

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06389

研究課題名(和文) 高分解能光ファイバー温度センサーの構築と応用計測

研究課題名(英文) Development of a high resolution optical fiber temperature sensor and its application to measurement

研究代表者

和田 健司 (WADA, KENJI)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40240543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：波長1.55 $\mu\text{m}$ 半導体レーザーからのピコ秒光パルス出力を単一モード光ファイバー中で相互相関させる光学システムを構築した。このシステムでは、温度変化に伴う光ファイバーの光路長変化を約10 $\mu\text{m}$ の精度で測定でき、光路長変化を温度校正することにより温度センシングを実現した。このシステムに実長70mのハイトレル被覆付き光ファイバーを接続し、実験室内の室温や恒温水槽内の微小な温度変化を調べた結果、0.0001から0.001 $^{\circ}\text{C}$ の分解能で連続して温度センシングできることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ポイントセンサーとして利用される従来の光ファイバー温度センサーは、小型であるため一般的に温度分解能が低い。本研究では、実長70mの光ファイバーを温度センサーとして、センサー部だけの温度変化が計測可能な光学システムを構築することにより0.0001から0.001 $^{\circ}\text{C}$ の温度分解能を実現した。開発した高分解能光ファイバー温度センシングシステムは、温度管理された空間や海底など、温度変化が少なく、長期間温度モニタリングが必要な場所に適用することが期待される。

研究成果の概要(英文)：We have developed a cross-correlation optical fiber system for picosecond optical pulses from a 1.55 $\mu\text{m}$  semiconductor laser. This system can measure the change in optical path length of a single-mode optical fiber as the temperature changes with an accuracy of about 10 $\mu\text{m}$ . Temperature sensing was realized by temperature calibration of the optical path length variation. This system is connected to a 70m long optical fiber with Hytrel jacket, which was used to measure the room temperature in the laboratory and the minute temperature in a thermostatic bath. As a result, it was confirmed that the temperature can be continuously sensed with a resolution of 0.0001 to 0.001 $^{\circ}\text{C}$ .

研究分野：レーザー計測

キーワード：光ファイバーセンサー 温度センサー 半導体レーザー ピコ秒光パルス 相互相関計測

## 1. 研究開始当初の背景

温度、歪み、振動等のセンシングには、一般的に電気式のデバイスが利用されている。ただし、センサー部に電気回路を含むことに起因し、耐雷性や遠隔測定性における課題があること、電磁ノイズの影響を受けやすいこと、故障が多いこと等の問題を抱える。その解決策として、光ファイバーセンサーの利用が挙げられる<sup>1)</sup>。

光ファイバーセンサーでは、環境変動(温度、歪み、振動)により生じた光ファイバーの屈折率変化、線膨張および非線形応答(ブリルアン散乱等)を光学的に測定することにより、元の環境変動の情報を読み出す。現在までに、FBG(ファイバーブラッググレーティング)や光干渉計を用いるポイントセンシング<sup>2,3)</sup>や後方散乱(ブリルアン、ラマン、レイリー)を利用する分布型センシング<sup>4,5)</sup>に関する多くの報告がなされている。前者の場合、温度変化、振動、ひずみに起因する光ファイバーの長さや屈折率変化を測定することにより、対象の物理量を読み出すことができる。したがって、長い光ファイバーを用いて、これらの微小な変動を長さ方向に積算すれば、物理量測定における高感度化、高分解能化を図ることができると思われる。しかし、一般的な応用では、空間分解能の向上が優先され、これに伴いセンサーの小型化が図られる。したがって、これとはトレードオフの関係にある物理量の高分解能化については犠牲にされることが多い。

## 2. 研究の目的

本研究では、温度管理された空間や温度変化の少ない海底等の比較的広い領域における微小な温度変化を測定する応用を想定し、長い光ファイバーを用いた高分解能温度センシングの実現をめざした<sup>6-10)</sup>。

