

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18852

研究課題名（和文）定在光パルス生成による透明サンプルの測定技術

研究課題名（英文）Measurement technology on transparent sample based on standing wave optical pulse generation

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、導波路光デバイスや細胞等の透明または半透明サンプル内の任意の点の歪み、振動、温度等を精密測定する新技術の開発を目標とした。提案手法では、サンプルの両端から周波数軸上で等間隔にスペクトルが並ぶ多モード光を入射し、サンプル内の特定範囲に生成するパルス状の定在波により散乱光を発生させ、歪みや温度を測る。なお、スペクトルの概形は適切に制御する。光ファイバをサンプルとした実験で、温度変化の分布測定を実時間で行い、提案手法の有効性を確認した。更に、散乱光生成のメカニズムが、光ファイバ回折格子とその歪みによる格子ピッチ変化によるものと類似していることに気づき、光ファイバ曲げ計測の実証も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、光パルス技術、光周波数コム技術、光計測技術等を結びつけ、新たな応用展開を進める足掛かりとなり、国内外の各研究分野の進展に貢献すると考えられる。具体的応用の点から、複数波長の散乱光に対する利得スペクトル整形を用いた分布計測は、散乱光強度から直接、温度や歪みが分かるため、測定高速化につながる利点がある。また、光ファイバ曲げセンサは、医療用カテーテルやロボットアーム等に埋め込み動作制御のフィードバックに利用すれば、より細やかな動作調整の実現につながる。以上の成果は、重要度が高まっている建造物の構造ヘルスマニタリングや、医用計測分野の発展につながると期待できる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is development of new technology on measuring strain, vibration, or temperature of a transparent or semitransparent sample. The proposed method generates standing wave optical pulse in the sample by injecting from both sides the multimode light composed of equally spaced spectral peaks in the frequency domain, where the spectral shape is appropriately controlled. Monitoring the scattered light produced by the standing wave optical pulse, the strain or temperature is measured. We used an optical fiber as a sample and successfully performed real-time distributed temperature measurements, which proved the validity of the proposed method. Furthermore, we also proposed and demonstrated curvature measurements using a multicore fiber Bragg grating, noticing the similarity between the mechanism of the scattering and the reflection by a fiber Bragg grating, which changes the center wavelength of the reflected light due to strain-induced grating pitch change.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：散乱光計測 多モード光 光周波数コム 歪み計測 温度計測 曲げ計測 分布計測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、これまでレーザを応用した様々な計測技術を研究してきた。今回の研究構想の原点は、『サンプル内に高強度な定在パルスを立てれば、そこで非線形散乱が起こる。散乱光スペクトルから、その点の歪みや振動等を選択的に測定できる。』というアイデアにある。

一般に定在波は、進行波と後退波の重ね合わせでできる。対向する光波が周期的なパルスであれば、特定の位置でパルス形状の定在波が生じる。これまで光スペクトル制御技術を光通信でのパルス生成や、分光計測のための広帯域光の生成の目的で進めてきた。それらの融合と発展により、任意の定在パルスを生成し歪みや振動計測へ応用可能と考え、研究に着手した。

2. 研究の目的

本研究では、導波路光デバイスや細胞等の透明または半透明サンプル内の任意の点の歪みや振動を精密測定する新技術の開発を当初の目標とした。目標達成にあたり、サンプルの両端から光周波数コムのような周波数間隔の等しい多モードスペクトルを持つ光を入射する手法を提案した。このような周波数間隔の等しい多モード光は、時間軸上では周期的なパルス光となる。そこで、そのスペクトルを適切に制御することで、サンプル内の任意の位置に定常的に大きな振幅を持つ定在パルスを作り、その点でのみ強い散乱光を引き起こすことを狙いとした。散乱光のスペクトルは一般に媒質の密度、屈折率の変化によって変化する。そこで、サンプルの特定点からの散乱光を調べ、そこで歪みや振動の様子を測定可能なシステム実現を目指すこととした。

