

# 片端光入射によるリアルタイム分布型光ファイバーセンサーの開発

Single-end-access real-time distributed optical fiber sensing



水野 洋輔 (Yosuke MIZUNO, Dr. Eng.)

東京工業大学 科学技術創成研究院 助教

(Associate Professor, Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology)

IEEE Photonics Society 応用物理学会 電子情報通信学会

受賞：第39回 応用物理学会講演奨励賞 (2016) 平成26年度 コニカミノルタ画像科学奨励賞 (2015) 平成25年度 東工大挑戦的研究賞 (2014) 平成24年度 手島精一記念研究賞 (中村健二郎賞) (2013) 2012年度 エヌエフ基金研究開発奨励賞 (2013) 第25回 安藤博記念学術奨励賞 (2012) 第10回 船井研究奨励賞 (2011) 第22回 独創性を拓く先端技術大賞 フジテレビジョン賞 (2008) 第2回 東京大学電気系学科優秀卒業論文賞 (2005)

著書：“Distributed Brillouin Sensing Using Polymer Optical Fibers”, in H. Alemohammad, Fiber Optic Sensors: Research, Technology, and Applications in Mechanical Sensing, Elsevier, to appear.

研究専門分野：光電子工学 計測光学 非線形光学 光ファイバー 超音波工学

100 kHz のサンプリングレート<sup>\*2</sup>を達成し、たわみ変形の伝搬を追跡することでリアルタイム動作を実証した[1]。本システムは、防災・危機管理技術としての応用範囲を広げ、生活の安全性向上に寄与するとともに、ロボットの新たな「神経」としての応用も期待できる。

## 1. 序論

1960年代から1970年代にかけての高度経済成長期に、集中的に建設された社会インフラの経年劣化が進んでいる。また、地震等の自然災害による損傷も蓄積して大きな社会問題に浮上してきている。この有力な対策として構造物に光ファイバーを「神経」のように埋め込むことで、構造物内の変形や温度を分布的に測定するシステムが使われつつある。長距離にわたって測定が可能なおよび、電磁ノイズに強い等の利点があり、注目を集めている (図1)。

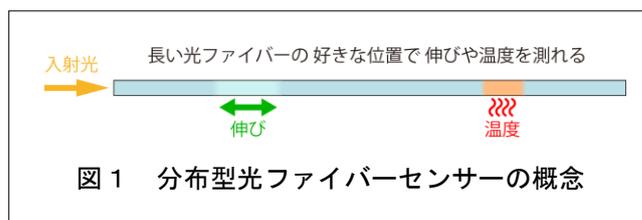


図1 分布型光ファイバーセンサーの概念

**あらまし** 光ファイバー中の変形 (伸び) と温度を検出できる分布型光ファイバーセンサーの性能向上に取り組み、片端からの光入射とリアルタイム動作の両立に世界で初めて成功した。近年、社会インフラの経年劣化や、地震等の自然災害対策が大きな社会問題として浮上しているが、ビル、トンネル、橋梁などの構造物に光ファイバーを「神経」として埋め込むことによって、構造物の変形を正確に監視できる。これまでの手法は、光ファイバーの両端から光を入射していたが、センサーの敷設に手間がかかるばかりか、光ファイバーが途中で1か所でも破断すると動作が停止してしまう難点があった。今回、位相検波<sup>\*1</sup>技術に基づいて、片端からの光入射による分布型光ファイバーセンサーの超高速化に成功し、これらの問題点を克服した。その結果、従来法の5000倍以上となる測定速度である

特に、光ファイバー中のブリルアン散乱<sup>\*3</sup>の周波数シフト (BFS) を用いた分布型の伸び・温度センサーは、他の手法に比べて高精度・高安定であることが知られている。中でも、ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR) <sup>\*4</sup> と呼ばれる手法は、光ファイバーの片端から光を入射するだけで動作、および、高空間分解能<sup>\*5</sup>、低コストなどの利点を併せ持っている。すでに、1 cm 以下の分解能の実現など、多くの成果が得られている[2]-[7]。しかし、サンプリングレートは19 Hzが最高であり、結果として分布測定に比較的長時間 (数十秒～数分) がかかるという問題があった。

そこで本研究では、BOCDRを高速化することで、片端光入射での動作、高空間分解能、および、リアルタイム動作という特徴を併せ持つ分布測定手法を世界に先駆けて実現した[1]。

