

プラスチック光ファイバ中のブリルアン散乱とそのセンサ応用 Brillouin Scattering in Plastic Optical Fibers and Its Sensor Applications

東京工業大学 精密工学研究所 ○水野 洋輔 林 寧生 中村 健太郎

P. & I. Lab., Tokyo Tech ○Yosuke Mizuno, Neisei Hayashi, and Kentaro Nakamura

E-mail: ymizuno@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

長い光ファイバに沿った任意の位置で歪や温度を測定できる光ファイバセンサを「分布型光ファイバセンサ」と呼ぶ。これを飛行機の翼やビルの内壁、ダムや橋梁など、多様化する構造物に埋め込むことで、それらのヘルスマonitoring、すなわち、地震による損傷や経年劣化などを監視することができる。そのため、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いる。歪・温度分布センシングの原理としては、主に光ファイバ中のブリルアン散乱が用いられている[1-4]。

分布型光ファイバセンサを構築する際、従来は専らシリカを中心とするガラスファイバが用いられてきた。しかし、ガラスファイバは損傷を受けやすく、取り扱いに気を付けなければならなかった。さらに、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、プラスチック光ファイバ(POF)に注目している[5]。

POFは太いコア径をもち、50%以上の歪にも耐えられるほどの高い柔軟性、安価な敷設コスト、容易なファイバ間接続、高い安全性など、ガラスファイバにはない多くの利点がある。POF中のブリルアン散乱に関する理論的報告は多数存在し、それゆえその重要性・有用性は多くの専門家によって認識されているものの、我々が初観測するまでに実験的報告はなかった[5]。

POFを用いて分布型光ファイバセンサを構築することで、取り扱いが簡単になり、対応可能な歪が大幅に拡大するのはもちろんのこと、最大の利点かつ独創的である点は、センサに対して「記憶」という新たな機能を付与できることにある。この機能は、POFが大きな歪に対して塑性変形を起こし、歪の大きさと印加された位置をPOF自身が記憶する性質を指す。この性質を用いれば、ガラスファイバの場合のように常に高価な解析装置を設置しておくなくとも、「構造物にはPOFだけを埋め込んでおき、地震の後など、1つの解析装置を持って多数の構造物を巡回検診すればよい」という全く新しいコンセプトが生まれる。社会全体で考えれば、光ファイバセンサ技術のコストが大幅に削減され、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、例えば地震後の住民の避難所生活の短縮などに貢献できるものと期待している。

本講演では、記憶機能を有する分布型光ファイバセンサ実現に向けての重要な第一歩として、(1) POF中のブリルアン散乱のセンシング特性の解明、(2) 相関領域法によるPOFを用いた歪・温度の分布センシングの実証とcmオーダーの高空間分解能の実現、(3) 最近開発された新たな高速分布測定法の適用による歪・温度分布のリアルタイム測定の実証、について述べる。以下の予稿では、主に(1)と(3)について詳細を述べる。

2. POF中のブリルアン散乱特性

センシング原理となる光ファイバ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、我々を含むいくつかの研究グループは、光ファイバ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。

POFには多くの種類があるが、ブリルアン散乱が観測され

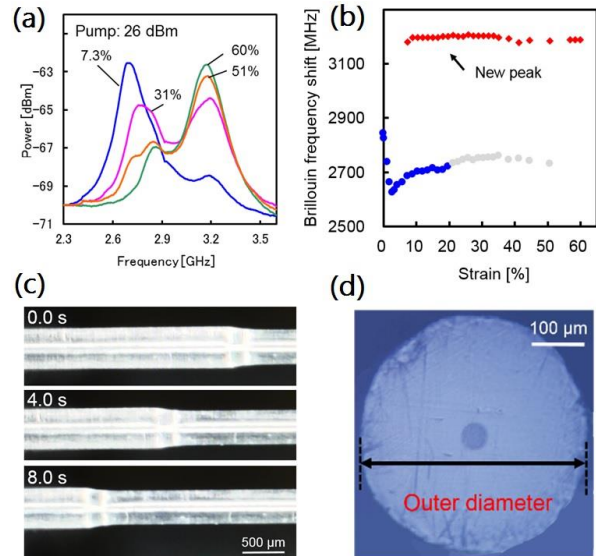


Fig. 1. Large-strain dependences of (a) BGS and (b) BFS in a POF at 1550 nm. (c) Process of the POF slimming effect, and (d) cross-sectional view of the slimmed POF.

