

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709032

研究課題名(和文) ポリマー光ファイバのテーパ加工によるブリルアン散乱の増強とセンシング応用

研究課題名(英文) Development of Distributed Brillouin Sensors Using Tapered Polymer Optical Fibers

研究代表者

水野 洋輔 (Mizuno, Yosuke)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：30630818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：長い光ファイバに沿った任意の位置で歪(ひずみ：伸びのこと)や温度を測定できる「分布型光ファイバセンサ」は、安心・安全のため世界中で精力的に研究がなされてきた。本研究では、従来のガラス光ファイバだけではなく、柔軟性に富むポリマー光ファイバ(POF)を用いたシステムの開発を推進した。特に、POFをテーパ加工(熱しながら引っ張り細径化する)ことで光散乱信号を増強する技術に着目した。複数のPOFのテーパ加工法を確立するとともに、POFを用いた歪・温度の分布測定に世界に先駆けて成功した。また、分布測定システム自体の性能向上も推進し、世界最高速度での動作を実証、振動分布測定への応用可能性を提示した。

研究成果の概要(英文)：Optical fiber sensing techniques have been extensively studied all over the world due to their capability of distributed strain and temperature measurement. In this study, we have developed fiber-optic sensing systems using not only standard silica glass fibers but also polymer (or plastic) optical fibers. We have especially focused on the light scattering signal enhanced by fiber tapering, i.e., by diameter reduction via a heat-and-pull process. We have established multiple methods for polymer fiber tapering, and successfully demonstrated polymer-fiber-based distributed strain and temperature sensing for the first time in the world. Besides, we have improved the performance of the distributed sensing system itself, and achieved a world-record ultrahigh-speed operation of distributed strain sensing, opening up a new field of fiber-optic distributed vibration sensing.

研究分野：光ファイバセンサ、計測光学、非線形光学、光電子工学

キーワード：光ファイバセンサ ブリルアン散乱 ポリマー光ファイバ プラスチック光ファイバ 歪・温度分布センサ 非線形光学 テーパ加工 防災技術

1. 研究開始当初の背景

(1) 長い光ファイバに沿った任意の位置で歪（ひずみ：伸びのこと）や温度を測定できる「分布型光ファイバセンサ」は、安心・安全のため、世界中で精力的に研究がなされてきた。しかし、従来専ら用いられていたガラス光ファイバは数%の歪で切断されてしまうため、それ以上の大きな歪を測定することはできなかった。そこで我々は、50%以上の歪にも耐えられるほど柔軟性の高いポリマー（プラスチック）光ファイバ（POF）の利用に着目していた。POFを用いることで、対応可能な歪の拡大のみならず、センサに対して「記憶」という新たな機能を付与できる。この「記憶」を有効活用すれば、コストの大幅削減を通じ、大規模建造物に限られていたファイバセンサ技術の対象を一般個人住宅等まで拡大できる。

(2) 分布型光ファイバセンサでは、一般にブリルアン散乱と呼ばれる光の散乱現象が用いられることが多い。研究開始当初までに、我々は POF 中のブリルアン散乱を世界で初めて実験的に観測することに成功し、その歪や温度に対する依存性を解明していた。しかし、コア径が大きい POF 中のブリルアン散乱光は微弱であり、システムの信号対雑音比が低いという問題があった。この状態では、多数回の信号処理が必要となり、測定速度や空間分解能が制限されてしまった。

2. 研究の目的

(1) 第一の目的は、ブリルアン散乱を増強するための POF のテーパー加工法を確立させることである。テーパー加工とは、POF を引き延ばしてコア径を小さくすることであり、光パワー密度が高くなるために非線形現象の一つであるブリルアン散乱パワーが飛躍的に向上すると期待される。

(2) 第二の目的は、POF 中のブリルアン散乱を用いた歪・温度の分布測定を実証することである。これまでにガラス光ファイバを用いて提案した「ブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）」という技術を POF に適用し、片端光入射での動作、高い信号対雑音比、および、高い空間分解能を実証する。

