

# 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温度依存性とコアのガラス転移温度との相関

## Correlation between core glass-transition temperature and Brillouin frequency shift dependence on temperature in plastic optical fibers

### Brillouin frequency shift dependence on temperature in plastic optical fibers

東工大<sup>1</sup>, 慶大<sup>2</sup>, NYU<sup>3</sup> 皆川 和成<sup>1</sup>, 小池 康太郎<sup>2</sup>, Qiming Du<sup>3</sup>, 林 寧生<sup>1</sup>, 小池 康博<sup>2</sup>, 水野 洋輔<sup>1</sup>, 中村 健太郎<sup>1</sup>

Tokyo Tech.<sup>1</sup>, Keio Univ.<sup>2</sup>, New York Univ.<sup>3</sup>

°K. Minakawa<sup>1</sup>, K. Koike<sup>2</sup>, Q. Du<sup>3</sup>, N. Hayashi<sup>1</sup>, Y. Koike<sup>2</sup>, Y. Mizuno<sup>1</sup> and K. Nakamura<sup>1</sup>

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

#### 1. はじめに

近年、多様な構造物の損傷や経年劣化を診断するため、光ファイバ中のブリルアン散乱に基づく分布型温度センサの研究が精力的に推進されている。従来のガラス光ファイバよりも柔軟性に富み扱いやすい温度センサを実現するため、我々はプラスチック光ファイバ (POF) の利用を検討している [1]。POF 中のブリルアン散乱特性の温度依存性は未解明な点が多かったが、最近の調査により、(1) 耐熱温度よりも 40 °C 程度高い温度まではブリルアン散乱が観測できること、(2) ブリルアン周波数シフト (BFS) の温度依存係数が POF の耐熱温度付近以上では数倍になること、が明らかになった[2]。(2)の性質はガラス転移温度 ( $T_g$ ) 程度に加熱されたコアが軟化したことに起因すると推測されているが、実証には至っていない。

そこで本研究では、ガラス転移温度を制御できるポリマー材料[3]を用意し、それらをコア母材に用いた POF 中の BFS の温度依存係数の絶対値が増加する温度 (以降、臨界温度と呼ぶ) が  $T_g$  とどのような関係があるかを調査した。

#### 2. 原理

ブリルアン散乱とは、光ファイバ中の光子と音響フォノンの相互作用により、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現象である[4]。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[4]。ここで、 $n$  はコアの屈折率、 $v_a$  はコア中の音速、 $\lambda_p$  は入射光の波長である。 $v_a$  は更に、ポアソン比  $\sigma$ 、密度  $\rho$ 、ヤング率  $E$  を用いて表される。一般に、ヤング率  $E$  が大きな温度依存性を示すため、音速と BFS も温度に大きく依存する。よって、BFS の値を見積もることで光ファイバ周囲の温度を測定できる。また、式(1)から、音速を測定することで BFS を算出することもできる。

#### 3. 実験方法

$T_g$  が異なる 5 つのポリメタクリル酸 2,2,2-トリフルオロエチル (PTFEMA) バルクを作製した。それぞれの物性値を表 1 に示す。各サンプルの  $T_g$  は、ドーパント (安息香酸ベンジル) 濃度を調整することで制御した。これらのポリマーバルクを厚さ 1.5 mm の円柱状に加工し、脱気水で満たした恒温槽内の穴あきステージの上に設置した (図 1)。その後、下記手順に従い、各サンプル中の音速および BFS (各サンプルをコア母材に使用した POF 中の音速および BFS に近い値となる) が示されている[5] の温度依存性を測定した。まず、図 1 に示すように各サンプルへ中心周波数 20 MHz の超音波パルスを照射し、上下端面からの反

Table 1. Prepared polymer bulk samples. RI, refractive index.

Sample	Dopant [mol%]	$T_g$ [°C]	RI at 1550 nm
1	0.00	77	1.408
2	1.99	69	1.415
3	4.04	59	1.419
4	6.02	48	1.424
5	7.98	43	1.426

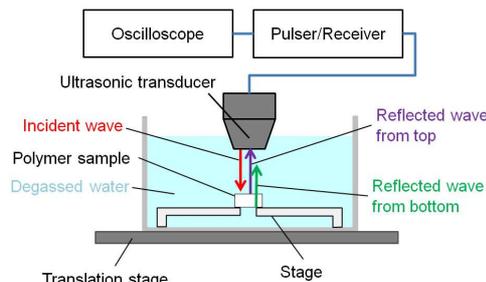


図 1. Experimental setup for BFS estimation.

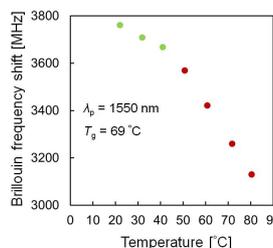


図 2. Temperature dependence of BFS in PTFEMA-2.

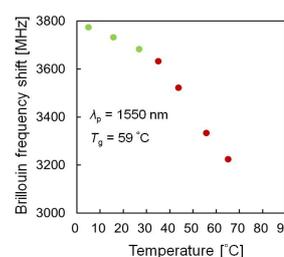


図 3. Temperature dependence of BFS in PTFEMA-3.

射波の検出時間差をオシロスコープ上で測定した。次に、その値とサンプルの厚さ (1.5 mm) から、ポリマーサンプル中の音速  $v_a$  を計算した。その後、式(1)を用いて BFS を計算した。以上の手順を脱気水の温度を変化させながら繰り返し、BFS の温度依存性を推定した。

#### 4. 実験結果

測定結果の例として、サンプル 2 ( $T_g = 69$  °C) とサンプル 3 ( $T_g = 59$  °C) 中の BFS の温度依存性を図 2 および図 3 にそれぞれ示す。昇温とともに BFS は減少した。また、BFS の温度依存係数の絶対値は、それぞれ約 50 °C、40 °C 以上で増加した。これらの温度は各  $T_g$  よりも約 20 °C 低い値であり、その他のサンプルでも同様の測定結果が得られた。示差走査熱量計によって観測した各サンプルのガラス転移は 20-30 °C の温度幅を有しているため、その転移開始温度と BFS の臨界温度には高い相関が見られたといえる。これは、 $T_g$  程度に加熱されたコアが軟化し、ヤング率が急激に低下したためであると考えられる。

本研究で得られた知見から、コアの  $T_g$  を任意に制御することで、指定した臨界温度以上の温度範囲で非常に高感度となるブリルアン温度センサが実現できることが示唆される。

#### 参考文献

[1] Y. Mizuno, et al., *Opt. Lett.* **35**, 3985 (2010).  
 [2] K. Minakawa, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 042502 (2014).  
 [3] K. Koike, et al., *Polym. Adv. Technol.* **25**, 204 (2014).  
 [4] G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, San Diego, CA, 2001).  
 [5] N. Hayashi, et al., *Appl Phys. Express* **4**, 102501 (2011).