ている唯一のタイプは、アクリルに全フッ素加工を施して1550 nm帯の伝搬損失を低減(約250 dB/km)したものである。市販されている中で最小のコア径50 μmを有するサンプルがブリルアン散乱の観測には適している。1550 nm帯・室温において、シリカ光ファイバのBFSは約10.8 GHzであるのに対し、全フッ素化POF(以下、単にPOFと呼ぶ)のBFSは約2.8 GHzである[5]。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、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+580 MHz/%、+1.18 MHz/Kであるのに対し、POFでは-121.8 MHz/%、-4.1 MHz/K(構造によっては-3.2 MHz/K)である(但し、2%程度以下の比較的小さい歪に限る)。歪・温度依存係数ともに符号が逆であり、絶対値はそれぞれ0.2倍、3.5倍である[6]。これは、POFのヤング率の特異な歪・温度依存性に起因するものであり、POF中のブリルアン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している。

一方、POFには数%を超える大きな歪を印加できることが特長の一つであるが、大きな歪に対するPOF中のBFSの依存性は特殊である。まず、ブリルアン散乱スペクトル(BGS)の大歪依存性をFig. 1(a)に示す。入射光パワーは26 dBm、引張速度は200 μm/sとした。印加歪が0%のときBFSは2.85 GHzにあり、0-2.3%の範囲では低周波側にシフトし、2.3%以上の範囲では高周波数側にシフトした。また、10%以上の歪印加時には2.8 GHz付近における散乱光パワーは徐々に減衰した[7]。また、7.3%以上の歪を印加すると、3.2 GHz付近に新たなピークが出現し、印加歪の増加に伴いそのパワーは増加した[8]。印加歪が31%のとき2つのブリルアン信号のピークのパワーは同程度となり、60%では元のピークは完全に消失した。なお、2.85 GHzに常に存在する比較的小さいピークは、歪が印加されていない入射端側の部分(6 cm)からの散乱信号であり、本質的ではない。2.8 GHzおよび3.2 GHz付近の2つのピークについて、BFSの大歪依存性をFig. 1(b)に示す。元のピークは非線形な依存性を示した。なお、印加歪が20%以上である場合は2.85 GHzの小さなピークの視野に埋もれてしまうため、BFSを正確に測定するのは困難であった。一方、3.2 GHz付近の新たなピークのBFSは、歪依存性をほとんど示さなかった。

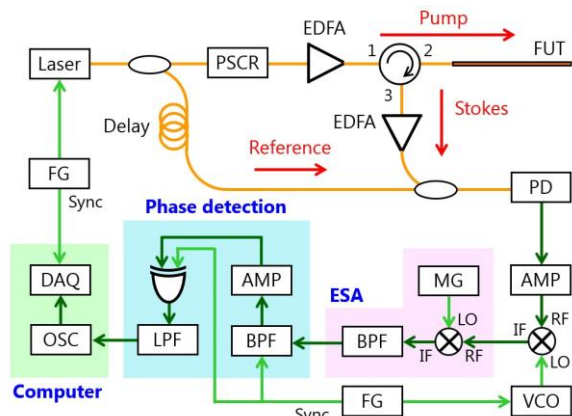


Fig. 2. Experimental setup for ultrahigh-speed BOCDR.

次に、200 $\mu\text{m/s}$ で約 7.3%の歪を印加しているときの POF の側面の写真を Fig. 1 (c) に示す。段状に細くなった部分が観測された。この細径部では、コア構造の変化に伴い音速が高くなり、BFS が 3.2 GHz 程度に急峻に変化した(「BFS ホッピング」と名付けた [8])。印加歪を増加に伴い、その細径部は POF に沿って拡張し、60%の歪印加により POF 全体が細径となった。その際、細径部の外径はほぼ一定に保たれていた。これが、新しいピークの BFS が歪に依存せず、そのパワーのみが歪に依存する理由である。細径部の断面写真を Fig. 1 (d) に示す。外径の変化から、細径部のコア径は歪を印加しない場合の約 0.85 倍になっていると推定された。最後に、60%の歪を印加した後に歪を開放したところ、塑性変形によって POF の全長は細径のまま保たれた。その POF に対して改めて BFS の歪・温度依存係数を測定したところ、両者ともに線形であり、その係数はそれぞれ $-65.6 \text{ MHz}\%$ 、 -4.04 MHz/K であった。これらの値は、従来の PFGI-POF における報告値の約 0.5 倍、約 1.3 倍であった [8]。従って、細径となった POF 中のブリルアン散乱を用いることで、歪に依存しにくい高精度な温度センシングという POF の特徴的価値をより高めることができる。

3. POF に沿った歪・温度分布の高速測定

光ファイバ中のブリルアン散乱を用いた歪・温度分布センサの方式として、これまでに種々の方式(時間領域 [1, 2]・周波数領域・相関領域 [3, 4]) が提案されてきたが、実時間分布計測が可能な方式は測定ファイバの両端から光を入射する構成に限られていた。両端からの光入射は、構造物等へセンサを敷設する際の自由度が減るほか、測定ファイバが 1 点でも破断するとシステム全体の動作が停止するという問題があった。これを解決したのが高速ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ (BOCDR) である。実験系の例を Fig. 2 に示す。超高速 BOCDR の光学系は基本的には従来の BOCDR [4] と同等であり、1550 nm 帯のレーザ出力を周波数変調して形成した「相関ピーク」を測定ファイバに沿って掃引することで歪や温度の分布測定を実現する。従来は、電気スペクトルアナライザの周波数掃引機能を用いて BGS を周波数領域で検出していたために、サンプリングレート (SR) が 20 Hz 未満に制限されていた。これに対し、高速 BOCDR では、電圧制御発振器を用いて BGS を時間領域で検出することで、数 100 Hz の SR が実現できる。更に、位相検波技術を用いて BGS から BFS を算出することにより、100 KHz 以上の SR も実現可能である。すでに、片端入射と実時間動作の両立に加え、信号対雑音比の向上や歪ダイナミックレンジの拡大にも成功している。更に、破断箇所を検出する機能や伝搬する機械波の実時間検出も実証している。

