

平成 27 年度 卒業論文

ファイバー光コム共振の外乱/周波数変換を
用いたひずみ計測に関する研究

平成 28 年 2 月 12 日

徳島大学工学部

機械工学科

安井研究室

増岡 孝

指導教官：安井 武史 教授

目次

第 1 章 諸言	1
2 章 ひずみ計測	3
2.1 電気的手法	3
2.2 光学的手法	5
3 章 モード同期ファイバーレーザー	8
3. 1 モード同期	9
3.1.1 受動モード同期	9
3. 2 超短パルス光と光コム	10
3. 3 ファイバー光共振器の外乱/周波数変換	11
4 章 外乱センシング型モード同期ファイバーレーザーの製作	13
4.1 共振器設計	13
4.1.1 利得媒質	13
4.1.2 ファイバー分散	14
4.2 共振器製作	15
4.3 繰り返し周波数の安定化制御	16
4.4 基本特性評価	18
5 章 光コムによる歪み/RF 周波数変換を用いた歪み計測	24
5.1 静的歪み計測	24
5.1.1 計測システム	24
5.1.2 静的歪み計測	25
5.2 動的歪み計測	26
5.2.1 周波数/電圧変換システムに基づいた微小動的歪み	26
5.2.2 動的歪み計測	27
5.3 動的ひずみの周波数特性	28
6 章 結言	31
参考文献	32

第 1 章 諸言

歪みセンサーは電子機器や工作機械から発生する異常振動や材料内の欠陥の発見など重要な評価に用いられている。さらに近年では、歪みセンサーの高精度、高速応答性、高感度化などの改善が望まれている。

従来、歪みセンサーには電気的手法として歪みゲージや伸び計などが代表的に用いられてきた。これらの電気的手法では、微弱な電圧信号のアナログ計測であるため各種ノイズの影響を受けやすく、高感度計測の困難および、高速な歪みの計測が困難であった。近年、電気的手法による制限を回避する手法として、光学的歪みセンサーが注目されている。

光学的歪みセンサーではこれまでに FBG センサーやレーザー干渉法など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、歪みを計測できれば、更なる高感度化が可能になると考えられる。そこで、我々は新たな歪みセンサーとして、ファイバー型フェムト秒モード同期レーザーを用いたファイバー光コム共振器の『歪み/RF (Radio Frequency) 周波数変換機能』に着目した。

光コム技術とは、光の周波数 (数百 THz) と電気的周波数 (RF 周波数、数十～数百 MHz 程度) を精密につなぐ画期的手法である。[1][2]そのため、通常は直接測定が難しい高周波の光周波数を、RF 周波数領域で容易に、直接的に、高速に、かつ高精度に測定ができる (200～600 THz の光を 1 kHz 以下の分解能で測定可能；ダイナミックレンジ、 10^{12} 程度；測定時間、1 μ s)。そのため、光コム技術は、瞬く間に光周波数計測や分光計測の分野に拡がり、2005 年のノーベル物理学賞に繋がった。しかし、その利用は光周波数計測や分光計測に限定され、光応用計測における光コムの可能性が十分に開拓されているとは言い難い。

そこで本研究では、光コム技術を歪み計測へ応用することで、より高精度な歪みセンサーを実現するとともに、光コム技術の新たな応用計測法の開拓を行う。具体的には、フェムト秒モード同期レーザーにより得られる多数の安定な

光周波数モード列が等間隔で規則的に櫛（コム）の歯状で並んだ超離散マルチ・スペクトル構造（光コム）を活用する。光コムの規則的な間隔（周波数間隔 f_{rep} ）は、フェムト秒モード同期レーザーの共振器長に依存する。そのため、共振器長を歪みセンサーとして用いることで、歪みを光コムの周波数間隔 f_{rep} に変換することが可能となる。また、光コムの周波数間隔は、フェムト秒モード同期レーザーの光パルス列の繰り返し周波数（～数十 MHz）と厳密に一致する。即ち、フェムト秒モード同期レーザーの繰り返し周波数を光検出器で検出することで、RF 周波数として歪みを検出することが可能となる。即ち、歪みを光コムを介して RF 周波数へ変換する、歪み/RF 周波数変換が実現できる。

本研究では、光コム技術による歪み/RF 周波数変換を用いた歪みセンサーの基礎研究として、ファイバー型光コム共振器の開発、および圧電セラミックス (PZT) により動的/静的歪みを与えた際の、歪み測定基本特性評価を行った。

2章 ひずみ計測

私達の日常生活において用いられている自動車や建物といった機械的構造物には十分な安全性が求められている。特に、使用環境に応じさまざまな荷重や振動によるひずみは、機械的構造物の破壊を誘引する大きな要因である。そのため、機械的構造物の設計、製作、および安全性点検などにおいて、ひずみの高精度な計測が求められている。従来のひずみ計測は、主に電氣的な計測法と光学的な計測法がある。

本章では、ひずみ計測の従来法を概説するとともに、その特徴を示す。

2.1 電氣的手法

電氣的ひずみ計測法は、ひずみ計測において一般的に用いられている手法である[3]。代表的なひずみ計測法として、ひずみによる電氣抵抗変化に基づくひずみゲージ（電氣抵抗変化型ひずみゲージ）がある。一般的な電氣抵抗変化型ひずみゲージの構造を図 2.1 に示す。

電氣抵抗変化型ひずみゲージは、絶縁体上に金属抵抗線や半導体などのひずみを受ける抵抗体を貼り付けた構造をしている。特に、金属抵抗線を抵抗体として用いた場合、測定対象物とともにひずみ ε がひずみゲージに付加された場合、ひずみゲージの元々の抵抗を R 、抵抗の変化量を ΔR とすると、

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon, \quad (2.1)$$

となる。ここで、比例定数 K はゲージ率と呼ばれ、ひずみゲージに用いられている金属線によって決定される。即ち、抵抗の変化率をオームの法則を利用して、電流、あるいは電圧の変化量として計測することで、ひずみを測定することができる。半導体を抵抗体として用いたの場合も同様に、ひずみによる抵抗変化（ピエゾ抵抗効果）を利用してひずみを計測する。

電氣抵抗変化型ひずみゲージは、構造が単純であり小型・軽量で、安価に生産できることから、非常に多くの場面で用いられている。しかしこのひずみゲージでは、最小検出変位が $1 [\mu\text{m}]$ 程度である。

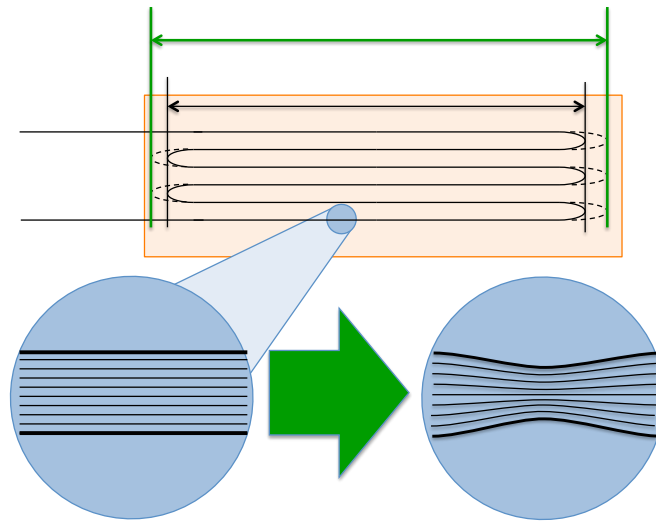


図 2.1 電気抵抗変化型ひずみゲージ原理図

別の電気的手法として差動変圧器がある[3]。差動変圧器の原理図を図 2.2 に示す。差動変圧器は、中央に 1 次コイルを巻き、その両側に 2 次コイルを用いて作動的に接続する 1 次コイルに発信機から交流電圧を加えると鉄心を通して 1 次コイルで作られた交流磁場が 2 次コイルへ伝達され、誘導電圧(e_1 , e_2)が生じる。コイルが作動接続されているため、出力電圧 e_0 は、

$$e_0 = e_1 - e_2, \quad (2.2)$$

となる。鉄心が中心位置にあれば $e_1=e_2$ となって出力電圧はゼロであるが、鉄心の移動によりコイルの交流磁場の伝達に変化を生じ、誘導電圧に差が発生する。出力電圧は移動距離と直線関係にあるので、出力電圧を計測することで変位を求めることができる。そのため差動変圧器を 2 つ用いて 2 点間の変位から歪みを求められる。しかし一般的に質量が大きいため動的歪みの計測には向かない。

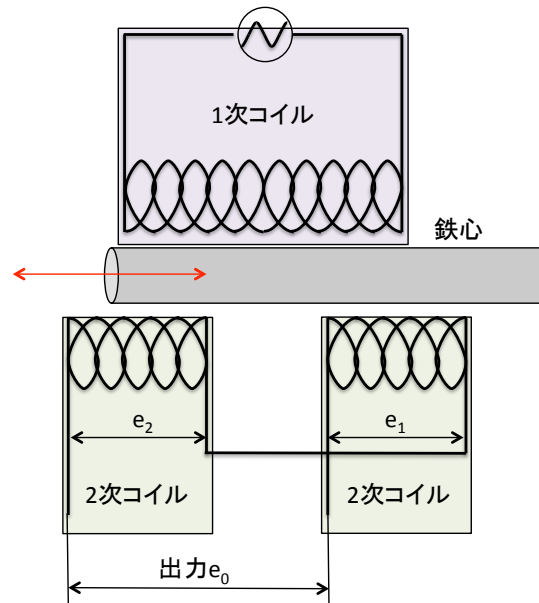


図 2.2 差動変圧器の原理図

2.2 光学的手法

電氣的ひずみ計測法の改善方法として、近年光を用いた光学的ひずみ計測法が考えられてきた。光学的ひずみ計測法では、ひずみを光の特徴量（周波数や位相など）に変換し、その特徴量を測定することでひずみを測定する。

