

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス : 3.13 光制御デバイス・光ファイバー

2024年9月18日(水) 13:30 ~ 16:15 会 A35 (朱鷺メッセ3F)

[18p-A35-1~10] 3.13 光制御デバイス・光ファイバー

田中 哲(防衛大)、合谷 賢治(秋田県大)

◆ 奨励賞エントリー

13:30 ~ 13:45

[18p-A35-1]

フェムト秒レーザー加工によるフッ化物ファイバーへのマイクロ流路の形成と赤外分光計測

○(M1)石田 岳士¹、杉本 尚哉¹、上原 日和²、時田 茂樹³、合谷 賢治¹ (1.秋田県大、2.核融合研、3.京大化研)

◆ 奨励賞エントリー ◆ 英語発表

13:45 ~ 14:00

[18p-A35-2]

Dual-laser Brillouin optical correlation-domain reflectometry: proof of concept

○(DC)Guangtao Zhu¹, Takahiro Ishimaru², Hiroshi Takahashi^{1,2}, Yusuke Koshikiya², Yosuke Mizuno¹ (1.YNU, 2.NTT)

14:00 ~ 14:15

[18p-A35-3]

小径POFにおけるブリルアン周波数シフトの歪・温度依存性の解明

○白井 振武¹、越智 星河¹、和田 有司²、中村 健太郎²、守屋 亮³、加世田 雄梧³、清水 享³、水野 洋輔¹ (1.横浜国大、2.東工大、3.日東電工)

14:15 ~ 14:30

[18p-A35-4]

POFに描画したFBGによる接触センシング：グレーティング数の影響の解明

○北村 ののか¹、ジャビッド ハムザ¹、渡邊 俊介²、李 ひよん³、水野 洋輔¹ (1.横浜国大、2.オキサイド、3.芝浦工大)

14:30 ~ 14:45

[18p-A35-5]

時間分割多重による長距離準分布型FBGセンサー

○黒田 圭司¹、清水 虎正¹ (1.北里大理)

15:00 ~ 15:15

[18p-A35-6]

アクティブノイズ低減による高感度近接場オプトメカニカル測定

○佐久間 涼子¹、浅野 元紀¹、山口 浩司¹、岡本 創¹ (1.NTT物性研)

15:15 ~ 15:30

[18p-A35-7]

カスケード型チャープLPGを用いた偏波保持型EDFレーザーの強度変調型センサへの応用

○田中 哲¹、岡野 真人¹、和田 篤¹ (1.防衛大)

15:30 ~ 15:45

[18p-A35-8]

OCDRとBOCDRのハイブリッド実装

○久保田 晴之¹、越智 星河¹、石丸 貴大²、高橋 央²、古敷谷 優介²、水野 洋輔¹ (1.横浜国大、2.NTT)

15:45 ~ 16:00

[18p-A35-9]

BOCDRにおける電気信号処理系の隔離の検討

○井上 諒¹、大島 瑠己²、岩崎 脩¹、菊地 啓太¹、水野 洋輔²、李 ひよん¹ (1.芝浦工大、2.横浜国大)

16:00 ~ 16:15

[18p-A35-10]

螺旋型および直線型ファイバを用いたdistributed acoustic sensingで計測される地震探査波形の逆解析に基づく地下イメージング

○榎谷 将吾¹、谷 昌憲¹ (1.INPEX)

フェムト秒レーザー加工によるフッ化物ファイバーへの マイクロ流路の形成と赤外分光計測

Femtosecond Laser Writing of Fluoride Fiber In-Line Microchannel for IR spectroscopy

秋田県大¹, 核融合研², 京大化研³ ◯(M1)石田 岳土¹, 杉本 尚哉¹, 上原 日和², 時田 茂樹³, 合谷 賢治¹

Akita Prefectural Univ.¹, National Institute for Fusion Science.², Kyoto Univ. Institute for Chemical Research.³ ◯Ishida Gakuto¹, Masaya Sugimoto¹, Hiyori Uehara², Shigeki Tokita³, Kenji Goya¹

E-mail: M26L001@akita-pu.ac.jp

1. 研究目的

本研究はフェムト秒レーザー加工技術を利用し、フッ化物ファイバーへのセンサー機能の付加を目的とする。従来の石英系ファイバーは透過波長帯域が 0.3 μm ~2.0 μm 程度であるのに対し、フッ化物ファイバーは 5 μm 程度までの光伝送が可能であるため、分子の指紋領域と呼ばれる中赤外光の一部を計測に利用することが出来る[1]。本研究ではフッ化物ファイバー表面に微細な流路を形成する手法を開発し、分光計測における設計条件を明らかにする。また、提案技術の実現性評価のために、作製したセンサーサンプルを用いた計測実験を行う。

2. 赤外分光計測

赤外分光計測では、物質が固有の赤外線を吸収する性質を利用する。物質が光を吸収するとき吸収のある特定波長のことを吸収波長と呼び、物質ごとに固有の吸収波長が存在する。式(1)に示すランベルト・ベールの法則は、その物体を透過または反射する際の光の強度変化を表す法則である。この法則を赤外分光計測に応用することで物質の濃度や特性を評価することが可能である。

$$A_{\lambda} = -\log_{10}(I/I_0) = \varepsilon_{\lambda}cL \quad (1)$$

ここで A_{λ} は吸光度 I_0 は入射光強度、 I は透過光強度、 ε_{λ} はモル吸光係数、 c はモル濃度、 L は光路長である。

3. 実験方法

フェムト秒レーザーによりファイバーの樹脂被覆、クラッドを除去し液体用のマイクロ流路を形成する。図1にセンサー化したファイバーの3Dモデルと実際に作製したセンサー部の断面を示す。

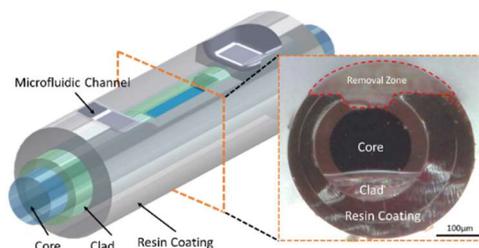


図1 センサーの3Dモデルと断面

本研究では、分光計測用の液体サンプルとして、水とグルコースを用いた。それぞれ波長 3000nm と 3400nm 近傍に吸収があり、光ファイバー上のセンサー部に滴下し、その吸収スペクトルを観察することにより、提案センサーの実現性を検証する。

4. 実験結果

図2に水及びグルコースを付着させた際の透過スペクトルを示す。実験で得られた減衰特性が水(灰)のスペクトルについて、波長 2900nm 近傍でピークを有しており、水の吸収特性と一致していることがわかる。またグルコースの質量%濃度を変化させてスペクトルの計測を行った結果、グルコースの吸収特性(青)と一致した波長で減衰が確認でき、挿入図の通り、質量%濃度の増加に伴って透過率が減少することを確認した。

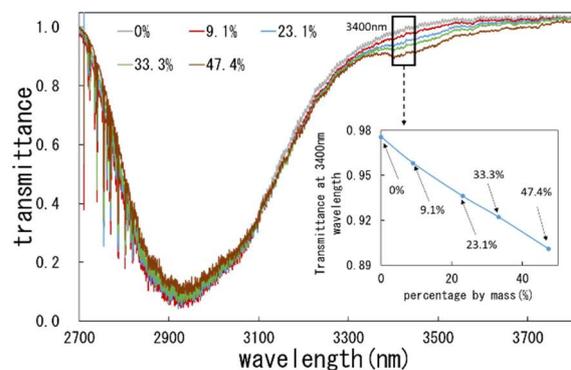


図2 媒質を付着させた際の透過スペクトル

5. 結論

本研究でフェムト秒レーザー加工を利用して、フッ化物ファイバー導波路上へのマイクロ流路の構造化に成功した。また、センサー性能の評価において、数 nL の微小な液量であっても水の検出、及びグルコースの質量%濃度の違いによる透過スペクトルの変化を定量可能であることが確認された。

[1] K. Goya *et al.*, A fluoride fiber optics in-line sensor for mid-IR spectroscopy based on a side-polished structure, *Sensors Actuators B Chem.* 351 (2022) 130904.