3. 研究の方法

本研究では、周波数間隔の等しいスペクトルからなる光源を単一波長レーザの変調により生成して用いた。サンプルは 30 m の光ファイバを用いた。図 1 に最終的に構築した実際の実験系の構成を示す。レーザ光に対し、約 12 GHz の高い周波数で変調をかけ、パルスを生成する。生じたパルスのスペクトルをスペクトル整形器により、適切な形状に整形する。提案手法では相似形状をとる散乱光の利得スペクトルを周波数軸上に複数生成することが、国内外の他の散乱光計測にはない特徴であり、これにより散乱光強度と歪みの関係を高い自由度で設計できる。12 GHz という高い周波数で変調をかける理由の一つは、周波数が高いほど、周波数軸上ではスペクトルピークの間隔が広くなり、パルス整形が容易になることにある。もう一つは、周波数間隔を広くすることで、散乱光から歪みや温度変化の情報を正確に計測する上での雑音となる不要な非線形効果を抑圧できることにある。一方、パルスの繰り返し周波数が極めて高いため、生じたパルスは 83 ps のサイクルで生じる。このようなパルスを光ファイバの両端から入射すると、光ファイバ内では 1.7 cm 間隔で定在パルスが生じ、特定の領域における散乱光を取り出すことが難しくなる。そこで、今回作製したシステムでは、変調器により 400 ns 毎に持続時間 30 ns のゲートを開けた。これにより、80 m 構毎に 6 m の範囲でのみパルスが切り出されて出てくる。定在パルス自体は 6 m の幅だが、非線形効果で生じる散乱光(誘導ブリルアン散乱光)は半値幅の 3 m の分解能で発生位置の検出が可能となる。

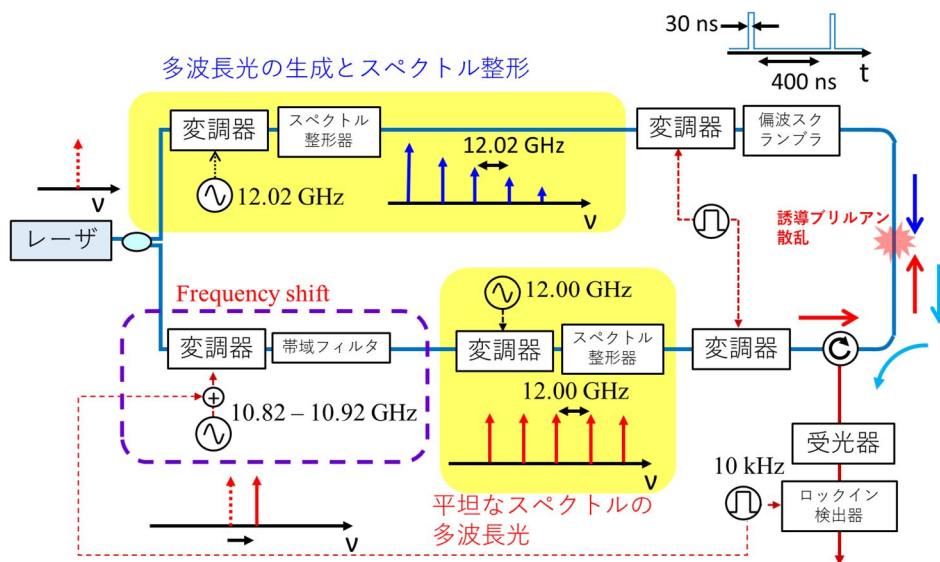


図 1. コム光とスペクトル整形による定在パルスおよび散乱光(誘導ブリルアン散乱光)発生の実験系

4. 研究成果

当初はサンプルの歪みを直接計測することを試みていたが、今回は同等のことをサンプルである光ファイバの一部の温度を変化させることで行った。温度を変化させると、屈折率や長さが

わずかに変化し、散乱光の状態も変化する。図1の実験系を用い光源のスペクトルを適切に整形することで、散乱光の強度が温度変化に比例して変化することが可能なことが実証できた(図2)。

