

プラスチック光ファイバ中のブリルアン周波数シフトの吸水率依存性

Brillouin frequency shift dependence on water-absorption ratio in plastic optical fibers

東工大¹, 慶大² °皆川 和成¹, 小池 康太郎², 林 寧生¹, 小池 康博², 水野 洋輔¹, 中村 健太郎¹

Tokyo Tech.¹, Keio Univ.² °K. Minakawa¹, K. Koike², N. Hayashi¹, Y. Koike², Y. Mizuno¹, and K. Nakamura¹

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

1. はじめに

光ファイバ中のブリルアン散乱に基づく歪/温度センサは、周波数情報を基に、光ファイバに沿って連続的に歪/温度を測定できるため、構造物ヘルスマモニタリングや温度管理などの分野で注目されている。従来、そのセンサヘッドはガラス光ファイバで構成されていた[1]。しかし、ガラス光ファイバは数%の歪を印加しただけで破断するという課題を抱えている。これを解決するため、我々は、柔軟性に富むプラスチック光ファイバ (POF) をセンサヘッドに用いたブリルアンセンサの開発を推進している。

一般に、ブリルアンセンサではブリルアン周波数シフト (BFS; ポンプ光とブリルアン散乱光の中心周波数差) の値から歪/温度を導出する[2]。そのため、我々はこれまでに POF 中の BFS の歪/温度依存性を明らかにした[3]。しかし、アクリル (PMMA) をはじめとするポリマー材料は吸水性を有するため[4]、POF は実環境に長期間置かれると湿気により吸水し、物性が変化すると考えられる。BFS はコアのヤング率等に依存するため[2,5]、POF を用いたブリルアンセンサを実環境で使用する上で、吸水の BFS に対する影響の解明は極めて重要な基本情報である。

そこで本研究では、最も広く使用されており、かつ将来的にブリルアンセンサとしての応用が期待される POF の 1 つである PMMA-POF[6]について、BFS の吸水率依存性を調査した。

2. 原理

光ファイバに入射された光はコア中の音響フォノンと相互作用し、結果的に入射光よりも周波数が数 GHz だけ低い後方散乱光が生じる。この現象がブリルアン散乱である[2]。この周波数シフト量 (BFS) は、

$$BFS = \frac{2nv_a}{\lambda_p} = \frac{2n}{\lambda_p} \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1-2\sigma)(1+\sigma)}} \frac{E}{\rho}, \quad (1)$$

で与えられる[2,5]。ここで、 n はコアの屈折率、 v_a はコア中の音速、 λ_p は入射光の波長、 σ はポアソン比、 E はヤング率、 ρ は密度である。一般に、 E が大きな歪/温度依存性を持つため[3]、 v_a や BFS も歪/温度に大きく依存する。したがって、BFS の値を測定することで光ファイバに印加された歪や周囲の温度を見積もることができる。また、式(1)より、 v_a を実測することで BFS を算出することもできる。

3. 実験方法

PMMA-POF 中の BFS を実測するのに必要な光学デバイスのいくつかは現在入手困難であるため、BFS の吸水率依

存性は、厚さ 1.50 mm、密度 1.489 g/cm³、屈折率 1.489、ガラス転移温度 124 °C の円筒形 PMMA バルクサンプルを用い、次の手順で導出した。まず、乾燥させたサンプルを一定温度の純水に浸し、浸漬時間と吸水率の関係を測定した。吸水率は、乾燥直後の質量に対する浸漬後の質量の増加率として定めた。次に、再度サンプルを乾燥させ、吸水率測定のとおり同じ温度の純水に浸し、浸漬時間と BFS の変化量の関係を推定する。BFS は文献[7]の超音波パルスエコー法を用い、中心周波数 20 MHz の超音波パルスで測定したバルク中の音速と式(1)を基に計算した。最後に、同じ浸漬時間での吸水率と BFS を 1 対のデータとしてプロットし、吸水率と BFS 変化量の関係として示した。

4. 実験結果

水温 60 °C における、浸漬時間に対する PMMA バルク中の吸水率と BFS 変化量を Fig. 1(a) と (b) にそれぞれ示す。吸水率は浸漬開始から約 1 日で急激に増加し、約 2 日で飽和した。飽和状態での吸水率は約 2.0% であった。BFS は浸漬時間の経過とともに減少し、吸水率とほぼ同じ時間スケールで飽和した。飽和状態での変化量は約 280 MHz であり、約 16 °C の温度上昇に対する BFS の変化に相当する[6]。次に、これらのデータを多次の指数関数で近似した曲線を基に、60 °C での BFS の吸水率依存性を算出した (Fig. 2.)。BFS は、吸水率の増加とともに減少した。これは、吸水によりポリマーのヤング率が減少したためと思われる。吸水率が 1.5% 程度以下の範囲では、BFS はほぼ線形な依存性を示した (係数は約 -137 MHz/%)。

以上の結果から、PMMA-POF 中のブリルアン散乱に基づく歪/温度計測では、センサヘッドの吸水対策が必要不可欠であることを示した。その一方で、BFS が吸水率に対して単調に変化したことから、POF を用いたブリルアンセンサは分布型の水分センサとしての応用可能性を秘めていることを明らかにした。

参考文献

- [1] X. Bao et al., *Sensors* **11**, 4152 (2011).
- [2] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, California, 1995).
- [3] Y. Mizuno et al., *Opt. Lett.* **35**, 3985 (2010).
- [4] M. Unemori et al., *Biomaterials* **24**, 1381 (2003).
- [5] K. F. Graff, *Wave Motion in Elastic Solids* (Dover Publications, New York, 1975).
- [6] N. Hayashi et al., *Appl. Phys. Express* **5**, 032502 (2012).
- [7] N. Hayashi et al., *Appl. Phys. Express* **4**, 102501 (2011).

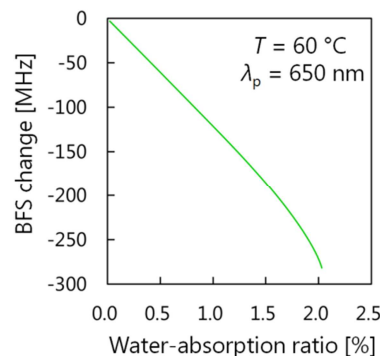
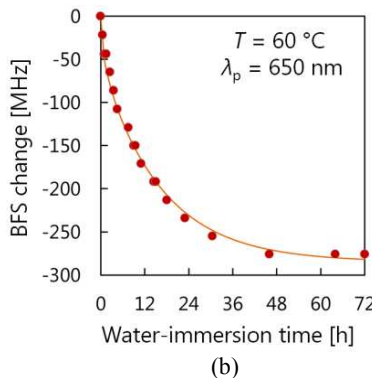
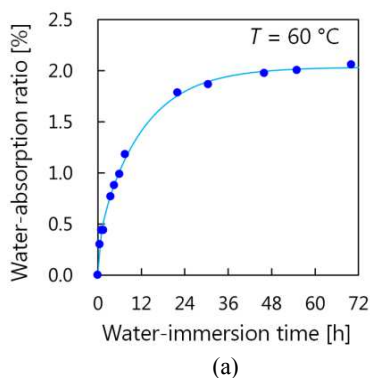


Fig. 1. (a) Water-absorption ratio and (b) BFS change vs. water-immersion time in the PMMA sample at 60 °C. The data were fitted using multi-order exponential curves.

Fig. 2. BFS dependence on water-absorption ratio in PMMA-POF at 60 °C, calculated with the two fitted curves shown in Figs. 1(a) and (b).