

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月7日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04374

研究課題名(和文)光コム光源の導入による高速かつ高精度な分布型ファイバセンシング

研究課題名(英文) High-speed and high-precision distributed fiber optic sensing based on optical frequency comb

研究代表者

田中 洋介 (TANAKA, Yosuke)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20283343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光周波数コムと呼ばれる周波数間隔一定の多波長光を用いた高速かつ高精度なファイバセンシングの実現を目標として検討を開始した。この手法はブリュアン利得スペクトルが光源の周波数掃引なしで測定できるため、短時間測定が可能である。利得スペクトルの一括測定に加え、光周波数コムによる多モード誘導ブリュアン散乱を用いたセンシングでは、従来手法に対し最大で3桁の感度拡大が可能な測定系を実現した。また、本研究を進める中で関連するファイバセンシング技術として、光ファイバ回折格子を多点設置した高精度測定を着想し、実験による検証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では光周波数コムによる多モード誘導ブリュアン散乱光の発生と分布型光ファイバセンシング応用を中心に、関連する計測技術も含めて幅広く検討を行った。特殊な光ファイバを使うことなく、計測の測定感度が任意に制御可能な本手法は、今後、他のセンシング技術にも応用可能と考えられ、当該分野発展への貢献が期待される。同時に、本研究で検討した技術は、橋梁、堤防、ビル、航空機などの大型構造物体の状態監視に応用できることから、将来的には防災や安全の観点から社会に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：We started this study with the aim of realizing high-speed and high-precision fiber optic sensing by using optical frequency comb that is composed of multiple modes with an equal frequency spacing. The proposed method can perform measurement in short time, because the Brillouin gain spectrum is measured without scanning the frequency of the light source. In addition to simultaneous measurement of Brillouin gain spectrum, the optical sensing based on multimode stimulated Brillouin scattering was demonstrated to be able to perform measurement with a sensitivity three orders higher than the conventional methods. We have also successfully demonstrated multi-point precision fiber optic measurement using fiber Bragg gratings, which is a spin-off of this study.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光ファイバセンサ 光周波数コム 多モード光 ブリュアン散乱 光ファイバ回折格子 歪み計測 温度計測 曲げ計測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

橋梁、堤防、ビル、航空機などの大型構造物に光ファイバを埋め込み、それらの歪みや温度変化を監視する分布型ブリュアンセンシングは、防災や安全の観点から重要な技術である。このセンシング技術では、計測の精度と時間の両立が1つの問題となっていた。申請者らは、光周波数コムと呼ばれる周波数間隔が一定の多波長光を用いると、多数のスペクトルの並列処理により光源周波数の掃引なしに高精度かつ短時間測定が達成できると考え、研究計画を立案した。

2. 研究の目的

本研究は申請時において以下を目標とした。

(1)ブリュアン散乱発生のための光コム生成

光ファイバ内で誘導ブリュアン散乱を誘起するポンプ、プローブとなる光コムを生成する。これらは光ファイバ両端から入射する光で、安定にブリュアン散乱を起こすためには、互いの中心周波数差や周波数間隔が一定条件の下で安定な必要がある。また、ブリュアン散乱を引き起こすためには十分なパワーも必要となる。

(2)ブリュアン利得スペクトルの高速測定の実証

ブリュアン利得スペクトル(BGS: Brillouin gain spectrum)は、誘導ブリュアン散乱が発生可能な周波数範囲と散乱光の強さを与えるスペクトルである。光コムによるポンプ光、プローブ光によって、ブリュアンスペクトルの一括高速測定を実証する。

(3)分布型光ファイバセンシングの実証

実際に分布測定システムを構築し、温度、歪み計測システムとしての評価を行う。

3. 研究の方法

(1)ブリュアン散乱発生のための光コム生成

光変調器により単色レーザ光に深い変調を与えて、コム光を発生させた。この手法では、コム光のモード間隔が変調器に印加する電気信号の周波数で決まる。電気信号発生器の周波数は極めて安定なため、モード間隔の安定性が保証される。また、1つのレーザ光を2つの光路に分岐すると共に、一方の周波数を光変調器によってシフトさせ、それぞれポンプおよびプローブ用コム光生成の種光とした。ここでも、光変調器によるシフト周波数の安定性により、ポンプコム光とプローブコム光の相対的な周波数差は安定になる。

