

# ファイバー光コム共振器の構築とそれを用いたひずみ/超音波計測に関する研究

## Strain and ultrasonic sensing with a fiber based optical comb cavity

機械創造システム工学コース 小倉 隆志 (Takashi Ogura)

Optical comb is an advanced light source improving the accuracy of frequency metrology. However, multi-dimensional (time, space, frequency, etc.) and multi-functional properties of optical comb could not be fully utilized for practical applications. Therefore, we proposed new approaches focusing on disturbance/radio-frequency conversion in fiber based optical comb cavity. For proof of principle, we demonstrated static and dynamic strain sensing with fiber based optical comb cavity by combination with the null method based on the feedback control of a repetition frequency. Furthermore, we applied disturbance/radio-frequency conversion to ultrasonic sensing by detecting heterodyne signal between repetition frequency and standard frequency. These proposed approaches will open a new door for innovative applications of optical comb.

### 1. 緒言

光コムを用いた光周波数計測[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、光格子時計の絶対周波数計測[2]や超精密分光[3]に用いられてきた。これは、光コムの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、光コムを用いた光応用計測は光周波数計測・分光計測・距離計[4]等と少なく、光コムの可能性が未だ十分には開拓されているとは言い難い。

そこで、本研究ではファイバー光コム共振器[5]独自の『外乱/周波数変換機能』に着目した新しいセンシング手法の開発を目指す。図1に示す光コム共振器は、光ファイバーベースのリング型共振器構造を有しており、そのコム間隔  $f_{rep}$  は

$$f_{rep} = \frac{c}{nL} \quad (1)$$

で与えられる。この時、 $c$  は光速、 $n$  はファイバーの屈折率、 $L$  は共振器長である。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・広ダイナミックレンジ計測が可能な物理量であるので、各種物理量の精度やダイナミックレンジを大幅に向上させる可能性がある。

本論文では、周波数変換する物理量として、ひずみと超音波をターゲットとした。ひずみ計測は材料の応力評価など極めて重要であり、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。いずれも重要な機械計測手法であるが、更なる高精度化や高速化が強く望まれている。そこで、ファイバー光コム共振器の外乱/周波数変換機能により、ひずみと超音波を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。まず、光コム間隔のフィードバック制御に基づいた零位法により、静的ひずみから数百 Hz の動的ひずみの計測を行った。次に、計測系の高周波化を試みることで、MHz オーダーの超音波計測を行った。

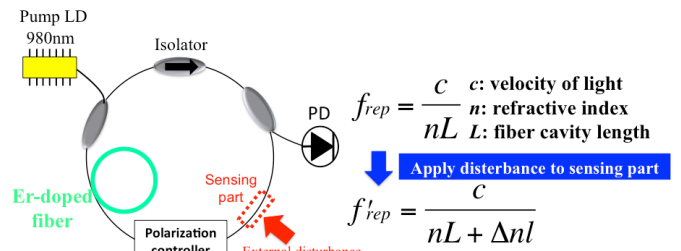


Fig. 1. Principle of disturbance/radio-frequency conversion in fiber based optical comb cavity

### 2. ファイバー光コム共振器を用いたひずみセンシング

図2にひずみセンシングのため構築した実験装置を示す。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エルビウム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) [5]を用いた。まず、共振器からの出力を光検出器(PD)へ入射し、 $f_{rep}$  信号を取得する。取得した  $f_{rep}$  信号は、基準信号( $f_{ref}$ )とミキサによりヘテロダインミキシングされ、 $f_{rep}$  信号と基準信号との位相差が出力される。出力された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となるよう制御用PZT(Control PZT:  $f_{rep}$  可変範囲=50Hz、周波数応答=1kHz)へ電圧が加えられる。このPZTには共振器中のファイバーを巻き付けているため、PZTに電圧が加わると、共振器の長さが変化する。すなわち、共振器

