

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13384

研究課題名（和文）高感度歪みセンシング光コムの開発と光音響イメージングへの応用

研究課題名（英文）Development of sensitive strain-sensing optical comb and its application for photoacoustic imaging

研究代表者

安井 武史（Yasui, Takeshi）

徳島大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号：70314408

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、光音響イメージングにおける電気的検出法の制限を本質的に解消するため、光周波数コムファイバー共振器を光学的音響センサーとして利用した。光音響波によるファイバー共振器の歪みを、高感度かつ高速に周波数信号へと変換し、周波数標準に基づいて超精密計測を行った。ひずみ計測及び超音波計測に適用し、その有用性を実証した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we proposed use of a fiber comb cavity as an optically photoacoustic sensor to overcome the limitation of electrically photoacoustic sensor in photoacoustic imaging. The distortion of the fiber comb cavity was converted into a frequency signal, and then was determined by frequency measurement based on a frequency standard. Effectiveness of the proposed method was demonstrated by strain measurement and ultrasound measurement.

研究分野：光コム計測、テラヘルツ計測、非線形光学顕微鏡

キーワード：応用光学・量子光工学 量子エレクトロニクス 光コム ひずみ計測 光音響イメージング

1. 研究開始当初の背景

光イメージングと超音波イメージングは、『生きたありのままの状態』で生体内部を可視化する手法として広く利用されてきた。光イメージングでは、生体分子との相互作用や蛍光プローブを用いることにより、高い空間分解能での選択的分子イメージングが可能だが、生体組織における光散乱が生体深部観察を困難としている。一方、超音波イメージングを用いると、散乱効果が光より2-3桁減少するため生体深部観察が可能になるが、分子識別性を有さず、空間分解能も低い。

近年、光と超音波のハイブリッドなイメージング法として、『光音響イメージング』が注目を集めている。光音響イメージングでは、光を生体に照射時、光エネルギーを吸収した生体(蛍光)分子が熱を放出し、その熱による体積膨張で発生する音響波(超音波)に基づいて画像化を行う。すなわち、分子選択に光を用い、信号検出に超音波を用いるので、光イメージングと超音波イメージングの長所を融合できる。これまでの動物実験において、生体深度数十mmの範囲内の組織内血管分布が数百μm程度の空間分解能で可視化されている。しかし、この技術を臨床レベルに引き上げるためには、生体深部における空間分解能の更なる向上が強く望まれる。

光音響イメージングで高い空間分解能を実現するためには、光音響波の高周波成分を感度良く検出する必要があるが、高周波の光音響波は直ぐに減衰し、生体内伝搬距離が極端に短くなる。従来の電気的音響トランスデューサーでは、低い検出感度と低い周波数応答が、生体深部における高い空間分解能実現を困難としていた。この問題を解消するためには、光音響波の高周波成分を高感度に計測する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、電気的検出法の制限を本質的に解消する光学的アプローチとして、光周波数コム(光コム)のファイバー共振器を光学的音響センサー(センシング光コム)として利用する。ここでは、ファイバー光コム共振器そのものをセンサーとして利用し、光音響波によるファイバー共振器の歪みを、高感度かつ高速に周波数信号へと変換し、周波数標準に基づいて超精密計測する。光音響波信号の高周波成分を高感度かつ高精度に周波数変換して検出することにより、生体深部における空間分解能を大幅に向上させることを目指す。

3. 研究の方法

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(繰返し周波数=モード同期周波数= f_{rep})を示す一方で(図1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} 間隔で規則的に梳(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1下側)。これを光コムと呼ぶ。光コムは、位相が揃った数万台の波長安定化CWレーザー光が等間隔で並んだ集合体と見なすことができる。したがって、光コムを構成する光周波数モード列の絶対周波数 ($f_m = f_{ceo} + mf_{rep}$, f_{ceo} : キャリア・エンベロープ・オフセット周波数, m : 光周波数モード次数) を、 f_{ceo} と f_{rep} の制御により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『光周波数の物差し』として利用できる。従来は、光周波数モードの絶対周波数 f_m に基づいた超精密分光や絶対周波数計測といった研究が主流であったが、本研究では、低周波(100MHz前後)で取り扱いが容易なコム間隔 f_{rep} に着目する。

