

# ファイバー光コム型ひずみセンサーに関する基礎研究

## Basic study of fiber-comb based strain sensor

○学 増岡 孝 (徳島大), ◎正 安井 武史 (徳島大), 正 南川 丈夫 (徳島大)

Takashi MASUOKA, Tokushima University, 2-1 Minami jousanjima, Tokushima, Tokushima, 770-8506 Japan

Takeshi YASUI, Tokushima University, 2-1 Minami jousanjima, Tokushima, Tokushima, 770-8506 Japan

Takeo MINAMIKAWA, Tokushima University, 2-1 Minami jousanjima, Tokushima, Tokushima, 770-8506 Japan

**Key Words:** Strain sensor, Laser cavity, Optical-comb, Sensing cavity

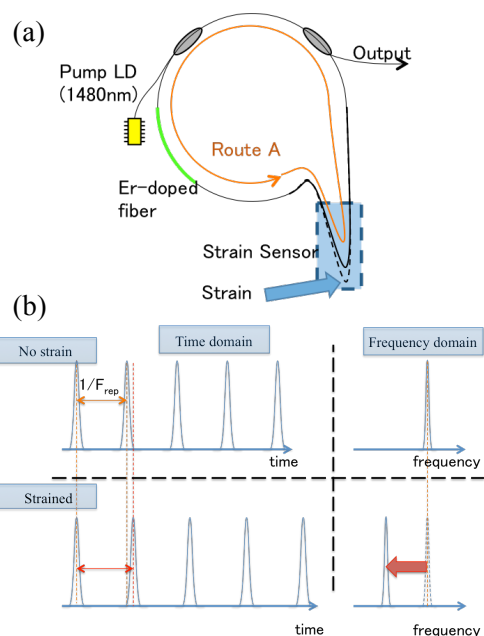
### 1. 緒言

光コム技術とは、光の周波数 (数百 THz) と電気の周波数 (RF: Ratio-frequency, 数十~100 MHz) を精密につなぐ画期的手法である<sup>(1)(2)</sup>。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  $\mu$ s~)。そのため、光コム技術は、瞬刻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。

我々は、光コムの特徴を活用した新たな光コム技術の応用として、高精度・高感度・高速な歪み計測法を提案する。従来の歪み計測法は、「歪みを電圧や電流といった強度信号へ変換」する電気的手法が用いられてきた。この手法には金属や半導体の電気抵抗の変化を計測することによってひずみを測定する手法や、ポリフッ化ビニリデン (PVDF)、圧電セラミックなどの圧電素子を用いた手法が代表的である。電気的手法では、微弱な電圧や電流といったアナログ強度信号を計測するため、ノイズの影響を受けやすい。そのため、感度が低下する、ノイズの影響を下げるために長時間の測定が必要といった制限が伴った。

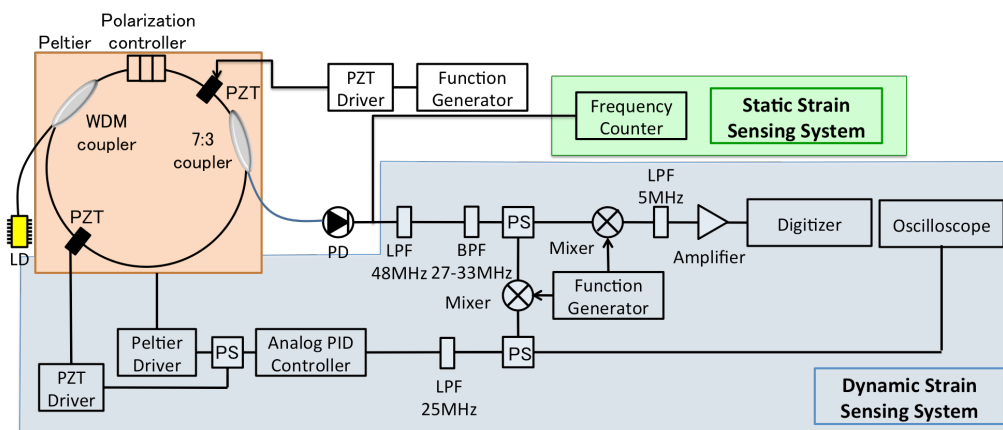
光コム技術により「歪みを光で検出し、RF 周波数に変換」することができれば、極めて高精度かつ高速な歪み測定が可能となるはずである。そこで本研究では、光コム技術を用いた高速・高感度な歪み測定の原理検証を行った。

### 2. 測定原理



**Fig 1 Principle of strain sensing with optical-comb.**

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 2 Experiment Setup**

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射出される（繰り返し周波数=モード同期周波数= $f_{rep}$ ）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  $f_{rep}$  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  $f_{rep}$  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  $f_{rep}$  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。光コム共振器では、 $f_{rep}$  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  $f_{rep}$  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

