

マルチコアプラスチック光ファイバ中のモード間干渉スペクトルの特異な温度依存性の観測 Unique temperature dependence of modal interference spectra in multi-core plastic optical fibers

○戸田 歌音¹、岸澤 知也¹、豊田 悠真¹、野田 康平^{1,2}、元石 直樹^{1,2}、
李 ひよん³、中村 健太郎²、市毛 弘一¹、水野 洋輔¹

¹横浜国立大学 工学研究院 ²東京工業大学 未来産業技術研究所 ³芝浦工業大学 工学部

OKanon Toda¹, Kazuya Kishizawa¹, Yuma Toyoda¹, Kohei Noda^{1,2}, Naoki Motoishi^{1,2},

Heeyoung Lee³, Kentaro Nakamura², Koichi Ichige¹, and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University ²Tokyo Institute of Technology ³Shibaura Institute of Technology

E-mails: toda-kanon-bw@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

近年、光ファイバを用いた種々の温度センサの開発が推進されている。中でも、光ファイバ中のモード間干渉を用いた温度センサは、比較的構成が単純で低廉な手法として注目されている。モード間干渉は、1本の多モード光ファイバ (MMF) を2本の単一モードファイバ (SMF) で挟み込んだ「SMS 構造」を用いることで容易に観測できる[1-7]。この構造では、一方のSMFからの入射光のエネルギーがMMF中で複数の伝搬モードに分配され、もう一方のSMFに出力される際に各伝搬モードが干渉する。SMS構造に対して広帯域光を入射すると、モード間干渉により透過光のスペクトルに干渉パターンが生じる。ここで、MMFに温度変化を加えるとその干渉パターンがシフトするため、シフト量を測定することにより温度を推定することができる。

Liuら[1]は、長さ1.8mの屈折率傾斜型 (GI) のシリカMMFを用いて、1550nm帯で58.5 pm/°Cの温度感度を得た。また、Tripathiら[2]は、温度感度の絶対値および符号がMMFの構造や材料に大きく依存することを示した。これを受けて、Huangら[3]は、MMFとしてアクリル (PMMA) をベースとした標準的なプラスチック光ファイバ (POF) を用い、1570nm帯で温度感度93.1 pm/°Cを得た。一方、我々はこれまでに、長さ1.0m、コア径62.5 μmの全フッ素化 (PF) GI-POFを用いて、1300nm帯で49.8 nm/°Cという高い温度感度 (絶対値はシリカファイバの1800倍以上) を得た[4]。他にも、部分塩素化POFなど、材料面で特殊なPOF中のモード間干渉も温度センシングに利用可能であることが報告されているが[5]、構造面で特殊なPOF中のモード間干渉については報告がなかった。

このような背景の下、我々は画像伝送用に開発されたマルチコアPOFをSMS構造におけるMMFとして利用し、モード間干渉スペクトルおよびその温度依存性の観測を試みた[6]。しかし、用いた増幅自然放出 (ASE) 光源の帯域が限られており、挙動の全容解明には至らなかった。

そこで本研究では、ASE光源に代わり超広帯域のスーパーコンティニューム (SC) 光源を用いて、マルチコアPOF中のモード間干渉スペクトルの温度依存性を解明し、温度センサへの応用可能性について議論した。

2. 実験系

今回用いたマルチコアPOFは、多数の細径の単一モードコアを有するPMMAベースのPOFである (Fig. 1)。安価で柔軟性に富み、折れにくく、工業用スコープなどに利用されている。各コアのモードフィールド径 (MFD) はシリカSMFのMFDよりも小さいため、マルチコアPOF中を伝搬する光には、異なるコアあるいはクラッドを通るモードが必ず存在し、結果としてモード間干渉が生じるものと期待される。