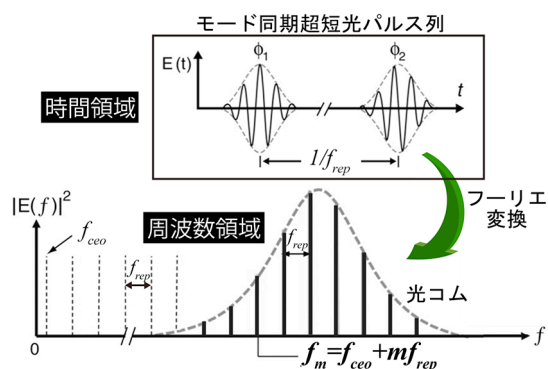


図1 光コムの時間波形(上側)とスペクトル波形(下側)

ファイバー光コムは図2に示すような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。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(センシング光コム)。この概念を光音響イメージングに適用する場合には、ファイバー・コム共振器の一部を光学的音響センサーとして光音響波イメージング装置に組み込み、光音響波によって生じたファイバー共振器の歪みを、周波数 f_{rep} で抽出する(歪み/周波数変換)。これにより、光音響波を、周波数という物理量で、高感度・高精度・高速に取得することが可能になる。

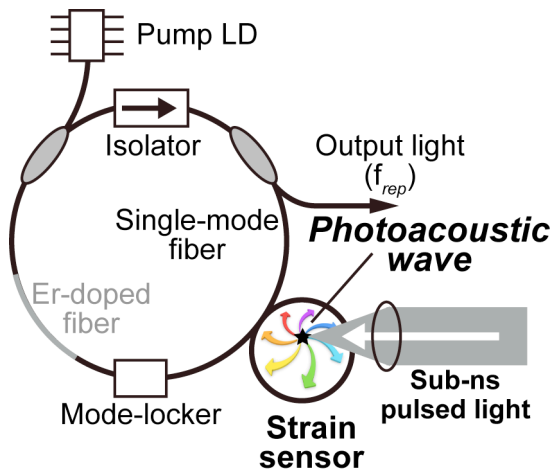


図2 歪みセンシング光コム

4. 研究成果

(1) 歪みセンシング光コムの開発

まず、センシング光コムの原理確認実験として、センシング光コムのファイバー共振器設計・開発及び歪みセンシングへの応用を行った。ファイバー共振器設計・開発に関しては、安定なモード同期動作および光コム間隔の周波数安定性という観点から検討を行った。その結果、モード同期動作機構として非線形偏波回転を利用し、リング型共振器構成を異常分散のソリトン型とすることにより、センシング光コムとして利用可能な基本特性を得られることを確認した。図3は、レーザー共振器内分散を変化させた場合の光スペクトル波形を示しており、いずれにおいてもソリトン状態独特のスペクトル波形が得られている。

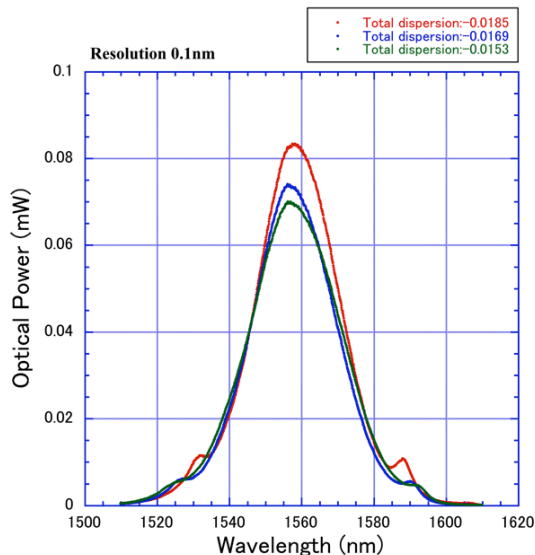


図3 センシング光コムの光スペクトル波形

次に、自作したセンシング光コムを、歪み計測に応用するための研究を行った。リング型ファイバー共振器の一部を歪み計測用センサーとして利用し、機械的歪みを印加した。まず、静的歪みに対する光コム間隔の線形応答性を確認し、 $\mu\epsilon$ オーダーの静的歪みの計測