Dual-laser Brillouin optical correlation-domain reflectometry: proof of concept

Guangtao Zhu¹, Takahiro Ishimaru², Hiroshi Takahashi^{1,2}, Yusuke Koshikiya², and Yosuke Mizuno^{1,3}

¹ Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama 240-8501, Japan

² Access Network Service Systems Laboratories, NTT Corporation, Ibaraki 305-0805, Japan

³ Institute for Multidisciplinary Sciences, Yokohama National University, Yokohama 240-8501, Japan

E-mails: zhu-guangtao-jm@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

Introduction

Over recent decades, there has been rising demand for health monitoring of infrastructures that are susceptible to various forms of degradation, such as earthquake damage and aging, which has led to a major increase in research on optical fiber sensors. Brillouin scattering [1] in optical fibers has been a major tool for developing these sensors, where the distribution of strain and/or temperature of the structure under test can be obtained by measuring the Brillouin frequency shift (BFS) within fibers under test (FUTs) [2,3]. Here, we focus on Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR) [4], distinguished by its advantages of single-end accessibility, relatively high spatial resolution, and the ability to randomly access sensing points.

In a standard BOCDR system [4], the output of a single laser diode (LD) is divided and used as both pump and reference lights. The Brillouin gain spectrum (BGS) is observed using an electrical spectrum analyzer (ESA) through optical heterodyne detection between the reference light and the spontaneous Brillouin-scattered light generated in the FUT, and the distributed measurement is performed by the frequency modulation of the LD. However, three primary limitations are associated with this method: (i) a delay line is often required in either the reference path or the pump path, as it is difficult to move the position of the 0-th correlation peak by controlling the modulation frequency of the LD, (ii) the BGS is observed in a high-frequency region in an ESA (~11 GHz for silica optical fibers), necessitating the use of an ESA with high specifications (or electrical heterodyne detection), and (iii) the LD modulation frequency needs to be swept to perform distributed sensing, causing variation of the spatial resolution during the measurement.

In this work, we newly develop a dual-laser BOCDR configuration that employs two LDs for the pump and reference sources. This configuration enables distributed strain measurement without the need for a delay line by adjusting the relative modulation phase of the two lights. We successfully demonstrate this approach with the BGS observed at a down-converted frequency of approximately 2.20 GHz as a proof of concept. Despite the necessity of an additional LD, the dual-laser BOCDR simplifies the system, eliminates the reliance on high-specification ESAs, and avoids sweeping the modulation frequency for distributed sensing, leading to the constant spatial resolution regardless of the sensing position.

Principles

The experimental setup of the dual-laser BOCDR is illustrated in Fig. 1. The optical output from LD1 serves as the pump light and is introduced into the FUT, and the backscattered Stokes light is directed into a photodetector. The output from LD2 serves as the reference light and acts as an optical local oscillator for optical heterodyne measurement. The electrical beat signal, with a frequency of the difference between the two lights, is monitored using an ESA. To resolve the sensing position along the FUT, the output frequencies of both LDs are modulated in sinusoidal waveforms under the control from the two channels of a function generator (FG). We control the modulation frequency to generate only a single correlation peak within the range of the FUT, thereby enabling selective observation of the BGS at the position of the correlation peak. By sweeping the modulation phase difference between the pump and reference lights with the 2-phase function of the FG, the sensing position can be swept along the FUT, and thus distributed measurement can be achieved.

Experiments

We first conducted distributed measurement along a 3.67-m-long FUT with the dual-laser BOCDR as a proof of concept. Two distributed-feedback LDs at 1550 nm from the same production series (155010C1424-19, CivilLaser; linewidth = ~3 MHz) were sinusoidally modulated by the two channels of the

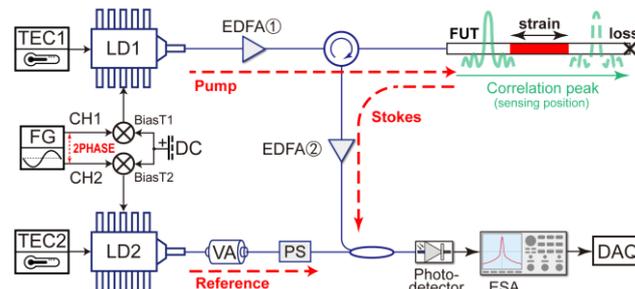


Fig. 1 Experimental setup of the dual-laser BOCDR. DAQ: data acquisition, DC: direct current, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, FUT: fiber under test, PS: polarization scrambler, TEC: thermoelectric cooler, VA: variable attenuator.

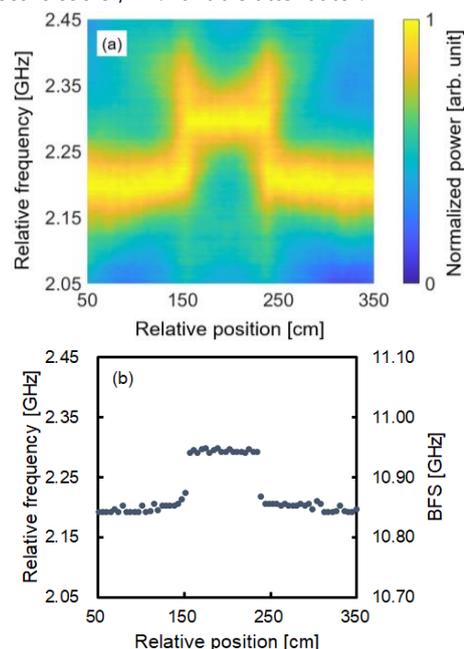


Fig. 2 Measured distributions of (a) BGS and (b) BFS along the FUT.

function generator. The modulation frequency was 3 MHz, and the phase of Channel 1 was swept from 75° to 110° to scan the sensing position along the FUT. A strain of 0.2% was applied to a section of 71.5 cm on the FUT. The output frequencies of the LDs were stabilized and controlled with two thermoelectric coolers (TECs), where the set temperatures in TEC1 and TEC2 were 24.2 °C and 27.2 °C, respectively. In this way, the frequency of the reference light was several GHz lower than that of the pump light, and thus the BGS can be observed at a low frequency in the ESA. The measured BGS and BFS distributions along the FUT are shown in Figs. 2(a) and 2(b), respectively. The measured BGS is normalized by setting the noise floor to 0 and the peak power to 1. The primary vertical axis in Fig. 2(b) shows the relative frequency between the reference and Stokes lights, while the secondary vertical axis shows the BFS calculated by adding the frequency between the pump and reference lights. It is shown that the BGSs were observed at significantly lower frequencies, and distributed measurement was successfully conducted.

References

- [1] E. P. Ippen, et al., *Appl. Phys. Lett.* **21**, 539 (1972).
- [2] K. Hotate, and T. Hasegawa, *IEICE Trans. Electron.* **E83-C**, 405 (2000).
- [3] T. Kurashima, et al., *IEICE Trans. Commun.* **E76-B**, 382 (1993).
- [4] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [5] Y. Mizuno, et al., *J. Lightwave Technol.* **28**, 3300 (2010).