## 3. 研究の方法

長尺光ファイバーを温度センサーとする光ファイバー温度センシングシステムを構築し、高分解能温度センシングの実証例を示した。また、各種光ファイバーセンサーの温度感度および熱時定数についても調べた。

## 4. 研究成果

### 4-1 光ファイバー温度センシングシステムの構成

本研究では、温度変化により生じる光ファイバーの光路長変化を光学的に読み出し、温度校正することを検討した。これを実現する光学システムを図1に示す。中心波長 1550 nm の分布帰還型半導体レーザー (DFB-LD) を変調周波数 1 GHz 付近で利得変調することによりピコ秒光パルス幅 $\sim 30$  ps、平均出力 120  $\mu$ W を発生させた。変調器の周波数は GPS (位置測位システム) で同期をとり精度  $10^{-12}$  に安定させた。光源からの光パルス列はサーキュレーターを通過後、50/50 ビームスプリッター (BS) で反射する成分と透過する成分に2分される。BS 以降の光ファイバーが被測定光ファイバー (温度センサー部) に相当し、レトロリフレクター (RR) により終端される。本システムに用いた光ファイバーはすべて単一モード型であり、温度センシングにおける高感度化を図るために、熱膨張係数の大きいハイトレル被覆型を採用した。センサー内に入射した光パルス成分は BS - RR 間を往復し、その一部が再び BS を透過して、光源側から BS で反射する後続の光パルス成分との間で光波干渉する。その結果生じる振幅ジッターにもとづく雑音強度を 10 MHz 帯域増幅器付きフォトダイオードと RF スペクトラムアナライザー (中心周波数 7 MHz, Zero span, RBW 10 kHz, VBW 10 Hz) により測定した。センサー部の光ファイバーは 20 L の水で満たした恒温槽 (AS ONE) 内に設置した。図1に示すように BS を用いることにより、光ファイバーセンサー部を光源やその他の光ファイバーと空間的に分離している。また、センサー部は、歪みや振動の影響を避けるため、プラスチックポビンに巻きつけ、温度ムラが生じないようにポビンへの巻き付けは 1 巻きとした。その結果、光ファイバーセンサーの実長は約 70 m となった。

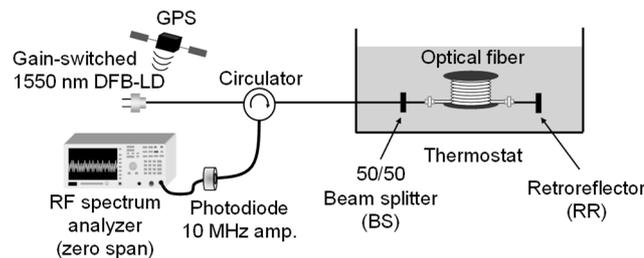


図1 光ファイバー温度センシングシステムの構成

## 4-2 光ファイバー温度センシングの原理

図1のDFB-LDの変調周波数を970から973MHzの範囲を10kHz間隔で掃引したときの雑音強度変化を図2に示す。この操作は、パルス列の空間的な間隔をおよそ30.83cmから30.93cmの範囲を3.2μm間隔で掃引したことに相当する。パルス列の空間的な間隔の整数倍がセンサー部の往復光路長に一致するとき、センサー側からBSを透過し、RRで反射されて戻ってくる光パルス成分と光源側からBSで反射する後続の光パルス成分が空間的に完全に重なる。このとき雑音強度は最大となり、図2に見られる雑音強度ピークが観測される。図中の数字は、センサー内での光パルスの往復回数を示し、6往復まで確認できる。このように、変調周波数の掃引により機械的遅延機構を設けることなく、光パルスの線形相互相関が行える。

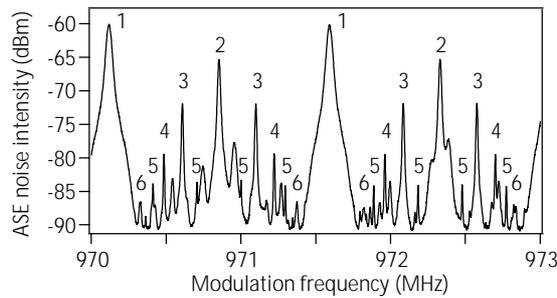


図2 変調周波数掃引したときの雑音強度の変化  
(図中の数字は光ファイバーセンサー内の光パルスの往復回数)