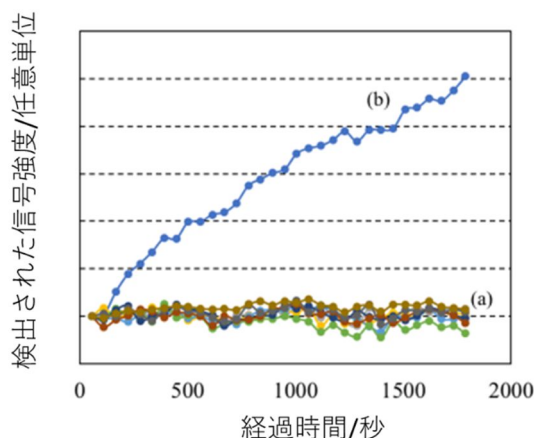


図2. 光ファイバの一部の温度を変化させたときの散乱光による信号の時間変化(熱を加えていない領域(a)では信号の変化はなく、熱を加えた領域(b)のみ信号が変化している。)

また、これとは別に、サンプルとして用いた光ファイバにおける散乱光の生成と周波数変化のメカニズムが、光ファイバ回折格子の歪みによる格子ピッチ変化と類似していることに気づき、最終年度は光ファイバ回折格子を使った研究も並行して進めた。

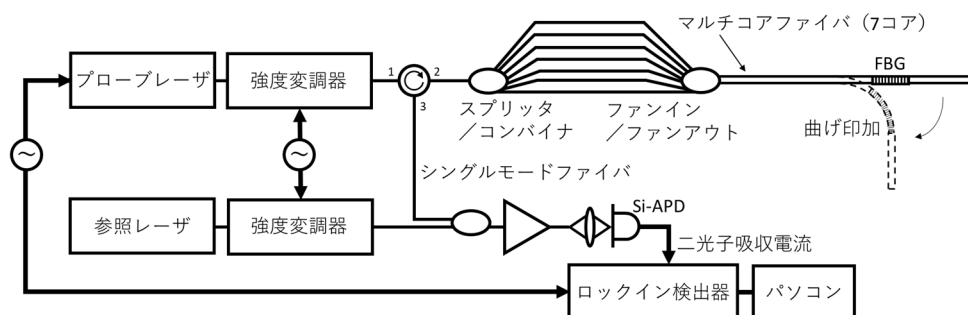


図3. マルチコア光ファイバと光ファイバ回折格子(FBG)を用いた曲げ計測の実験系

図3に構築した実験系を示す。ここでは、複数コアからなるマルチコア光ファイバ(MCF: Multicore fiber)に回折格子(BG: Bragg grating)を加工したマルチコア光ファイバ回折格子(MCFBG)をサンプルとして用いた。MCFBGを曲げると、内側のコアと外側のコアとは異なる歪みが加わることから、反射光の波長に違いが生じる。このことと、研究室で従来から研究を行っている強度相関計測技術を用いることで、MCFBGについて任意の曲げ方向と曲げの大きさとが、光スイッチ等によるコアの切り替えを行うことなく計測可能なことを実証した。スイッチングを伴わない構成は、国内外の他の研究ではないもので、今後、計測を高速化する上で重要なポイントとなる。図4に計測結果の一例を示す。曲げについて理論通りの結果が得られた。