以下では、高速 BOCDR の測定ファイバとして POF を用いた場合の実験について述べる。まず、温度分布を測定した。測定ファイバの構成を Fig. 3 に示す。3.0 m の POF の 1.0 m の区間を 55°C に加熱した (室温は 25°C)。レーザの変調振幅は 0.4 GHz、変調周波数は 13.515–13.590 MHz の範囲で掃引した。これは、測定レンジ 8.2 m、理論空間分解能 0.65 m に相当する。1 点の SR は 42 Hz、測定点数は 84、1 回の分布測定時間は 2 s とした。BGS と BFS の分布測定結果をそれぞれ Fig. 4 (a)(b) に

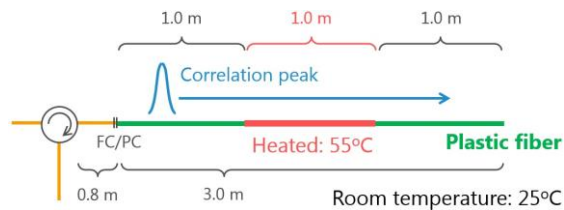


Fig. 3. Schematic structure of the fiber under test.

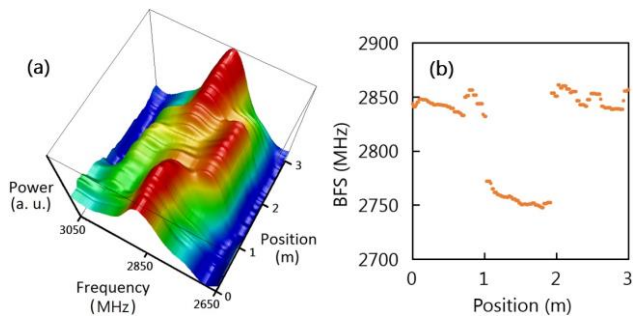


Fig. 4. Measured distributions of (a) BGS and (b) BFS.

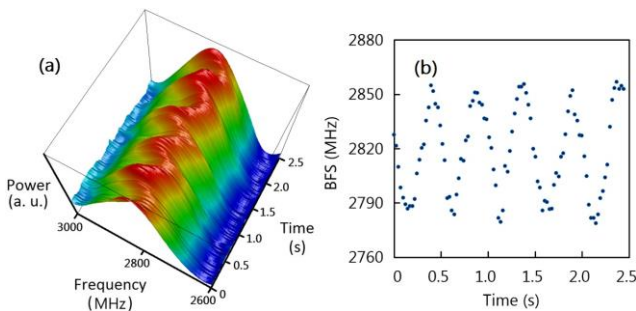


Fig. 5. Temporal variations of (a) BGS and (b) BFS.

示す。加熱区間の BFS は 30°C の温度変化に相当する量だけ減少しており、温度の分布測定が実証された。

また、3.0 m の POF の 1.0 m の区間に印加された動的歪の検出も実証した。測定レンジや空間分解能、SR は上記と同様とした。予め 0.3%の静的歪を印加した上で、更に $\pm 0.3\%$ の正弦波状の動的歪を 2 Hz で印加した。測定した BGS と BFS の時間変化をそれぞれ Fig. 5 (a)(b) に示す。BFS は $\pm 0.3\%$ の歪に相当する量だけ 2 Hz で変動しており、動的歪の検出が実証された。

4. まとめ

記憶機能を有する歪・温度分布センサ実現に向けての重要な第一歩として、本稿では POF 中のブリルアン散乱のセンシング特性の解明と、高速 BOCDR 法による POF を用いた歪・温度の実時間分布測定の実証について述べた。1550 nm 帯において、POF 中の BFS (約 2.8 GHz) の歪・温度依存係数ともに、シリカファイバと比べて符号が逆であり、絶対値はそれぞれ 0.2 倍、3.5 倍であることから、POF 中のブリルアン散乱は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した。また、POF に数%を超える大きな歪を印加した場合に生じる BFS ホッピング現象についても紹介した。最後に、高速 BOCDR 法を POF に適用し、温度の分布測定や動的歪の検出を実証した。今後の課題の一つは、記憶機能の実装である。

参考文献

- [1] T. Horiguchi et al, *J. Lightwave Technol.* **7**, 1170 (1989).
- [2] Y. Peled et al, *Opt. Express* **19**, 19845 (2011).
- [3] K. Hotate et al, *IEICE Trans. Electron.* **E83-C**, 405 (2000).
- [4] Y. Mizuno et al, *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [5] Y. Mizuno et al, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 021103 (2010).
- [6] Y. Mizuno et al, *Opt. Lett.* **35**, 3985 (2010).
- [7] N. Hayashi et al, *Opt. Express* **20**, 21101 (2012).
- [8] N. Hayashi et al, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 091113 (2014).