雑音強度ピークが現れる変調周波数 $f_{m,n}$  ( $m$ : センサー内での光パルスの往復回数,  $n$ : センサー部の  $m$  回往復光路長をパルス列の空間的な間隔で除した整数) と往復光路長  $L$  の関係は次式で表される。

$$mL = \frac{nc}{f_{m,n}}, \quad n = \frac{f_{m,n}}{f_{m,n} - f_{m,n-1}} \quad (1)$$

ここで、 $c$  は真空中の光速である。 $n$  は近接の $f_{m,n-1}$ を測定することにより次式から決定される。したがって、あらかじめ $n$ を決定しておけば、測定した $f_{m,n}$ の値のみを式(1)に代入することによって、温度変化に伴い伸縮するセンサー光路長 $mL$ を連続モニタリングすることができる。

## 4-3 センシングシステムの温度分解能

### 4-3-1 センサー光路長計測の距離分解能

図1中の恒温槽の水温を40°C一定に設定した。図2に示した $m=1$ のASE雑音強度ピークに対応する変調周波数 $f_{1,n}$ ,  $f_{1,n-1}$ に対して、それぞれの半値幅に相当する周波数範囲を1kHz間隔で周波数掃引し、雑音強度を測定した。 $f_{1,n}$ に対する結果を図3に示す。計42点の測定値(赤丸)を線形表示し、ガウス関数フィッティング(実線)を行った結果、 $f_{1,n}=971.592026\text{ MHz}\pm 58\text{ Hz}$ を得た。同様に見積もった $f_{1,n-1}=970.118311\text{ MHz}\pm 69\text{ Hz}$ とともに式(1)に代入すると、 $n=659$ と $L=203.339699\text{ m}\pm 12\text{ }\mu\text{m}$ を得た。この標準偏差(距離分解能)は、光源のスペクトル幅と測定時間に依存する。

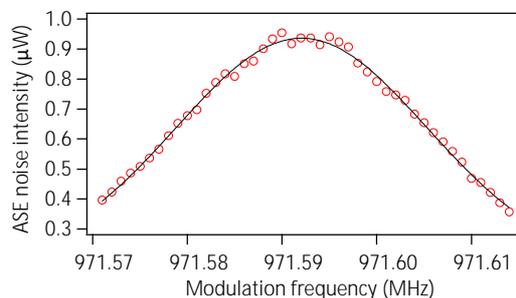


図3  $m=1$ のピーク付近で変調周波数掃引したときのASE雑音強度の変化  
(実線はガウス関数フィッティング)

#### 4-3-2 センサー光路長と温度変化の関係

図3と同じ実験を連続的に行いながら、図1の恒温槽内の水温を25°Cから30°Cまで2.5時間かけて一定の温度勾配で上昇させ、 $f_{1,659}$ の温度依存性を調べた。水温とセンサー光路長(往復回数  $m = 1$ )の関係には一次関数の関係が成立し、単位温度あたりのセンサー光路長の伸縮は  $13.45 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  であり、これを25°Cにおける光路長(203.147 m)を用いて単位長さあたりで表現すると  $66.2 \text{ } \mu\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  と見積もられる。0~50°Cの温度範囲で同様の実験を行い、この関係が成立することを確認した。これより、光ファイバーセンサーとしての温度分解能は、1.の  $f_{1,659}$  測定における標準偏差を用いて、 $8.9 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$  ( $12 \text{ } \mu\text{m} / 13.45 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) と見積もられた。