光学的ひずみ計測法の代表例として、Fiber Bragg Gratings(ファイバー・ブラッグ・グレーティング:FBG)を用いた FBG ひずみセンサーがある[4]。図 2.3 に FBG の一般的な構造を示す。

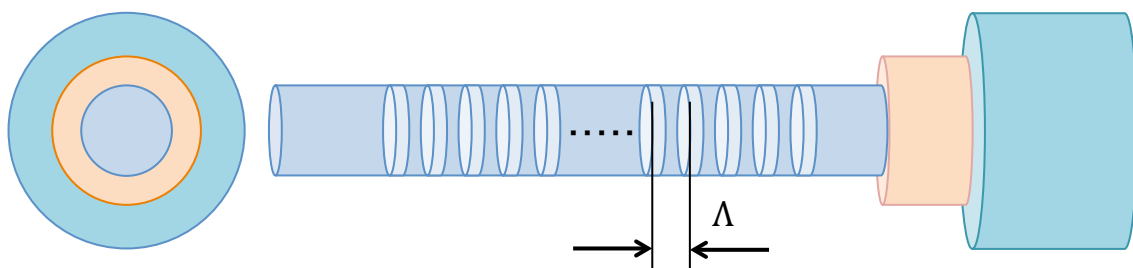


図 2.3 FBG の構造図

FBG は、ファイバーを構成しているコアの内部に回折格子を持たせたものである。コアの内部の回折格子は、一般的に次のように製作される。まず、ゲルマニウムをドープしたファイバーのコアに対して紫外線を照射することで、ファイバーの一部の原子結合が切断される。原子結合の切断は照射する紫外線の強度に依り、ファイバー内の屈折率の変化を引き起こす（光誘起屈折率変化）。

紫外線の照射強度をファイバーの長さ方向に周期的に変化させることにより、周期的な屈折率の変化が発生し、回折格子として働く。入射光の波長と回折格子の間隔の関係が、

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (2.3)$$

を満たした場合、その波長の光は反射する。ここで、 λ_B は FGB の反射する光の波長（ブラッグ波長）、 Λ は回折格子の間隔、 n_{eff} は FGB の有効屈折率である。一方、式(2.3)を満たさな光はそのまま透過する。

FBG を用いたひずみセンサーでは、ひずみによる FBG の周期構造の変化にともなう式(2.3)の反射波長の変化を利用する。FBG ひずみセンサーの原理図を図 2. 3 に示す。つまり、FBG に対して、歪みや温度などの外乱を与えると、ファイバーの伸縮、温度変化に伴う有効屈折率の変化が起こり Λ 、 n_{eff} に変化を与え、波長 λ_B はシフトする。FBG センサーではこの波長の変化量を観察することにより、歪みを計測できる。

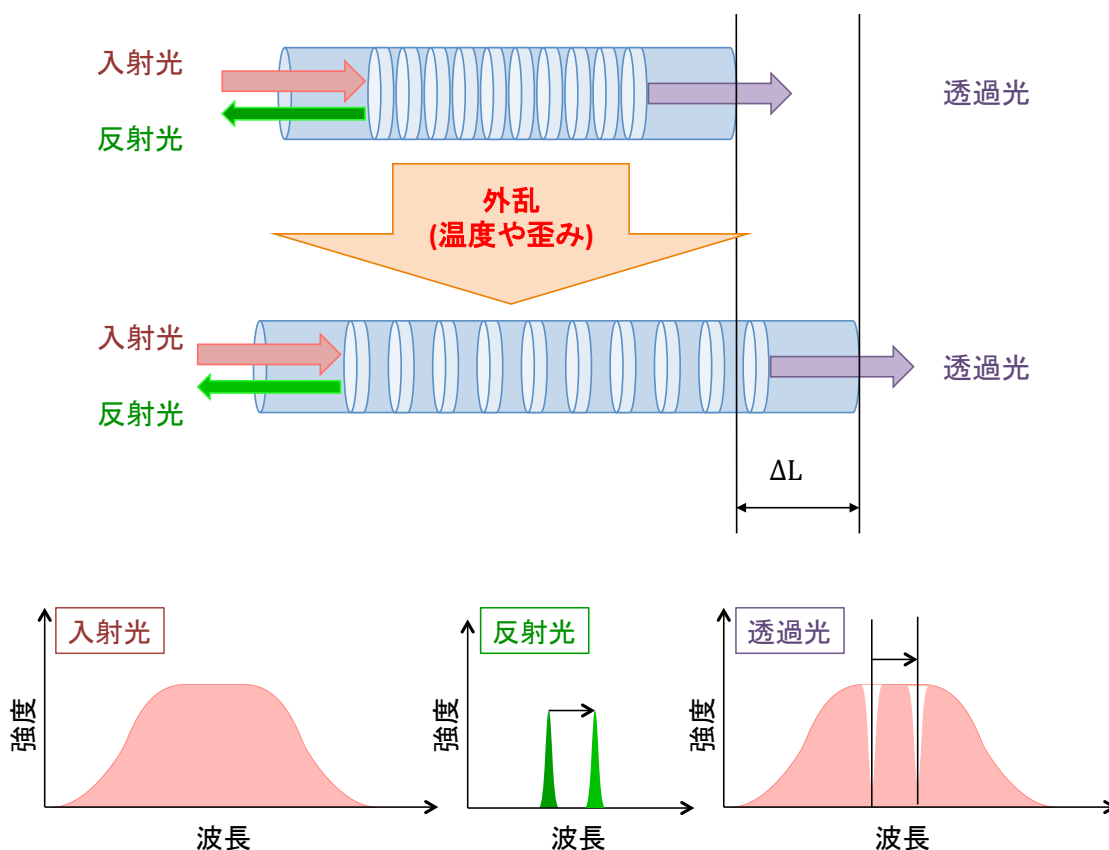


図 2.4 FBG センサーの原理図

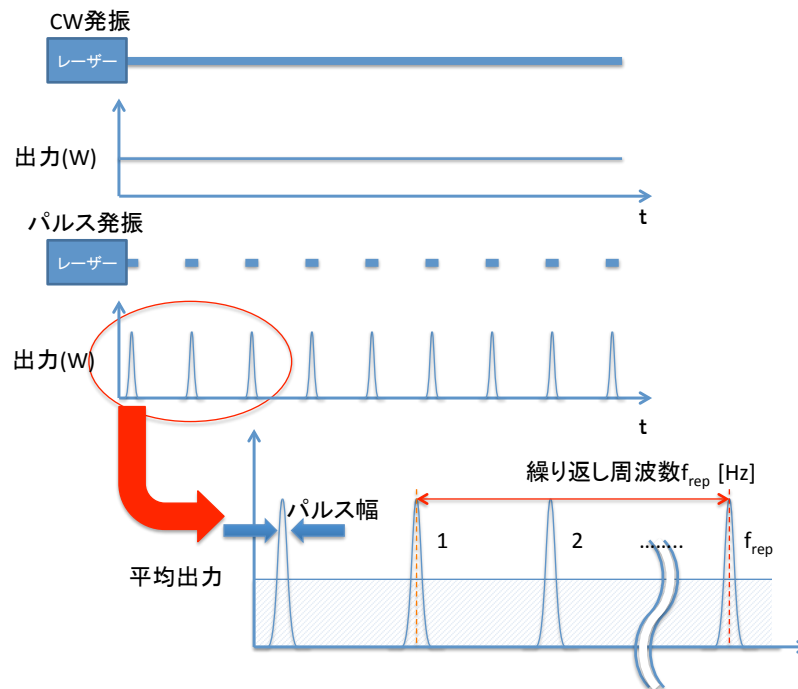
FBG ひずみセンサーは、電気抵抗型ひずみセンサーにくらべて 10 倍程度ひずみ測定精度が高い。しかし、光の波長を精密に計測するため、高分解能の分

光器、あるいはフーリエ分解型分光器による時間がかかる光路長掃引が必要であった。また、波長測定精度は 0.1~0.01 nm (光周波数精度 1~10 GHz) 程度であった。

そのため、より高精度かつ高速測定可能なひずみセンサーを実現するため、本研究では、ファイバー光コム共振器の『歪み/RF (Radio Frequency : 300Hz~3THz の信号) 周波数変換機能』を用いた新たなひずみセンサーの開発を行った。

3章 モード同期ファイバーレーザー

レーザーは光増幅器と光共振器によって構成され、その出力は光共振器内で光が光増幅媒質を往復しながらコヒーレントに誘導放出を誘起することによって得られる[4]。レーザーの発振動作は大きく分けて連続波発振動作（Continuous-Wave Operation: CW Operation）とパルス発振動作（Pulsed Operation）の2つがあり、それぞれCWレーザー、パルスレーザーと呼ばれる。連続波発振とパルス発振の様子を図3.1に示す。CWレーザーは連続の一定の出力が得られるのに対し、パルスレーザーは一定の繰り返し周波数（ f_{rep} ）で発振するパルス状の出力が得られる。[1;ファイバーレーザー基礎編]



CWレーザーの特性は平均出力 P_{mean} [W]で表される。一方パルスレーザーの場合は平均出力 P_{mean} [W]、パルス幅 τ [s]、繰り返し周波数 f_{rep} [Hz]、パルスエネルギー E_{pulse} [J]、ピーク出力 P_{peak} [W]などで表現される。パルスレーザーの各パラメータには以下の関係がある。

$$\text{平均出力 [W]} = \text{パルスエネルギー [J]} \times \text{繰り返し周波数 [1 / s]}$$

$$\text{ピーク出力 [W]} \sim \frac{\text{パルスエネルギー [J]}}{\text{パルス幅 [s]}}$$

パルスの発振動作には大きく分けて、直接変調法、Q スイッチ法、そしてモード同期法の3つがある。

直接変調法は、CW レーザーの出力を機械的シャッターの ON/OFF によってパルス波形を得る、もしくは発振器の励起源をパルス制御する方法である。パルス幅は ms~ps 程度である。Q スイッチ法は、レーザー媒質中で十分に反転分布が起こるまで待ち、一気にレーザーを発振させることで、非常に大きなエネルギーのレーザー光を等間隔で出すことができる手法である。パルス幅は μs ~ns 程度である。しかしこれらの手法では本研究で用いているようなフェムト秒オーダーの超短パルスを得ることは困難である。そのため、超短パルスを得る手法として超高速光シャッターが必要となる光のシャッターは光のピークパワーによって開閉しピークパワーの強い超短パルスのみがシャッターを通過することができるその結果フェムト秒レーザーを得ることができる。

