

# 偏波スクランプリングを用いた

## ブリルアン光相関領域リフレクトメトリによる歪分布全長測定の実現

東京大学 工学系研究科 電子工学専攻 水野洋輔様

**論文概要** 近年、地震による損傷や経年変化を自己診断できる機能を備えた材料・構造「スマートマテリアル・スマートストラクチャ」の実現が望まれ、損傷などを分布的に検知する神経網として光ファイバを用いた「分布型センシング」が注目を集めている。例えば、ビル・橋・トンネル内壁・ダム・高速道路などの構造物や、航空機の翼や圧力隔壁、燃料タンクなどに光ファイバを貼り巡らせ、光ファイバに沿った歪や側圧、温度などをセンシングすることで、これらの材料・構造の診断が可能となる。ここで、センサとなる光ファイバを「光ファイバ神経網」と呼ぶ[1-4]。光ファイバ神経網には、高い空間分解能、速い測定速度、そして光ファイバのどの位置の情報でも得られる、などの諸機能を併せ持つことが求められる。

このような背景の下、我々は被測定ファイバ(FUT)の片端から光を入射するだけで歪および温度分布測定を可能とする「ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ(BOCDR)」を提案し[5]、世界記録となる 13 mm の空間分解能と 50 Hz のサンプリング速度の両立に成功した[6]。しかし、BOCDR で観測されるブリルアン利得スペクトル(BGS)は偏波状態の影響を受けるため[7]、長いファイバに沿った分布測定を行うには偏波コントローラを手動で調整し、偏波状態を多数回最適化する必要があった。そこで本研究では、偏波スクランプリングを導入することで BGS の変動を自動的に抑制し、歪全長測定の実現と高速化を実現した。さらに、電気スペクトラムアナライザ(ESA)のノイズフロアを補正することにより BOCDR の S/N 比を向上させる手法を提案し、その効果を実証した。

BOCDR は、ポンプ光を FUT に入射した際の自然ブリルアン散乱光を、参照光とビートさせて検出する歪分布測定技術である。光源の光周波数に正弦波変調を施し、FUT 中に光の相関ピークを立てて位置分解を行う。偏波スクランプリングを導入した BOCDR の実験系を Fig. 1 に示す。偏波スクランブラは、偏波状態を高速(~MHz)に変化させ、その影響を平均化させるデバイスである[8, 9]。これを参照光路に設けることで、観測される BGS が参照光とブリルアン散乱光の相対的な偏波状態に依存しなくなる[10]。

Fig. 2 のように、2 箇所にて 0.3 % の歪を印加した全長約 100 m の SMF を FUT とした。光源の光周波数の変調振幅は 3.3 GHz、変調周波数は 735.86 – 766.28 kHz とした。これは、測定レンジ約 140 m、分解能約 40 cm に対応する。また、ESA のスパンを 10.763 – 11.063 GHz とした。さらに、測定点 1 点の BGS 測定のサンプリングレートは 19 Hz とし、1 つの BGS につき 1001 点のデータを取得しているため、1 データのサンプリングレートは約 19 kHz となる。これは偏波スクランブラの動作レートよりも 50 倍以上小さいので、偏波スクランプリングによって偏波状態の平均化が可能となる。測定点数は 760 とし、全測定時間は約 40 秒であった(測定点数を減らせば、測定時間をさらに短くすることもできる)。

Fig. 3 に、偏波スクランプリングがある場合とない場合の、FUT 全長に渡るブリルアン周波数シフト(BFS; BGS がピークとなる周波数)の分布測定結果を示す。偏波スクランプリングがない場合は、測定点の変化に伴い信号レベルが大きく変動し、BFS の測定が正しく行われなかった。一方、偏波スクランプリングがある場合は、歪を印加した 2 箇所のみで BFS の大きな変化が観測された。歪を印加した箇所の拡大図を Fig. 4(a)および(b)に示す。1 m および 50 cm の歪を 40 秒で検出できた。

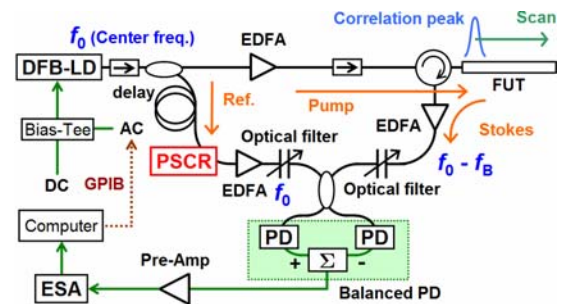


Fig. 1. Experimental setup of BOCDR system with a polarization scrambler (PSCR).

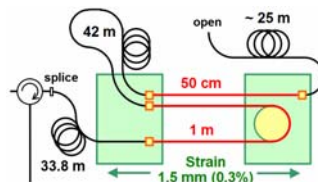


Fig. 2. Structure of the FUT.