小径 POF における Brillouin 周波数シフトの歪・温度依存性の解明

Strain and temperature dependences of Brillouin frequency shift in small-diameter plastic optical fibers

○白井 振武¹, 越智 星河¹, 和田 有司², 中村 健太郎², 守屋 亮³, 加世田 雄梧³, 清水 享³, 水野 洋輔¹

¹横浜国立大学 大学院工学研究院 ²東京工業大学 未来産業技術研究所 ³日東電工

○Shimbu Shirai¹, Seiga Ochi¹, Yuji Wada², Kentaro Nakamura²,

Toru Moriya³, Yugo Kaseda³, Takashi Shimizu³, and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University ²Tokyo Institute of Technology ³Nitto Denko

E-mails: shirai-shimbu-nd@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

社会インフラの経年劣化や災害による損傷が問題となっており、建造物の健全性を正確かつ高速に診断する技術の需要が高まっている。そこで、電気センサにはない多くのメリットをもつ光ファイバセンサが注目されている。特に、 Brillouin 散乱を用いた光ファイバセンサは、歪や温度の分布情報を計測することができるため、研究開発の進展が著しい。

従来の Brillouin センサには、主にシリカガラス光ファイバが用いられてきたが、歪への耐性が低く、数%の歪で破断するという問題があった。そこで、ガラス光ファイバよりも高い柔軟性を有し、数 10 %以上の歪にも耐えることができるプラスチック光ファイバ (POF) を用いた Brillouin センサに注目が集まっている[1]。

POF には多くの種類があるが、 Brillouin 散乱が観測されている唯一のタイプは、アクリルに全フッ素化加工を施して 1550 nm 帯の伝搬損失を低減 (約 250 dB/km) したものである。 Brillouin 散乱の観測には、市販されている中で最小のコア径 50 μm を有する屈折率傾斜型全フッ素化 POF (以下、単に POF と呼称する) が適している[1]。

Brillouin 特性は、 POF の断面積の大部分を占める補強層の影響を受け、同じコア径であっても外径によって変化する可能性がある。これまでに、外径 750 μm および 500 μm の POF (断面構造をそれぞれ Fig. 1(a) および Fig. 1(b) に示す) の Brillouin 特性は解明されている[2-4]。しかし、最近市販化された、外径が 250 μm 程度の POF (Fig. 1(c); コア材料も少々異なる) の Brillouin 特性については報告がない。

そこで本発表では、外径が 250 μm 程度の POF の Brillouin 利得スペクトル (BGS) を観測し、その歪や温度に対する依存性を調査した。

2. 原理

1550 nm 帯・室温において、シリカ光ファイバの Brillouin 周波数シフト (BFS) は約 10.8 GHz であるのに対し、 POF の BFS は約 2.8 GHz である[2]。これは、シリカファイバに比べて POF 中の音速が低い (柔らかい) ことに起因する。

また、1550 nm 帯における BFS の歪と温度に対する依存係数はそれぞれ、シリカファイバでは +500 MHz/%、 +1.0 MHz/K 程度であるのに対し、外径 750 μm の POF (Fig. 1(a)) では -122 MHz/%、 -4.1 MHz/K [3] (外径 500 μm の POF (Fig. 1(b)) では -3.2 MHz/K [4]) である。これは、 POF 中の Brillouin 散乱が歪に依存しにくい高感度な温度センシングに利用可能であることを示唆する。

3. 実験

小径 POF 中の BGS を観測するための、自己ヘテロダイン検波に基づく実験系を Fig. 2 に示す。1550 nm のレーザの出力を 19 dBm まで増幅して POF に入射した。 POF のコア径は 50 μm 、外径は 232 μm 、長さは 3 m であり、補強層の材料はポリカーボネートである。

BGS および BFS の歪依存性の測定結果を Fig. 3(a) および Fig. 3(b) にそれぞれ示す。まず、室温・無歪での BFS は約 2.72 GHz であり、他の POF の BFS [2] よりも 100 MHz 程度低い値となった。これは、コア材料の差異 (非公開) に起因するものと考えられる。次に、BGS は歪印加に伴い低周波側にシフトし、BFS の歪依存係数は -190 MHz/% 程度であった。この絶対値は、従来報告[3]の約 1.5 倍である。さらに、BGS および BFS の温度依存性の測定結果を Fig. 4(a) および Fig.

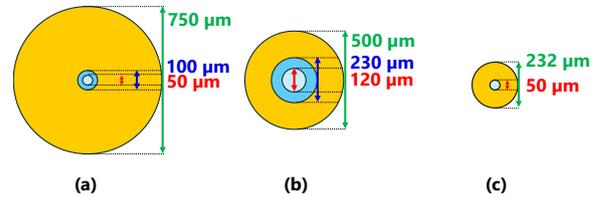


Fig. 1. Cross-sections of commercially available POFs with three-layered structures (core, cladding, and overcladding).

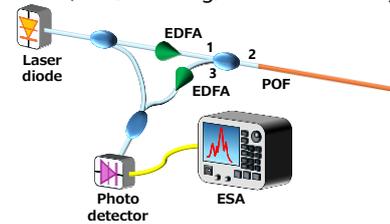


Fig. 2. Experimental setup for observing Brillouin gain spectrum in plastic optical fiber (POF). EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer.

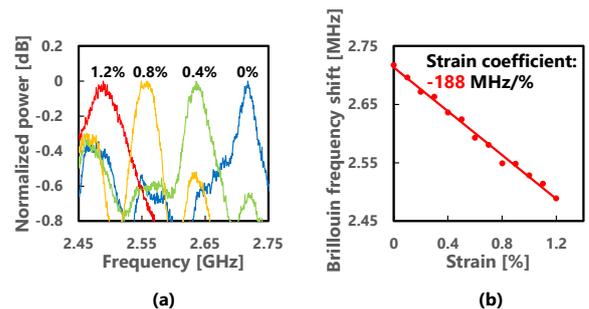


Fig. 3. Strain dependences of (a) BGS and (b) BFS.

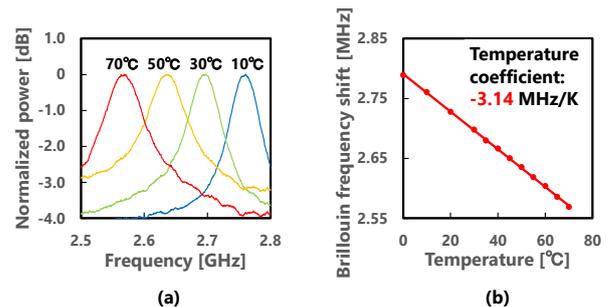


Fig. 4. Temperature dependences of (a) BGS and (b) BFS.

4(b) にそれぞれ示す。歪依存性と同様、温度上昇に伴い BFS は低周波数側へシフトし、その依存係数は -3.1 MHz/K 程度であった (外径 500 μm の POF [4] と同等)。

BFS の歪依存係数の絶対値の増大は、 POF の構造と材料のどちらかの違いに起因すると考えられる。今後、歪印加時に誘起されるコア部の応力解析シミュレーションを実施し、その原因がどちらに起因するのかを解明していく。

参考文献

- [1] Y. Mizuno, et al., Photon. Res. **9**, 1719 (2021).
- [2] Y. Mizuno, et al., Appl. Phys. Lett. **97**, 021103 (2010).
- [3] Y. Mizuno, et al., Opt. Lett. **35**, 3985 (2010).
- [4] K. Minakawa, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 042502 (2014).

