

# V字に曲げたプラスチック光ファイバを用いた屈折率センシング

## Refractive-index sensing using V-shaped plastic optical fibers

東京工業大学 精密工学研究所 ○李 熙永 林 寧生 水野 洋輔 中村 健太郎

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

E-mails: {hylee, hayashi, ymizuno, knakamura}@sonic.pi.titech.ac.jp

### 1. はじめに

光ファイバセンサは遠距離・多点測定が可能、電磁ノイズに強いなどの利点を有し、歪・温度・振動・湿度・屈折率などの各種センサが開発されてきた。その中でも、光ファイバを用いた屈折率センサは生物・化学分野での需要が高まっており、これまでに種々の構成が提案されて来た [1-6]。特に、ガラス光ファイバのテーパ加工部でのエバネッセント波を用いたセンサは比較的低コストで高感度であるため、精力的な研究が推進されてきた [2]。しかし、ガラス光ファイバのテーパは壊れやすく作製や取り扱いに注意が要求されるため、最近では高い柔軟性を有するプラスチック光ファイバ (POF) のテーパの利用が注目されている。

従来は、POF のテーパ加工法として、外部熱源を用いた手法 [3] や化学エッチング技術を用いた手法 [4, 5] が利用されてきた。しかし、外部熱源や薬品の利用は安全性が十分とはいえない。一方、外部熱源や薬品を利用せず、POF 中の伝搬光を熱に変換してテーパ化する手法 [6] も提案されているが、初期損失を人工的に印加する必要があるため最終的な損失が高くなるという問題があった。また、高パワー光の入射が必要であり、POF 端面の焦げ [7] や POF ヒューズの発生 [8] も問題であった。

そこで本発表では、POF の補強層に切れ込みを入れてV字に曲げるという、簡便で安全かつ低コストな手法で、液体の屈折率センシングが実現できることを実証する。

### 2. POF の加工と屈折率センサの実験系

実験では、コア径 625  $\mu\text{m}$ 、クラッド径 70  $\mu\text{m}$ 、補強層径 750  $\mu\text{m}$  の全フッ素化 POF [9] を用いた。この POF は、1550 nm 帯における光伝搬損失が比較的低い (250 dB/km)。なお、コアとクラッドは同一のポリマー材料から構成されており (ドーパントが異なる)、目視で判別可能な境界は存在しない。

POF の加工手順を Fig. 1 (a) に示す。約 25 cm の POF の中央付近の補強層にファイバカッターを用いて切れ込みを入れ、V字に折り曲げた。加工後の POF の顕微鏡写真を Fig. 1 (b) に示す。コア・クラッド層が剥き出しになっている様子が分かる。

加工した POF を用いた屈折率センサの実験系を Fig. 2 に示す。1550 nm 帯の半導体レーザー (LD) の出力をエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) で 10 dBm まで増幅し、POF に入射した。透過光は別の EDFA で 35 dB 増幅させた後、光スペクトラムアナライザ (OSA) によりスペクトルのピークパワーを測定した。POF とシリカ単一モードファイバ (SMF) の結合は、FC/SC アダプタを介した突合せ接合により行った。

まず、POF の加工部を 25°C の水 (1550 nm 帯で屈折率 1.318 [10]) に浸したときの透過光パワーの変動を、V 字の折り曲げ角度 (折れていない状態のとき 0° と定義する) の関数として測定した。この結果から、屈折率センシングに用いる折り曲げ角度を決定した。

続いて、屈折率を 1.318 から 1.348 まで連続的に変化させた 25°C の砂糖水 (濃度を 0% から 20% まで変化させて調整) を用いて、透過光パワーの屈折率依存性を調査した。