(3) 第三の目的は、BOCDR の動作速度を飛躍的に向上させ、POF に適用することである。従来の BOCDR はサンプリングレート（ある位置の歪を測定する速度）は 19 Hz が限界であったが、これではリアルタイム分布測定は困難であった。そこで、振動の分布測定の実現を目指し、高速化を実現する。

3. 研究の方法

(1) POF は、ガラス光ファイバと比較してガラス転移温度が低い（100°C前後）ため、熱を加えて引っ張る加工が容易である。従来は、

外部熱源を POF に近づけて加工していたが、等方的な加熱が困難であり、テーパー形状が安定しなかった。そこで今回は、2種類の POF 特有のテーパー加工法を提案した。1つ目は、POF を伝搬する光自体が誘起する発熱を利用する手法であり、2つ目は、熱湯を用いる手法である。

(2) BOCDR の実験系の測定光ファイバとして、POF を採用した。POF 中のブリルアン散乱光は、微弱である上に、周波数シフトが極めて低いため、各種デバイスや実験条件の最適化が必要となる。例えば、周波数シフトを伴わないレイリー散乱光とブリルアン散乱光を分離するために、従来のガラス光ファイバを用いた実験系では狭線幅光フィルタを使用することができたが、POF を用いた際は困難となる。

(3) 従来の BOCDR は、各位置におけるブリルアン利得スペクトル（BGS）を電気スペクトルアナライザ（ESA）の取得した後、ブリルアン周波数シフト（BGS 上でピーク値を与える周波数）を算出し、これを歪や温度に換算していた。しかし、BGS 全体を取得するための ESA の周波数掃引には時間がかかるため、これを用いない2種類の手法を提案した。1つ目の手法は、「位相検波 BOCDR」である。これは、時間領域に変換した BGS を1周期の正弦波に近似し、高速で位相情報を取得する技術であり、超高速で歪や温度の分布情報を取得することが可能になる。2つ目の手法は、「傾斜利用 BOCDR」である。周波数シフトの情報は、BGS の線形部分の傾きを利用することで、ある1つの周波数における光パワーに変換することができる。そこで、周波数シフトの代わりにこの光パワーを検出すれば、周波数掃引の必要がなくなり、高速な分布測定が可能になる。以上の2種類の手法をまずはガラス光ファイバを用いて実証した後、POF に適用した。

4. 研究成果

(1) 新たな POF のテーパー加工法として、伝搬光による発熱を用いた手法と、熱湯を用いた手法を開発した。ここでは、後者に関する成果を記す。

テーパー加工する POF には、通信波長帯での光伝搬損失が比較的小さい全フッ素化屈折率傾斜型 POF を用いた。コア径 50 μm 、クラッド径 120 μm 、補強層径 490 μm であり、全長 800 mm のサンプルを用いた。実験系を図 1 に示す。POF の中心付近の 150 mm の区間を 97°C の熱湯に浸し、両方向から巻き取ることで引張した。適宜、蒸発分に相当する量の熱湯を補給した。1550 nm のレーザ出力をシリカ単一モードファイバ（SMF）経由で POF に入射した。POF と SMF 間の結合は突合せ接続により実現した。テーパー加工中、適宜 POF の透過光パワーをパワーメータで

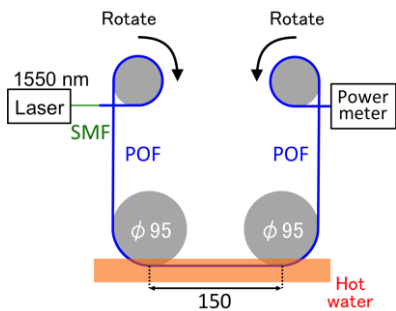


図 1. 熱湯を用いた POF のテーパー加工系.