POFに描画したFBGによる接触センシング：グレーティング数の影響の解明

Touch sensing using FBG inscribed in POF: effect of grating number

○北村 ののか¹, ハムザ ジャビッド¹, 渡邊 俊介², 李 ひよん³, 水野 洋輔¹

¹横浜国立大学 大学院工学研究院 ²オキサイド ³芝浦工業大学 大学院理工学研究科

ONonoka Kitamura¹, Hamza Javid¹, Shunsuke Watanabe², Heeyoung Lee³, and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University ²OXIDE ³Shibaura Institute of Technology

E-mails: kitamura-nonoka-pt@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバセンサは、電気センサにはない多くのメリットを有しており、昨今の研究開発の進展が著しい。光ファイバセンサは大きく2種類に分類され、1つは分布型センサであり、光ファイバ全長の任意の位置で物理量の測定が可能である[1]。もう1つは点型センサであり、ファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG) を用いたセンサが代表的である[2]。一般に、点型センサの方が分布型センサよりも測定精度が高い。ここでは、点型センサに焦点を当てる。

シリカ単一モードファイバ (SMF) に描画した FBG は広く使用されているが、数%の歪で破損してしまうという欠点がある。これに対して、プラスチック光ファイバ (POF) は歪への耐性が高い。従来はアクリル POF を用いた研究が主流であったが、近年では通信波長帯での光伝搬損失が低い全フッ素化屈折率傾斜型 (PFGI-) POF も脚光を浴びている。

2022年、我々は PFGI-POF に描画した FBG を用いた接触センシングを提案し、FBG と物体の距離が近づくにつれて透過光パワーが減少し、接触時に最小となることを明らかにした[3]。また、光サーキュレータを用いた反射型の構成でも、接触センシングの動作を実証した[4]。ただし、これらはグレーティング数が 500 の PFGI-POF-FBG を用いた際の結果であった。グレーティング数が接触センシングの特性に与える影響は、まだ解明されていない。

そこで本研究では、グレーティング数を 1, 10, 100 とした3つの PFGI-POF-FBG サンプルを用いて、接触センシングの動作を検証した。

2. 実験条件

用いた PFGI-POF は、コア (直径: 50 μm 、屈折率: ~ 1.35)、クラッド (厚み: 10 μm 、屈折率: ~ 1.34)、および、オーバークラッド (外径: 490 μm) の3層構造である。コアとクラッドは透明フッ素樹脂 (CYTOP®)、オーバークラッドはポリカーボネートから構成される。フェムト秒レーザーにより PFGI-POF のコアに1行ずつ直接グレーティングを描画することで FBG を作製した。グレーティング数が 1, 10, 100 の3種類の PFGI-POF-FBG サンプルを用意した。長さは全て 0.4 m とした。

PFGI-POF-FBG に基づく接触センシングの動作検証に用いた実験系を Fig. 1 に示す。シード光が 1070 nm のスーパーコンティニューム (SC) 光源からの超広帯域出力光を PFGI-POF-FBG に入射し、透過光スペクトルを光スペクトラムアナライザ (OSA) で観測した。接触させる物体は、大きさ 20 \times 20 \times 50 mm のゴムとした。PFGI-POF 上の3か所、(A) FBG から光源側に約 5 cm 離れた点、(B) FBG 直上、(C) FBG から OSA 側に約 5 cm 離れた点、に物体を接触させた。

3. 実験結果と考察

波長 1000–1500 nm におけるグレーティング数 100 のサンプルを用いた場合の透過光スペクトルを Fig. 2(a) に示す。また、波長 1146 nm 付近の拡大図を Fig. 2(b) に示す。1146 nm 付近を含む一部の波長範囲で、FBG 上に物体を接触させたとき(B)のみ、パワーが顕著に減少した。また、Fig. 3 は、PFGI-POF 上の各点に物体を接触させ、その約 6 秒後に接触を解除したときの、波長 1146 nm におけるパワーの時間変化である。物体の FBG との接触状態に応じて、顕著なパワーの増減が確認された。なお、接触時の立ち下がり時間は約 0.70 秒、解除時の立ち上がり時間は約 1.28 秒であった。

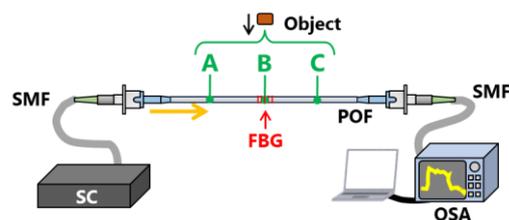


Fig. 1. Experimental setup. FBG: fiber Bragg grating, SC: supercontinuum, SMF: single-mode fiber, OSA: optical spectrum analyzer, POF: plastic optical fiber.

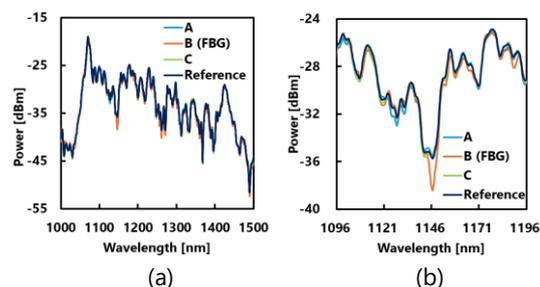


Fig. 2. (a) Wideband optical spectra measured with the POF-FBG containing 100 gratings: spectra when the object is not touched (reference) and when touched at points A, B (FBG), and C. (b) Magnified view around 1146 nm.

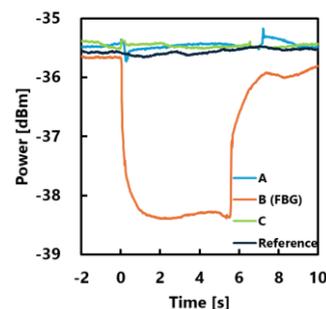


Fig. 3. Temporal power variations when the object is touched at positions A, B (FBG), and C. The power variation without touching is also displayed for reference.

先行研究 (グレーティング数 500) では広い波長帯で接触に伴うパワー変動が観測されたが[3]、本実験 (グレーティング数 100) では一部の波長付近でのみパワー変動が観測された。また、グレーティング数 1, 10 のサンプルでは、どの波長帯においても接触センシングの動作は確認できなかった。以上より、グレーティング数は、接触センシング動作に伴うパワー変化が生じる波長帯域の広さと正の相関があると考えられる。波長帯を細かく調整せずに動作させるためには、数 100 程度以上のグレーティング数が望ましいといえる。

参考文献

- [1] Y. Mizuno, et al., *Light: Sci. Appl.* **5**, e16184 (2016).
- [2] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings* (Academic, San Diego, CA, 1999).
- [3] K. Noda, et al., *Appl. Phys. Express* **15**, 122005 (2022).
- [4] H. Javid, et al., *Appl. Phys. Express* **16**, 112001 (2023).

時間分割多重による長距離準分布型 FBG センサー

Long-distance quasi-distributed FBG sensor based on time-division multiplexing

北里大理¹, °黒田圭司¹, 清水虎正¹

Department of Physics, School of Science, Kitasato University¹, °Keiji Kuroda¹, Kosei Shimizu¹

E-mail: kkuroda@kitasato-u.ac.jp

Fiber Bragg Grating(FBG)は、光ファイバーのコアに回折格子が形成されている光ファイバー型デバイスで、回折格子の周期によるブラッグ反射条件を満たす波長の光のみ反射する。FBG に温度変化や歪み加わると、反射波長がシフトするためセンサーヘッドとして活用されている。単一伝送路に FBG を直列に組み込むことで多点センシングが可能である。多点化の方法としては時間分割多重(TDM)、波長分割多重(WDM)などが用いられる。多点化の他にセンサーに求められる機能としては長距離、配置のフレキシブル性(位置、間隔、個数)、トラブル耐性、高精度性などがある。20km を越える長距離センサーに関しては伝搬損失があるため、通常 FBG の反射率は 90%以上のものを用いて WDM 多点化を行う。この場合、多点化の限界は光源のバンド幅で制限される。我々のグループではヘテロダイン検出を用いることによる高機能 FBG センサーの研究を行っている。今回は 14m、2km、42km の位置に分散配置された 1%反射率 FBG の TDM 多点長距離センサーについて報告する。

