

プラスチック光ファイバヒューズ現象の観測

東京工業大学 水野 洋輔・田中 宏樹・中村 健太郎
 東京大学 林 寧生
 (国研)物質・材料研究機構 轟 眞市

1. はじめに

光ファイバヒューズとは、高パワー光の入射により光ファイバが局所的に加熱され発生した輝点（閃光）が、光ファイバを破壊しながら光源に向かって伝搬する現象である^{(1)~(4)}。輝点が伝搬した後の光ファイバはコアが損傷し光通信には使用できないため、ヒューズ現象は光ファイバ通信の容量限界を決定する要因の一つとされている。これまでに、シリカガラス光ファイバにおけるヒューズ現象については多くの報告がなされているが^{(1)~(4)}、近年通信や計測分野で注目を集めているプラスチック光ファイバ（POF）^{(5)~(7)}におけるヒューズ現象は報告がなかった。

本稿では、POF中の光ファイバヒューズを初めて観測し、その特異な性質を明らかにしたので概説する。ガラス光ファイバと比較して、伝搬速度は1~2桁遅く、閾値パワー密度は180倍低かった。続いて、発生・伝搬機構を解明するとともに、伝搬を停止させる手法や遠隔でモニタリングする手法を紹介する。最後に、工学応用の可能性についても述べる。

2. 基本特性の解明

2-1 ガラス光ファイバヒューズの性質^{(1)~(4)}

シリカにより構成された単一モード光ファイバにおけるヒューズ現象の主な性質としては、

- ① ヒューズ伝搬速度はm/sオーダー
- ② 閾値パワー密度は約1.2 MW/cm²
- ③ 伝搬速度の入射光パワー密度への依存係数は約

$$9.4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MW}^{-1} \cdot \text{cm}^2$$

- ④ 伝搬後には弾丸状の周期的な空乏が形成される
- ⑤ 伝搬後は光を通さない
- ⑥ 輝点は「プラズマ」とであるとされている

などが知られている。以下では、POFヒューズの性質はこれらと大きく異なることを示す。

2-2 POFヒューズの発生と伝搬⁽⁸⁾⁽⁹⁾

POFヒューズを発生、伝搬させるための実験系を図1に示す。1,550 nm帯の光を増幅し、突合せ接合⁽⁷⁾を介して外径750 μm、コア径50 μmのPOF（通信波長帯で250 dB/kmという比較的低い光損失を有する全フッ素化屈折率傾斜型POF⁽⁶⁾）に入射した。POFの開放端を金属粉に接触させてヒューズを発生させた。

発生したヒューズがPOFに沿って光源に向かって伝

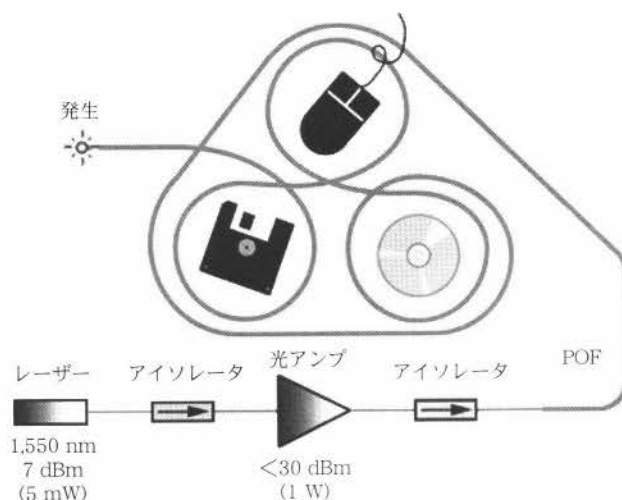


図1 POFヒューズ発生のための実験系

搬する様子を1秒おきに撮影し、重ねて表示したのが写真1である。ガラス光ファイバ中のヒューズに比べ、極めて遅い速度でヒューズが伝搬した。POFヒューズの伝搬速度の入射光パワー密度依存性(図2)から、

- ① ヒューズ伝搬速度は最も遅いときに21.9 mm/sであり、ガラス光ファイバ中の速度よりも1~2桁遅い
- ② 閾値パワー密度は6.6 kW/cm²であり、ガラス光ファイバ中の値よりも180倍小さい
- ③ 伝搬速度の入射光パワー密度への依存係数は1,590 mm・s⁻¹・MW⁻¹・cm²であり、ガラス光ファイバ中の値よりも170倍大きい