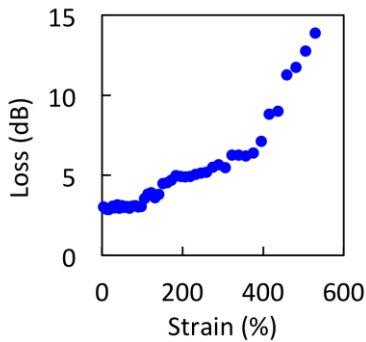


図 2. テーパー加工した POF の伝搬損失の、ウエスト部の歪に対する依存性

測定した。

まず、歪を印加しない状態で POF の 150 mm の区間を熱湯に浸したときの伝搬損失の時間変化を測定した。その結果、損失は時間とともに次第に増加したが、約 50 分経過した後ではほぼ一定 (3.6 dB) となった。その後、約 0.5 mm/s の速度で POF を引張した。ウエスト部の歪に対する伝搬損失の依存性を図 2 に示す。約 100% 以下の歪に対しては、損失はほぼ一定であった。100% 以上の歪に対しては、損失は約 0.010 dB/% で増加した。更に、約 400% 以上の歪に対しては、損失は約 0.048 dB/% で急激に増加し、560% 程度の歪で POF が破断した。

同様にウエスト部に 360% の歪を印加し、熱湯から取り出した POF テーパー (上記とは別サンプル; 伝搬損失は 7.2 dB) の形状を図 3(a)(b)(c) に示す。テーパー加工が施されていない箇所ではコア・クラッド層が透明であるのに対し、テーパー加工が施されたウエスト部ではコア・クラッド層が白濁していた。この POF テーパーの外径分布を図 4 に示す。約 380 mm に渡ってテーパー形状が得られ、その中心の約 150 mm のウエスト部においては、230 μm 程度の一様な外径が得られた。この値は、POF の体積が一定という仮定の下での理論値 233 μm と極めて良く一致している。

また、500% の歪を印加した POF テーパーのウエスト部の顕微鏡写真を図 5 に示す。白濁したコア・クラッド層が破断し、補強層のみで形状を保っていることが確認された。

以上から、図 2 において、約 100% の歪での変化はコア・クラッド層の白濁開始に、約 400% の歪での変化は白濁したコア・クラッド層の破断に、約 560% の歪での変化は補強層

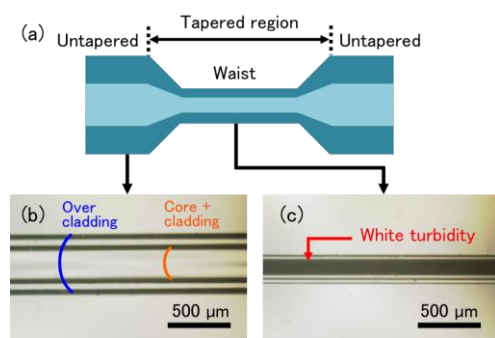


図 3. (a) テーパー加工した POF の形状の模式図. (b,c) テーパー加工していない箇所とウエスト部の顕微鏡写真.

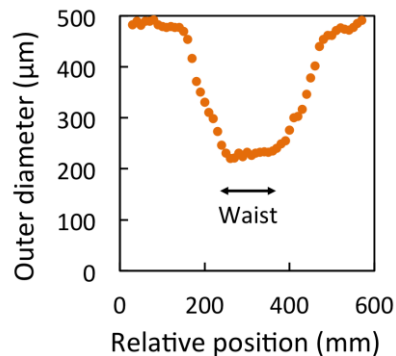


図 4. テーパー加工した POF の外径分布.

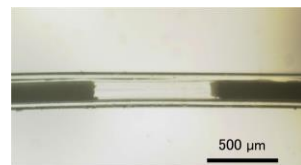


図 5. 500% の歪が印加されたときのウエスト部の顕微鏡写真.

の破断に、それぞれ対応していると考えられる。

本実験では POF の両側から等速度で巻き取ることでテーパー加工を行ったが、左右の巻き取り速度に差を設けることで長距離に渡るテーパー加工が可能であると考えられる。テーパー形状を任意に制御することも今後の課題である。