センサー光路長が km 程度に長くなった場合も、標準偏差は図3の結果と同程度であることを確認した。したがって、センサー光路長を長くすると、比例して温度分解能が向上し、原理的には  $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$  や  $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$  の温度分解能が実現できる。ただし、長い光ファイバーセンサーをボビンに巻き付けた場合、積層構成となるため、応答速度が顕著に低下してしまうことが問題となる。そこで、図1のシステム構成を維持し、センサー光路長を実質的に長くするためには、センサー内の光パルスの往復回数  $m$  を増加すればよく、この場合、温度分解能は  $(8.9/m) \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$  で改善される。

#### 4-4 温度センシングの例

図4に示すように CIR と BS の間に 1 km 長の光ファイバーを挿入し、センサー部と同様に恒温槽の中に設置した。室温 24°C に対して、光ファイバーセンサーが入った恒温槽中の水温は 30°C 一定に設定し、4.1 節と同様の測定を 200 回(140 分)連続して行った。一方、恒温槽中の水温は、恒温槽の測定が開始された直後は 33°C 一定に設定し、恒温槽での測定が 20 回(14 分)終了するごとに 1°C ずつ上昇させ、100 回(70 分)終了時に 38°C に設定した後、残り 100 回の測定中は 38°C 一定とした。また、恒温槽および内に白金抵抗温度計(温度分解能 0.02°C、温度精度 0.3°C)を設置し、それぞれの温度を連続測定した。

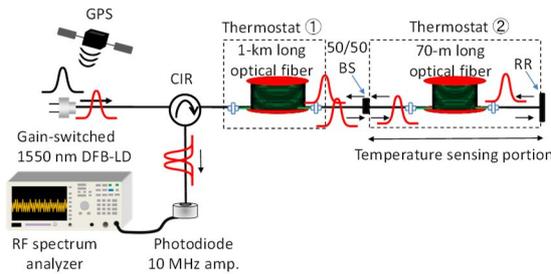


図4 光ファイバー温度センシングの測定系

図5に測定結果を示す。恒温槽内の白金抵抗温度計の指示値の変化(a)は、設定した通り、測定回数20回ごとに33°Cから1°Cずつ上昇し、測定回数100回で38°Cに達している。この条件では室温との温度差が大きい。

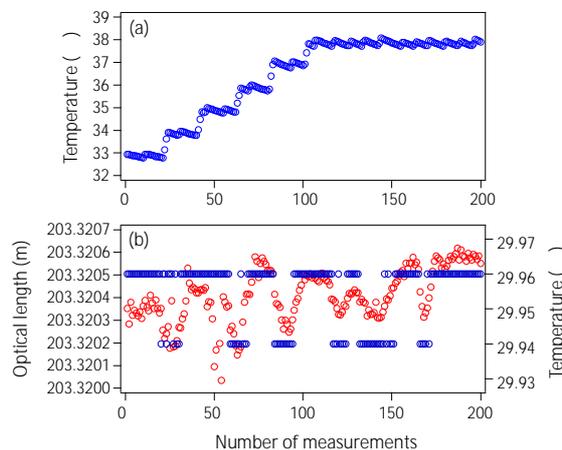


図5 光ファイバー温度センシングシステムによる測定結果 (a)恒温槽内の温度の時間変化, (b)恒温槽内の温度(青)とセンサー光路長(赤)の時間変化

いため、水温の低下とヒーターによる加熱が頻繁に繰り返されている様子が確認できる。一方、室温に近い30°C一定に設定した恒温槽では、図5(b)に示すように白金抵抗温度計の指示値(青丸)は、測定回数200回の間、29.96°Cと29.94°Cの0.02°Cの温度差(温度分解能に相当)内だけで変動した。この図に、同時に測定した光ファイバー温度センサーの光路長変化(赤丸)を重ねた。プロットの際には、まず始点の光路長を適当な温度(例えば、29.94°C)に対応させ、残りすべての光路長を4.2節の結果を利用して温度に変換した。次に、その変換した温度を四捨五入によって0.02°Cのグリッドに丸めた。この結果を白金抵抗温度計の指示値と比較し、最も良い相関が得られるまで始点の温度を走査した。この手法により、センサー光路長は、白金抵抗温度計の指示値で校正された。図5(b)の結果より、光源および観測場所から1 km離れた位置の温度測定において、途中の経路で大きく温度変動がある場合でも、 $10^{-3}$ °Cレベルの微小な温度変化を検出できることがわかった。