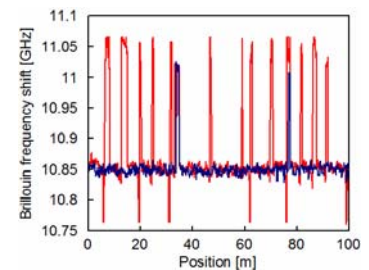


Fig. 3. Measured BFS distribution along the entire length of the 100-m FUT, with (blue) and without (red) a polarization scrambling.

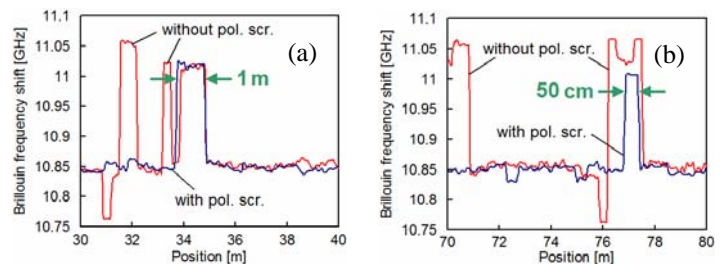


Fig. 4. Magnified BFS distribution along the FUT, with (blue) and without (red) a polarization scrambling. The ranges are (a) 30 – 40 m, and (b) 70 – 80 m.

また、以下の手順で ESA のノイズフロアの補正を行った: (1) 偏波スクランプリングにより BGS の変動を抑制する、(2) 十分に大きい歪を印加したときの BGS をノイズフロアとして記録する、(3) 従来と同様に歪分布測定を行い、得られた BGS からノイズフロアを差し引いたものを正味の BGS として採用する。まず、測定点を固定した場合に、本手法により S/N 比が向上することを実験的に確認した。次に、2箇所(33.8–34.8 m, 76.8–77.3 m)に

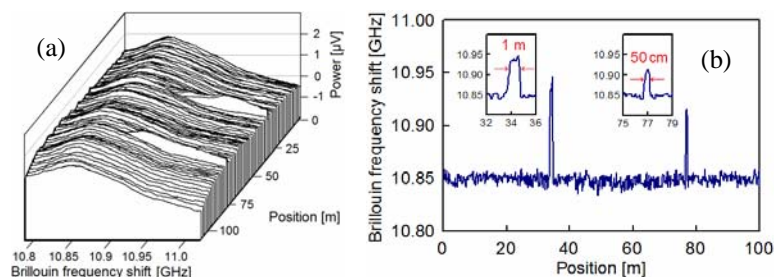


Fig. 5: Magnified BFS distribution along the FUT, with (blue) and without (red) a polarization scrambling. The ranges are (a) 30 – 40 m, and (b) 70 – 80 m.

0.2%および0.14%の歪を印加した全長100mの単一モードファイバに対して、本手法を試みた。光源の光周波数の変調振幅は5.4GHz、変調周波数は約750kHzとした。このときの空間分解能は約24cm、測定レンジは約138mであった。BGSおよびBFSの分布測定結果をFig.5(a)および(b)に示す。従来[5,6]よりも高いS/N比で、長いファイバに沿った歪分布測定を正しく行うことが出来た。これは、相関ピークのサイドローブによる反射光の影響がESAのノイズフロアと比較して極めて小さいことを意味する。

[1] K. Hotate: Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 6616. [2] T. Horiguchi, T. Kurashima, and M. Tateda: IEEE Photon. Technol. Lett. **2** (1990) 352. [3] K. Hotate and T. Hasegawa: IEICE Trans. Electron. **E83-C** (2000) 405. [4] K. Y. Song, Z. He, and K. Hotate: Opt. Lett. **31** (2006) 2526. [5] Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate: Opt. Express **16** (2008) 12148. [6] Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate: IEEE Photon. Technol. Lett. **21** (2009) 474. [7] Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate: Appl. Phys. Express **2** (2009) 046502. [8] R. Noe, H. Rodler, A. Ebberq, G. Gaukel, B. Noll, J. Wittmann, and F. Auracher: J. Lightw. Technol. **9** (1991) 1353. [9] F. Bruyere, O. Audouin, V. Letellier, G. Bassier, and P. Marmier: IEEE Photon. Technol. Lett. **6** (1994) 1153. [10] K. Hotate, K. Abe, and K. Y. Song: IEEE Photon. Technol. Lett. **18** (2006) 2653.

**コメント** このような賞を頂けることとなり、大変光栄に感じております。BOCDRが「光ファイバ神経網」を担う技術として、実際に社会で使われ人の役に立つためには、まだまだ乗り越えるべき課題があります。この度の受賞を励みに、今後もBOCDRの性能を向上させるべく研究を進めていきたいと思っております。また、日々の研究へのご支援につきまして、保立和夫教授、何祖源准教授にこの場を借りて御礼申し上げます。