(2) BOCDR に基づき、POF に沿った歪・温度の分布測定を実証したことについて記す。

長さ 1.3 m および 2.0 m の全フッ素化屈折率傾斜型 POF を測定ファイバとして用いた。コア径は 50 μm 、クラッド径は 100 μm 、1.55 μm 帯での伝搬損失は約 250 dB/km であった。POF を用いた BOCDR の測定系を図 6 に示す。線幅 1 MHz の半導体レーザの出力光をカップラで二つに分け、一方に 1 km の遅延を加えた後、4 dBm に増幅し参照光とした。もう一方は 27 dBm に増幅し、ポンプ光として POF に入射した。ブリルアン散乱光 (ストークス光) を参照光と合波し、フォトダイオードで電気信号に変換した後、ESA で BGS として観測した。ストークス光と参照光の相対的な偏波状態は最適化した。位置分解を行うため

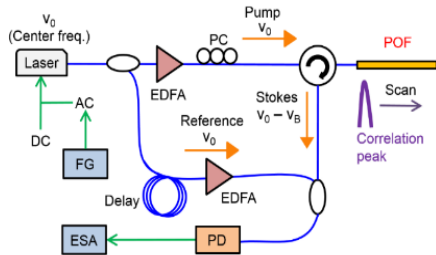


図 6. POF を用いた BOCDR の実験系.

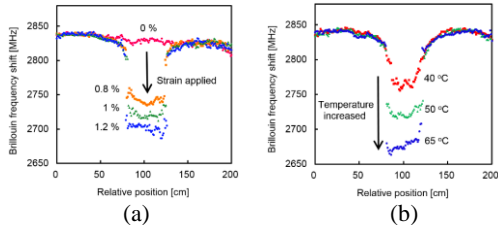


図 7. ブリルアン周波数シフトの分布。(a) 歪を加えた場合、(b) 温度を変化させた場合.

に、レーザの駆動電流に正弦波変調を印加し、POF 中に「相関ピーク」を形成した。この相関ピークを POF に沿って掃引することで分布測定を実現した。

まず、空間分解能を抑え、高い信号対雑音比で歪・温度分布測定を実証した。変調周波数を 11.654–11.698 MHz、変調振幅を 0.9 GHz とし、測定レンジは 9.5 m、理論空間分解能は 34 cm とした。また、サンプリングレートは 3.3 Hz とした。以下の実験では室温は 18 °C に保った。全長 2 m の POF 中の入射端から 80 cm から 130 cm にかけての 50 cm の区間に歪 (≤ 1.2 %) を印加したときのブリルアン周波数シフトの分布を図 7 (a) に示す。測定点を 200 としたので、測定時間は約 1 分であった。歪印加区間において周波数シフトが低周波側に移り、その歪係数 $-115.3 \text{ MHz}/\%$ は従来の報告とほぼ一致した。また、同様の区間の温度を変化させた場合の周波数シフトの分布を図 7 (b) に示す。高温印加区間において周波数シフトが低周波側に移り、その温度係数 $-3.27 \text{ MHz}/\text{K}$ は従来の報告と同等であった。

次に、cm オーダの高い空間分解能での温度分布測定を実証した。変調周波数を 53.321–53.451 MHz、変調振幅を 0.9 GHz とし、測定レンジは 1.2 m、理論空間分解能は 7.4 cm とした。全長 1.3 m の POF 中の入射端から 100 cm から 110 cm にかけての 10 cm の区間を 40 °C に昇温したときの BGS およびブリルアン周波数シフトの分布を図 8 (a)(b) にそれぞれ示す。測定時間は約 40 秒であった。高温印加区間においてブリルアン周波数シフトが低周波側に移った。ブリルアン周波数シフトの変化量は約 26 MHz であり、40 °C が正しく検出された。なお、90 cm から 115 cm にかけて緩やかにブリルアン周波数シフトが変化する原因は、高温区間とそれ以外の区間の BGS (線幅 約 100 MHz) がオーバーラップしているためと考えられる。

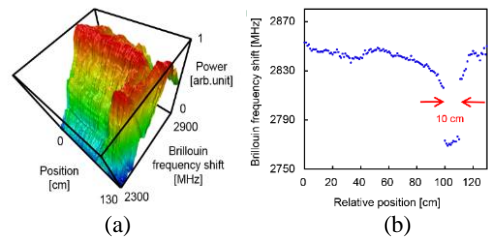


図 8. 高空間分解能での測定結果。(a) BGS の分布、(b) 周波数シフトの分布.