3. 1 モード同期

光コムのような ps~fs の超短パルスを発生させる方法として、モード同期という方法がある。モード同期とはレーザー共振器内の各縦モードの位相を同期させるという意味である。誘導放出の帯域が広いレーザー媒質においては非常にたくさんの縦モードが同時に増幅される。このたくさんの縦モードの位相が同期される（モード同期）と、共振器内の縦モード間隔と強度/位相変調が周波数引き込みを起こす。その結果、全てのモードがあるタイミングで強め合い超短パルス光が出力される。モード同期を起こさせる方法として共振器のパラメータに周期的な変調を起こす能動モード同期と受動的に変調が起こる受動モード同期がある。本論では受動モード同期を用いたレーザーを使用しているので受動モード同期のみ示すことにする。

3.1.1 受動モード同期

超短パルス光を発生させる有効な手法の一つに受動モード同期がある。受動モード同期の手法には、可飽和吸収体 (Saturable absorber) を用いた手法、偏波コントローラー[5]を用いた手法、Kerr レンズ効果を用いた手法[6][7]などが

ある。

過飽和吸収体を用いた手法では、可飽和吸収体をレーザー共振器内に設置する。過飽和吸収体とは、低い強度の入射光には吸収体として働き、高い強度の入射光には吸収体の能力が飽和し吸収が減っていく非線形物質である。このため、パルス成分のみを効率よく共振器内に保持し、前述のモード同期を促進する。

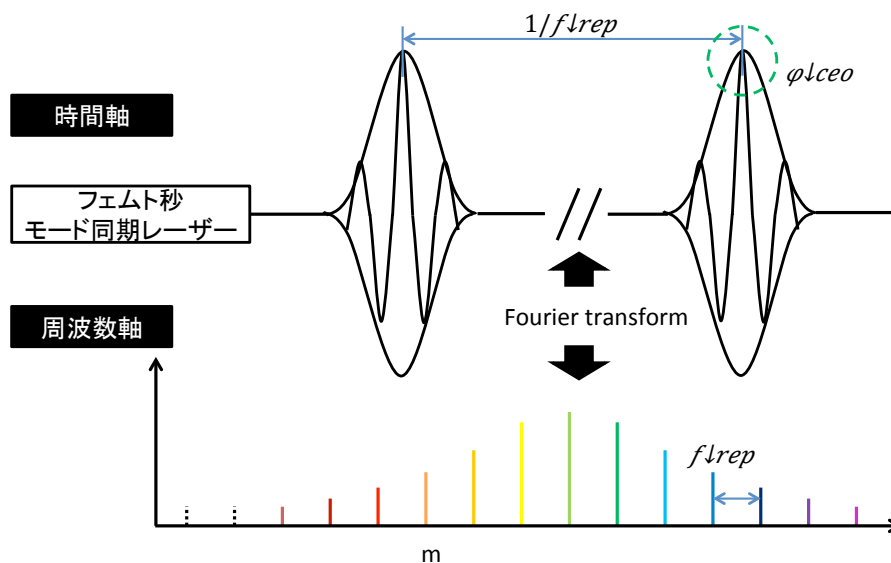
偏波コントローラーを用いた手法は非線形偏波回転(NPR)を用いたスイッチングによりパルスのみを取り出す方法である。NPRは $\lambda/2$ 波長板、 $\lambda/4$ 波長板そして偏光子で構成されており、光強度に依存して伝搬光の直交する2つの成分間に位相差が生じ、両者の成分から構成される楕円偏波面が自分自身で超高速に回転する現象である。ファイバー内を伝搬したパルス光は偏光状態が変わる。しかし、CW光では偏光状態は変わらないため、波長板を調整することでピークパワーの強いパルス光のみを取り出すことができる。

また電氣的光学素子である Kerr レンズ効果を用いた受動モード同期の手法も存在する。

強い光強度を受けると複屈折性を示す効果を Kerr 効果といいレーザー結晶において光の位相速度が変化する自己位相変調により、スペクトル幅が広がる。この時ガウス型パルス場合屈折率の分布はレンズ状に発生する。そのためレーザービームは自己収束により強いピークパワーを得ることができる。その結果レーザー結晶が自己位相変調と自己収束を繰り返し、モード同期を達成することができる。

3. 2 超短パルス光と光コム

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(繰返し周波数=モード同期周波数= f_{rep})を示す(図 1 上側)。一方、その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)の歯状で立ち並んだスペクトル構造を示す(図 1 下側)。これを光コムと呼ぶ。[8]



光コムを持つスペクトル構造の等間隔性を活用することで、光周波数領域（数百 THz）と RF 周波数領域（数十～100 MHz 程度）を直接的にかつ厳密につなぐことができる。そのため、測定しやすい繰り返し周波数（RF 周波数領域）を用いた、高精度な光計測が期待される。

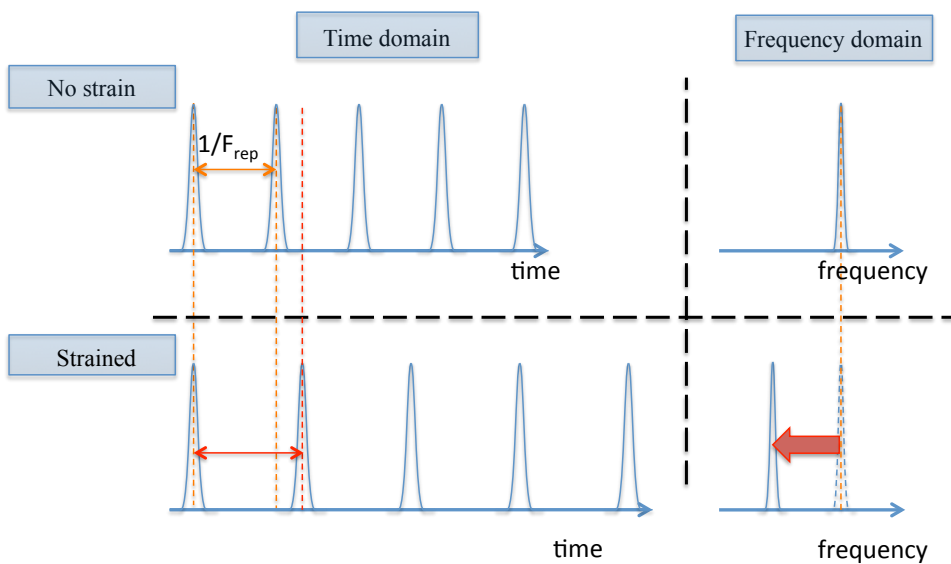
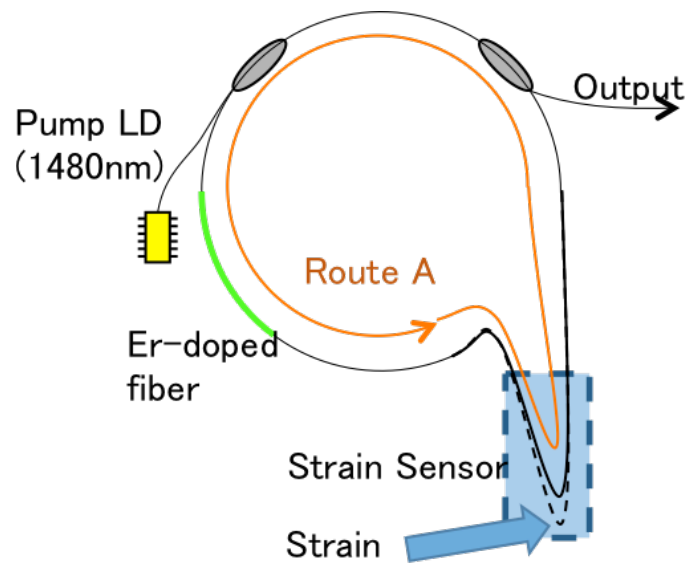
3. 3 ファイバー光共振器の外乱/周波数変換

モード同期ファイバーレーザーからの出力光のコム間隔（または繰り返し周波数） f_{rep} は、

$$f_{rep} = c/nL$$

（ 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。つまり、光コム共振器では、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} が変化する（図 1b）。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。



ひずみ計測において、従来光の周波数は数百 THz 帯であるため高い確度・精度での周波数計測は制限されてきたが、光コム技術により「歪みを光で検出し、RF 周波数に変換」することができれば、極めて高精度かつ高速な歪み測定が可能となるはずである。そこで本研究では、光コム技術を用いた高速・高感度な歪み測定の原理検証を行った。

4章 外乱センシング型モード同期ファイバーレーザーの製作

本章では、本実験で使用したファイバーレーザーの基本特性及び構成を示す。本研究では共振器の一部をセンシングに用いるため、共振器特性として測定対象以外の外乱に強く、安定したモード同期が可能なファイバー光コム共振器の製作が求められている。本章では、本研究で用いた外乱センシング型モード同期ファイバーレーザーの設計・製作法を示すとともに、製作したモード同期ファイバーレーザーの安定性評価について述べる。

4.1 共振器設計

本研究では、測定対象である外乱（歪み）に対しては高感度でありつつも、他の外乱（温度変化、レーザー光強度揺らぎなど）に対しては堅牢である必要がある。そのため、上記条件を満たすようにモード同期ファイバーレーザー共振器設計を行った。特に、出力特性（出力安定性、繰り返し周波数、パルス幅など）に影響を与える共振器に用いる利得媒質、共振器長、分散値等を中心に検討した。