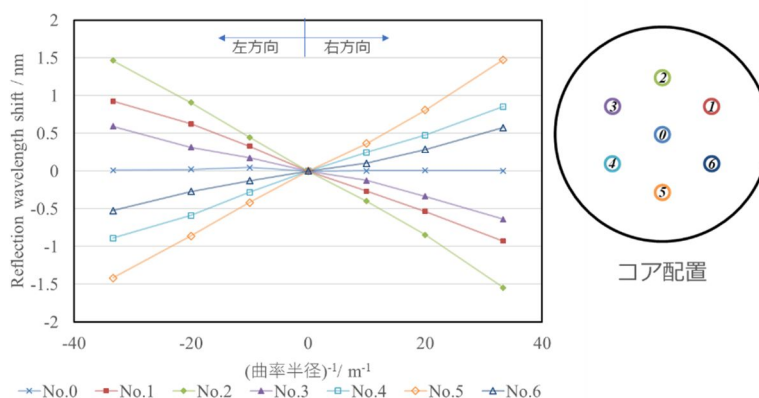


図4. マルチコア光ファイバ断面(右)と曲げを加えた際の各コアからの反射光の変化(左)。

今回の研究で得られた以上の成果は、光パルス技術、光周波数コム技術、光計測技術等を結びつけ、新たな応用展開を進める足掛かりとなるものであり、国内外におけるそれぞれの研究分野の進展に貢献するものと言える。具体的な応用の観点から、複数波長の散乱光に対する利得スペクトル整形を用いた分布計測は、散乱光強度から特定の点における温度や歪みが分かるため、測定の高速化につながるメリットがある。また、光ファイバ曲げセンサは、医療用カテーテルやロボットアーム等に埋め込んで使えば、計測結果をそれらの動作制御にフィードバックして利用できるようになり、より細やかな動作調整の実現につながるものと期待できる。これらは将来的に、今後ますます重要度が高くなる建造物の構造ヘルスマニタリングや、医用計測分野の発展につながると考えられる。最後に今回は光ファイバを透明サンプルとして原理確認を進めたが、今後、様々な透明・半透明サンプルへの応用を検討していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tanaka Yosuke, Abe Tetsuya, Miyazawa Hiromasa	4. 巻 -
2. 論文標題 Directional Curvature Sensing Using Multicore Fiber Bragg Grating and Two-Photon Absorption Process in Si-APD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 OSA Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (Optical Society of America, 2019)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1364/CLEO_SI.2019.SF3L.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 尾崎裕太、田中洋介
2. 発表標題 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
3. 学会等名 2018年度日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川貴大、尾崎裕太、田中洋介
2. 発表標題 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
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤佑真、長谷川貴大、尾崎裕太、田中洋介
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Tanaka and Takahiro Hasegawa
2. 発表標題 Brillouin optical time domain analysis using spectrally reshaped 12-GHz spacing multimode pump and probe
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2020, San Jose, California, USA, paper SF3P.7, May 15, 2020.(Online Conference) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuma Endo, Takahiro Hasegawa, Yuta Ozaki, and Yosuke Tanaka
2. 発表標題 Highly sensitive measurement of fiber strain based on multimode stimulated Brillouin scattering
3. 学会等名 24th OptoElectronics and Communications Conference 2019, TuP4-C, Fukuoka, Japan, July9, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Abe and Yosuke Tanaka
2. 発表標題 Three-dimensional bending measurement using multicore fiber Bragg grating and two-photon absorption process in Si-APD
3. 学会等名 24th Microoptic conference (MOC2019), P-51, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, Nov.19, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川貴大
2. 発表標題 マルチヘテロダイン検出によるブリルアン利得スペクトル測定とその高感度化
3. 学会等名 2019年度日本光学会年次学術講演会、PDP4、大阪大学コンベンションセンター、2019年12月5日.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宗 祥久、田中 洋介
2. 発表標題 繰り返しパルス光による誘導ブリルアン散乱の光ファイバ内多点誘起とその散乱光スペクトル
3. 学会等名 2019年度日本光学会年次学術講演会、PDP9、大阪大学コンベンションセンター、2019年12月5日.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中洋介
2. 発表標題 次世代産業を支える高精度・高機能光ファイバセンシング
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会、BI-7-1(予稿をもって発表扱い) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園田 直弘、阿部 哲也、田中 洋介
2. 発表標題 マルチコアFBG Si-APD二光子吸収応答利用距離計測による3次元曲げセンシング
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会、12p-B406-4(予稿をもって発表扱い)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿部哲也、園田直弘、田中洋介
2. 発表標題 Si-APD二光子吸収応答とマルチコアFBGによる3次元ファイバ曲げ計測
3. 学会等名 光波センシング技術研究会LST64-18, 東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naohiro Sonoda, Tetsuya Abe, Yosuke Tanaka
2. 発表標題 Experimental investigation of multicore fiber Bragg grating's crosstalk for curvature sensing
3. 学会等名 Optical Technology and Measurement for Industrial Applications 2020 (OPTM2020), OPTMp-21, Pacifico Yokohama, Kanagawa, Japan, April. 23, 2020. (予稿のみで発表扱い) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考