# 片端光入射によるリアルタイム分布型光ファイバーセンサーの開発

## Single-end-access real-time distributed optical fiber sensing

### 2. 従来手法の原理

センシング原理となる光ファイバー中の散乱現象として、レイリー散乱やラマン散乱が知られている。これらの現象を応用した分布センサーは、実装が比較的容易であるが、散乱光の強度情報を利用するため安定性・精度が低かった。そこで、筆者らを含むいくつかの研究グループは、光ファイバー中の超音波と光の相互作用である「ブリルアン散乱」を利用した分布型センサーに着目している。ブリルアン散乱による反射光は、光ファイバー中の超音波によってドップラー効果を受け、周波数が「ブリルアン周波数シフト (BFS)」と呼ばれる量だけ減少することが知られている。この BFS は、光ファイバーに印加された歪の大きさや温度に比例して変化するため、BFS を測定することでそれらを決定することが可能となる。この手法は、散乱光の強度ではなく周波数を利用するため、安定性・精度が高いのが特長である。

ブリルアン散乱を用いた分布測定の手法は、光パルスを用いた時間領域法、フーリエ変換を用いた周波数領域法、および、光のコヒーレンス制御を用いた相関領域法の3種類に大別される。一般に、時間領域法では空間分解能が低く、周波数領域法では動作速度が遅いことが知られており、高空間分解能と高速動作を両立する手法として、筆者らは相関領域法に着目した。相関領域法では、入射光に巧みな周波数変調を施すことで、光ファイバーのある特定の箇所が生じたブリルアン散乱信号のみを選択的に抽出し、分布測定を実現する。相関領域法のうち、片端からの光入射で動作する「ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ (BOCDR)」の実験系を図2に示す。レーザーの出力光の中心周波数に変調周波数  $f_m$  で正弦波変調を施すことで、測定ファイバー中にはブリルアン散乱光と参照光の周波数差が時間的に変動しない（両光の時間平均的な相関が高い）箇所が生じる一方、それ以外の領域では両光の周波数差は時間的に変動する（両光の時間平均的な相関が低い）。ここで、相関が高い箇所を「相関ピーク」と呼ぶ。いま、光周波数は正弦波変調されているので、相関ピークは周期的に立ち並び、その間隔は変調周波数  $f_m$  に反比例する。これを利用し、測定ファイバー中にただ一つの相関ピークが立つように

$f_m$  を制御すれば、相関ピークに対応した位置でのブリルアン散乱信号のみが抽出できる。さらに  $f_m$  を掃引することで、相関ピークを測定ファイバーに沿って移動させ、ブリルアン散乱スペクトルや BFS の分布情報を得ることができる。これまでに、ガラス光ファイバーで 6 mm の空間分解能が実現されている。

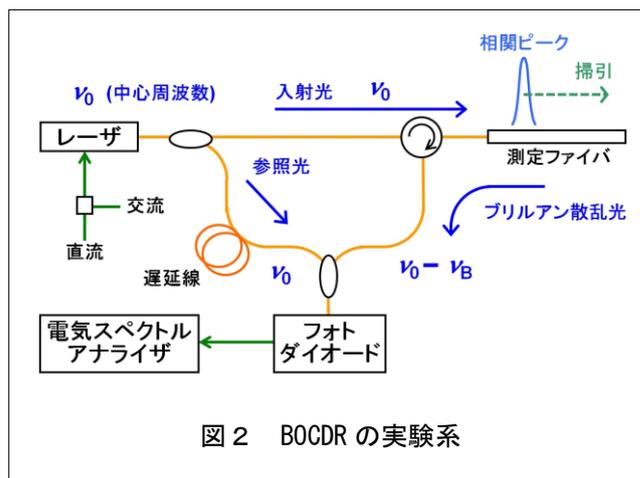


図2 BOCDRの実験系

### 3. 新手法の提案と実験結果

従来の BOCDR の実験系では、ブリルアン散乱スペクトル全体を電気スペクトルアナライザー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 (BFS) 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3左)。これは、BFS の取得を周波数領域から時間領域に変換したと解釈できる。しかし、そのままでは BFS の算出が速度を制限してしまい、サンプリングレートは最高でも 200 Hz 程度に制限されてしまった。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ー (BPF) により正弦波に近似して、排他的論理和 (XOR) の論理ゲートと低域通過フィルター (LPF) を用いて位相検波を行った (図3右)。これにより、BFS 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。結果として、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、光ファイバー中の任意の位置での伸びや温度変化を、1 秒間に 10 万回測定できるよ