4.1.1 利得媒質

ファイバーレーザーの利得媒質には、光ファイバーのコアの部分にエルビウム(Er)、ホルミウム(Hr)、ネオジウム(Nd)、サマリウム、(Sm)、ツリウム(Tm)、イッテリビウム(Yd)など 3 価のイオンを活性物質として添加した希土類添加ファイバーが用いられる[4]。これらの希土類添加ファイバーは、3 [μm]以下の様々な波長に遷移線を有する。一般的な希土類添加量は 0.01%～1%程度であり、ファイバーに添加された場合希土類イオン間で非発光または発光を伴うエネルギー移動が起こる。つまり、それぞれイオン固有な準位に対応した励起を行うことで誘導放出による光増幅作用を持つ。また、一般にファイバーコア径は 10 [μm]以下であるので、ファイバーのダメージ閾値から励起光強度に制限がともなう。しかし、希土類添加ファイバーは、低い入力パワーであっても励起密度を高めることができ、相互作用長が数十 cm～数 km と長い場合単位長さの利得

が低くとも大きな総合利得が得られる[9]。

今回共振器には、エルビウム添加ファイバー(EDF)を採用した。EDF は、3準位系の安定した発振が可能で、一般的な励起波長は 980 [nm] と 1480 [nm]、発振波長は ~1550 [nm] である。また、EDF を用いた共振器ではオールファイバーで構成することができるのでアライメントフリーで外乱に強く安定なモード同期を実現することができる。そのため本研究では EDF を利得媒質として採用し、またその時の励起波長を 980 [nm]とした。

4.12 ファイバー分散

ファイバーレーザーでは、超短パルス伝搬に重要な影響を及ぼすため共振器の分散値の設計が必要である。なぜならパルスを構成する多数の異なる波長成分が $c/n(\omega)$ という異なる速度で伝わるからである。このとき、 c は真空中の光速で、 $n(\omega)$ は光周波数 ω における屈折率である。分散にはファイバーを構成している材料自体が持つ材料分散とファイバー自体の幾何学的構造により発生する導波路分散が存在する。これらの分散を全て合わせて光ファイバーでの分散と呼んでいる。分散における重要なパラメータとして群速度分散 β_2 [ps²/m]、分散パラメータ D [ps²/nm/km]がある。式 2.1 に β_2 、 D の関係式を示す。

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left[2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right] \cong \frac{\omega}{c} \frac{d^2n}{d\omega^2} \cong \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (2.1)$$

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \cong -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (2.2)$$

ただし

$$\begin{array}{ll} \omega : \text{入射波の周波数} & c : \text{真空中の光速} \\ n : \text{屈折率} & \lambda = 2\pi c / \omega \end{array}$$

とする。

β_2 が正の値 (D が負の値) のとき正常分散が発生する。このとき長波長側が速く進み、短波長側は遅く進む。また反対に β_2 が負の値 (D が正の値) のときは異常分散が発生し、長波長側が遅く、短波長側は速く進む。

本研究で用いるシングルモードファイバー (SMF) では分散パラメータ 18 [ps²/nm/km]であり、式 2.1 より 1550 [nm]で群速度分散は-0.02286 [ps²/m]とな

った。しかし、EDFの分散値や分散パラメータはデータシートに載っていないことが多く実験的に推定しなければならない。今回は、電気通信大学美濃島研究で用いている値 $0.05[\text{ps}^2/\text{m}]$ を参考にさせていただいた。また本研究で用いた EOM はモジュール化されており、EOM (LiNbO_3) 部とその他の EOM モジュール部になっている。その他の EOM モジュール部については光路長 $0.25[\text{m}]$ を自由空間伝播していることから、群速度分散 $0 \text{ ps}^2/\text{m}$ 、屈折率 1 とした。EOM 部は LiNbO_3 結晶の群速度分散が $0.1 [\text{ps}^2/\text{m}]$ であり、結晶の長さが $40[\text{mm}]$ であることから、分散値を $0.004 [\text{ps}^2]$ と推定した。各素子の推定分散値を合計し共振器合計の分散値が 0 に近づくように設計した。また本研究ではファンクションジェネレータ (Agilent 33522A) を用いて変調信号を与えるため、繰り返し周波数を与えるため、共振器を構成している素子の一覧およびその特性を以下の表に示す。

表 4.1 共振器を構成する素子の特性値

	長さ [m]	群速度分散 [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	0.045078	0.045078	1.48	4.884
EOM モジュール	0.25	0	0	1	0.25
EOM (LiNbO_3)	0.055	0.1	0.0055	2.2	0.121
素子(WDM,70:30 カプラ)	0.102	0	0	1	0.102
合計	7.707		-0.040862		11.277

4.2 共振器製作

図に共振器の構成図を示す。リング型共振器の大部分はシングルモードファイバーで構成されている。励起レーザー (LD) には、波長 $980[\text{nm}]$ のレーザーダイオードを用いた。LD からの出力は、波長分割多重カプラ (WDM) を経由して EDF (30 dB/m) で吸収され、 $1.5[\mu\text{m}]$ 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。EDF のルミネッセンスと吸収しきれなかった励起光は双方向へ進むが、偏光無依存アイソレータによって一定方向に制限される。3 軸偏波コントローラー (偏光子・ $\lambda/2$ 波長板・ $\lambda/4$ 波長板) を用いて非線形偏波回転によるモード同期を実

現し、効率的にパルス成分のみを増幅させる。生成した光パルスは 70:30 分岐カプラによって 30%オシレータから取り出される。また、繰り返し周波数安定化制御のためドラム型 PZT、及びペルチェ素子は共振器に組み込まれている。

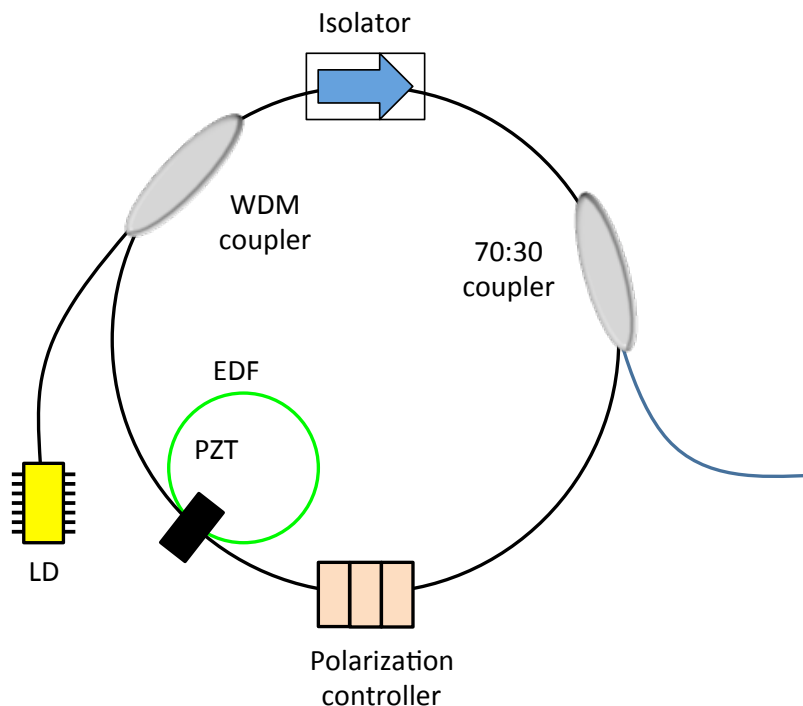


図 4.1 共振器の構成図

4.3 繰り返し周波数の安定化制御

4.3.1 共振器安定化制御システム

本研究では繰り返し周波数の安定化制御として PZT およびペルチェ素子(温度調整)を用いた制御をおこなった。PZT は高周波数領域 (数 Hz~数十 kHz) を担い、ペルチェ素子は低周波数領域 (<数 Hz) の安定化制御を担う。これは、外気温変化による共振器長の伸縮変化による繰り返し周波数の変化量 (数百 Hz/°C程度) が非常に大きく、PZT のみでは制御しきれないためである。

ペルチェ素子を用いた温度制御による共振器長制御のため、共振器を金属の箱に設置し、ペルチェ素子を取り付けた。実験に用いた温度制御の箱の構成を図 4.2 に示す。箱の側面にはアルミを使用し、箱の底面には熱伝導性を高くするため銅板を使用した。サーミスターからの測定温度と設定温度の差から PI 制御を行った。また、サーミスターをペルチェ素子の真上に置くことで温度制御のた