実験では、波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯のレーザ光源を用いた。このとき、BGS はポンプ光に対し約 11 GHz 低い周波数を中心に数 10 MHz の範囲に生じる。ポンプ光と BGS の中心周波数との差はブリュアン周波数シフト(BFS: Brillouin frequency shift)と呼ばれる。BFS が光ファイバの温度や歪みで変化することから、温度や歪みの計測ができる。ポンプ光、プローブ光の中心周波数差は BFS 付近にした。また、ポンプ光スペクトルの周波数間隔は、BFS より広くとらないと、異なる周波数のポンプ光による BGS が互いに重なってしまう。このことに注意して、ポンプ光、プローブ光スペクトルの周波数間隔を設定し、実験を進めた。

(2)ブリュアン利得スペクトルの高速測定の実証

図1に示すように、ポンプ光とプローブ光とで多モードスペクトルの周波数間隔がわずかに異なるようにした。これにより、ポンプ光の各モードによって生成する同じ形状の BGS に対し、プローブ光の相対的な周波数差が少しずつ異なるようになる。その結果、各プローブ光は異なる利得でブリュアン増幅される。このとき、増幅された多モードプローブ光のスペクトルの包絡線形状はもとの BGS と相似になる。したがって、これらの光のパワーを並列に一括測定することで、BGS の短時間測定が実現する。

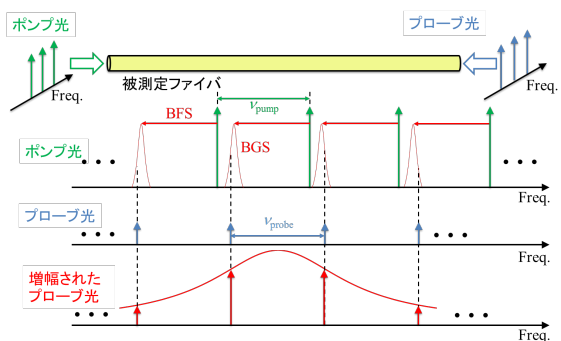


図1. 光コムによるブリュアン利得スペクトルの一括高速測定

(3)分布型光ファイバセンシングの実証

光コムによるポンプ光とプローブ光に対して、光変調器によって時間軸上で周期的にゲートをかける実験系を構築した。このゲート制御により、ポンプ光とプローブ光は光ファイバ内の特定の位置でのみ重なり、誘導ブリュアン散乱が発生する。ゲートのタイミングを変化させることで、光ファイバ内の任意の点に対するセンシングが実現する。被測定ファイバの一部の温度や歪みを変化させ、本手法の検証を行った。

4. 研究成果

主な研究成果を以下にまとめる。

(1)光コム生成とブリュアンセンシング

当初の予想通りブリュアンスペクトルの一括測定が、光コムをポンプ、プローブ光に使うことで実現できた。更なる成果として、ポンプ、プローブのモード間隔を適切に調整することで、一般的な単一モード光による BGS 測定に対し最大で 1,000 倍以上の高い感度での測定が可能になった(図 2)。特殊な光ファイバを使うことなく、センシング感度を向上させた成果は、国内外でも最初となる。従来型のポンプ、プローブ法による BGS 測定では、プローブ光の周波数を掃引するため、安定性、測定精度、測定時間の両立が困難であった。本手法では、周波数が固定されているため、安定であり、原理的に短時間で測定できる。これらに加えて高感度が実証されたことで、本手法の潜在的な有用性が示された。

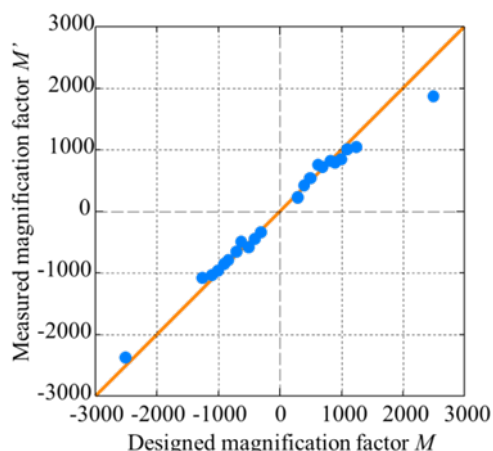


図 2. コム光によるブリュアンセンシングの感度拡大

(2)分布型光ファイバセンシングの実証

ゲートによって出射タイミングを制御したポンプ光、プローブ光を用いた実験により、光ファイバの温度や歪みに対する分布測定の原理確認に成功した。これにより、提案手法が分布測定に応用可能なことが示された。

(3)本研究から派生した成果

BGS は、光ファイバ内の微弱な音響波が回折格子となって生じるが、センシングの観点からは、光ファイバ回折格子(FBG: fiber Bragg grating)との類似性がある。一方、一般の多点 FBG センシングでは、反射スペクトルが重ならないような FBG を使うのに対し、ブリュアンセンシングでは、BGS の中心波長がファイバの各点で互いに重ならないようにする必要はない。多点 FBG センシングでも、反射スペクトルが重なる FBG を使用可能な構成となれば、異なる FBG の設計、製作が不要になる。また、光源の周波数を広い範囲にわたり掃引する必要もなくなる。