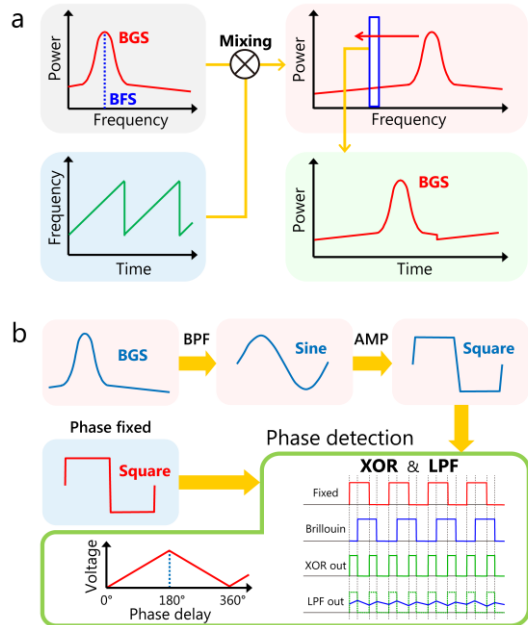


図 9. BOCDR の超高速化の原理。(a) BGS を時間領域に変換する手法、(b) BGS を位相検波により取得する手法.

POF を用いた BOCDR の性能とシリカ SMF を用いた BOCDR の性能を空間分解能、測定レンジ、および、実効的な測定点数 (分解能と測定レンジの比) について比較する。まず、POF-BOCDR の理論的な最高分解能は 23 mm と計算され、一般的な SMF-BOCDR での値の約 1/4 である。また、POF-BOCDR の理論的な最高測定点数は 44 と計算され、SMF-BOCDR の約 1/13 であるが、時間ゲート法や多重変調法の適用により解決できる可能性がある。更に、測定レンジは空間分解能とのトレードオフおよび POF の伝搬損失によって制限されるが、伝搬損失が比較的低くなる短波長帯の利用等により 1 km 程度までは延伸できると考えられる。実際に POF を用いた実験も行ったが、ここでは省略する。

(3) 従来の BOCDR を高速化するため、ESA の周波数掃引機能を用いない 2 種類の新手法「位相検波 BOCDR」と「傾斜利用 BOCDR」を提案した。ここでは前者について記す。

従来のシステムでは、BGS 全体を ESA の周波数掃引機能を用いて取得した後、そのピーク値を与える周波数 (ブリルアン周波数シフト: 歪や温度に換算可能) を算出していた。その結果、サンプリングレートは 19 Hz に制

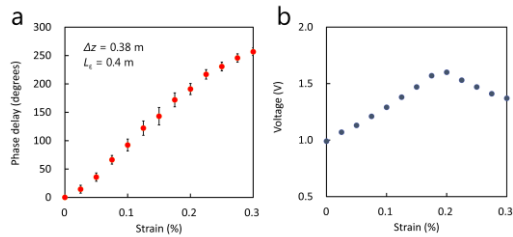


図 10. (a) 位相遅延と歪の関係、(b) システム出力と歪の関係。

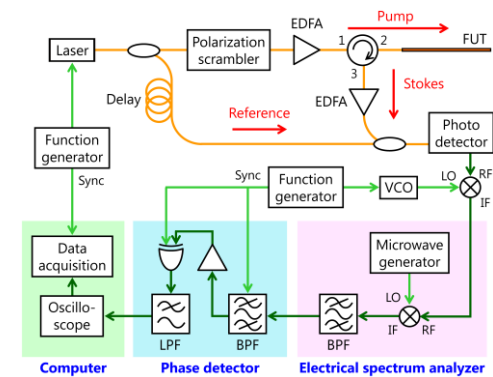


図 11. 位相検波 BOCDR の実験系。

限されていた。そこで、電圧制御発振器を用いて周波数掃引を行うことで、高速なスペクトルの取得を実現した(図 9(a))。しかし、そのままではピーク点の算出が速度を制限してしまう。そのため、さらに取得したスペクトルを狭帯域通過フィルタにより正弦波に近似して、排他的論理和の論理ゲートと低域通過フィルタを用いて位相検波を行った(図 9(b))。これにより、ブリルアン周波数シフトと 1 対 1 対応となる量を直接取得することが可能となった(図 10(a)(b))。