図 1(a)に 1%反射率 FBG を直列に多点化した場合の規格化反射強度をプロットしている。赤の実線が強度を直接検出したデータ(ID)で $I_D(\text{FBG})=(1-R)^{2(n-1)}$ で $R=0.01$ である。図 1(b)は伝搬損失で同じく赤の実線がデータ(ID)で $I_D(\text{Pro})=10^{-2k(n-1)/10}$ である。ここで k はシリカファイバーの伝搬損失 0.2dB/km である。一方ヘテロダイン検出(HD)では参照光(振幅 E_{ref})との混合で反射光(振幅 E_{sig})を $2|E_{\text{sig}}E_{\text{ref}}|$ として測定するため、依存性にルートがかかりそれぞれ $I_{HD}(\text{FBG})=(1-R)^{(n-1)}$ と $I_{HD}(\text{Pro})=10^{-k(n-1)/10}$ となる。図 1(a)、(b)の青の破線がデータである。また 1%FBG を 0km から 1km 間隔で配置した場合、それぞれ $I_D(\text{Total})=(1-R)^{2(n-1)} \times 10^{-2k(n-1)/10}$ 、 $I_{HD}(\text{Total})=(1-R)^{(n-1)} \times 10^{-k(n-1)/10}$ となり図 1(c)のようになる。例えば 1km 間隔で 40 個の FBG を配置した場合 ID では 1 個目の FBG に比べて信号強度が 20dB 程度減少しているのに対し、HD では減少幅が 10dB 程度に緩和されている。つまり 40km に渡って配置した FBG を同じオーダーの信号強度で同時に検出できる可能性を示唆している。

図 2 に実験セットアップを示す。光源として DFB-LD (Distributed Feedback Laser)アレイを用い、直接変調によって波長 1531.0nm、パルス幅 1.4 μ s、繰り返し 19.92 μ s のパルスを送振させる。パルスは 90:10 カプラーで分割し 10%を波長マーカの C₂H₂セルへ送る。90%を等分割し信号光と参照光とし信号光は強度変調器(IM)で 60ns パルスにし、サーキュレーター経由でセンサー部に入射する。FBG 反射光は参照光と再び 50:50 カプラーで混合され、ヘテロダイン検出される。カプラーの二つの出力は差動検出器によって検出され、光検出器(PD)で検出した C₂H₂セル透過光強度とともにオシロスコープを通してパソコンで取り込む。繰り返し 20 秒の Ramp 電圧をレーザーの温度コントローラー(TEC)に印加することで温度(波長)自動掃引を行う。センサー部は検出部から 14m の位置に FBG1、FBG1 から 2043m の位置に FBG2、FBG2 から 40424m の位置に FBG3 が配置されている。FBG1 と FBG2 は室温に置かれ FBG3 は恒温槽(WB)の中に入れ温度変化を与える。FBG は全て中心波長 1531.0nm、バンド幅(FWHM) 0.2nm、反射率 1%である。

図 3(a)に得られたビート信号を示す。ここで参照パルスは 420~421.3 μ s 程度まで広がっており、60ns の反射パルスとのビート信号が 3 つ現れている。信号パルスと参照パルスは同じレーザー出力から発生させているため 14m 位置の FBG 反射は干渉するが 2km、42km 位置の FBG からの反射が検出部に到達する時間は約 20 μ s と約 420 μ s であるため同じ出力から発生させた参照パルスとは干渉しない。一方でパルスの繰り返しを約 20 μ s とした場合、2km FBG は n 番目の反射光と $n+1$ 番目の参照光、42km FBG は n 番目の反射光と $n+22$ 番目の参照光間で干渉する。つまり図 3(a)に示した 420 μ s の 22 番目の参照パルスには 3FBG からの反射のビート信号が同時に検出されることになる。ただしファイバー長さはメートルオーダーまで調整してないので FBG3、2、1 の順番で間隔も FBG3 が離れた位置に観測されている。ビート振幅の大きさは伝搬損失と干渉時の偏光状態で決まる。ここでは原理実証のため 3 個の FBG のみ用いているが、0~42km にわたって 1km 間隔で配置された低反射率 1%の FBG を同じオーダーで TDM 多重化可能であることがわかる。講演では温度センサー動作についても報告する予定である。

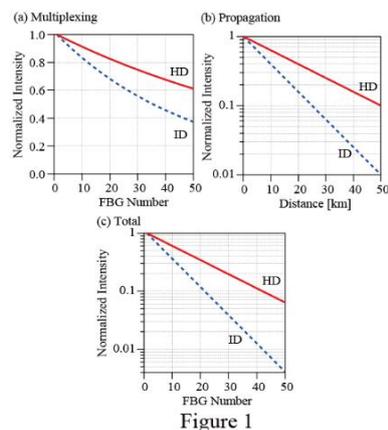


Figure 1

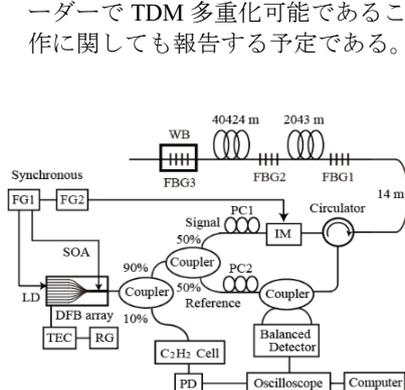


Figure 2

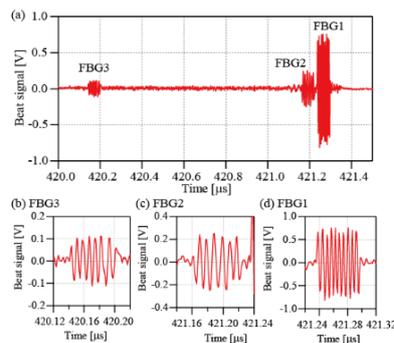


Figure 3

アクティブノイズ低減による高感度近接場オプトメカニカル測定

Highly sensitive optomechanical near-field detection with active noise reduction

NTT 物性基礎研 °佐久間涼子, 浅野元紀, 山口浩司, 岡本創

NTT Basic Research Labs, °Ryoko Sakuma, Motoki Asano, Hiroshi Yamaguchi, Hajime Okamoto

E-mail: ryoko.sakuma@ntt.com

光キャビティを用いた近接場オプトメカニクスは、光近接場を介した光共鳴周波数の変化から微小機械振動子の高感度変位計測を可能にする[1]。特に、微小シリカ球をプローブ型の光キャビティとして用いた近接場振動計測は、光キャビティと構造的に独立した振動体に適用できることから、同チップ上での作製が困難な構造や材質の振動子特性を評価できる汎用性を併せ持つ[2]。しかし、光キャビティと独立な機械振動子から構成される近接場オプトメカニクス測定では、測定系の揺らぎ、特にキャビティと振動子のギャップ間隔の揺らぎによるノイズフロアの上昇が課題であった[3]。本研究では、低周波ノイズを低減させるアクティブノイズコントロールを適応し、ノイズレベルの圧縮による高感度オプトメカニカル測定を実証した。

本研究では、細線化したシリカファイバを光キャビティ($Q \sim 10^6$)に接触させることで、光をキャビティモードに結合させ、さらに SiN 薄膜振動子($50 \times 50 \times 0.03 \mu\text{m}$)を光キャビティに近接させることで、共振周波数変化から薄膜熱振動のエネルギースペクトル密度(PSD)を測定した(図(a))。測定系の低周波ノイズ($\sim 100 \text{ Hz}$)を低減するフィードバック制御回路は、位相シフトの役割を担うバンドパスフィルタ(BPF)と増幅器から構成し、検出光の AC 成分を入力信号として、フィードバック信号をナノポジショナに印加した。図(b)赤線に、フィードバック制御時(BPF: 110 Hz , ゲイン: 60 倍)の薄膜熱振動の PSD を示す。ノイズフロアは約 0.5 倍に圧縮され、低 Q 値光キャビティを用いた場合でも熱振動スペクトルが検出可能であることが示された。本手法は、測定系起因の低周波振動を相殺することにより、光キャビティのショットノイズ揺らぎを低減させる。今後、多様な微小振動に対する超高感度な計測への展開が期待できる。

本研究は、JSPS 科研費 JP23H05463 の助成を受けたものです。

[1] D. J. Wilson et al., *Nature*, 524, 325 (2015). [2] M. Asano, et. al., *Appl. Phys. Lett.*, 112(20), 201103 (2018).