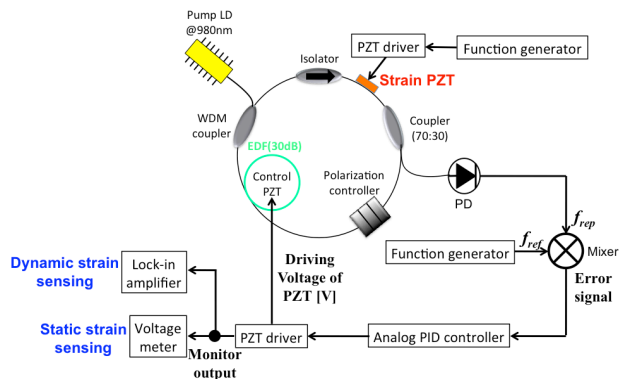


Fig. 2. Experimental setup of strain sensing

長さを PZT で制御することで、 $f_{rep}$  周波数安定化を実現している。

実験では、共振器中のファイバーにひずみ付加用の積層 PZT(Strain PZT: 長さ=20mm、最大変位=17.4 $\mu$ m、周波数応答>1kHz)を接着した。そして、この PZT に電圧を加える事で、共振器中のファイバーへ静的/動的ひずみを与えた。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、この電圧を電圧計もしくはロックインアンプにより計測した。

実験結果を図 3 に示す。図 3(a)は静的ひずみを与えた結果であり、変位量と制御電圧とが良好な線形性を示した。また、最小二乗法による直線フィッティングから、直線の傾きは 273mV/ $\mu$ m となった。この傾き 273mV/ $\mu$ m と制御電圧測定分解能 10mV と最大制御電圧値 10V より、測定可能な最小変位は 0.037 $\mu$ m、最大変位は 37 $\mu$ m となる。さらに、ひずみ付加範囲を Strain PZT の長さ 20mm とすると、測定可能な最小ひずみと最大ひずみはそれぞれ、1,85 $\mu$  $\epsilon$  と 1850 $\mu$  $\epsilon$  となった。ひずみゲージのひずみ感度がおおよそ  $10^{-6}$   $\epsilon$  であるので、本手法はひずみゲージと同程度のひずみ感度がある。さらに、分解能の高い電圧計(6桁)を使用することで、高感度化が可能である。また、図 3(b)は動的ひずみ(1Hz~3kHz)を与えた結果である。この結果から、動的ひずみに対する周波数応答は 200Hz であり、この値は、 $f_{rep}$  周波数安定化制御系の応答と一致する。したがって、 $f_{rep}$  周波数安定化制御系を高速化[7]することにより、数百 kHz の動的ひずみが計測可能になると思われる。

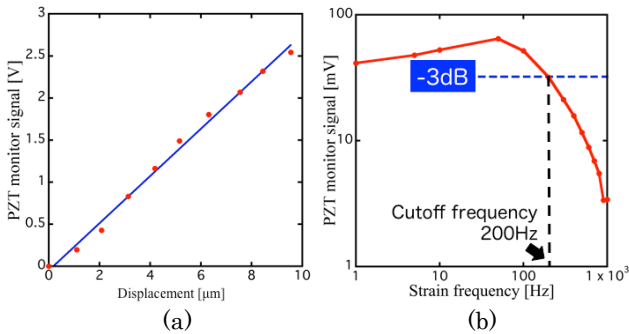


Fig. 3. (a) Relationship between displacement and PZT monitor signal. (b) Frequency response of the dynamic strain sensing

### 3. ファイバー光コム共振器を用いた超音波センシング

前述したひずみセンシングの手法は、計測可能な動的ひずみの周波数が  $f_{rep}$  周波数安定化制御の周波数応答によって制限されるため、超音波のような MHz の動的外乱を計測することが困難である。そこで、高周波信号が計測できるよう、図 2 のセットアップを改良した。図 4 に改良した超音波センシング用セットアップを示す。改良点は、 $f_{rep}$  信号と基準信号とのヘテロダインミキシング出力を直接センシングに利用している点である。計測原理を説明する。まず、超音波がファイバーへ付加されると、 $f_{rep}$  信号に変調がかかり、 $f_{rep} \pm f_s$ (超音波の周波数)の周波数にサイドバンドが発生する。このサイドバンド信号と  $f_s$ (基準信号

