

ポリペンタフルオロスチレンに基づく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 Temperature dependence of Brillouin frequency shift in poly(pentafluorostyrene)-based plastic optical fibers

¹東工大 ²慶大 ³NYU ○皆川 和成¹ 小池 康太郎^{2,3} 林 寧生¹ 小池 康博² 水野 洋輔¹ 中村 健太郎¹

○Kazunari Minakawa¹, Kotaro Koike^{2,3}, Neisei Hayashi¹, Yasuhiro Koike², Yosuke Mizuno¹, and Kentaro Nakamura¹

¹P. & I. Lab., Tokyo Tech, Japan ²KPRI, Keio Univ., Japan ³PRI, NYU, USA

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

1. はじめに

近年、光ファイバ中のブリルアン散乱光を用いた温度センサは、長距離にわたる任意の位置で温度測定が可能であることから、精力的な研究が推進されている。しかし、従来はセンサヘッドがガラス光ファイバで構成されており、数%の歪で破断するという問題があった。これを解決すべく、我々は、数 10%の歪に耐えられるほど柔軟性の高いプラスチック光ファイバ(POF)をセンサヘッドとして用いたブリルアン温度センサを実現したいと考えている[1,2]。

これまで、ブリルアン散乱観測に適した POF として、1.55 μm 帯での伝搬損失が比較的低い全フッ素化屈折率傾斜型(PFGI-)POF が用いられてきた[1,2]。しかし、従来よりも高い温度測定感度を有するものの[2]、PFGI-POF はその複雑な製造工程のため高コストであった[3]。そこで我々は、PFGI-POF に比べて製造コストが極めて低いポリペンタフルオロスチレン(PPFS)に基づく POF[4]に注目している。

PPFS は、通信波長帯の 1 つである 850 nm 帯において伝搬損失が小さい[4]が、1.55 μm 帯では伝搬損失が大きい。しかし、現在は 1.55 μm 以外の波長では必要な光デバイス(光増幅器やサーキュレータ)の入手が難しく、POF 中のブリルアン散乱を実測することは困難である。

そこで本研究では、バルクの PPFS 中の音速とその温度依存性を超音波パルスエコー法により測定し、850 nm 帯における PPFS-POF 中のブリルアン周波数シフト(BFS)の温度依存性を調査した。加えて、PPFS の分子量が BFS に与える影響についても調査した。

2. 原理

光ファイバ中を伝搬する光は、音響フォノンとの相互作用を介し、周波数が数 GHz 程度低周波側にシフトした微弱な反射光を生じる。これがブリルアン散乱であり、その周波数シフト量を BFS と呼ぶ。光ファイバ中の BFS は、

$$BFS = 2nV_a/\lambda, \quad (1)$$

の関係を満たす。ここで、 n はコアの屈折率、 V_a は光ファイバ中の音速、 λ は入射光の波長である。すなわち、音速が既知であれば BFS は計算により求められる。一般に、音速は温度に依存して変化するため、BFS も温度に依存する。

この性質を利用すれば、温度センシングが可能となる。

3. 実験方法

表 1 に示す 4 種類の PPFS バルクサンプルを作製した。その際、重合の開始剤の量を調整することによって各サンプルの分子量を制御した。これらの PPFS サンプルをそれぞれ厚さ 4 mm、直径 10 mm の円筒状に切削加工し、脱気水で満たした恒温槽内に設置した。その後、中心周波数 20 MHz の収束超音波を上部から照射し、上面と底面からの反射波が戻る時間差から各サンプル中の音速を測定した[5]。最後に、各温度での音速を式(1)に代入し、波長 850 nm における各サンプルの BFS を算出した。恒温槽内の脱気水の温度は、20-75 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化させた。

4. 実験結果

表 2 に各 PPFS サンプル中の 27 $^{\circ}\text{C}$ における BFS とその温度依存性を示す。比較のため、シリカファイバ及び PFGI-POF 中における値も示した。BFS の温度依存性はいずれのサンプルにおいても線形であり、ヒステリシスも観測されなかった(サンプル P-2 の例を図 1 に示す)。また、BFS およびその温度係数はどちらも PPFS の分子量には依存せず、それぞれ約 6.1 GHz、約 -7.1 MHz/K でほぼ一定であった。この値は PFGI-POF 中における値とほぼ同じであり[2]、またシリカファイバ中の値よりも絶対値が約 3.3 倍大きい[6]。なお、バルクと POF では BFS とその温度依存性に大きな差はないことがすでに報告されている[5]。

以上の結果から、ブリルアン温度センサのセンサヘッドとして PPFS-POF を用いることで、PFGI-POF と同程度の高い温度測定感度を維持しつつ、低コスト化が見込める。

参考文献

- [1] Y. Mizuno *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 021103 (2010).
- [2] Y. Mizuno *et al.*, *Opt. Lett.* **35**, 3985 (2010).
- [3] M. H. Hung *et al.*, [*Polymeric Materials Encyclopedia*], CRC Press, New York, vol. 4, 2466 (1996).
- [4] T. Kaino, *Appl. Phys. Lett.* **48**, 757 (1986).
- [5] N. Hayashi *et al.*, *Appl. Phys. Express* **4**, 102501 (2011).
- [6] T. Kurashima *et al.*, *Appl. Opt.* **29**, 2219 (1990).

Table 1. The amount of initiator for polymerization, molecular weights (M_w : weight average, M_n : number average), and refractive indices (RIs) at 850 nm of PPFS bulk samples.

Sample	Initiator [mol%]	$M_w (\times 10^5)$ [g/mol]	$M_n (\times 10^5)$ [g/mol]	M_w/M_n	RI
P-1	0.20	8.13	4.13	1.97	1.467
P-2	0.30	7.69	3.99	1.93	1.467
P-3	0.40	6.84	3.57	1.92	1.466
P-4	0.50	5.96	2.65	2.25	1.467

Table 2. BFSs at 27 $^{\circ}\text{C}$ and their temperature coefficients of the PPFS samples, silica fiber, and PFGI-POF at 850 nm. Note that the values for the silica fiber and PFGI-POF have been recalculated using eq. (1).

Sample	BFS at 27 $^{\circ}\text{C}$ [GHz]	Temperature coefficient [MHz/K]
P-1	6.16	-7.27
P-2	6.17	-7.07
P-3	6.16	-7.18
P-4	6.18	-7.12
Silica fiber	19.7	2.2
PFGI-POF	5.1	-7.5

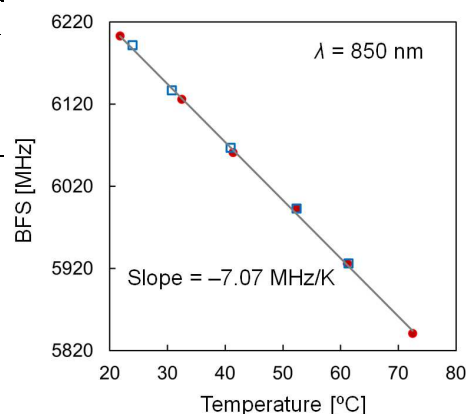


Figure 1. Temperature dependence of BFS in PPFS sample (P-2) at 850 nm.