めの制御帯域を得るようにした。ペルチェの下にある銅板はスペーサーとして用いている。

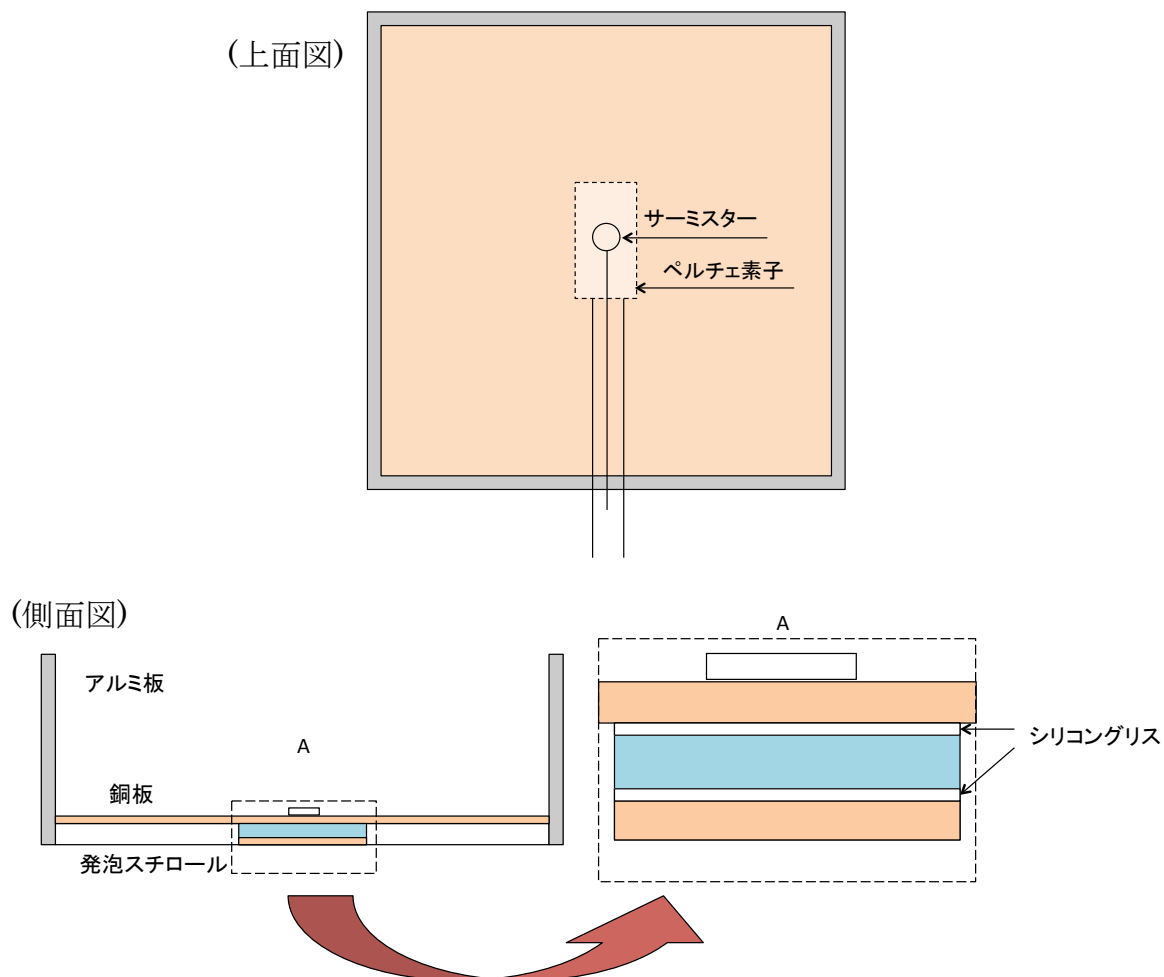


図 4.2 共振器の音調箱の構成図

PZT を用いた共振器長制御には、ドラム型 PZT を用いた。ドラム型 PZT は、共振器を構成するファイバーを直接巻きつけた。ドラム型 PZT を用いた共振器長制御による繰り返し周波数変化量は、数十 Hz 程である。

4.3.2 位相同期制御による繰り返し周波数安定化制御

以下に繰り返し周波数安定化制御のブロック線図を示す。

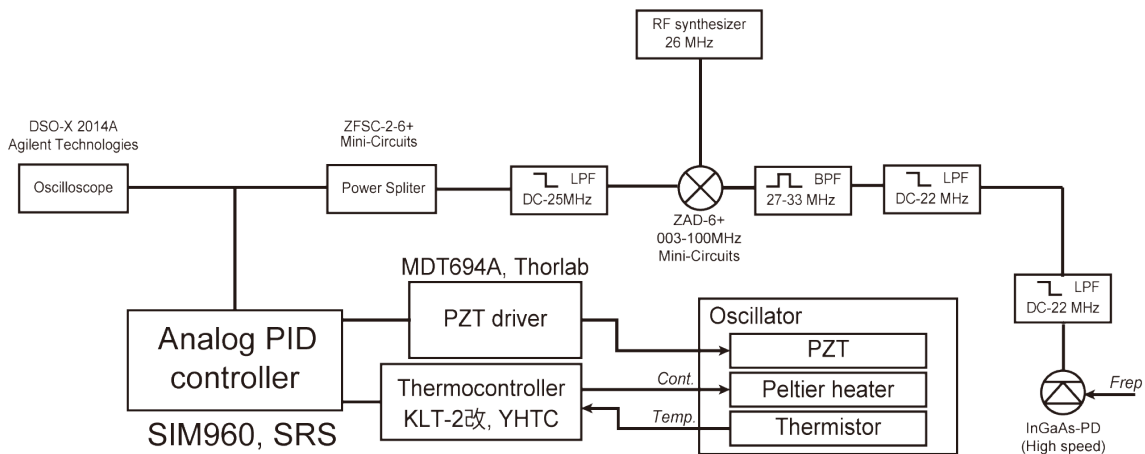


図 4.3 繰り返し周波数の制御ブロック線図

高速な In-GaAs 検出器から得られた f_{rep} の RF 信号は、LPF、BPF で波形を基本波のみに整えられる。その後、 f_{rep} とファンクションジェネレータからの信号をダブルバランスドミキサーによってミキシングする。ミキシングされた信号は和周波と差周波が発生するので、フィルタリングを行うことで差周波のみを取り出す。そして PI 制御回路に入力する。PI 制御回路において差周波が 0 となるよう制御を行う。PI 制御から出力された信号は PZT とペルチェの各ドライバーに入力され、 f_{rep} の安定化制御を行う。

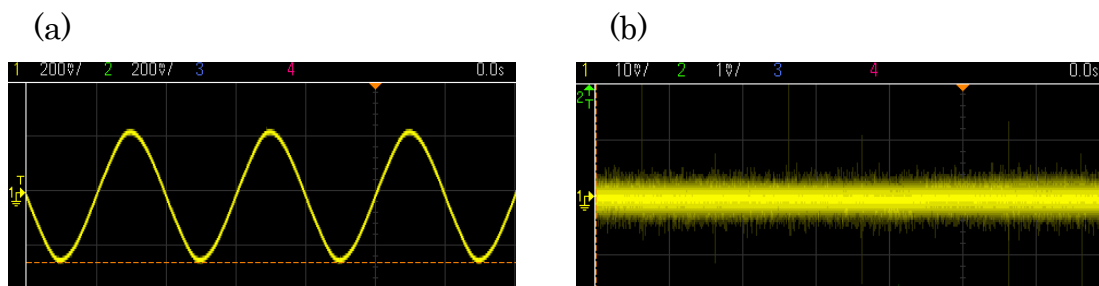


図 4.3 繰り返し周波数安定化制御前後図 (a)制御前 (b)制御後

図 4.3 にミキシング信号の差周波信号の制御前、制御後の信号を示す。制御前の信号は振幅約 500 [mVp-p] の AC 信号であったが、制御後は振幅 10 [mVp-p] の DC 信号になり、安定した f_{rep} 制御が行われていることがわかる。

4.4 基本特性評価

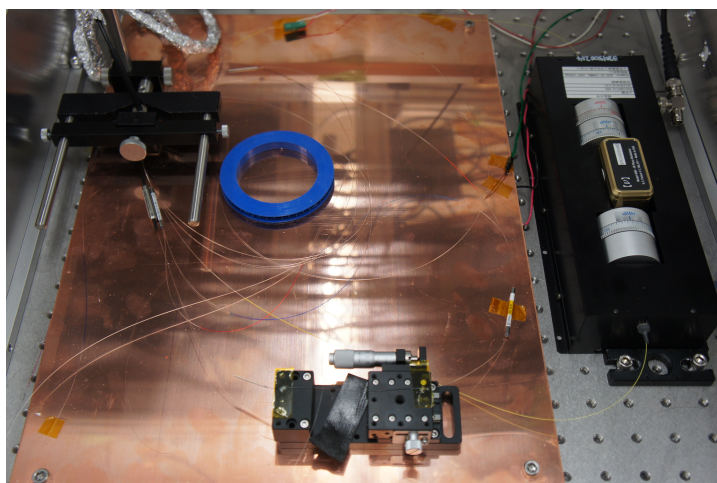
製作したファイバー共振器の写真と光スペクトルと RF スペクトルを図 4.5(a)

図 4.5(b)図 4.5(c)に示す。写真のように共振器を銅板の上ののせ温度調整がファイバーに加えられるためにファイバーを広げて銅板に接するように置いた。さらに共振器の周りをアルミの板で囲い外気温による f_{rep} の変化を与えないようにした。実際には天井部もアルミ板で蓋をしている。また、今回の実験で与える歪みは共振器が入っている箱のなかで発生させた。

光スペクトルの波形は設計上ソリトンパルスと呼ばれる安定なモード同期を実現するとともにスペクトル幅の狭い波形を目指した。しかし、製作した光コム共振器では、図 4.5(b)のように FWHM が 32.5 [nm] とスペクトル幅が広い状態であった。これは、分散の想定値よりもより 0 に近いあるいは正の値となり、ストレッチパルスとなってしまっていると考えられる。ストレッチパルスであっても歪み計測は可能であると考えられるが、ソリトンパルスのほうがより安定した計測が可能であると考えられる。本研究では製作したストレッチパルスの光コム共振器を用いるが、今後は共振器分散を変えスペクトル波形を計測し、共振器トータル分散の検証を行っていく。

図 4.6(c)に、製作したファイバー共振器出力光の RF スペクトルを示す。26 [MHz] 間隔でスペクトルのピークを見ることができる。また、高調波である 52 [MHz]、78 [MHz] の安定した信号強度のピークが見えるので、安定したモード同期がかかっていると言える。

(a)