実際の実験系を図 11 に示す。これにより、100 kHz を超えるサンプリングレートを達成することができた。これは、従来法の 5000 倍以上の速度であり、光ファイバ中の任意の位置での伸びや温度変化を、1 秒間に 10 万回測定できることを意味する。まず、1 kHz の局所的な振動の検出に成功した(図 12(a)–(d))。次に、光ファイバをたわませて発生させた変形の伝搬を検出した(図 12(e)–(g))。以上により、リアルタイム動作が確認できた。関連動画を <https://youtu.be/OTKUivvYbH0> に示す。本手法は、伸び縮み(振動)や温度変化の分布情報を片端からの光入射で、リアルタイムかつ高空間分解能で取得できるため、様々な構造物(ビル・橋梁・トンネル・ダム・堤防・パイプライン・風車の羽根・航空機の翼など)に関わる防災・危機管理技術として幅広く活用することができる。また、アームに巻き付けることで、任意の位置で接触や変形、温度変化を検出するロボットの新しい「神経」としての応用も期待できる。なお、詳細は省略するが、本システムを POF に適用することにも成功した。

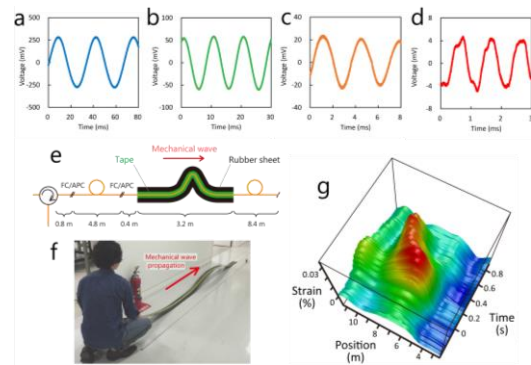


図 12. 振動測定 ((a) 30 Hz, (b) 100 Hz, (c) 300 Hz, (d) 1 kHz)、および、伝搬するたわみ変形のリアルタイム検出の結果 ((e) 測定光ファイバの構成、(f) たわみ変形が伝搬する様子、(g) 検出されたたわみ変形の伝搬)。

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)

[雑誌論文] (計 5 2 件)

- ① Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Fukuda, and K. Nakamura, “Single-end-access distributed strain sensing with wide dynamic range using higher-speed Brillouin optical correlation-domain reflectometry,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, 掲載確定.
- ② Y. Mizuno, H. Ujihara, H. Lee, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Polymer optical fiber tapering using hot water,” *Appl. Phys. Express*, 査読有, 掲載確定.
- ③ K. Minakawa, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Cross effect of strain and temperature on Brillouin frequency shift in polymer optical fibers,” *J. Lightwave Technol.*, 査読有, 掲載確定. DOI: 10.1109/JLT.2017.2689331
- ④ H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry using polymer optical fibers with high propagation loss,” *J. Lightwave Technol.*, 査読有, vol. 35, no. 11, pp. 2306-2310 (2017). DOI: 10.1109/JLT.2017.2663440
- ⑤ N. Hayashi, Y. Mizuno, K. Nakamura, S. Y. Set, and S. Yamashita, “Experimental study on depolarized GAWBS spectrum for optomechanical sensing of liquids outside standard fibers,” *Opt. Express*, 査読有, vol. 25, no. 3, pp. 2239-2244 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.002239
- ⑥ Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Fukuda, K. Y. Song, and K. Nakamura, “Ultrahigh-speed distributed Brillouin reflectometry,” *Light: Sci. Appl.*, 査読有, vol. 5, e16184 (2016). DOI: /10.1038/lsa.2016.184
- ⑦ H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Operation of slope-assisted Brillouin optical correlation-domain