#### 4-5 各種光ファイバーセンサーの温度感度と時定数

##### 4-5-1 各種光ファイバーセンサーの温度感度

図1のBSとRR間にプラスチックポピンから外した実長5 mのハイトレル被覆付き光ファイバー心線と実長5 mのアクリル UV 被覆のみの光ファイバー素線をそれぞれ接続し、4.2節と同じ実験を行った。その結果、光ファイバー心線および光ファイバー素線の温度感度はそれぞれ  $17 \mu\text{m}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})$ 、 $7 \mu\text{m}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{m})$ と見積もられた。光ファイバー素線の場合を基準として温度感度を比較すると、光ファイバー心線は2.4倍(17/7)、ポピンに巻いた光ファイバー心線は9.4倍(66/7)になることがわかった。

##### 4-5-2 各種光ファイバーセンサーの熱時定数

変調周波数を固定し、微小で急速な温度変化を与えたときの時間応答から各種光ファイバーの水中での熱時定数を測定した。その結果、ポピンに巻いた光ファイバー心線、光ファイバー心線、光ファイバー素線に対してそれぞれの熱時定数は28.3秒、5.3秒、0.4秒と測定された。光ファイバー素線の場合を基準として熱時定数を比較すると、光ファイバー心線は13.3倍(5.3/0.4)、ポピンに巻いた光ファイバー心線は70.8倍(28.3/0.4)になることがわかった。

#### 4-6 まとめ

利得変調した分布帰還型半導体レーザーを光源とし、70 m長の単一モード光ファイバーをセンサーとする光ファイバー温度センシングシステムを構築した。このシステムの温度分解能は $8.9 \times 10^{-4}$ °Cであり、光ファイバーセンサー内の光パルスの往復回数に比例して温度分解能が改善されることを示した。このシステムを用いて、光源や検出器から1 km離れた恒温槽内の $10^{-3}$ °C程度の微小な温度変化をモニターすることに成功した。

一方、光ファイバー温度センシングの観点からは、光ファイバー素線をベースとして、ハイトレル被覆の装着、さらにポピンへの巻き付けを行うことにより、温度感度(温度変化に対する光ファイバー光路長の変動量)はそれぞれ2.4、9.4倍と効果的に上昇するが、逆に熱時定数にもとづく応答速度は13.3、70.8倍と非常に長くなってしまったことを確認した。これより、温度センシングシステムを構築する際は、測定対象に応じて、温度感度と応答速度を考慮して、光ファイバーセンサー部の設計を行う必要があることがわかった。

