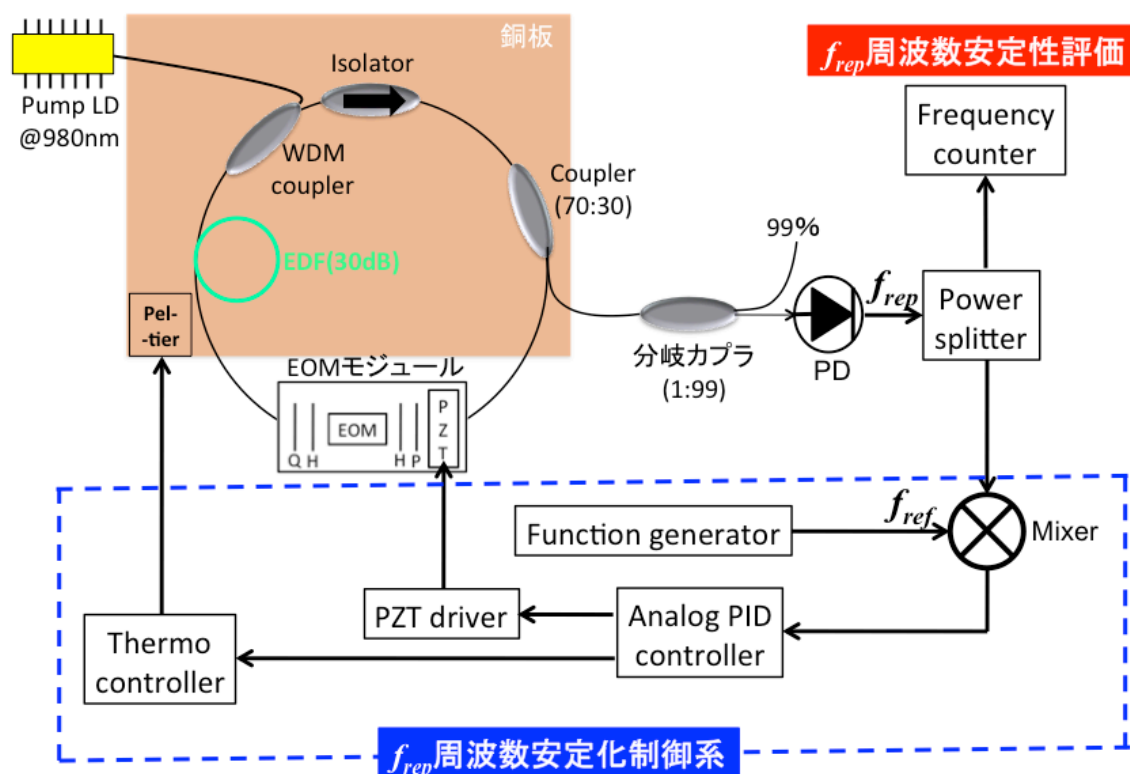


図 5.3 f_{rep} 周波数安定性評価セットアップ

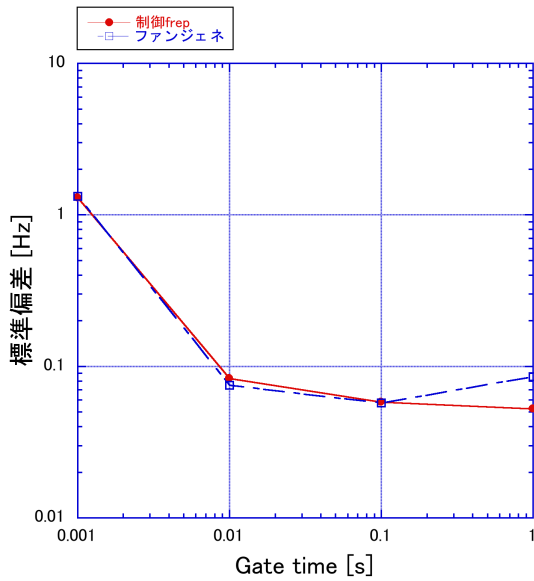


図 5.4 f_{rep} 周波数安定性

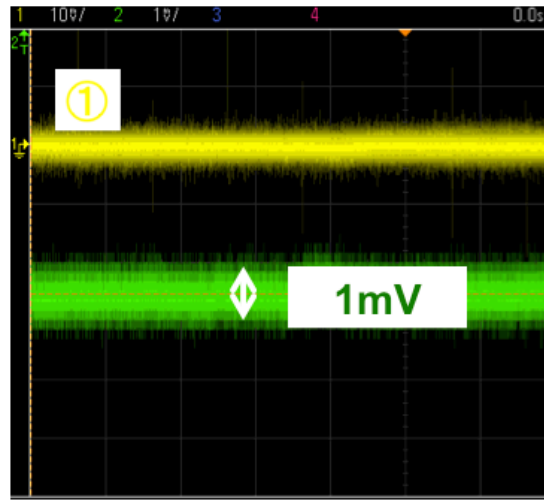


図 5.5 f_{rep} と f_{ref} のミキシング後 DC 信号

5.4 PZT と EOM を用いたひずみ計測

まず、原理確認のために、第 4 章と同じひずみ実験を行った。図 5.6 にセットアップを示す。共振器中のファイバーに積層 PZT を張りつけ、PZT に電圧を付加することでファイバーへひずみを与えた。実験結果を図 5.7、5.8 に示す。図 5.7 は、図 5.5 と比較すると、位相差信号が sin 的に変化していることがわかる。また、図 5.8 は RF スペクトラムアナライザーで計測した結果であり、PZT 駆動周波数 10kHz の位置に信号が現れている。このことから、本手法でひずみ計測が実証されたと言える。