# 片端光入射によるリアルタイム分布型光ファイバーセンサーの開発

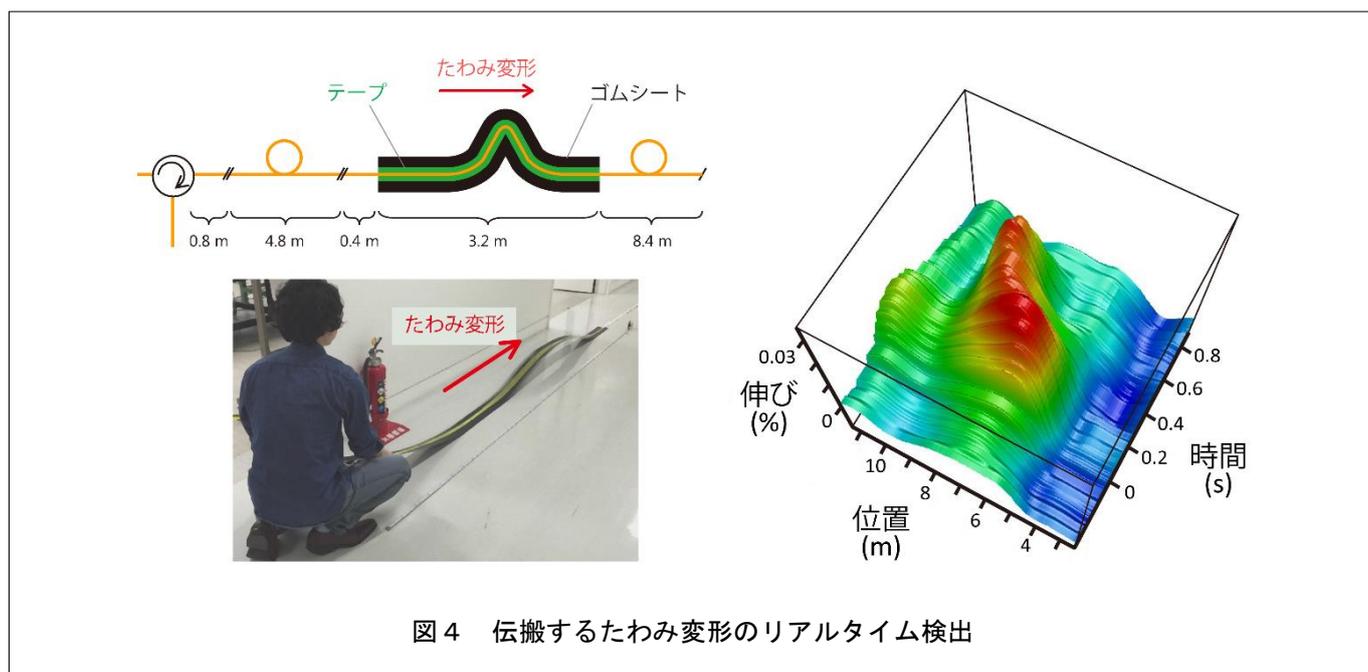
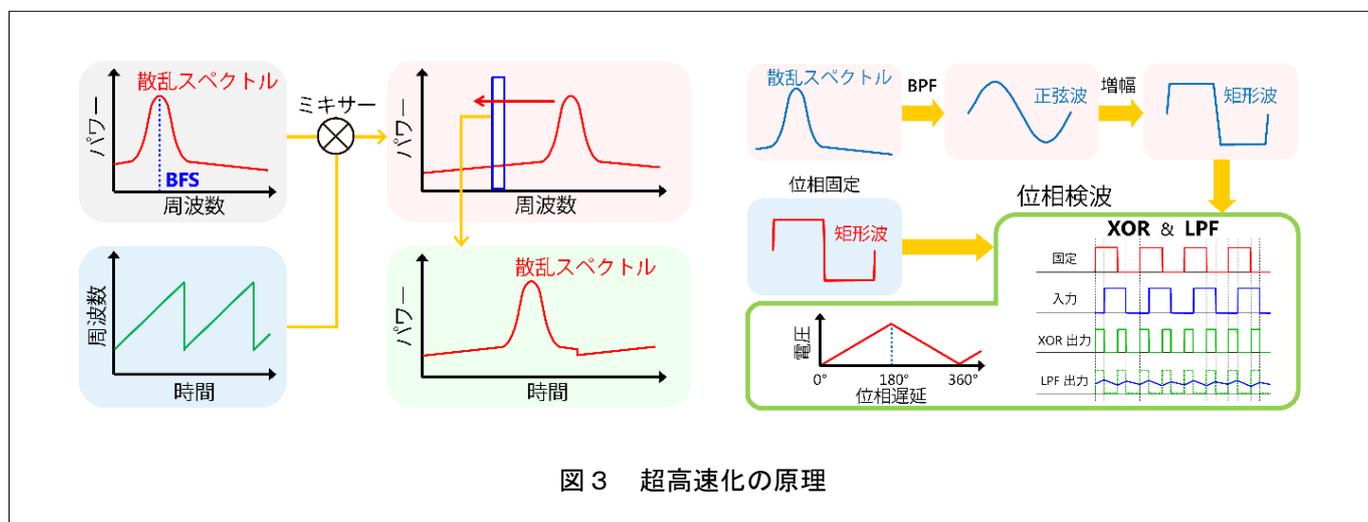
## Single-end-access real-time distributed optical fiber sensing

