

ファイバー光コム共振器の外乱/周波数変換を用いたひずみ計測に関する研究

機械工学科 増岡 孝

1. 緒言

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。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、いずれの手法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)と電氣的周波数(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, 1012 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. 原理

光コム技術を用いた歪み測定システムの原理図を図 1 に示す。本研究では、光コムを生成するレーザーシステムを構築し、その一部を歪みセンサーとして用いた。図 1 のルート A が光コムを生成する共振器となる。

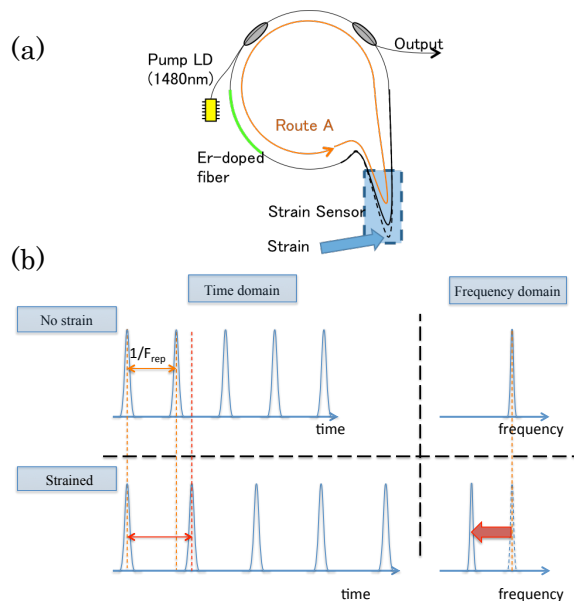


Fig. 1 Principle of strain sensing with optical-combs

光コム共振器からの出力は、一定の間隔で繰り返す超短パルス光が出射される(繰り返し周波数=モード同期周波数=frep)を示す。これをフーリエ変換の関係にある周波数領域で観察すると、多数の安定な光周波数モード列が frep 間隔で規則的に櫛(コム)の歯状で並んだ構造を示す。本研究では、低周波(100 MHz 以下)で一般的な周波数測定機器で計測や取り扱いが容易なコム間隔 frep に着目する。ファイバー光コムはリング型ファイバー共振器を有しており、そのコム間隔 frep 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。光コム共振器では、frep が十分に安定な状態であるため、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 frep が高感度かつ高速に変化する(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。

3. 実験装置及び実験方法

図 2 に実験の装置図を示す。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, frep=27 MHz, 光学的共振器長 $nL=11.27$ m)を用いた[3]。本実験では、PZT を用いてファイバー共振器長を静的変化、また周期的

変化させることにより、静的/動的歪みを付与した。測定領域はPZTを接着剤で固定した20 [mm]とした。静的歪み(図2緑部)、動的歪み(図2青部)に対する計測手法を以下に示す。

静的歪みの計測では、光コム共振器からの出力を直接周波数カウンタで計測した。これにより、特定の歪みが与えられた際のfrepの変化から、歪みの定量的計測を行った。動的歪みの計測では、より高感度化を実現するため、歪み/位相変換計測を行った。その際、平均frepを一定にする制御システムと位相計測システムを構築した。

平均frep制御システムでは、まず光コム共振器からの出力光を高速光検出器で検出し、frep情報を電気信号へ変換する。得られた信号は、フィルターとアンプで波形整形された後、周波数発生器からの参照信号(26 MHz)とミキシングされる。ミキシングすると、frep信号と参照信号との差周波が出力される。この差周波を用いて光共振器中の温度調整用Peltier素子と共振器長制御用PZTへフィードバック制御することで、frepが参照信号周波数に位同期される。この際、制御システムの制御帯域は10 Hzとした。

位相計測システムでは、前述と同様にfrep信号と参照信号をミキシングする。このときfrep制御システムの制御帯域より十分高い周波数外乱(>>10 Hz)が加わると、frepが参照信号と同期できず、ミキシングされた出力に変化が見られる。この変化は、外乱周波数と同じ周波数で変化し、またその大きさはfrep信号と参照信号の位相差を表す。この信号をサンプリングレート250MHzのデジタルライザー及びRFスペクトラム・アナライザーで計測することで、外乱の高感度検出を実現した。

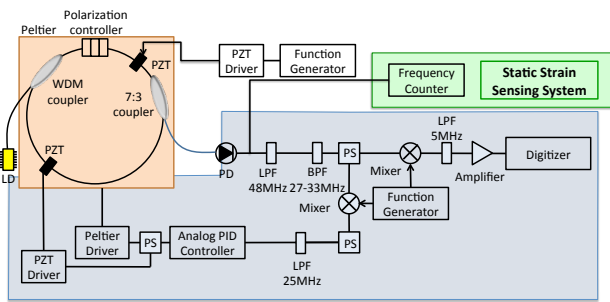


Fig. 2 Experiment setup

4. 実験結果

4.1 静的歪みの計測

まず、PZTにより与えた静的歪みの計測を行った。PZT

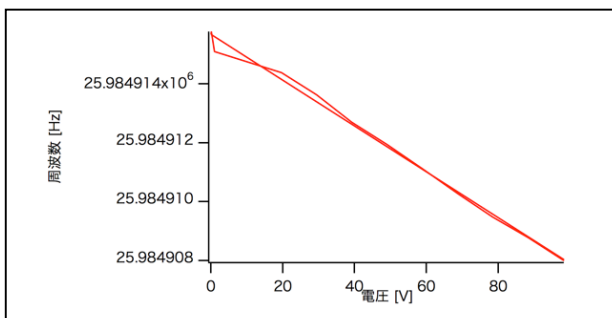


Fig 3 Relation of repetition frequency and static strain

与えた電圧とfrep変化の関係を図3に示す。

グラフより傾き-0.07 [Hz/V]の線形関係が得られた。また、最大繰り返し周波数変量は、8.68 [Hz] (PZT電圧範囲:0~100 [V])であった。このことから、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]であり、最大歪みは0.0018であるといえる。

4.2 動的歪みの計測

次に、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ルラ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 [Vp-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。

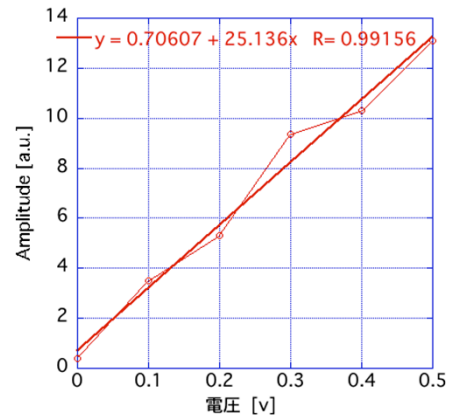


Fig 4 Dynamic strain measurement with small voltage

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。

5. 考察

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。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性を明らかにした。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。

6. 参考文献

- 1) Scott. 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, et al., “Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust ant low-noise fiber based frequency comb”, Opt. Express, 14, (2006)