#### 【参考文献】

- 1) "Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists," E. Udd and W. B. Spillman Jr. ed., Wiley-Interscience, New York, NY, 2<sup>nd</sup> Edition, 2006.
- 2) R. Uchimura, A. Wada, S. Tanaka, and N. Takahashi: J. Lightwave Technol. **33** (2015) 2499.
- 3) K. Wada, H. Narui, D. Yamamoto, T. Matsuyama, and H. Horinaka: Opt. Express **19** (2011) 21467.
- 4) G. Bolognini and A. Hartog: Optical Fiber Technol. **19** (2013) 678.
- 5) Y. Mizuno, H. Lee, and K. Nakamura: Appl. Sci. **8** (2018) 1845.
- 6) K. Wada, S. Matsukura, A. Tanaka, T. Matsuyama, and H. Horinaka: Opt. Express **23** (2015) 23013.
- 7) A. Ishiguro, A. Tanaka, T. Ohmae, R. Mizutani, and K. Wada: Proc. of CLEO-PR2017 (2017) S1682.
- 8) 和田健司: フォトニクスニュース **4** (2018) 123.
- 9) T. Ohmae, A. Ishiguro, T. Nakamura, T. Matsuyama, and K. Wada: The 7th Asia-Pacific Optical Sensors Conf. (APOS) (2018).
- 10) 徳永, 内藤, 松山, 和田, 岡本: 日本赤外線学会誌 第30巻1号 (2020) 印刷中.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 和田健司	4. 巻 5
2. 論文標題 高分解能光ファイバー温度センシングシステム	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 フォトニクスニュース	6. 最初と最後の頁 24-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 K. Wada, N. Kitagawa, and T. Matsuyama	4. 巻 10
2. 論文標題 The Degree of Temporal Synchronization of the Pulse Oscillations from a Gain-Switched Multimode Semiconductor Laser	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 950-1-950-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma10080950	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 水谷亮一，北川直昭，松山哲也，和田健司	4. 巻 27
2. 論文標題 利得変調した単一モード半導体レーザーの時間ジッター抑制に関する数値シミュレーション	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本赤外線学会誌	6. 最初と最後の頁 44-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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37件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Ohmae, A. Ishiguro, T. Nakamura, T. Matsuyama, K. Wada
2. 発表標題 High-resolution optical fiber temperature sensor system using linear cross-correlation fiber interferometer
3. 学会等名 The 7th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (APOS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田健司
2. 発表標題 位相雑音法によるパルス時間ジッター計測に対するレート方程式を用いた検証
3. 学会等名 第26回「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」技術専門委員会研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田健司, 大前貴寛, 徳永和成, 松山哲也, 岡本晃一
2. 発表標題 光ファイバー温度センシングに用いるピコ秒光源の比較
3. 学会等名 第27回「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」技術専門委員会研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田健司, 大前貴寛, 徳永和成, 松山哲也, 岡本晃一
2. 発表標題 ピコ秒光パルスの線形相互相関計測にもとづく高分解能光ファイバ温度センサ
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大前貴寛, 徳永和成, 松山哲也, 和田健司, 岡本晃一
2. 発表標題 線形相互相関にもとづく光ファイバー温度センシングにおける光源比較
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大前貴寛, 徳永和成, 松山哲也, 和田健司, 岡本晃一
2. 発表標題 相互相関法にもとづく光ファイバー温度センシングにおける温度分解能の評価
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会(Optics & Photonics Japan 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田健司, 大前貴寛, 徳永和成, 松山哲也, 岡本晃一
2. 発表標題 高分解能光ファイバー温度センシングにおけるASE雑音の利用について
3. 学会等名 第28回「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」技術専門委員会研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田健司, 大前貴寛, 徳永和成, 松山哲也, 岡本晃一
2. 発表標題 ファイバー光学長計測にもとづく高分解能光ファイバー温度センサー
3. 学会等名 レーザー学会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田健司
2. 発表標題 LED・半導体レーザーを用いた光ファイバセンシング技術
3. 学会等名 LED関連技術講座
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳永和成, 大前貴寛, 松山哲也, 和田健司, 岡本晃一
2. 発表標題 線形相互相関を用いた光ファイバー温度センシングシステムの特性
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 和田健司
2. 発表標題 ノイズで測る高速現象 - カオスとノイズの関係 -
3. 学会等名 東北大学未来科学技術共同研究センター未来科学3月ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田健司, 北川直昭, 松山哲也
2. 発表標題 利得変調多モード半導体レーザーにおけるパルス成分の同時発振性
3. 学会等名 レーザー学会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」第23回研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Ishiguro, A. Tanaka, T. Ohmae, R. Mizutani, T. Matsuyama, and Kenji Wada
2. 発表標題 High Resolution Fiber Temperature Sensor Based on Precise Measurement of Long Fiber Length