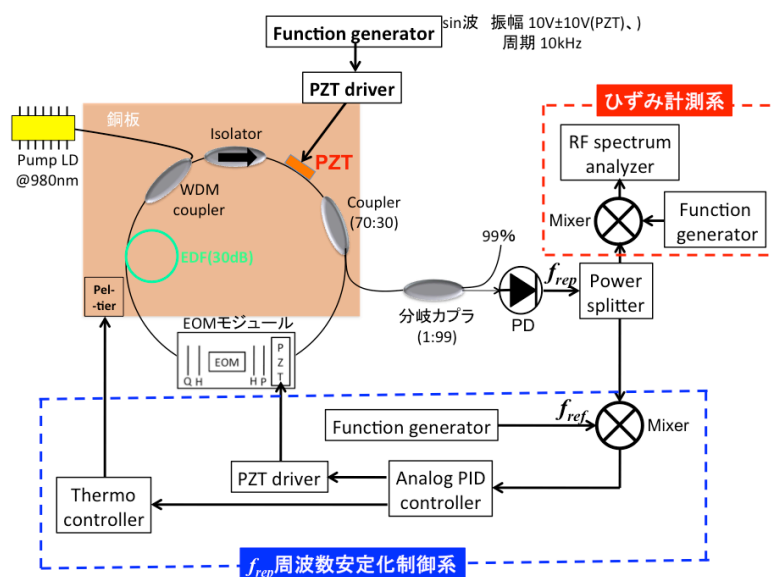


図 5.6 ひずみ計測セットアップ

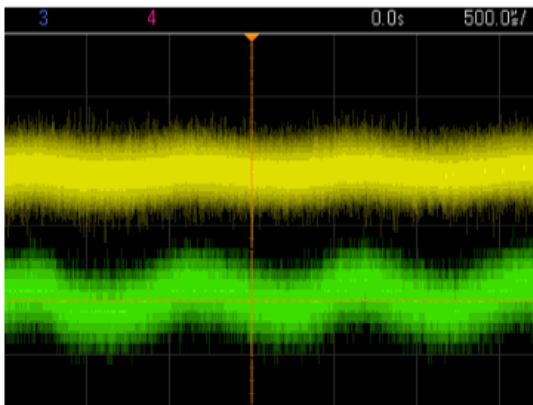


図 5.7 f_{rep} と f_{ref} のミキシング
後 DC 信号図 5.3

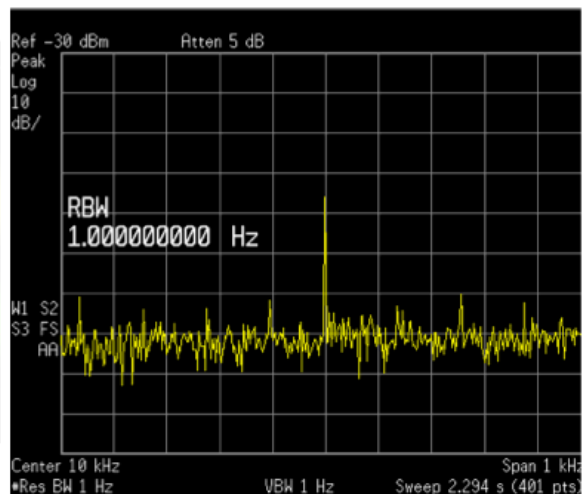


図 5.8 PZT ひずみ測定結果

また、共振器中に組込んだ EOM に電圧を付加することで、高周波のひずみ計測を行った。実験結果を図 5.9 に示す。図 5.8 から 10kHz から 500kHz までの周波数のひずみを計測している。これは、第 4 章での周波数応答特性 200Hz から比べると、3 桁程周波数の高いひずみ計測に成功したと言える。

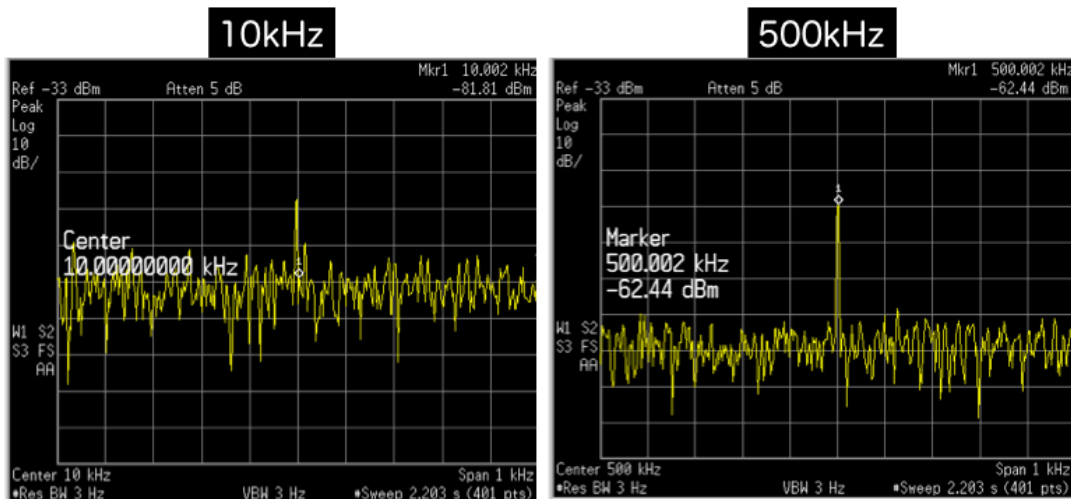


図 5.9 EOM ひずみ測定結果

5.5 超音波トランスデューサを用いた超音波計測

この節では、超音波トランスデューサを用いて共振器中のファイバーへ超音波を照射し、超音波センシングを行った。図 5.10 にセットアップを示す。また、図 5.11 に超音波トランスデューサとファイバーとの位置関係を図示した。図 5.11 (a) は側面から見た図を示している。共振器中のファイバーの一部をスライドガラスの上に固定し、そこに少々の水を滴下する。水を使用する理由は、トランスデューサの音響インピーダンスマッチングと、空気より水が密度が高いため、超音波によるひずみをよりファイバーへ与えることが可能だからである。また、超音波トランスデューサを 3 軸ステージに取り付け、ファイバーに覆いかぶせるよう配置する。図 5.11 (b) は上から見た様子を表しており、トランスデューサの下に、共振器中のファイバーが 4 本通っている。