[3] R. Sakuma, et. al., arXiv:2402.08179, (2024).

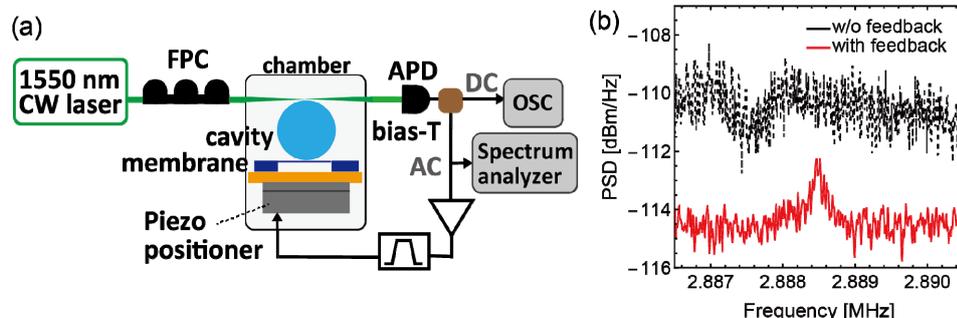


Fig. (a) Schematic representation of the active noise control in the near-field optomechanical measurement mechanism. The amplified and dephased AC output of the avalanche photodiode is applied to the nano-positioner. (b) PSDs of the thermal motion of the membrane with (red) and without (black) active noise control.

カスケード型チャープ LPG を用いた偏波保持型 EDF σ レーザの 強度変調型センサへの応用

Application of Polarization-Maintaining EDF σ Laser with Cascaded-Chirped LPG to Intensity-Based Sensor

防衛大 ◯田中 哲, 岡野 真人, 和田 篤

National Defense Academy ◯Satoshi Tanaka, Makoto Okano, Atsushi Wada

E-mail: satoshi@nda.ac.jp, st_nda@ybb.ne.jp

これまで我々は、カスケード型チャープ長周期光ファイバグレーティング (C-CLPG) を波長選択素子およびセンサ素子として用いた EDF レーザセンサを構成し、それらの高性能化について検討を行ってきた。とくに、折り返し C-CLPG を用いた σ 共振器型 EDF レーザ (EDF σ L) を用いた手法[1]では、C-CLPG における複屈折補償効果を実現し、センシング動作時においても安定した発振動作が可能であることを示した。また、偏波保持 EDFA (PM-EDFA) を用いた PM 型 EDF σ レーザ (PM-EDF σ L) を新たに提案し、より高安定かつ高精度なレーザ型センサを実現した[2]。本研究では、PM-EDF σ L の安定した出力パワー特性を活かした強度変調型センシングの実証実験を行った。

PM-EDF σ L による強度変調型センシングの実証実験のために構成した実験系を Fig.1 に示す。図に示すように、PM-EDF σ L では波長選択素子およびセンサ素子として、ファラデー回転鏡による折り返し C-CLPG が用いられており、レーザはここで用いられる C-CLPG-1 のチャンネルスペクトルピークのひとつで発振する。また、強度変調型のセンシングでは、レーザ出射光を波長フィルタとして用いる C-CLPG (C-CLPG-2) を透過させ、レーザの発振波長にスペクトルの傾斜部 (動作点) を合わせることで発振波長変化にともなう強度変動がセンサ出力として得られる。なお、ここで構成した PM-EDF σ L では、偏波保持型のリング共振器の採用により発振出力が安定しているだけでなく、チャンネルスペクトルの温度依存性がほぼ同じ C-CLPG を用いることで、周囲の温度変化にともなう動作点の調整が不要となっている。

実証実験の 1 例として、C-CLPG-1 の一端に繰り返し変位を与え、C-CLPG の屈曲変形[3]によるセンサ出力を測定した結果を Fig.2 に示す。ここでは、パルスステージを駆動し 500 μ m の変位幅で変位を 70 秒間に 5 往復与えた。Fig.2 のグラフにおいて、●は約 0.5 s 毎に波長計で測定した発振波長を示しており、赤の実線はそのときに得られた光検出器の出力で波長変化に合わせて対応させている。これらのグラフから分かるように、強度変調型のセンサ出力がレーザの発振波長変化に一致して得られている。講演では、従来の波長測定を用いた手法では困難であった比較的高速な振動センシングの実証実験についても報告する予定である。

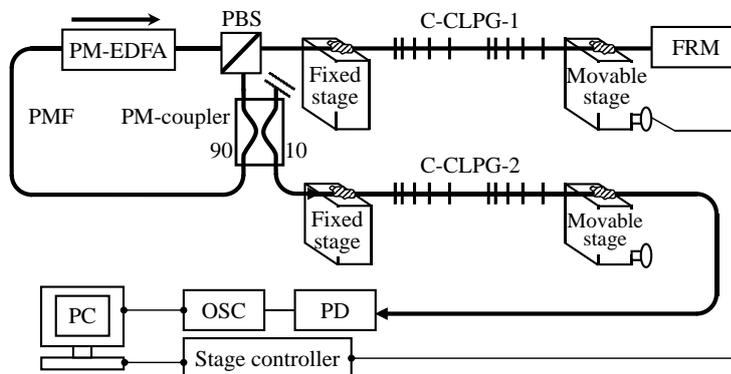


Fig.1. Experimental setup for an intensity-based sensing with PM-EDF σ L.

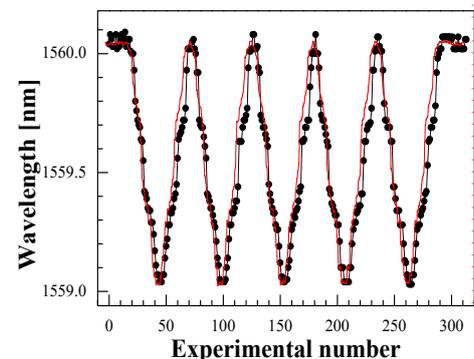


Fig.2. Typical results: wavelengths (circular plots with black line) and intensity-based sensor output (red line).

- 文献 [1] K. Fukushima, A. Wada, S. Tanaka, F. Ito : Opt. Commun. 58 (7), 127713 (2022.4).
 [2] 田中, 諸永, 福嶋, 岡野, 和田 : 第 84 回秋季応物講演会予稿集, 23p-A308-12 (2023.9).
 [3] K. Fukushima, M. Okano, A. Wada, S. Tanaka, F. Ito : Electron. Express, 20 (2), 20220496 (2023.1).

OCDR と BOCDR のハイブリッド実装

Hybrid implementation of OCDR and BOCDR

○久保田 晴之¹、越智 星河¹、石丸 貴大²、高橋 央²、古敷谷 優介²、水野 洋輔¹

¹横浜国立大学 工学研究院 ²NTT アクセスサービスシステム研究所

OHaruyuki Kubota¹, Seiga Ochi¹, Takahiro Ishimaru², Hiroshi Takahashi², Yusuke Koshikiya², and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University, ²NTT Access Network Service Systems Laboratories

E-mails: kubota-haruyuki-bc@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

社会インフラの経年劣化や損傷が社会問題となっており、電気センサにはないメリットを有する光ファイバセンサに注目が集まっている。中でも、光ファイバに沿った種々の物理量の分布を測定できる分布型センサは研究の進展が著しい。分布型の光ファイバセンサは、その位置分解の原理から時間領域法・周波数領域法・相関領域法の3種類に大別される。それらのうち、我々は相関領域法の研究に携わっている。

相関領域法は、測定ファイバ (FUT) の両端から光を入射する方式と、片端のみから光を入射する方式に分けられるが、後者の方が敷設時の自由度が高く、利便性が高い。片端光入射型の相関領域法に基づく技術として、反射率分布を測定する「光相関領域反射計 (OCDR)」[1]、および、歪・温度分布を測定する「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」[2]が知られている。すなわち、反射率分布あるいは歪・温度分布をそれぞれ独立に測定するシステムは実現されている。