- reflectometry: Comparison of system output with actual frequency shift distribution,” Opt. Express, 査読有, vol. 24, no. 25, pp. 29190-29197 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.029190
- ⑧ Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, Y. Wada, and K. Nakamura, “Brillouin scattering in multi-core optical fibers for sensing applications,” Sci. Rep., 査読有, vol. 5, 11388 (2015). DOI: 10.1038/srep11388
- ⑨ K. Minakawa, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Thermal memory effect in polymer optical fibers,” IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, vol. 27, no. 13, pp. 1394-1397 (2015). DOI: 10.1109/LPT.2015.2421950
- ⑩ Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Fiber-optic interferometry using narrowband light source and electrical spectrum analyzer: influence on Brillouin measurement,” J. Lightwave Technol., 査読有, vol. 32, no. 24, pp. 4132-4138 (2014). DOI: 10.1109/JLT.2014.2365187
- ⑪ M. Ding, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Discriminative strain and temperature measurement using Brillouin scattering and fluorescence in erbium-doped optical fiber,” Opt. Express, 査読有, vol. 22, no. 20, pp. 24706-24712 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.024706
- ⑫ N. Hayashi, K. Minakawa, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Brillouin frequency shift hopping in polymer optical fiber,” Appl. Phys. Lett., 査読有, vol. 105, no. 9, 091113 (2014). DOI: 10.1063/1.4895041
- ⑬ Y. Mizuno, S. Ohara, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Ultrasonic splicing of polymer optical fibres,” Electron. Lett., 査読有, vol. 50, no. 19, pp. 1384-1386 (2014). DOI: 10.1049/el.2014.1224
- ⑭ N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Distributed Brillouin sensing with centimeter-order spatial resolution in polymer optical fibers,” J. Lightwave Technol., 査読有, vol. 32, no. 21, pp. 3397-3401 (2014). DOI: 10.1109/JLT.2014.2339361
- ⑮ Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Fresnel-assisted self-heterodyne detection for Brillouin gain spectrum characterisation in polymer optical fibres,” Electron. Lett., 査読有, vol. 50, no. 16, pp. 1153-1155 (2014). DOI: 10.1049/el.2014.0963
- ⑯ Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, and K. Nakamura, “Spiral propagation of polymer optical fiber fuse accompanied by spontaneous burst and its real-time monitoring using Brillouin scattering,” IEEE Photon. J., 査読有, vol. 6, no. 3, 6600307 (2014). DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2323301
- ⑰ Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, K. Nakamura, and S. Todoroki, “Propagation mechanism of polymer optical fiber fuse,” Sci. Rep., 査読有, vol. 4, 4800 (2014). DOI: 10.1038/srep04800
- ⑱ Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, K. Nakamura, and S. Todoroki, “Observation of polymer optical fiber fuse,” Appl. Phys. Lett., 査読有, vol. 104, no. 4, 043302 (2014). DOI: 10.1063/1.4863413
- [学会発表] (計 148件)
- ① Y. Mizuno, H. Lee, N. Hayashi, K. Nakamura, and S. Todoroki, “Plastic optical fiber fuse and its impact on sensing applications”, 25th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-25), paper Th-X3, Jeju, Korea, April 24-28, 2017 <invited>.
- ② Y. Mizuno, H. Lee, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Brillouin scattering in plastic optical fibers and its applications to high-speed distributed sensing”, 6th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (APOS 2016), paper Tu3A.1, Shanghai, China, October 11-14, 2016 <invited>.
- ③ Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Brillouin light scattering in plastic fibers,” Asia Communications and Photonics Conference 2014 (ACP 2014), paper AW4D.2, Shanghai, China, November 11-14, 2014 <invited>.
- ④ Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Distributed strain and temperature sensing based on Brillouin scattering in plastic optical fibers,” 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-23), paper 9157-678, Santander, Spain, June 2-6, 2014 <invited>.
- [図書] (計 1件)
- ① Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Distributed Brillouin Sensing Using Polymer Optical Fibers”, Chap. 5, in H. Alemohammad, Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors: Research, Technology, and Applications in Mechanical Sensing, 1st Edition, Elsevier (ISBN: 9780128031315), 掲載確定.
- [その他]
ホームページ等
<http://www.nakamura.pi.titech.ac.jp/ymizuno/>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
水野 洋輔 (MIZUNO, Yosuke)
東京工業大学・科学技術創成研究院・助教
研究者番号：30630818