うになったことを意味しており、この値は従来法の5000倍以上の速度である。

続いて、本手法の有用性を実験により実証した。まず、測定光ファイバーの任意の位置に最大1 kHzまでのさまざまな局所振動を発生させ、これらを検出できることを示した。各振動の周波数はもちろん、得られた振動の振幅も他の手法（レーザードップラー法）で測った値と一致した。次に、光ファイバーをたわませて発生させた変形が伝搬の様子を検出した（図4）。本手法により得られたたわみ変形の伝搬速度は約10 m/s

であり、ビデオから算出した値とほぼ一致した。また、変形の大きさも理論値と良い一致を示した。以上により、リアルタイム動作が確認できた。東京工業大学公式アカウントよりYouTubeに関連動画をアップロードしたので、ぜひご覧ください（<https://youtu.be/0TKUivvYbH0>）。

最後に、ガラス光ファイバーに比べて柔軟性に富むプラスチック光ファイバー\*6[8]-[23]にも本手法を適用し、高速な局所振動検出および分布測定が可能であることを示した。



# 片端光入射によるリアルタイム分布型光ファイバーセンサーの開発

## Single-end-access real-time distributed optical fiber sensing

### 4. まとめと将来の展開

本研究では、位相検波技術を駆使し、片端からの光入射により動作する分布型光ファイバーセンサーの超高速化に成功した。その結果、従来法の 5000 倍以上となる 100 kHz のサンプリングレートを達成し、たわみ変形の伝搬を追跡することでリアルタイム動作を実証した。また、プラスチック光ファイバーの適用可能性も実証した。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。今後は、更なる性能向上を推進するとともに、システムの小型化・低コスト化やフィールドテストにも注力し、数年後の実用化を目指す計画である。

### 用語解説

#### \*1 位相検波

2 つの正弦波が時間的にどれくらいずれているかを検出すること。

#### \*2 サンプリングレート

光ファイバー中のある 1 点の伸びや温度を、1 秒間あたりに測定できる回数。例えば、サンプリングレートが 100 kHz であるとは、ある位置での伸びや温度を 1 秒間に 10 万回測定できることを意味する。

#### \*3 ブリルアン散乱

光ファイバー中に存在する微弱な超音波により入射光が散乱され、周波数のダウンシフトを伴って反射される現象。周波数シフト量（BFS）が伸びや温度に依存するため、センシングの原理として利用されている。

#### \*4 ブリルアン光相関領域反射計（BOCDR）

入射光に巧みな周波数変調を施すことで、光ファイバーのある特定の箇所が生じたブリルアン散乱信号のみを選択的に抽出し、分布測定を実現する手法。光ファイバーの片端からの光入射で動作するのが最大の特長である。

#### \*5 空間分解能

検出可能な伸びや温度変化区間の最短の長さ。

#### \*6 プラスチック光ファイバー

アクリルなどの高分子材料で構成された光ファイバー。ガラス光ファイバーよりも丈夫で柔軟性に富む一方、光伝搬損失が大きい比較的近距離の通信に用いられることが多い。また、プラスチック光ファイバーはコア径が大きいためブリルアン散乱光が微弱であり、信号対雑音比が劣化するため、ガラス光ファイバーよりも分布測定は困難である[8]-[23]。