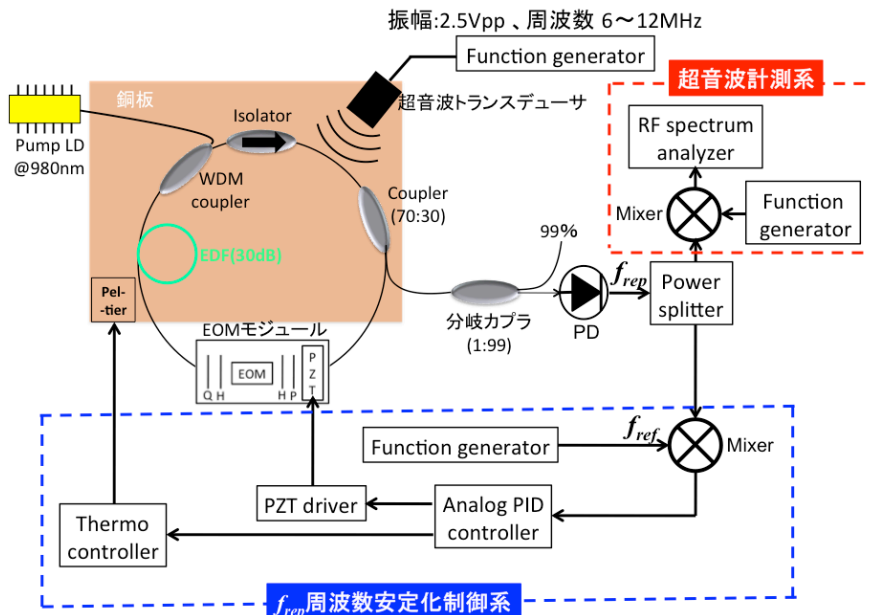
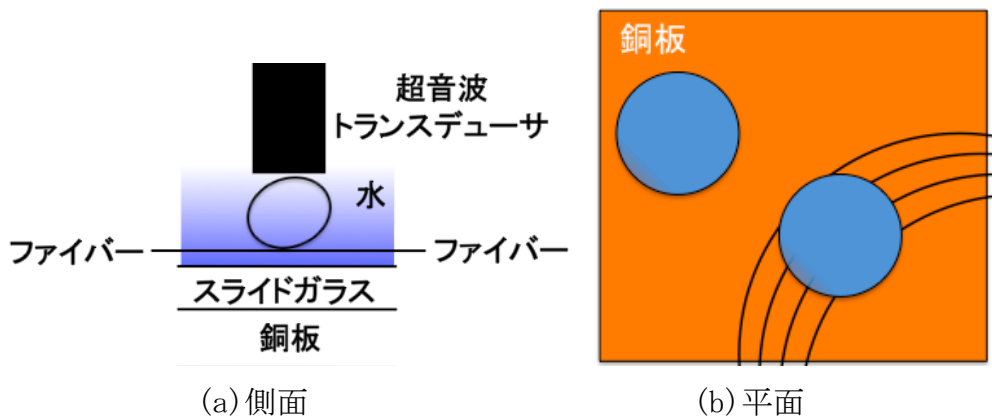


図 5.10 超音波計測セットアップ



(a) 側面

(b) 平面

図 5.11 超音波トランスデューサ付近模式図

実験はまず、図 5.1 に示した原理を確認するため、 f_{rep} 信号を直接 RF スペクトラムアナライザーで計測し、サイドバンドの有無を確認した。実験結果を図 5.10 に示す。結果から、 f_{rep} (26 MHz) - f_s (9 MHz) = 17 MHz の位置に信号が現れているため、原理確認を行う事が出来た。

続いて、図 5.10 超音波計測系を用いて、6 MHz～12 MHz までの超音波計測を行った。実験結果を図 5.12 に示す。6 MHz から 12 MHz の超音波を、SN 比 40～60 で計測した。この結果から、ファイバー光コムの『外乱/RF 周波数変換機能』を用いて、数 MHz の超音波が計測可能であることを実証した。しかし、図 5.12 の妥当性(周波数応答等)を評価するためには、トランスデューサから発生している音圧や、ファイバーに発生するひずみを定量的に計測する必要がある。