$=f_{rep}$ )をヘテロダインミキシングすることで、ミキサーから  $\pm f_s$  の周波数信号が出力される。したがって、ヘテロダインミキシング後の信号を計測することで、超音波の計測が可能となる。この計測手法の周波数応答は  $f_{rep}$  周波数安定化制御の周波数応答によって制限されないため、計測信号の高周波化が期待される。

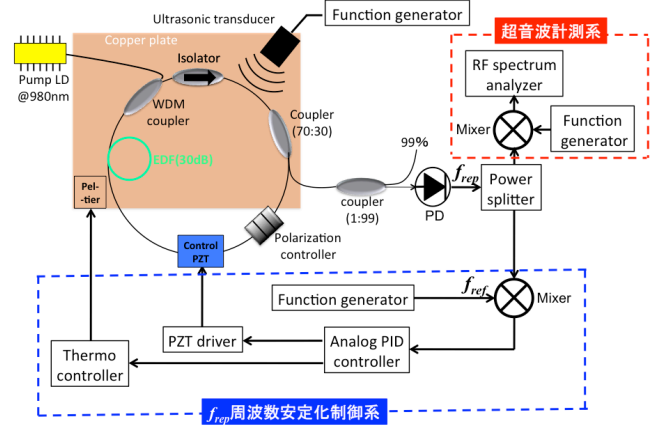


Fig. 4. Experimental setup for ultrasonic sensing

図 5 に超音波トランスデューサ(共振周波数 9MHz)によって発生した超音波の計測結果を示す。図 5(b)において、6~12MHz の超音波を SN 比 40~60dB にて計測した。また、原理的に計測可能な超音波周波数は、ファイバー・PD・ミキサーの周波数応答帯域によって制限される。

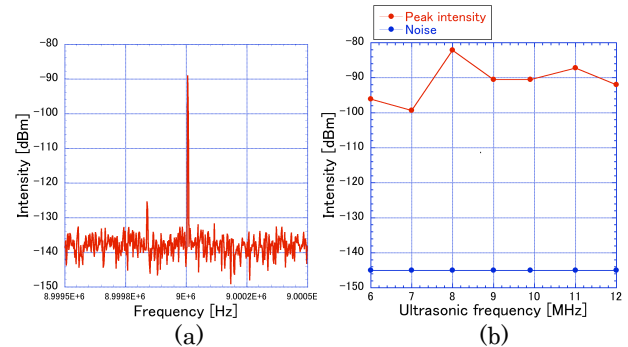


Fig. 5. (a) Experimental result of 9MHz ultrasonic sensing.

(b) Experimental result of 6MHz-12MHz ultrasonic sensing.

### 4. 結言

本研究では、ファイバー光コム共振器の外乱/周波数変換機能を用いたひずみ及び超音波計測を行った。提案手法の内、1 手法はひずみゲージと同等のひずみ感度を実証し、もう 1 手法は 12MHz までの超音波計測を実証した。本研究の成果により、光コムの新規応用展開加速が期待される。

### 参考文献

- 1) S.A Diddams *et al.*, Phys. Rev. Lett **84**, 5102(2000).
- 2) M. Takamoto *et al.*, Nature **435**, 03541 (2005)
- 3) K. Takahata *et al.*, Phys. Rev. A **80**, 032518 (2009)
- 4) K. Minoshima *et al.*, Applied Optics **39**, 5512 (2000)
- 5) H. Inaba *et al.*, Optics Express **14**, 5223 (2006)
- 6) L. V. Wang *et al.*, Science **335**, 1458 (2012)
- 7) Y. Nakajima *et al.*, Opt. Express **18**, 1667 (2010)