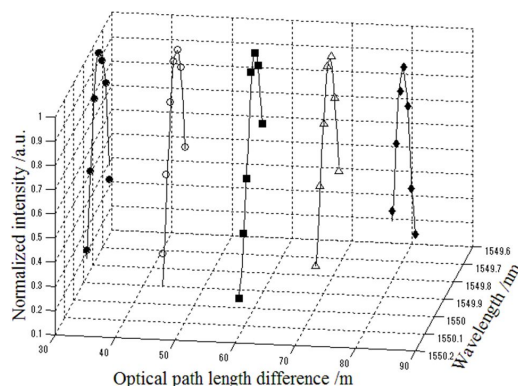


図 3. FBG までの距離と FBG 反射スペクトルの一括測定

申請者らは、光源からの出射光に変調器で変調をかけてプローブ光とし、基準信号との相関をとる新しい原理の FBG センシングを着想した。原理的には、ブリュアンセンシングと異なるが、システム構成要素は重なるものが多い。このシステムでは、FBG までの距離から FBG が識別でき、反射スペクトルの中心波長から温度や歪みが計測できる。実験では、図 3 のように FBG までの精密な距離測定と反射スペクトルとの同時測定に成功した。これにより、FBG センシング研究に新しい方向性を提示することができた。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

Y. Tanaka, T. Abe, and H. Miyazawa, “Directional curvature sensing using multicore fiber Bragg grating and two-photon absorption process in Si-APD,” *OSA Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2019*, paper SF3L.1, 2019. https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2019.SF3L.1 (査読有)

Y. Tanaka, Y. Ozaki, Y. So, “Scanless Brillouin gain spectrum measurement based on multi-heterodyne detection,” *OSA Technical Digest of 26th international conference on optical fiber sensors (OFS-26)*, paper TuE90, 2018. <https://doi.org/10.1364/OFS.2018.TuE88> (査読有)

Y. Tanaka, and M. Nemoto, “Fiber fault detection using Brillouin amplification and two-photon absorption process in Si-APD,” *OSA Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2018*, paper SM2K.4, 2018. https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2018.SM2K.4 (査読有)

Y. Tanaka, H. Miyazawa, “Multipoint fiber Bragg grating sensing using two-photon absorption process in Silicon avalanche photodiode,” *IEEE J. Lightwave Technology* vol. 36, issue.4, pp. 1032-1038, 2018. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2771513> (査読有)

Y. Tanaka, M. Nemoto, Y. Yamada, “Displacement measurement using two-photon absorption process in Si-avalanche photodiode and fiber Bragg gratings,” *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. 36, issue.4, pp. 1192-1196, 2018. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2760890> (査読有)

Y. Tanaka and Y. Ozaki, “Brillouin frequency shift measurement with virtually controlled sensitivity,” *Appl. Phys. Express*, vol. 10, no.6, 062504, 2017. <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/APEX.10.062504> (査読有)

Y. Tanaka, Y. Ozaki, T. Kurokawa, “Sensitivity enhancement of Brillouin frequency shift measurement based on multispectral pump and probe,” *OSA Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2017*, paper STh4K.5, 2017. https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2017.STh4K.5 (査読有)

Y. Tanaka, T. Hirasakura, Y. Yamada, M. Nemoto, T. Kurokawa, “Simultaneous measurement of distance and temperature using FBGs and two-photon absorption process in Si-APD,” *OSA Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2016*, paper STu4H.2, 2016. https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2016.STu4H.2 (査読有)

[学会発表](計 19 件)

Y. Endo, T. Hasegawa, Y. Ozaki, Y. Tanaka, “Highly sensitive measurement of fiber strain based on multimode stimulated Brillouin scattering,” 24th OptoElectronics and Communications Conference 2019, TuP4-C, Fukuoka, Japan, July9, 2019.