一方で、これらの量を同時に測定できるシステムはまだ報告されていない。歪・温度分布に加えて反射率分布を同時に計測できれば、歪や温度変化を伴わない反射率の変化の検出が可能となり、構造物の健全性診断の質が向上すると考えられる。

そこで本研究では、OCDR と BOCDR のハイブリッド実装を実現する。具体的には、従来の BOCDR の実験系で、歪分布測定のみならず、反射率分布測定をも実現できることを実証する。

2. 原理と実験系

OCDR および BOCDR では、レーザ出力に周波数変調を施すことで、FUT に「相関ピーク」を生成し、その位置からの反射光 (散乱光) のみを選択的に検出する。ここで、変調周波数を制御し相関ピークを掃引することで、分布測定を実現する。OCDR では、反射パワーを位置に対してプロットすることで反射パワーの分布情報を得る。一方、BOCDR では、各位置におけるブリルアン利得スペクトル (BGS) を取得し、それから算出したブリルアン周波数シフト (BFS) の分布を歪や温度の分布情報に読み替える。

今回用いた OCDR-BOCDR ハイブリッド系を Fig. 1 に示す。ハードウェアは、標準的な BOCDR の実験系と同等である。波長 1550 nm、線幅 3 MHz のレーザを用いた。参照光路には 2 km の遅延ファイバを挿入した。変調周波数は 2089.5–2138.9 kHz と変化させ、変調振幅は 2.15 GHz とした。また、FUT への入射パワーは 19 dBm で固定した。

この実験系は、OCDR としては、音響光学変調器を撤廃した簡素化 OCDR [3]の実験系とみなすことができる。参照光と反射光の干渉信号を電気信号に変換し (BGS の検出が可能で高速フォトディテクタであっても低周波帯で感度を有するため、同一の PD が使用可能)、電気スペクトラムアナライザ (ESA) のゼロスパン機能を用いて 100 MHz における反射パワーの時間変化を観測した。OCDR としての理論空間分解能は 2.9 cm、測定レンジは 49 m であった。

一方、BOCDR としての動作も可能である。参照光と反射光の干渉信号を電気信号に変換した後、中心周波数を約 11 GHz に設定した ESA で BGS を観測し、BFS を算出した。ESA での BGS の平均回数は 10 回、測定点は 125 点、1つの測定点における BGS のサンプリングレートは 19 Hz とした。BOCDR としての理論空間分解能は 21.8 cm であり、測定レンジは OCDR と同様に 49 m であった。

ハイブリッド動作を実証するための FUT の構成を Fig. 2 に示す。PC コネクタと開放端で比較的強い反射が生じる (曲げ損失の印加により、開放端でのフレネル反射は減衰さ

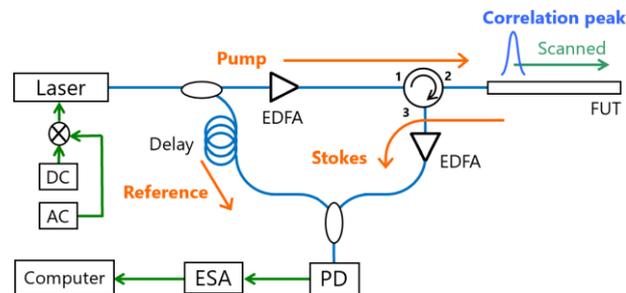


Fig. 1. Experimental setup of OADR-BOADR hybrid system. EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FUT: fiber under test, PD: photodetector.

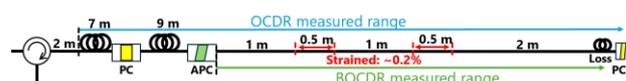


Fig. 2. Structure of FUT, where strains and bending loss were applied.

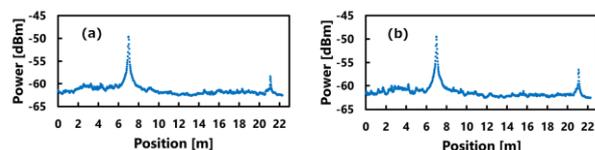


Fig. 3. Reflected power distributions (a) without and (b) with strain applied.

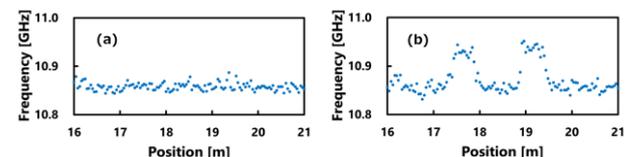


Fig. 4. Measured BFS distributions (a) without and (b) with strain applied.

せた)。また、約 0.2%の歪を 2 箇所の区間に印加した。

3. 実験結果

まず、歪を印加していない場合と歪を印加した場合の反射率分布測定の結果を Fig. 3(a)と 3(b)にそれぞれ示す。歪の有無に関係なく、PC コネクタと開放端の反射ピークが正しい位置に検出された。次に、歪を印加していない場合と歪を印加した場合の BFS 分布測定の結果を Fig. 4(a)と 4(b)にそれぞれ示す。歪印加により、2 箇所の約 0.5 m の区間で BFS がシフトしており、これは実際の歪印加区間に一致している。また、BFS のシフト量は 100 MHz 程度であり、0.2%の歪の大きさにも良い一致を示している。以上より、BOCDR の実験系において信号処理のみを変更することにより、歪分布だけでなく反射パワー分布をも測定できることを実証した。

参考文献

- [1] K. Hotate, et al., *J. Lightwave Technol.* **11**, 1701 (1993).
- [2] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [3] M. Shizuka, et al., *Appl Phys. Express* **9**, 032702 (2016).

BOCDR における電気信号処理系の隔離の検討

Separation of electrical signal processing units in BOCDR

○井上 諒¹、大島 瑠己²、岩寄 脩¹、菊地 啓太¹、水野 洋輔²、李 ひよん¹

¹ 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 ² 横浜国立大学 大学院工学研究院

○Ryo Inoue¹, Ryuki Ohata², Shu Iwasaki¹, Keita Kikuchi¹, Yosuke Mizuno², and Heeyoung Lee¹

¹Shibaura Institute of Technology ²Yokohama National University

E-mails: af20077@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

光ファイバ中で生じるブリルアン散乱を用いた歪・温度センサは、周波数情報に基づいて比較的高精度に歪・温度の分布を測定できるため、構造物の健全性診断への応用が期待されている。これまでに、自然ブリルアン散乱を用いた「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」など、種々のブリルアンセンサが提案されている[1]。

BOCDRは、測定ファイバ(FUT)の片端への光入射で動作し、mm オーダの高い空間分解能、ランダムアクセス性、リアルタイム動作性、低廉性を兼ね備える唯一の技術である。BOCDRでは光波コヒーレンス関数の合成法[2]に基づき、周波数変調された信号光と参照光を干渉させることで、FUT中に相関ピーク(測定位置として機能)を生成する。変調周波数の制御により相関ピークをFUTに沿って掃引することで、各測定位置におけるブリルアン利得スペクトル(BGS)の分布を取得する。このBGSから歪や温度の情報に読み替え可能なブリルアン周波数シフト(BFS)を算出することで、歪・温度の分布測定が可能となる。

最近、BOCDRの現場適用のために、実験系の小型化が進んでいる。しかし、大型の電気スペクトラムアナライザ(ESA)の機能を小型のローカル回路で実装するのは容易ではない。

そこで本研究では、BOCDRの実験系の最終段にある電気信号処理系を現場から離れた場所に設置し、光学測定系と長距離光ファイバを介して接続する方式を提案する。これにより、ESAをはじめとする電気デバイスで現場のスペースを圧迫することを回避できる。本稿では、両系を接続する長距離ファイバの長さがBGS・BFS分布測定の結果に及ぼす影響を調査した。

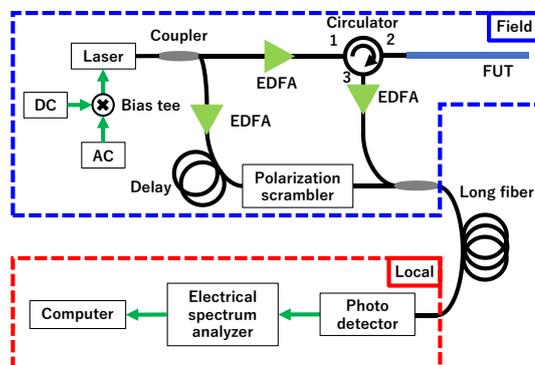


Fig. 1. Proposed BOCDR setup.