3. 学会等名 CLEO-PR 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Mizutani, N. Kitagawa, M. Nakata, A. Ishiguro, T. Matsuyama, and K. Wada
2. 発表標題 Linear Cross-Correlation Measurement of Timing Jitter in a Gain-Switched Distributed Feedback Laser
3. 学会等名 CLEO-PR 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 和田 健司, 水谷 亮一, 松山 哲也
2. 発表標題 利得変調相関法による半導体レーザの時間ジッタ測定について - 従来法との比較を交えて
3. 学会等名 第22回福井セミナー
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大前貴寛, 石黒敦己, 中村俊樹, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 相互相関系にもとづく高分解能光ファイバー温度センサー
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水谷亮一, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 利得変調1.55umDFBレーザーの時間ジッターに対する線形相互相関測定
3. 学会等名 日本赤外線学会第27回研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大前貴寛, 石黒敦己, 中村俊樹, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 光パルスの線形相互相関計測にもとづく高分解能光ファイバー温度センサー
3. 学会等名 日本赤外線学会第27回研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 和田健司, 北川直昭, 松山哲
2. 発表標題 利得変調多モード半導体レーザーからのパルス出力における時間同期
3. 学会等名 日本赤外線学会第27回研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水谷亮一, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 利得変調した半導体レーザーの時間ジッターに対する線形相互相関計測
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 和田健司, 石黒敦己, 大前貴寛, 中村俊樹, 松山哲也
2. 発表標題 高分解能光ファイバー温度センサーを用いた温度ゆらぎの測定
3. 学会等名 レーザー学会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」第24回研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松山哲也, 水谷亮一, 和田健司
2. 発表標題 利得変調半導体レーザーの時間ジッターに対する線形相互相関測定
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第38回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大前貴寛, 石黒敦己, 中村俊樹, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 高分解能光ファイバー温度センシングにおける温度勾配の影響
3. 学会等名 レーザー学会第517回研究研究報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田健司, 松山哲也
2. 発表標題 多モード半導体レーザーにおけるモード成分間の同時発振
3. 学会等名 本応用数理学会2018年(第14回)研究部会連合発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大前貴寛, 石黒敦己, 中村俊樹, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 高分解能光ファイバー温度センサーの温度校正
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田健司, 北川直昭, 水谷亮一, 松山哲也, 堀中博道
2. 発表標題 利得変調半導体レーザーの時間および振幅ジッター
3. 学会等名 レーザー学会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 水谷亮一, 北川直昭, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 利得変調した分布帰還型半導体レーザーの時間ジッター抑制
3. 学会等名 第77回秋季応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石黒 敦己, 田中天翔, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 光ファイバーの光学長測定にもとづく高分解能温度センシング
3. 学会等名 第77回秋季応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 北川直昭, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 テラヘルツ時間領域分光法における光源振幅ジッターの影響
3. 学会等名 第77回秋季応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 田中天翔, 石黒敦己, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 長距離光ファイバーの光学長精密計測を利用した高分解能温度センシング
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石黒敦己, 田中天翔, 大前貴寛, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 利得変調した1.55 $\mu$ m半導体レーザーの戻り光誘起雑音を利用した高分解能温度センサー
3. 学会等名 日本赤外線学会 第26回研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中田美里, 水谷亮一, 北川直昭, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 利得変調した分布帰還型半導体レーザーの時間ジッターの見積もりと制御
3. 学会等名 日本赤外線学会 第26回研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 和田健司, 水谷亮一, 中田美里, 北川直昭, 松山哲也
2. 発表標題 利得変調半導体レーザーの時間ジッターの測定と制御
3. 学会等名 レーザー学会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石黒敦己, 田中天翔, 大前貴寛, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 利得変調した半導体レーザーの戻り光誘起雑音を利用した高分解能温度センサー
3. 学会等名 レーザー学会第503回研究会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水谷亮一, 北川直昭, 中田美里, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 戻り光誘起雑音を利用した利得変調半導体レーザーの時間ジッター測定
3. 学会等名 レーザー学会第503回研究会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水谷亮一, 北川直昭, 中田美里, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 利得変調DFBレーザーの時間ジッターに対する線形相互相関測定
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石黒敦己, 田中天翔, 大前貴寛, 松山哲也, 和田健司
2. 発表標題 長距離光ファイバーを用いた高分解能温度センサーの温度校正
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----