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,  $f_{rep}=27$  MHz）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。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  $f_{rep}$  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  $f_{rep}$  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  $f_{rep}$  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、 $f_{rep}$  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、 $f_{rep}$  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、 $f_{rep}$  が参照信号周波数に位相同期される。この際、制御用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  $f_{rep}$  信号と参照信号をミキシングする。外乱が入力されていない場合、 $f_{rep}$  制御システムにより  $f_{rep}$  信号と参照信号は同期されているため、ミキシングされた出力に変化は見られない。しかし、 $f_{rep}$  制御システムの制御帯域より十分高い周波数外乱 ( $\gg 10$  Hz) が加わると、 $f_{rep}$  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  $f_{rep}$  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 250 MHz のデジタルサイザー及び 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。

### 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。図 3 に与えた歪みと周波数変化率の関係を示す。グラフより傾き  $2.397 \times 10^{-8} \mu\text{m}^{-1}$  の線形関係が得られた。このことから、光コム共振器による静的歪み計測が可能であることを実証した。

#### 4.2 動的歪みの計測

次に、正弦波状駆動電圧信号（振幅  $\pm 20$  V、オフセット 10 V）を PZT に加えた際の動的歪み計測を行った。（図 4a）に歪み周波数 10 kHz と（図 4b）に 50 kHz の場合の結果を示す。

10 kHz において SN 比 24.3 dB, 50 kHz において SN 比 34.6 dB の信号を確認することが出来た。またほかの周波数でも同様に信号が確認され、動的歪みを計測することが出来た。

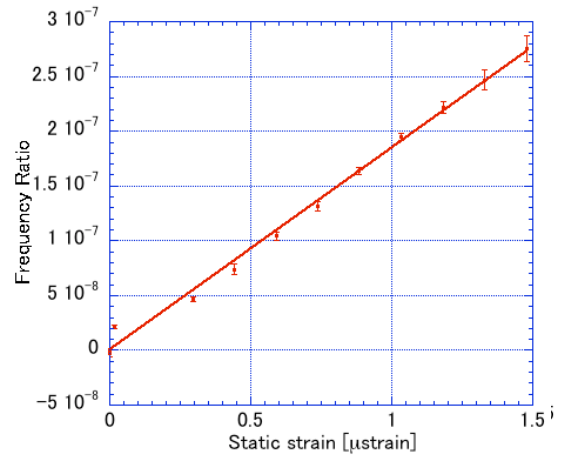


Fig 3 Relation of repetition frequency and static strain

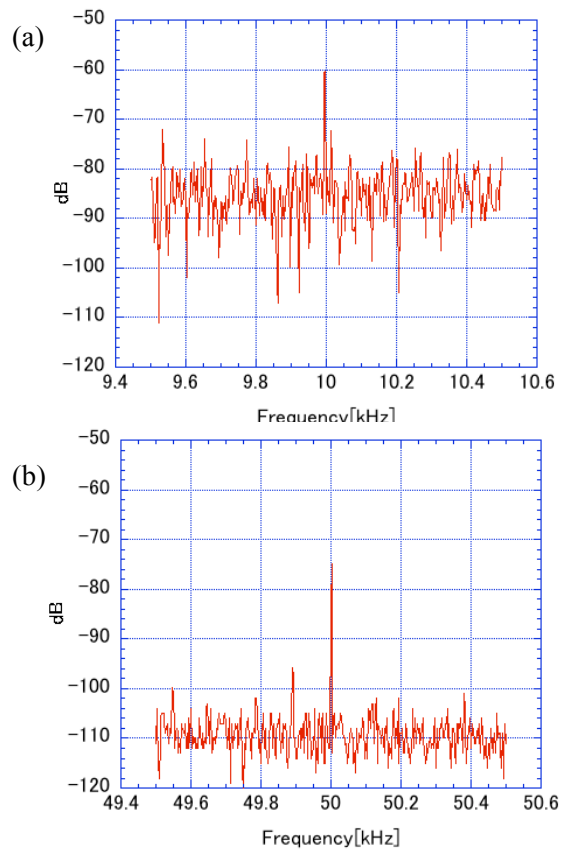


Fig 4 RF spectrum of mixing output by applying dynamic strain at 10 kHz (a) and 50 kHz (b)

### 5. 結言

本研究では、光コムの繰り返し周波数とファイバー共振長の関係を利用することで、静的/動的歪みを RF 帯の周波数情報として直接計測する手法を提案し、PZT によって生成した静的歪み、および動的歪みが計測可能であることを示した。

### 6. 参考文献

- (1) S. A. Diddams et al., “Direct Link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb”, Phys.Rev.Lett. 84, 5102- 5105(2000)
- (2) H. Inaba et al. “Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust ant low-noise fiber based frequency comb,” Optics Express 14, 5223 (2006).