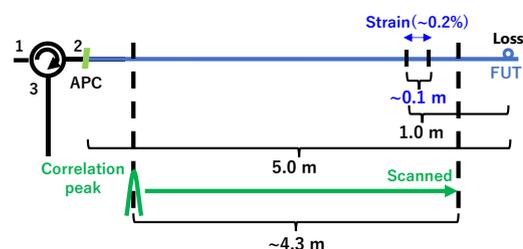


Fig. 2. FUT structure and measurement conditions.

2. 実験条件

今回用いたBOCDRの実験系をFig. 1に示す。信号光と参照光を干渉させるカプラまでが光学測定系(現場に設置することを想定)、光検出器から電気信号処理系(現場から離れた場所に設置)である。これらを接続する長距離ファイバとして、25 kmのシリカ単一モードファイバ(SMF)を用いた。比較のため、従来と同程度の1 mのSMFを用いた場合でも同様の測定を行った。

光学測定系では、波長1550 nmのレーザに正弦波変調を施し、変調振幅は4.55 GHzとし、変調周波数は5.375-5.475 MHzの範囲で掃引した。測定レンジは約19 m、理論空間分解能は約8 cmであった。FUTの構成をFig. 2に示す。全長5 mのシリカSMF(BFSは約10.86 GHz)を用い、終端から0.9-1.0 m離れた0.1 mの区間に約0.2%の歪を印加した。

3. 実験結果

まず、接続ファイバの長さが1 mのときのBGSおよびBFSの分布測定の結果をFig. 3(a)に示す。3.8 m付近の位置において、約0.2%の歪に相当する100 MHz程度のBFSの増加が観測されており、歪分布を正しく計測できていることが確認できた。このとき、光検出器への入射光パワーは約1.2 dBmであった。

次に、各所の光パワーの設定を維持したまま、接続ファイバの長さを25 kmに変更したときのBGSおよびBFSの分布測定の結果をFig. 3(b)に示す。信号対雑音比が悪化し、BFSのシフトを正しく検出することはできなかった。このとき、光検出器への入射光パワーは、長距離ファイバによって減衰した結果、-4.0 dBm程度であった。

そこで最後に、光検出器への入射光パワーが約1.2 dBmとなるように光増幅器の設定を調節したときのBGSおよびBFSの分布測定の結果をFig. 3(c)に示す。1 mの接続ファイバを用いたときと同様に、3.8 m付近にBFSの増加を観測できた。

以上より、光学測定系と電気信号処理系を分離した場合も、それらを接続する長距離ファイバによる光パワーの減衰を補償すれば、正しく分布測定を行える可能性が高いといえる。今後は、信号対雑音比の定量評価など、より精緻な検討を進める。

参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).

[2] K. Hotate, et al., *J. Lightw. Technol.* **24**, 2541 (2006).

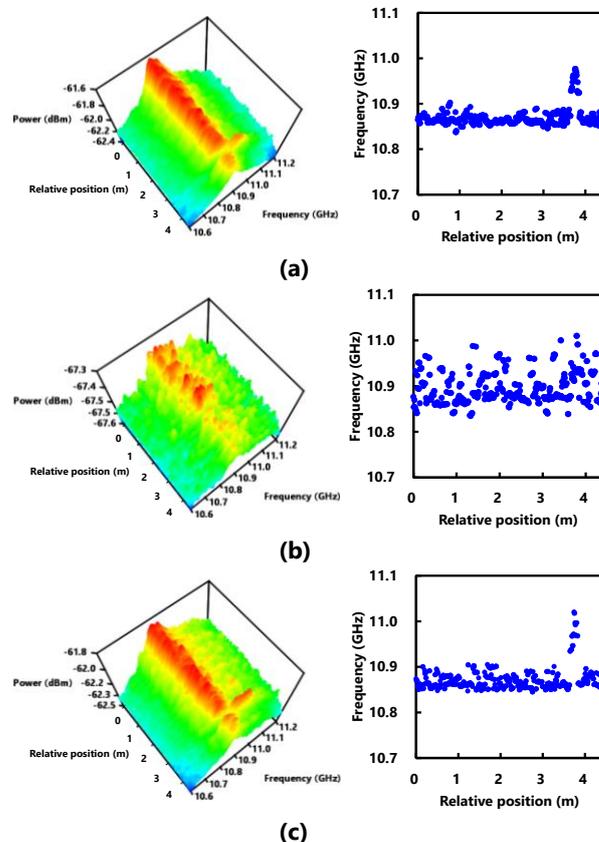


Fig. 3. Distributions of BGS (left) and BFS (right) measured when the connecting fiber length was (a) 1 m, (b) 25 km (without power control), and (c) 25 km (with power control).

**螺旋型および直線型ファイバを用いた distributed acoustic sensing で
計測される地震探査波形の逆解析に基づく地下イメージング**
**Subsurface imaging using waveform inversion for seismic data measured by distributed
acoustic sensing with helical and straight fibers**

株式会社 INPEX¹ °榎谷 将吾¹, 谷 昌憲¹

INPEX Corporation¹, °Shogo Masaya¹, Masanori Tani¹

E-mail: shogo.masaya@inpex.co.jp

近年、光ファイバセンシングは様々な分野に応用され始めており、その1つとして、地震モニタリングや地下構造を把握するための地震探査などの地下の推定への distributed acoustic sensing (以下、DAS) の活用が進められている (例えば[1])。地表および海底面に設置された直線型の光ファイバケーブルを用いた DAS 計測に基づく地震探査を行う際の課題の1つとして、DAS で計測されるエネルギーは、ファイバの軸方向の成分が、その垂直方向の成分と比べて支配的となるため、地表あるいは海底面に対して鉛直方向に伝搬する波を計測することが制約となる。この課題を克服し、鉛直成分のエネルギーも十分に計測することが可能となれば、計測方向の依存性が低減し、例えば、地震探査の反射波の記録の改善が期待でき、地下イメージングの精度向上に資する可能性がある。この課題の解決を目指すアプローチの1つとして、ファイバを直線ではなく螺旋状の形状とすることにより、軸方向に対して垂直方向の感度を向上させる、螺旋型光ファイバケーブルが提案されている[2]。地震探査における螺旋型ファイバを用いた実証試験も報告されているもの (例えば[3])、現時点では十分にその有効性が示されているわけではない。

本研究では、海底面に設置された光ファイバを用いた地震探査を想定した数値シミュレーションを行い、そのシミュレーションにより得られたデータから、螺旋型および直線型のファイバで計測される DAS データを推定し、双方のデータで逆解析を実施し、得られる地下のイメージングの精度を比較する。最後に、地下イメージングにおける螺旋型および直線型の光ファイバセンシングの可能性および課題について議論する。

参考文献

- [1] N. J. Lindsey et al., Fiber-Optic Network Observations of Earthquake Wavefields, *Geophysical Research Letters*, 44, 11792-11799 (2017).
- [2] B. N. Kuvshinov, Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves, *Geophysical Prospecting*, 64, 671-688 (2016).
- [3] S. Masaya et al., Surface-deployed DAS measurement with triply helically wound fibers in an active seismic survey, in *Proceedings of 28th International Conference on Optical Fiber Sensors*, W4.70 (2023).