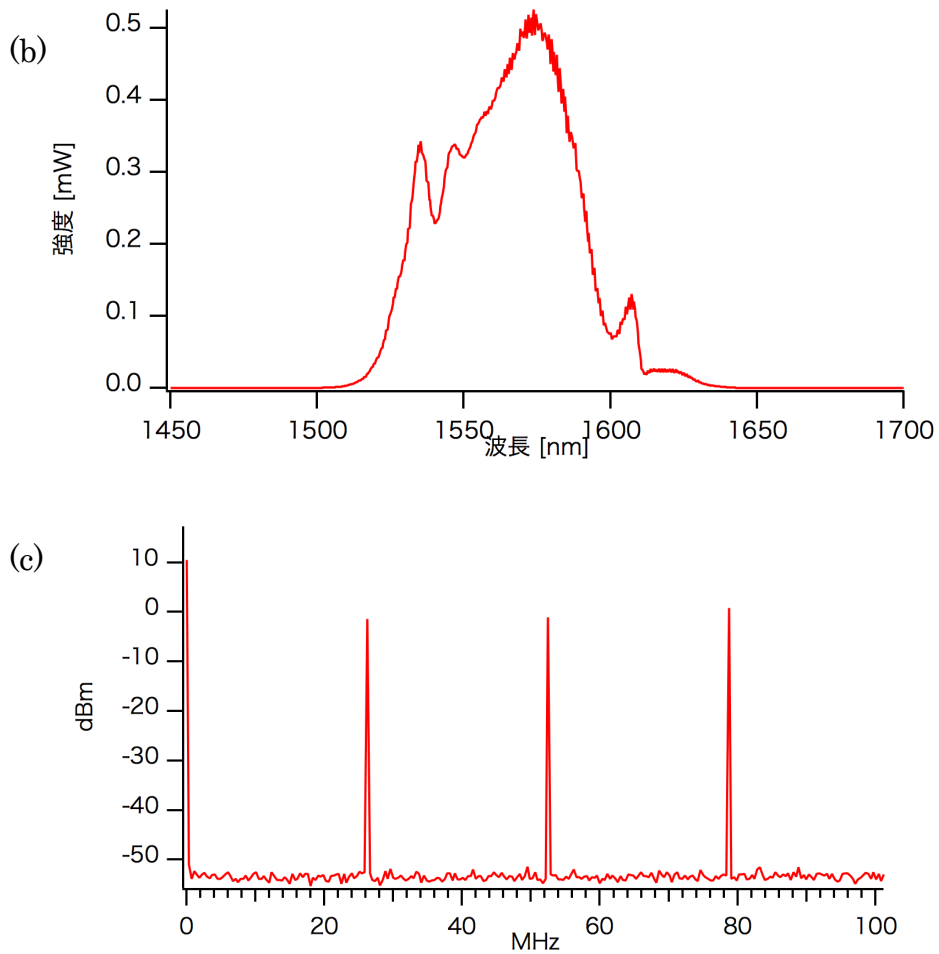


図 4.4 作成された共振器の(a)装置図,(b)光スペクトル,(c)RF スペクトル

表 4.2 ファイバー出力の基本特性値

ピーク出力	0.52 [mW]
繰り返し周波数	26.212688 [MHz]
FWHM	32.5 [nm]

次に、 f_{rep} の安定化制御に用いられているドラム型 PZT の特性評価を行った。ドラム型 PZT は共振器中にあり、ファイバーを巻きつけて制御を行った。図 4.5 に電圧による f_{rep} の変化を示す。ドラム型 PZT へ 150V 電圧を印加することによるファイバーの伸縮により、繰り返し周波数を 30 [Hz] 程度制御できることがわかる。

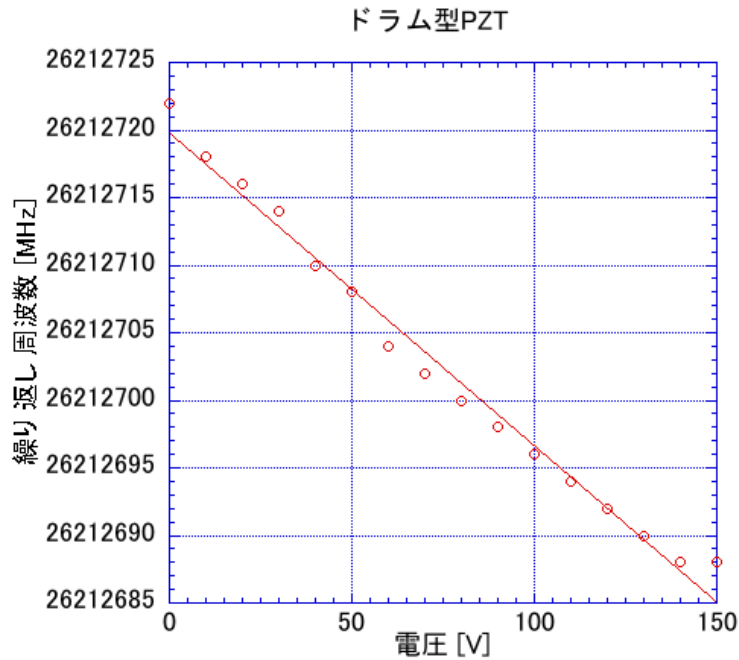


図 4.5 ドラム型 PZT の電圧特性

次に制御による繰り返し周波数の安定度評価を行った。3章で記述した通りファイバー光共振器出力光の繰り返し周波数を用いたひずみ計測においては安定な繰り返し周波数が必要となる。評価にはまずペルチェ素子を一定温度に設定し、PI 制御を行わないもの(緑 : Peltier INT)とドラム型 PZT のみ PI 制御を行ったもの (PeltierINT+PZT), そしてペルチェ素子とドラム型 PZT 両方で PI 制御を行ったもの(PeltierEXT+PZT)を比較した。

表 4.3 各制御状態における繰り返し周波数の標準偏差

	Peltier INT	Peltier INT + PZT	Peltier EXT + PZT
Gate time [s]	S.D [Hz]	S.D [Hz]	S.D [Hz]
0.001	2.71	1.98	1.24
0.01	0.077	0.0773	0.0819
0.1	0.09833	0.0418	0.0352
1	0.2043848	0.0939564	0.03887273

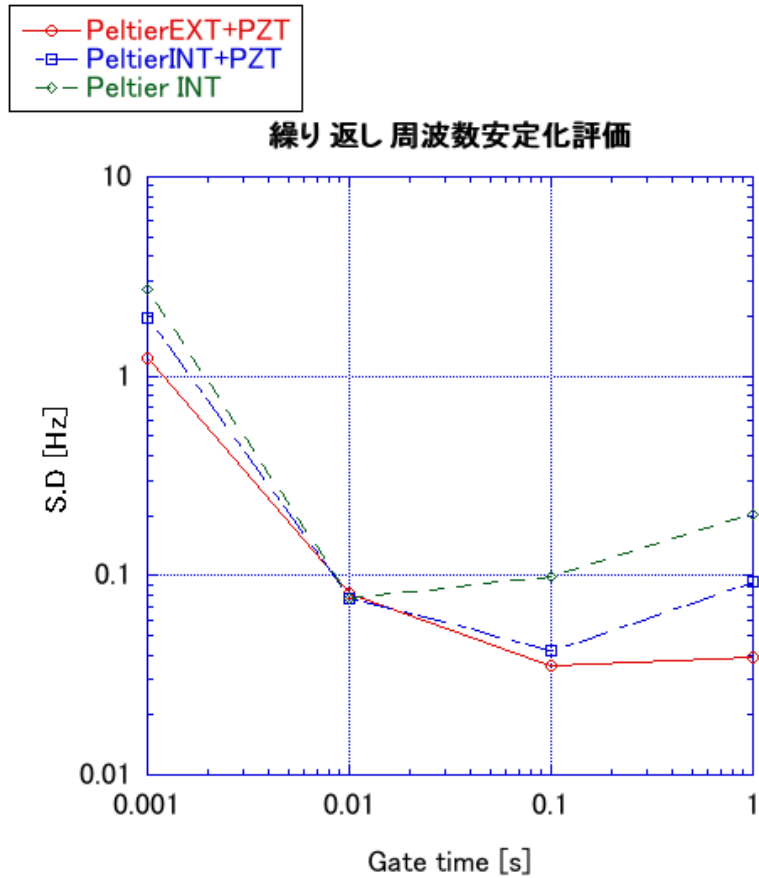


図 4.6 各制御状態における繰り返し周波数の標準偏差

表 4.3 および図 4.6 より、ペルチェの一定温度に制御を行う緑のグラフだとペルチェの制御は遅いため長いゲート時間だと安定しない。これはサーミスタとペルチェは銅板中央部 1 点で制御を行っている。そのため、ファイバー全体の制御が遅れるためだと考えられる。またペルチェの一定温度で制御に加え PZT の制御を行った青いグラフは大きな f_{rep} の変化に対応できないため安定度が落ちたと考えられる。

ペルチェ素子及びドラム型 PZT による PI 制御を行う赤いグラフの場合、繰り返し周波数はゲート時間 1 [s] のとき標準偏差は 0.039 [Hz]、また 0.1 [s] のとき標準偏差は 0.031 [Hz] であり、ほぼ一定の標準偏差であり安定に制御できていると言える。

また、すべてのグラフにおいて 0.001 [s] は周波数カウンタの読み取れ得る桁数が少なくなるため数 Hz の範囲で偏差が発生しているように見える。

以上の結果から PZT 及びペルチェ素子を PI 制御回路によって制御した場合が

安定に制御が行われていると言える。

5章 光コムによる歪み/RF周波数変換を用いた歪み

計測

本章では、3章で述べたファイバー光コムの外乱/周波数変換によるひずみ計測を行う。光コム共振器には、4章で述べた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]， $f_{rep}=26$ [MHz]）を用いた。本実験では、PZT を用いてファイバー共振器長に静的歪み、あるいは周期的変化させることにより動的歪みを付与した。

5.1 静的歪み計測

5.1.1 計測システム

はじめに積層型 PZT を用いて PZT に付加する電圧と繰り返し周波数の関係を調べた。用いた積層型 PZT の最大変化量は 17.6 [μm]（PZT 電圧：0-100 V）である。ファイバーに対する固定方法はエポキシ接着剤を滴下し固定した。そのため、歪み付加範囲は接着剤で固定した 2 点間の距離であり、20 [mm] であった。図 5.1 に実験装置図を示す。

ファイバー光コム共振器からの出力は高速検出器 InGaAs-PD によって検出される。検出された RF 信号は、ローパスフィルタ (LPF) でフィルタリングし、周波数カウンタで繰り返し周波数を計測する。