そこで、光コム共振器と CW レーザーとのビート信号を検出し、 f_{rep} の変化を光コムのモード次数倍して検出を試みた。

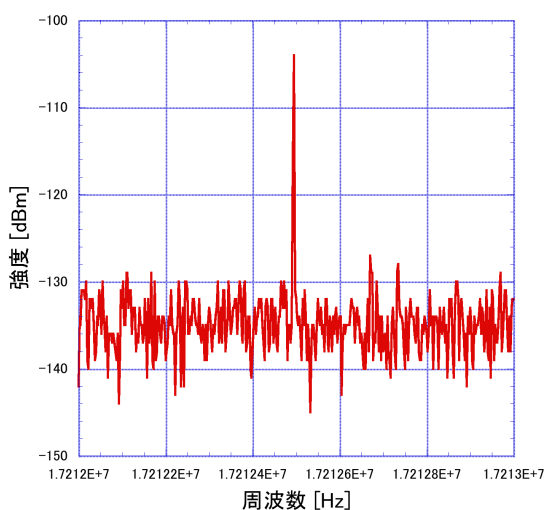


図 5.11 超音波(9MHz)による f_{rep} サイドバンド

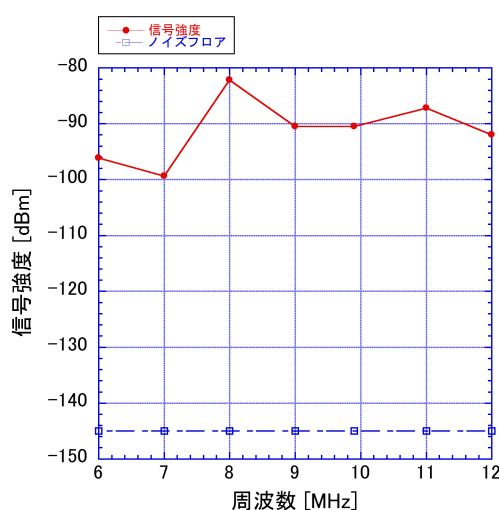


図 5.12 超音波(6MHz～12MHz) 測定結果

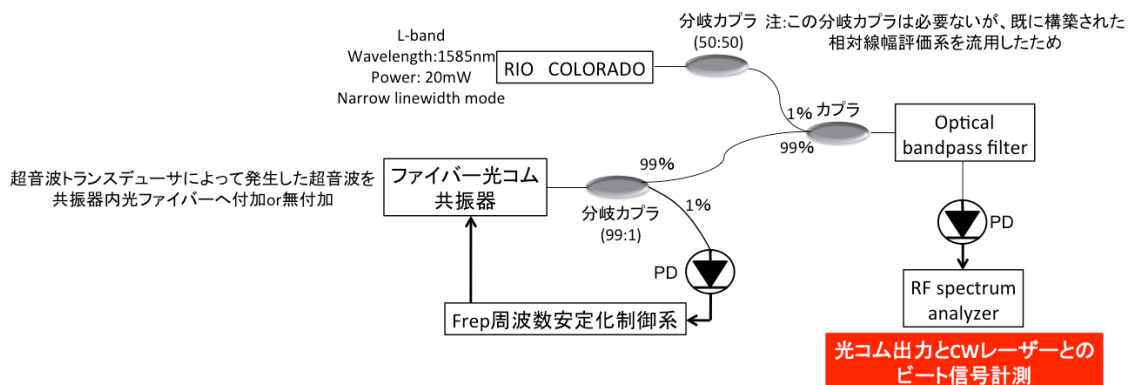
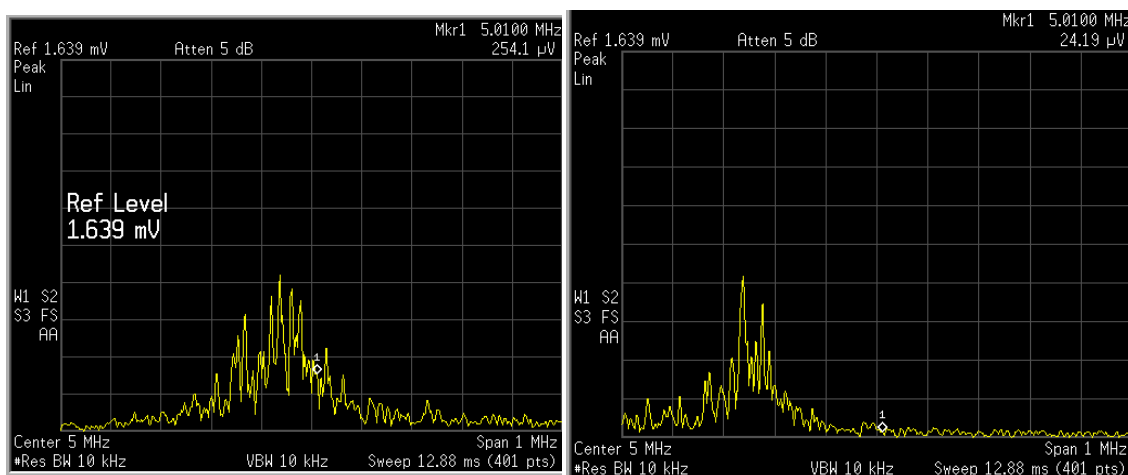