が可能であることを確認した (図4)。

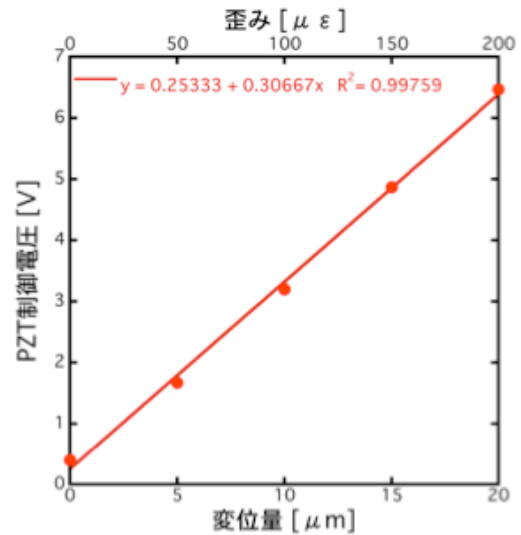


図4 歪みセンシング光コムの光スペクトル波形

更に、動的歪みの特性評価を行ったところ、180Hz までの周波数応答を確認した (図5)。これらの結果から、センシング光コムが静的及び動的歪みの高精度計測に利用可能であるとの結論を得た。

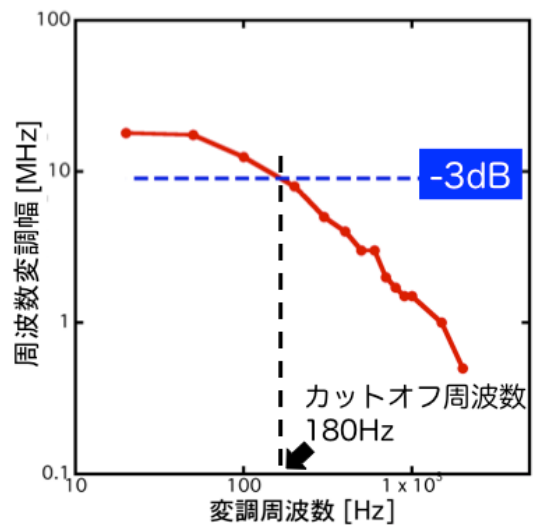


図5 歪みセンシング光コムの静的特性

(2) 超音波センシング光コムの開発

上述の静的歪み計測では良好な性能を得ることが出来たが、動的歪み計測では f_{rep} 周波数安定化制御系のフィードバック・ループにより、180Hz の周波数応答性に留まった。そこで、センシング光コムを高周波化し超音波計測へ拡張するために、 f_{rep} 周波数安定化制御系と並列に超音波計測系を導入した (図6)。

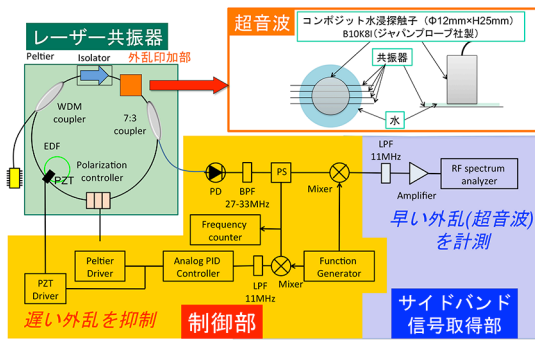


図6 超音波センシング光コム

f_{rep} 周波数安定化制御系では、センシング光コムにおける温度変化や機械的振動といった超音波よりも低周波の環境外乱を補正する。一方、ファイバー共振器と被測定超音波（周波数= f_s ）が相互作用すると、 f_{rep} に変調（強度変調もしくは位相変調）がかかり、 $f_{rep} \pm f_s$ の周波数にサイドバンドが発生する。 f_{rep} 周波数安定化制御系では、制御帯域不足のため、 $f_{rep} \pm f_s$ の信号を補正できないので、超音波計測系において、このサイドバンド信号と f_{rep} をミキシングすることで、 f_s の超音波信号が抽出できる。この手法により、9MHz の超音波信号を 40dB のダイナミックレンジで計測することに成功した（図7）。