### 参考文献

- [1] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Fukuda, K. Y. Song, and K. Nakamura, "Ultrahigh-speed distributed Brillouin reflectometry", *Light: Sci. Appl.*, vol. 5, e16184 (2016).
- [2] 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*, vol. 24, no. 25, pp. 29190-29197 (2016).
- [3] H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry: proof of concept," *IEEE Photon. J.*, vol. 8, no. 3, 6802807 (2016).
- [4] 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.*, vol. 32, no. 24, pp. 4132-4138 (2014).
- [5] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Alternative implementation of simplified Brillouin optical correlation-domain reflectometry," *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 6, 6803108 (2014).

# 片端光入射によるリアルタイム分布型光ファイバーセンサーの開発

## Single-end-access real-time distributed optical fiber sensing

- [6] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Suppression of ghost correlation peak in Brillouin optical correlation-domain reflectometry," *Appl. Phys. Express*, vol. 7, no. 11, 112501 (2014).
- [7] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Simplified configuration of Brillouin optical correlation-domain reflectometry," *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 5, 6802807 (2014).
- [8] K. Minakawa, K. Koike, N. Hayashi, Y. Koike, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Dependence of Brillouin frequency shift on water absorption ratio in polymer optical fibers," *J. Appl. Phys.*, vol. 119, no. 22, 223102 (2016).
- [9] N. Hayashi, M. Shizuka, K. Minakawa, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Simplified optical correlation-domain reflectometry using polymer fiber," *IEICE Electron. Express*, vol. 12, no. 22, 20150824 (2015).
- [10] H. Ujihara, N. Hayashi, K. Minakawa, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Polymer optical fiber tapering without the use of external heat source and its application to refractive index sensing," *Appl. Phys. Express*, vol. 8, no. 7, 072501 (2015).
- [11] K. Minakawa, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Thermal memory effect in polymer optical fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 13, pp. 1394-1397 (2015).
- [12] N. Hayashi, K. Minakawa, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Polarization scrambling in Brillouin optical correlation-domain reflectometry using polymer fibers," *Appl. Phys. Express*, vol. 8, no. 6, 062501 (2015).
- [13] K. Minakawa, K. Koike, Q. Du, N. Hayashi, Y. Koike, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Temperature dependence of Brillouin frequency shift in polymers controlled by plasticization effect," *J. Appl. Phys.*, vol. 117, no. 14, 144505 (2015).
- [14] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Simplified Brillouin optical correlation-domain reflectometry using polymer optical fiber," *IEEE Photon. J.*, vol. 7, no. 1, 6800407 (2015).
- [15] N. Hayashi, K. Minakawa, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Brillouin frequency shift hopping in polymer optical fiber," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 9, 091113 (2014).
- [16] Y. Mizuno, S. Ohara, N. Hayashi, and K. Nakamura, "Ultrasonic splicing of polymer optical fibers," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 19, pp. 1384-1386 (2014).
- [17] H. Ujihara, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Measurement of large-strain dependence of optical propagation loss in perfluorinated polymer fibers for use in seismic diagnosis," *IEICE Electron. Express*, vol. 11, no. 17, 20140707 (2014).
- [18] A. A. Jasim, N. Hayashi, S. W. Harun, H. Ahmad, R. Penny, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Refractive index and strain sensing using inline Mach-Zehnder interferometer comprising perfluorinated graded-index plastic optical fiber," *Sens. Actuat. A*, vol. 219, pp. 94-99 (2014).
- [19] N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Distributed Brillouin sensing with centimeter-order spatial resolution in polymer optical fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 21, pp. 3999-4003 (2014).
- [20] Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, "Fresnel-assisted self-heterodyne detection for Brillouin gain spectrum characterisation in polymer optical fibres," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 16, pp. 1153-1155 (2014).
- [21] K. Minakawa, K. Koike, N. Hayashi, Y. Koike, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Dependence of Brillouin frequency shift on temperature in poly(pentafluorostyrene)-based polymer optical fibers estimated by acoustic velocity measurement," *IEICE Electron. Express*, vol. 11, no. 10, 20140285 (2014).
- [22] N. Hayashi, H. Fukuda, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Observation of Brillouin gain spectrum in tapered polymer optical fiber," *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 17, 173108 (2014).
- [23] K. Minakawa, N. Hayashi, Y. Shinohara, M. Tahara, H. Hosoda, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Wide-range temperature dependences of Brillouin scattering properties in polymer optical fiber," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 4, 042502 (2014).