図 5.13 光コム共振器と CW レーザーとのビート信号検出系

実験結果を図 5.14 示す。実験結果から、超音波を付加した場合としていない場合を比較して、ビート信号の線幅に大きな違いが見られなかった。この結果から、超音波によってファイバーに発生するひずみはごく僅かであることが言える。



(a) 超音波付加

(b) 超音波無付加

図 5.14 ビート信号計測結果

まとめ

ファイバー光コム of 『外乱/RF 周波数変換機能』を用いて、超音波トランスデューサから発生した 6~12MHz の超音波を計測した。今後は実験結果の定量性を評価していく。

第 6 章 まとめ

本研究では光コム共振器独自の『外乱/RF 周波数変換機能』に着目した新しいひずみ/超音波計測手法を開発した。本論分では、まず、ファイバー光コム共振器の原理について説明した。次に、ファイバー光コム共振器の設計・構築・最適化を行い、その基本特性評価を行った。次に、ファイバー光コム共振器を用いたひずみ計測を行った。ひずみ計測は材料の応力評価など極めて重要である。本手法は、光コム間隔のフィードバック制御に基づいた零位法を行ったことが特徴である。実験の結果、本手法で静的ひずみ計測の妥当性を実証するとともに、数百 Hz の動的ひずみの計測をおこなった。最後に、ファイバー光コム共振器を用いた超音波計測を行った。超音波計測は材料の非破壊検査やバイオイメージングにおいて広く利用されている。そこで、ファイバー光コム共振器の外乱/RF 周波数変換機能により、超音波を RF 周波数信号として高精度・高速・高ダイナミックレンジで検出することを試みた。計測系の高周波化を試みることにより、MHz オーダーの超音波計測が可能であることを確認した。

参考文献

- [1] Scott A. Diddams, David J. Jones, Jun Ye, Steven T. Cundiff, John L. Hall, Jinendra K. Ranka, Robert S. Windeler, Ronald Holzwarth, Thomas Udem, and T. W. Hänsch, “Direct Link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb”, *Phys. Lett.* **84**, 5102 (2000)
- [2] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/
- [3] Masao Takamoto, Feng-Lei Hong, Ryouichi Higashi, and Hidetoshi Katori, “An optical lattice clock”, *Nature*. **435**, 03541 (2005)
- [4] Keisuke Takahata, Takumi Kobayashi, Hiroyuki Sasada, Yosohiaki Nakajima, Hajime Inaba, and Feng-Lei Hong, “Absolute frequency measurement of sub-Doppler molecular lines using a 3.4- μm difference-frequency-generation spectrometer and a fiber-based frequency comb”, *Phys. Rev. A* **80**, 032518 (2009)
- [5] Kaoru Minoshima and Hirokazu Matsumoto, “High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser”, *Applied Optics* **39**, 5512 (2000)
- [6] H. Inaba, Y. Daimon, F-L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. R. Schibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi and M. Nakawaza, “Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust ant low-noise fiber based frequency comb,” *Optics Express* **14**, 5223 (2006).

- [7] L. V. Wang and S. Hu, “Photoacoustic tomography: in vivo imaging from organelles to organs,” *Science* **335**, 1458–1462 (2012).
- [8] G. Rousseau, B. Gauthier, A. Blouin and J-P. Monchalin, “Non-contact biomedical photoacoustic and ultrasound imaging,” *Journal of Biomedical Optics* **17**, 061217 (2012).
- [9] J. Boneberg, S. Briaudeau, Z. Demirplak, V. Dobler and P. Leiderer, “Two-dimensional pressure measurements with nanosecond time resolution,” *Appl. Phys. A* **69**, 557-560 (1999).
- [10] H. Li, B. Dong, Z. Zhang, H. F. Zhang and C. Sun, “A transparent broadband ultrasonic detector based on an optical micro-ring resonator for photoacoustic microscopy,” *Scientific Reports* **4**, 4496 (2014).
- [11] Serge M. Melle, Kexing Liu, and Raymond M. Measures, “Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system”, *Applied Optics*. **32**, 3601 (1993)
- [12] Kwang Yong Song, Zuyuan He, and Kazuo Hotate, “Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis”, *Optics Letters*. **31**, 2526 (2006)
- [13] Shun Wanga, Ping Lua, Hao Liaoa, Liang Zhanga, Deming Liua and Jiangshan Zhang, “4Passively mode-locked fiber laser sensor for acoustic pressure sensing” *Modern Optics*. **60**, 1892 (2013)