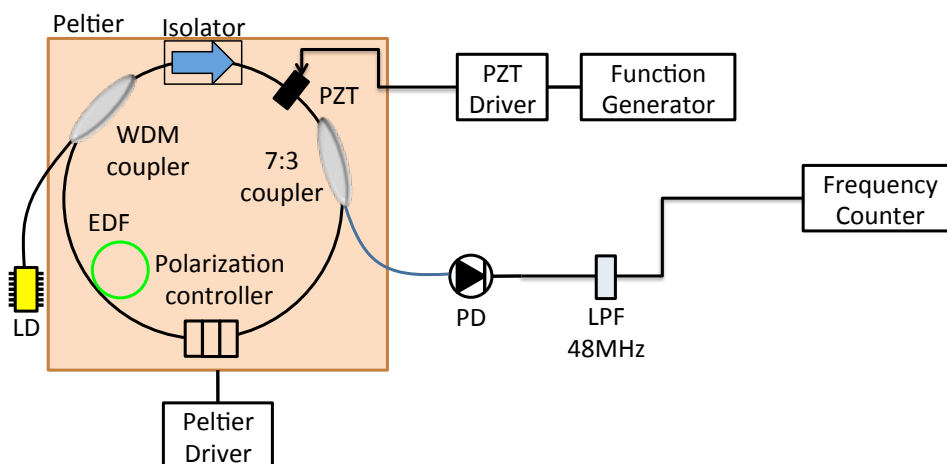


図 5.1 静的歪み計測装置図

5.1.2 静的歪み計測

図 5.2 に PZT 負荷電圧に対する繰り返し周波数変化率 (f_{rep} ratio : $\Delta f_{rep}/f_{rep}$) の関係を示す。実験結果より、PZT に電圧を負荷すると共振器長が伸び、その結果繰り返し周波数にほぼ線形に傾き -0.07 [Hz/V] の変化を与えていることを確認した。また、最大繰り返し周波数変量は、 8.68 [Hz] (PZT 電圧範囲 : $0 \sim 100$ [V]) であった。

繰り返し周波数 f_{rep} と光学的共振器長は、下記の式の関係が成り立つ。

$$f_{rep} = \frac{c}{nL},$$
$$\Delta nL = \frac{\Delta f_{rep}}{f_{rep}} nL, \quad (5.1)$$

c : 真空中の光速

即ち、繰り返し周波数は光学的共振器長(nL)により決定され、この共振器では 11.277 [m] なので、繰り返し周波数から推定される共振器長の最大変量は 3.76 [μm] である。測定領域は PZT を接着剤で固定した 20 [mm] とした場合、最大歪みは 0.0018 であるといえる。なお、共振器長の最大変量は PZT の最大変量とは異なっていたが、これはファイバーの固定に歪みが生じたためであると考えられる。また、4 章より積層型 PZT に電圧を負荷しない定常状態において繰り返し周波数は 0.039 [Hz] で変動していた。それは光学的共振器変位量 16.9 [nm] に相当する。測定領域を 20 [mm] のとした場合測定歪み限界は 0.845 [μstrain] である。

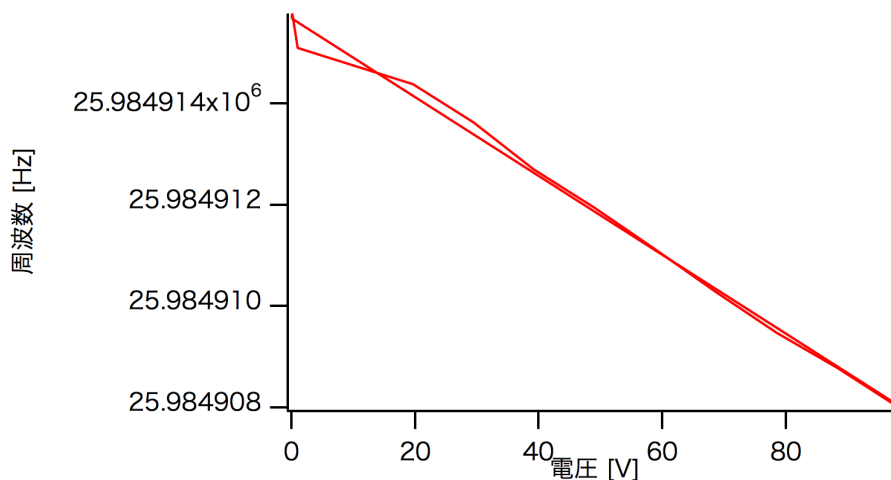


図 5.2 PZT 電圧- f_{rep} 曲線

5.2 動的歪み計測

5.2.1 周波数/電圧変換システムに基づいた微小動的歪み

動的歪みの計測では、周期的に変化する繰り返し周波数 f_{rep} の微小な変化を計測する必要がある。そのため、静的歪み計測で用いた周波数カウンターは用いることができない。そこで、ミキサーによる周波数/電圧変換システムを構築し、微小な周波数変量を計測した。実験装置を図 5.3 に示す。

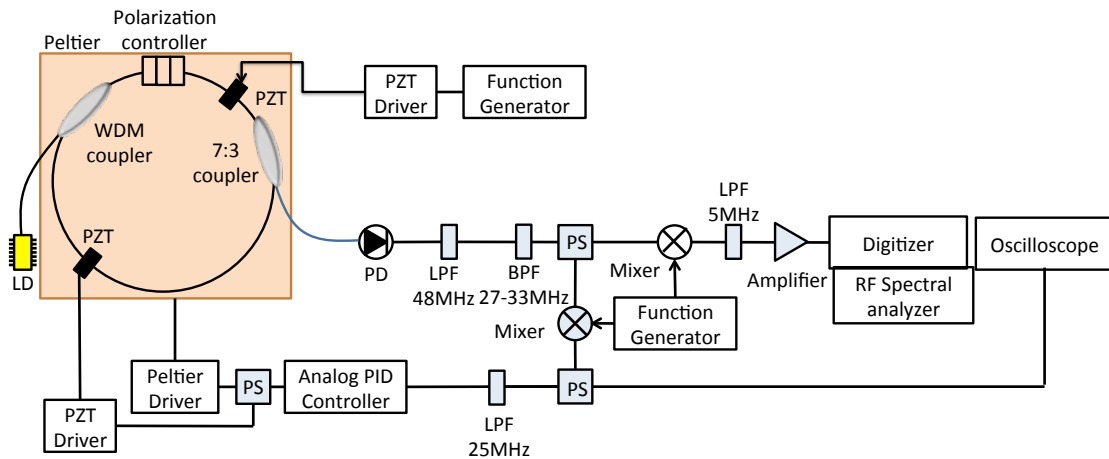


図 5.3 動的歪み測定装置図

繰り返し周波数安定化制御部では、まず光コム共振器の出力を高速検出器 InGaAs-PD で検出し RF 信号へ変換する。検出された信号はローパスフィルター (LPF) およびバンドパスフィルター (BPF) フィルタによって波形整形されパワースプリッター(PS)により制御用 f_{rep} 信号と計測用 f_{rep} 信号に分けられる。その後、制御用 f_{rep} 信号とファンクションジェネレータから出力された参照信号をミキサーに入力し、ミキシングを行った。ミキサーからの出力は制御信号として PI コントローラ (SIM980、SRS) に入力される。この時のミキサーの P 値は 50、I 値は 20 とした。制御信号はパワースプリッターにより温度制御用ペルチェ素子ドライバーおよび PZT ドライバーへ入力し、安定化制御を行った。

歪み計測部では、計測用 f_{rep} 信号とファンクションジェネレータから出力された参照信号をミキサーに入力し、ミキシングを行った。この時、事前に繰り返し周波数安定化制御を行うことで、ミキサーの出力は計測用 f_{rep} 信号とファンク

シヨンジエネレータからの参照信号との位相差に相当する電圧信号が得られる。ファンクシヨンジエネレータの出力信号の位相を適当に調整し、制御信号との位相差が $\pi/2$ になるよう位相の調整を行った。この状態で共振器長に動的歪みを与えられると、繰り返し周波数が周期的に変化することによる瞬時位相差が生じ、ミキサー部で位相/電圧変換される。この時、動的歪みの周波数はミキサー出力電圧変量の周波数と一致し、歪み量はミキサー出力電圧の振幅として現れる。即ち、得られた電圧信号をデジタイザーやRFスペクトルアナライザー、オシロスコープ等で計測し、周波数解析することで、与えた動的歪みの周波数特性および歪み量を計測することができる。

5.2.2 動的歪み計測

次に積層型PZTに動的歪みを与えた際の動的歪み計測を行った。

まず、動的歪みとして与えるPZT電圧とミキサーの出力信号強度の関係を調査した。本研究に用いる積層型PZTは電圧0-150[V]、周波数56[kHz]まで対応している。本実験では、動的歪みの基本計測能を評価するため、PZTに付加する周波数を1[kHz]、電圧オフセットを10[V]とし、振幅を0.1[Vp-p]~0.5[Vp-p]に変化させた。また、動的歪みを反映したミキサーの出力をデジタイザーによって時間波形を取得し、フーリエ変換した際の歪み変調周波数における信号強度を取得した。実験結果を図5.4に示す。