遠藤佑真、長谷川貴大、尾崎裕太、田中洋介、「多モード誘導ブリルアン散乱による高感度ファイバ歪み測定」2019年第66回応用物理学会春季学術講演会、12a-M116-4、東京工業大学 大岡山キャンパス、2019年3月12日。

長谷川貴大、尾崎裕太、田中洋介、「多モード誘導ブリルアン散乱による分布型光ファイバセンシング」レーザー学会学術講演会第39回年次大会、東海大学高輪キャンパス、14-2、2019年1月14日。

宮澤弘将、田中洋介、「Si-APD二光子吸収を利用した多点FBGセンシング—アンダーサンプリングによる測定時間短縮」光波センシング技術研究会 LST62-9、東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館 pp.63 - 70、2018年12月4日。

尾崎裕太、田中洋介、「短尺光ファイバ中の多モードブリルアン散乱におけるブリルアン周波数シフト変化の高感度測定」2018年度日本光学会年次学術講演会、PDP4、筑波大学東京キャンパス文教校舎、2018年11月2日。

Y. Ozaki, Y. Tanaka, “Brillouin gain spectrum measurement using multimode light — measurement with 10-m long optical fiber based on lock-in detection,” 23rd Microoptic conference (MOC2018), P-10, International convention center, Chang Yung-Fa Foundation, Taipei, Taiwan, Oct.16, 2018.

宮澤 弘将、田中 洋介、「Si-APD二光子吸収応答を利用した多点FBGセンシングにおけるアンダーサンプリングの検討」2018年第79回応用物理学会秋季学術講演会、19a-438-5、名古屋国際会議場、2018年9月19日。

宗祥久、尾崎裕太、田中洋介、「多モード光源とマルチヘテロダイン検波によるブリュアン利得スペクトル測定」光波センシング技術研究会LST61-9、東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館 pp.153-158、2018年6月12日。

宗 祥久、尾崎 裕太、田中 洋介、「多モードポンプ・プローブによる誘導ブリルアン散乱—10 m 光ファイバによる高感度温度測定」2018年第65回応用物理学会春季学術講演会、19a-C303-5、早稲田大学西早稲田キャンパス、2018年3月19日。

根本 昌弥、宮澤 弘将、田中 洋介、「Si-APD二光子吸収応答による距離測定とブリルアン増幅を用いた光ファイバ破断点計測」2018年第65回応用物理学会春季学術講演会、19a-C303-4、早稲田大学西早稲田キャンパス、2018年3月19日。

M. Nemoto, H. Miyazawa, Y. Tanaka, “Observation of stimulated Brillouin scattering growth along optical fiber using two-photon absorption process in a silicon avalanche photodiode,” 22nd Microoptics conference (MOC2017), Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Japan, P-41, Nov. 21,

2017.

根本昌弥、宮澤弘将、田中洋介、「Si-APD 二光子吸収応答による光ファイバ内ブリルアン散乱の観測」、2017 年度日本光学会年次学術講演会、PDP6、筑波大学東京キャンパス文教校舎、2017 年 11 月 2 日。

尾崎裕太、田中洋介、黒川隆志、「多モードポンプ・プローブによる誘導ブリルアン散乱を用いた高感度ファイバセンサ」光波センシング技術研究会 LST59-16、東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館 pp.107-114、2017 年 6 月 6 日。

宮澤弘将、田中洋介、黒川隆志、「Si-APD 二光子吸収応答を利用した多点型 FBG センシング」光波センシング技術研究会 LST59-10、東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館 pp.67-74、2017 年 6 月 6 日。

今村翔悟、黒川隆志、田中洋介、「変調器を用いた光周波数コム生成とファイバセンシングへの応用」2017 年電子情報通信学会総合大会、C-3-28、名城大学天白キャンパス、2017 年 3 月 25 日。

尾崎 裕太、田中 洋介、黒川 隆志、「多モードポンプ・プローブによる誘導 Brillouin 散乱の誘起と高感度ファイバセンサ応用」第 64 回応用物理学会春季学術講演会、16p-418-3、パシフィコ横浜、2017 年 3 月 16 日。

宮澤 弘将、根本 昌弥、山田 祥規、田中 洋介、黒川 隆志、「Si-APD 二光子吸収応答を利用した距離計測と多点 FBG センサ応用」第 64 回応用物理学会春季学術講演会、16a-418-10、パシフィコ横浜、2017 年 3 月 16 日。

根本 昌弥、山田 祥規、田中 洋介、黒川 隆志、「Si-APD 二光子吸収応答による距離と FBG 歪みの同時測定」第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、16p-C32-3、朱鷺メッセ、2016 年 9 月 16 日。

根本昌弥、山田祥規、田中洋介、黒川隆志、「Si-APD 二光子吸収応答の FBG センサ応用」、光波センシング技術研究会 LST57-8、東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館 pp.53-60、2016 年 6 月 14 日。

〔その他〕

<http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/7/0000627/profile.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：塩田 達俊

ローマ字氏名：(SHIODA, tatsutoshi)

所属研究機関名：埼玉大学

部局名：理工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：10376858

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。