### 関連文献

- [24] M. Shizuka, H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Simplified optical correlation-domain reflectometry employing proximal reflection point," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 12, 128003 (2016).

# 片端光入射によるリアルタイム分布型光ファイバーセンサーの開発

## Single-end-access real-time distributed optical fiber sensing

- [25] S. Shimada, H. Tanaka, K. Hasebe, N. Hayashi, Y. Ochi, T. Matsui, I. Nishizaki, Y. Matsumoto, Y. Tanaka, H. Nakamura, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Ultrasonic welding of polymer optical fibres onto composite materials," *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 17, pp. 1472-1474 (2016).
- [26] M. Shizuka, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Simplified optical correlation-domain reflectometry without reference path," *Appl. Opt.*, vol. 55, no. 15, pp. 3925-3928 (2016).
- [27] N. Hayashi, H. Lee, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Observation of backward guided-acoustic-wave Brillouin scattering in optical fibers using pump-probe technique," *IEEE Photon. J.*, vol. 8, no. 3, 7100707 (2016).
- [28] S. Shimada, M. Shizuka, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Measurement of the optical path length difference in an interferometer using a sinusoidally frequency-modulated light source," *Appl. Opt.*, vol. 55, no. 11, pp. 2904-2908 (2016).
- [29] M. Shizuka, S. Shimada, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Optical correlation-domain reflectometry without optical frequency shifter," *Appl. Phys. Express*, vol. 9, no. 3, 032702 (2016).
- [30] H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Observation of Brillouin gain spectrum in optical fibers in telecommunication band: effect of pump wavelength," *IEICE Electron. Express*, vol. 13, no. 3, 20151066 (2016).
- [31] M. Yoshida, Y. Hirayama, A. Takahara, M. Kashi, K. Takeuchi, T. Ikeda, F. Hirai, Y. Mizuno, K. Nakamura, H. Kimura, N. Ino, and W. Inoue, "Real-time displacement measurement system using phase-shifted optical-pulse interferometry: application to a seismic observation system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 2, 022701 (2016).
- [32] H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Refractive index sensing using V-shaped polymer optical fibers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 11, 118001 (2015).
- [33] G. Numata, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Drastic sensitivity enhancement of temperature sensing based on modal interference in polymer optical fibers," *Appl. Phys. Express*, vol. 8, no. 7, 072502 (2015).
- [34] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, Y. Wada, and K. Nakamura, "Brillouin scattering in multi-core optical fibers for sensing applications," *Sci. Rep.*, vol. 5, 11388 (2015).
- [35] G. Numata, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Strain and temperature sensing based on multimode interference in partially chlorinated polymer optical fibers," *IEICE Electron. Express*, vol. 12, no. 2, 20141173 (2015).
- [36] M. Ding, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Discriminative strain and temperature measurement using Brillouin scattering and fluorescence in erbium-doped optical fiber," *Opt. Express*, vol. 22, no. 20, pp. 24706-24712 (2014).
- [37] M. Ding, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Brillouin signal amplification in pumped erbium-doped optical fiber," *IEICE Electron. Express*, vol. 11, no. 18, 20140627 (2014).
- [38] G. Numata, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Ultra-sensitive strain and temperature sensing based on modal interference in perfluorinated polymer optical fibers," *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 5, 6802306 (2014).
- [39] 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.*, vol. 6, no. 3, 6600307 (2014).
- [40] Y. Kato, Y. Wada, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Measurement of elastic wave propagation velocity near tissue surface through optical coherence tomography and laser Doppler velocimetry," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 7S, 07KF05 (2014).
- [41] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, K. Nakamura, and S. Todoroki, "Propagation mechanism of polymer optical fiber fuse," *Sci. Rep.*, vol. 4, 4800 (2014).
- [42] Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, K. Nakamura, and S. Todoroki, "Observation of polymer optical fiber fuse," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 4, 043302 (2014).

この研究は、平成24年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成25～27年度に実施されたものです。