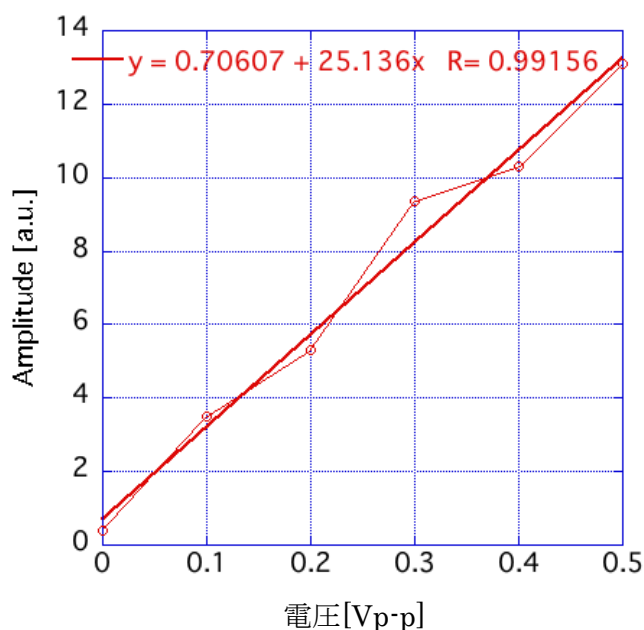


図 5.4 PZT 微小電圧動的歪み測定

図 5.4 から、非常に高い線形性を得ることができたことがわかる。また、設定可能な PZT の最小振幅電圧である 0.1 [V_{p-p}]においても歪みの周波数を計測することができた。これは図 5.2 と式 5.1 より、3.0 [nm]の共振器長変化に対応する。即ち、測定領域 PZT を接着剤で固定した 20 [mm]とした場合、ひずみは 0.15 [μstrain]となる。

5.3 動的ひずみの周波数特性

図 5.5 に PZT によって共振器に与える動的歪みの強度はオフセット 10 [V] 振幅 20 [V_{p-p}]のまま周波数信号を 1 [kHz]~ 2 [kHz]まで変化させた周波数特性を示す。図 5.5 より与える一定変位量の振幅を与えても、計測される信号強度は反比例的に低下していることがわかる。

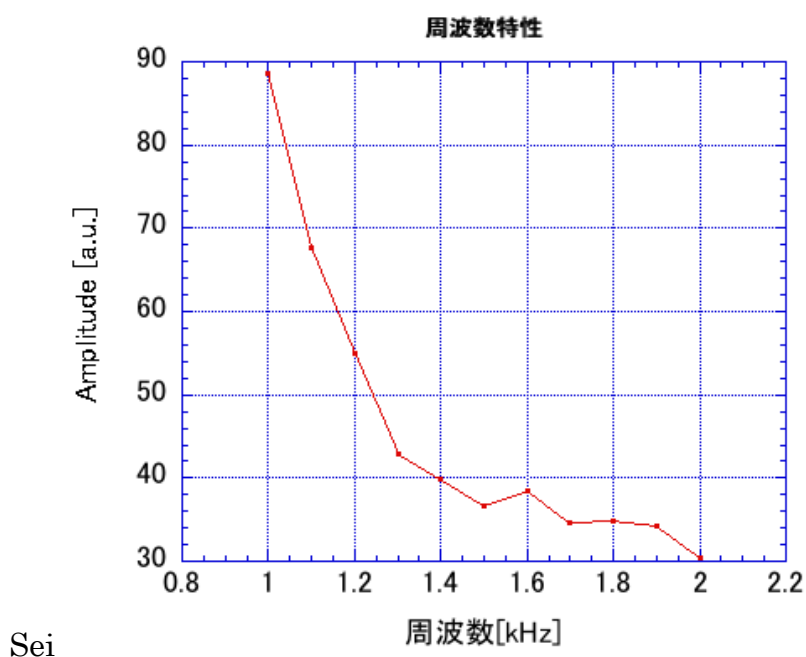


図 5.5 動的ひずみの周波数特性

本研究の動的歪みの測定は繰り返し周波数とファンクションジェネレータのミキシング信号を計測していた。これは動的歪みによる位相変調を計測するためである。PZT により変調された光コム共振器の出力光強度を、

$$I_{mr} = A_r \cos \varphi$$

であるとする。この時、 φ は光コム共振器の出力の位相である。光コム共振器の

基本繰り返し周波数を ω_r 、PZTにより変調を与える変調周波数を

$\bar{\omega}_a$: 振幅強度

ω_a : 周波数

$$\omega_s = \bar{\omega}_a \cos \omega_a t$$

とおく。この時、変調後周波数 ω_m は、

$$\begin{aligned} \omega_m &= \omega_r + \omega_s \\ &= \omega_r + \bar{\omega}_a \cos \omega_a t \end{aligned}$$

となる。即ち、光コム共振器の出力の位相は、

$$\varphi = \int_0^t \omega_m dt$$

と表せる。そのため、光コム共振器の出力光強度は、

$$I_{mr} = A_r \cos \left[\int_0^t \omega_m dt \right]$$

である。 ω_r を定数とすると、

$$\begin{aligned} I_{mr} &= A_r \cos \left[\omega_r t + \int_0^t \bar{\omega}_a \cos \omega_a t dt \right] \\ &= A_r \cos \left[\omega_r t + \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) \right] \end{aligned}$$

と表せる。

一方で、シンセサイザーの信号を

$$I_{syn} = A_{syn} \cos(\omega_{syn} t + \varphi)$$

とすると、ミキサからの出力は、

$$\begin{aligned} I_{mix} &= I_{mr} \cdot I_{syn} \\ &= A_r \cos \left[\omega_r t + \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) \right] \cdot A_{syn} \cos(\omega_{syn} t + \varphi) \\ &= \frac{A_r A_{syn}}{2} \left[\cos \left\{ \omega_r t + \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) + \omega_{syn} t + \varphi \right\} \right. \\ &\quad \left. + \cos \left\{ \omega_r t + \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) - (\omega_{syn} t + \varphi) \right\} \right] \end{aligned}$$

となる。 $\omega_{syn} = \omega_r$ であれば、

$$I_{mix} = \frac{A_r A_{syn}}{2} \left[\cos \left\{ 2\omega_r t + \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) + \varphi \right\} + \cos \left\{ \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) - \varphi \right\} \right]$$

ここで、LPF を用いて差周波成分で第2項の部分のみ取り出す。

$$I_{mix,LPF} = A' \cos \left\{ \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) - \varphi \right\}$$

ただし、

$$A' = \frac{A_r A_{syn}}{2}$$

とする。取り出された差周波成分は

$$I_{mix,LPF} = A' \cos \left\{ \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) - \varphi \right\}$$

で表される。上式において変調数端数 $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ であれば

$$I_{mix,LPF} = A' \sin \left\{ \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) \right\}$$

と変換することができる。

一般的に θ が微小であるとき

$$\sin \theta \simeq \theta$$

とできる。

よって $\frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t)$ が微小であれば $I_{mix,LPF}$ は

$$\begin{aligned} I_{mix,LPF} &\simeq A' \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) \\ &= \frac{A_r A_{syn}}{2} \frac{\bar{\omega}_a}{\omega_a} \sin(\omega_a t) \end{aligned}$$

と近似できる。

よって変調を与える周波数が高周波になると強度は反比例的に減少する。このことから、図 5.5 で得られた動的歪みの周波数特性は、理論値とよく一致していることがわかる。

以上より、本研究で提案した光コムの歪み/RF 周波数変換機能を利用した歪み計測が可能であることが明らかとなった。

6章 結言

本研究では、光コム共振器の「外乱/RF 周波数変換機能」による動的/静的ひずみ計測手法を開発した。はじめに、外乱/RF 周波数変換機能について従来の歪み計測を踏まえて説明した。次に、ひずみを計測する上で最適なファイバー光コム共振器を持つレーザーの設計および製作を行った。その結果、繰り返し周波数 26 [MHz]、平均出力 10 [mW]の光コム共振器を得ることができ、その基本特性を評価した。そして、共振器の繰り返し周波数の安定化制御として温度調整用箱の作成および構築を行った。最後に、製作した光コム共振器を用いて、積層 PZT による歪みに対する繰り返し周波数の応答を計測した。その結果 PZT による歪みと繰り返し周波数を変化の関係を明らかにした。以上のことから、本研究では光コム共振器の「外乱/RF 周波数変換機能」による動的/静的ひずみ計測の原理確認を行い、その有用性を明らかにすることができた。

しかし、定量性および再現性の評価はまだ不十分である。特に、今回製作した光コム共振器が安定した発振が得られないことがあり、測定結果の信頼性を向上させる観点からも、安定した光コム共振器の製作およびそれによる再実験が求められる。その際、光コム共振器の安定性に大きく寄与する分散値を再検討する必要があると考えられる。分散値はデータシートがなく推定で行っているため、計算にズレが生じている可能性がある。今後は、光コム共振器を再検討していくことで、より高精度な光コムによる歪み計測を行う。

以上のことから、本研究では光コム共振器の「外乱/RF 周波数変換機能」による動的/静的ひずみ計測手法を提案し、高精度な歪み測定が可能であることを示した。光コム共振器の「外乱/RF 周波数変換機能」は、外乱を光コムのもつ光周波数情報へ変換し、さらに測定が高精度かつ容易な RF 周波数へ変換する点がポイントである。これにより、従来法よりも大幅な機能改善が見込まれる。また、外乱は歪み以外（疎密波、屈折率など）にも適用することなどが可能となり、様々な応用展開が見込まれる。今後、光コムによる外乱センサーが発展することで、多くの分野で有力な手法になると考えられる。

参考文献

- [1] Scott S. A. Diddams et al., “ Direct Link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb”, *Phys.Rev.Lett.* **84**, (2000)
- [2] Hajime Inaba, Yuta Daimon, Feng-Lei Hong, Atsushi Onae, Kaoru Minoshima, Thomas R. Schibli, Hirokazu Matsumoto, Masaaki Hirano, Toshiaki Okuno, Masashi Onishi, and Masataka Nakazawa “Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb”, *Opt. Express*, **14**, (2006).
- [3] 南茂夫,木村一郎 “初めての計測工学” 講談社 (1999)
- [4] 住村和彦,西浦匡則 “ファイバーレーザー -基礎編- ”, オプトロニクス社 (2011)
- [5] 小林喬郎 “固体レーザー”, 学会出版センター (1997)
- [6] J.herrmann, B. Wilhelmi ”超短光パルスレーザー”,共立出版株式会社(1991)
- [7] D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett “60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti: sapphire laser”, *Opt. Lett*, **16**, (1991)
- [8] Jun Ye, Steven T. Cundiff “Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications”, Springer (2005)
- [9] 井原敦之 “高安定ファイバコムによるテラヘルツ計測の高度化”