マルチコアPOF中のモード間干渉スペクトルの温度依存性を観測するための実験系をFig. 2に示す。コア数13,000、外径1.0mm、各コアの直径約6.0 μm、長さ15cmのマルチコアPOF (MBL-1000、旭化成) とコア数3,500、外径0.35mm、各コアの直径約4.0 μm、長さ15cmのマルチコアPOF (MB-350、旭化成) を、長さ約1mの2本のシリカSMFでコネクタ接続により挟み込み、SMS構造を構成した。超広帯域のSC光源の出力をこの構造に入射し、透過光のスペクトルを光スペクトルアナライザ (OSA) で観測した。ホットプレートを用いてマルチコアPOFの中心5cmを40°Cまで加熱し、30°Cの状態との差分としてパワー変化を測定し、透過スペクトルの温度依存性を調査した。なお一般に、モード間干渉において、長さLの区間にΔTの温度変化を与えたときと、長さL/nの区間にn・ΔTの温度変化を与えたときでは、干渉スペクトルに生じる変化は同等であることが知られている[7]。

3. 実験結果

まず、波長900-1150 nmにおける透過スペクトル (差分) の温度依存性をFig. 3に示す (MBL-1000の場合)。これまでSMS構造において報告されてきた明瞭な周波数シフトや臨界波長[2]は観測されず、パワーの変化のみが生じた。MB-350でも同様であった。このような特異な挙動は、マルチコアPOFの特殊な構造に起因するものと推測される。なお、前後のSMFの

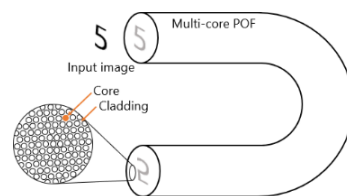


Fig. 1. Schematic of multi-core POF for imaging.



Fig. 2. Experimental setup.

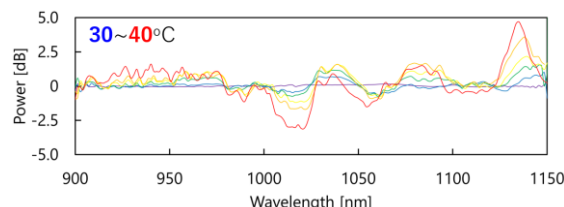


Fig. 3. Transmitted spectral difference measured at 30, 32, 34, 36, 38 and 40°C (MBL-1000).

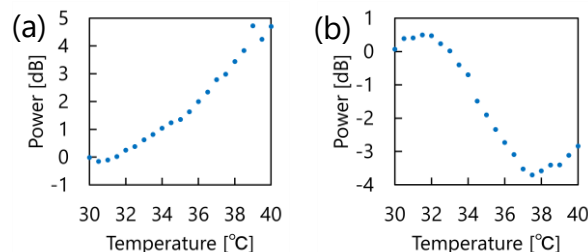


Fig. 4. Temperature dependencies of spectral powers at (a) 1135.1 nm in MBL-1000 and (b) 1055.4 nm in MB-350.

温度を変化させてもスペクトルに変化は生じなかった。

続いて、パワーに基づく温度計測の可能性を検討した。2種類のマルチコアPOFにおいて、パワー変動が最大となる波長における、パワーの温度依存性をFig. 4(a)(b)にそれぞれ示す。どちらの結果でも温度の上昇に伴うパワー変化が見られるが、温度とパワーが1対1に対応する温度範囲が限定されてしまう場合があることがわかる。さらに、振動などにより容易にモードが変化してしまうため、特定波長のパワーに基づいて温度を計測する手法は不安定である。よって、マルチコアPOF中のモード間干渉を用いて、温度ダイナミックレンジの制限が緩和され、かつ安定性の高い温度センシングを行うためには、スペクトル形状全体を利用したより高度な信号処理 (機械学習など) を施す必要があると考えられる。

謝辞：本実験で用いた2種類のマルチコアPOFは、旭化成株式会社にご提供頂きました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Liu, et al., Appl. Opt. **46**, 2516 (2007).
- [2] S. M. Tripathi, et al., J. Lightw. Technol. **27**, 2348 (2009).
- [3] J. Huang, et al., Opt. Lett. **37**, 4308 (2012).
- [4] G. Numata, et al., IEEE Photon. J. **6**, 6802306 (2014).
- [5] G. Numata, et al., IEICE Electron. Exp. **12**, 20141173 (2015).
- [6] 戸田 他, 2021 秋応物, 12p-N306-3.
- [7] Y. Mizuno, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 058002 (2018).