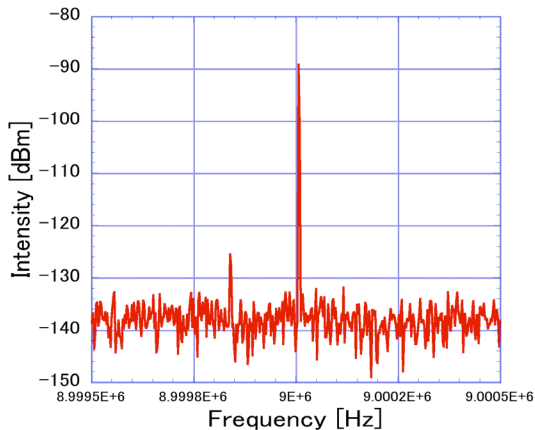


図7 超音波の計測

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計8件）

- ① 増岡孝, 小倉隆志, 南川丈夫, 中嶋善晶, 山岡禎久, 美濃島薫, 安井武史, "ファイバー型光周波数コムを用いた超音波センサーの開発," 第64回応用物理学会春季学術講演会, 2017/3/14, パシフィコ横浜（神奈川県・横浜市）。
- ② T. Minamikawa, T. Ogura, T. Masuoka, Y. Nakajima, Y. Yamaoka, K. Minoshima, and T. Yasui, "Optical-frequency-comb-based ultrasound sensor," BiOS2017 in Photonics West 2017, 2017/1/31, San Francisco (USA).

- ③ 増岡孝, 小倉隆志, 南川丈夫, 中嶋善晶, 山岡禎久, 美濃島薫, 安井武史, "光音響波検出のための RF 変換ファイバー光コムの開発," レーザー学会学術講演会第37回年次大会, 2017/1/8, 徳島大学（徳島県・徳島市）。
- ④ 増岡孝, 小倉隆志, 南川丈夫, 中嶋善晶, 山岡禎久, 美濃島薫, 安井武史, "光音響波検出のための RF 変換ファイバー光コムの開発," 第1回フォトニクス研究会「光の境界を開拓する!!」, 2016/12/2, 沖縄県青年会館（沖縄県・那覇市）。
- ⑤ 南川丈夫, 増岡孝, 小倉隆志, 中嶋善晶, 山岡禎久, 美濃島薫, 安井武史, "光コムセンシングキャビティによる超音波計測," Optics & Photonics Japan 2016, 2016/11/2, 筑波大学東京キャンパス文京校舎（東京都・文京区）。
- ⑥ 増岡孝, 小倉隆志, 南川丈夫, 中嶋善晶, 山岡禎久, 美濃島薫, 安井武史, "ファイバー光コム型超音波センサーに関する基礎研究," 第77回応用物理学会秋季学術講演会, 2016/9/15 朱鷺メッセ（新潟県・新潟市）。
- ⑦ 南川丈夫, 小倉隆志, 増岡孝, 中嶋善晶, 山岡禎久, 美濃島薫, 安井武史, "ファイバー光コム共振器によるひずみセンシング," 2016年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2016/9/8, 茨城大学（茨城県・水戸市）。
- ⑧ T. Yasui, T. Ogura, T. Minamikawa, Y. Nakajima, and K. Minoshima, "Strain Sensing with a Disturbance/RF-Converting Fiber Comb Cavity," Conference on Lasers and Electro-Optics 2016, 2016/6/6, San Jose (USA).

〔その他〕

ホームページ等

<http://femto.me.tokushima-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安井 武史 (YASUI, Takeshi)

徳島大学・大学院理工学研究部・教授

研究者番号：70314408

(2) 研究分担者

美濃島 薫 (MINOSHIMA, Kaoru)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20358112

山岡 禎久 (YAMAOKA, Yoshihisa)

佐賀大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80405274