### 3. 実験結果

POF の加工部を水に浸したときの透過光パワーの変動を、20° おきの折り曲げ角度について測定した結果を Fig. 3 (a) に示す。縦軸は、空気中での透過パワーに対する相対値とした。この結果から、100° 以下の折り曲げ角度では屈折率変化に対する透過光パワー変動が小さい (感度が低い) といえる。折り曲げ角度が大きいほど空気中での光損失は高くなるため、この意味では折り曲げ角度は小さいほうが好ましい。よって、屈折率センサとして用いる折り曲げ角度は 120° と決定した。このとき、折り曲げによる光損失は約 7 dB であり、伝搬光の熱変換を用いた手法での初期損失を除いた値 (約 25 dB) [6]

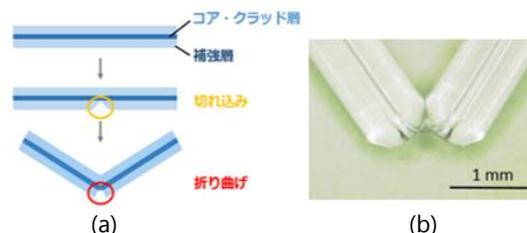


Fig. 1. (a) Fabrication procedures. (b) Photograph of V-shaped POF.



Fig. 2. Schematic of the experimental setup for refractive-index sensing. EDFA, erbium-doped fiber amplifier; LD, laser diode; OSA, optical spectrum analyzer.

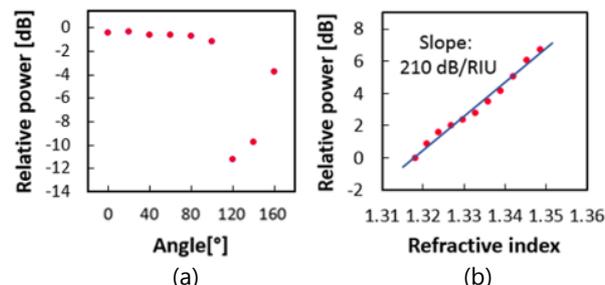


Fig. 3. (a) Relative power dependence on the angle of V-shape. (b) Relative power plotted as a function of the refractive index of liquid. Measured data are shown as red circles, and the blue line is a linear fit.

よりも約 18 dB 低かった。

次に、折り曲げ角度を 120° としたときの透過光パワーの屈折率依存性を Fig. 3 (b) に示す。縦軸は、加工部を水に浸したときの透過光パワーに対する相対値とした。屈折率の増加に伴って透過光パワーはこの範囲でほぼ線形に単調増加 (縦軸は対数であるが) し、その依存係数は約 210 dB/RIU であった。この屈折率に対する透過光パワーの正の依存性は、POF のテーパを用いたセンサ [5] と同等である。

### 4. まとめ

外部熱源や薬品を用いず、POF の補強層に切れ込みを入れて V 字に折り曲げるだけで、液体の屈折率センサが構成できることを実証した。折り曲げ角度を 120° としたとき、液体の屈折率増加に対して透過光パワーは単調に増加し、その依存係数は約 210 dB/RIU であった。

### 参考文献

- [1] T. Takao and H. Hattori, Jpn. J. Appl. Phys. **21**, 1509 (1982).
- [2] A. Leung et al, Biosens. Bioelectron. **21**, 2202 (2006).
- [3] D. J. Feng et al, Appl. Opt. **53**, 2007 (2014).
- [4] D. F. Merchant et al, Sens. Actuat. A, Phys. **76**, 365 (1999).
- [5] Y. M. Wong et al, J. Opt. A : Pure Appl. Opt. **5**, S51 (2003).
- [6] H. Ujihara et al, Appl. Phys. Express **8**, 072501 (2015).
- [7] Y. Mizuno et al, Opt. Lett. **38**, 1467 (2013).
- [8] Y. Mizuno et al, Sci. Rep. **4**, 4800 (2014).
- [9] Y. Koike and M. Asai, NPG Asia Mater. **1**, 22 (2009).
- [10] G. M. Hale and M. R. Querry, Appl. Opt. **12**, 555 (1973).