という性質が明らかになった。詳細な理論解析によると、遅い伝搬速度はポリマーの低い熱伝導率に起因すると推察された。また、低い閾値パワー密度について

は、ポリマーの低いガラス転移温度(図3に示すような、光吸収係数が急激に高くなる温度と相関がある)に起因すると考えられる。

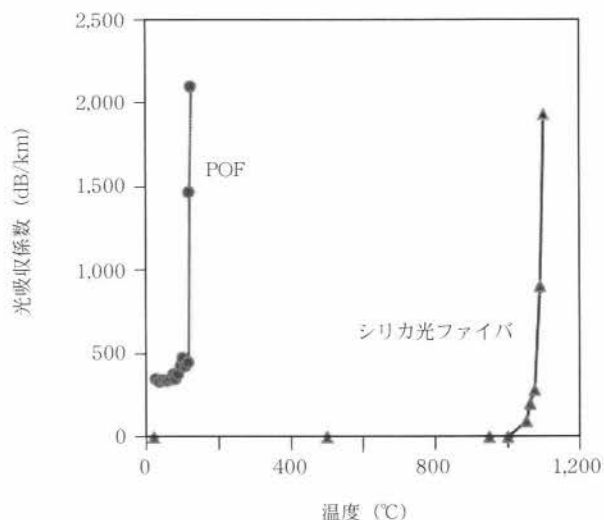


図3 POFとシリカ光ファイバの光吸収係数の温度依存性

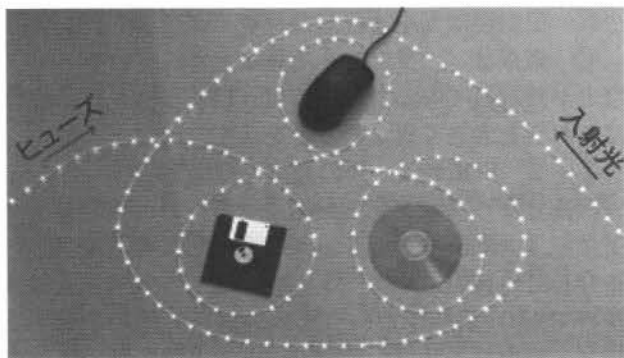


写真1 伝搬するPOFヒューズを1秒おきに撮影し、重ねて表示した図

POFの配置は、シリカ光ファイバを用いた先行研究³⁾に倣った。次の動画も参照：https://www.youtube.com/watch?v=t0k_B6EQ0hg

2-3 顕微鏡観察^{(8)~(10)}

ヒューズ通過後のPOFの顕微鏡写真の1例を写真2に示す。弾丸状の周期的な空乏は観測されず、ポリマーは黒く炭化し、その軌跡は螺旋状に振動していた。その振動の周期は約1,400 μmであり、屈折率傾斜構造から算出される光線の周期1,204 μmと近い値であった。これは、最大のエネルギーを与える特定の光伝搬モードに沿って輝点が伝搬することを示唆する。

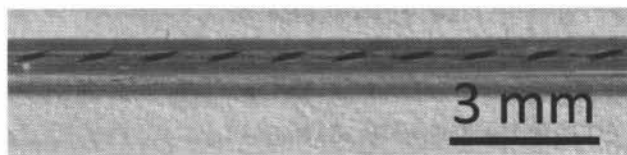


写真2 ヒューズ通過後のPOFの顕微鏡写真の例

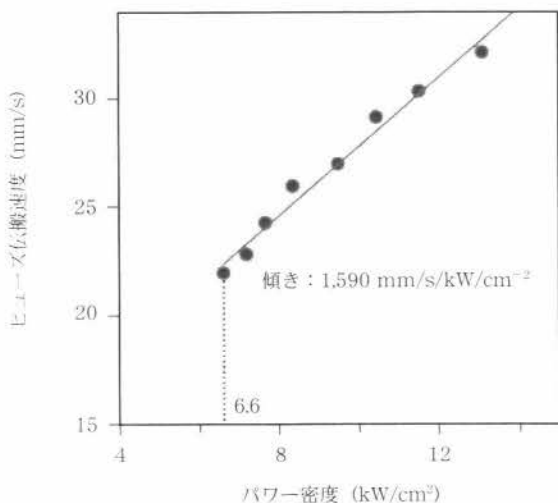


図2 POFヒューズ伝搬速度の入射光パワー密度依存性

また、発生した気体が周期的に配列する場合があること(写真3)や、サブワットレベルの高パワー光入射により発生した多量の気体が爆発を誘引し、ヒューズ伝搬が自発的に停止する場合があること(写真4)も明らかになった。

2-4 スペクトル解析⁽⁹⁾

伝搬しているPOFヒューズの放射スペクトルを測定

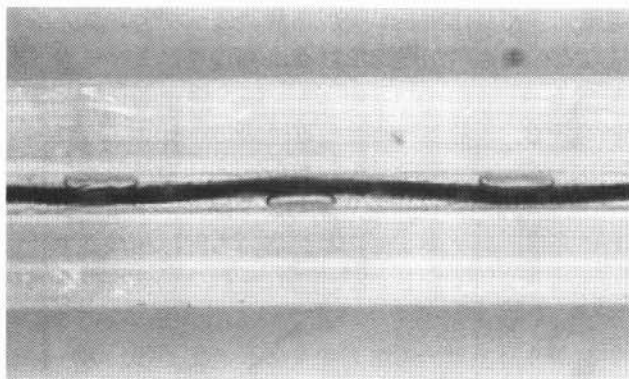


写真3 発生した気体が周期的に配列している様子



写真4 多量の気体発生により爆発し、ヒューズ伝搬が停止した様子

したのが図4である。比較のため、太陽光と電球の放射スペクトルも含めた。POFヒューズの放射スペクトルに物理的意味を持つ線スペクトルは現れなかったため、少なくともPOFヒューズは従来言われてきたような「プラズマ」ではなく熱輻射であることが明らかになった。なお、プランクの法則およびウィーンの変位則より、輝点の温度は約3600 Kと見積もられた。

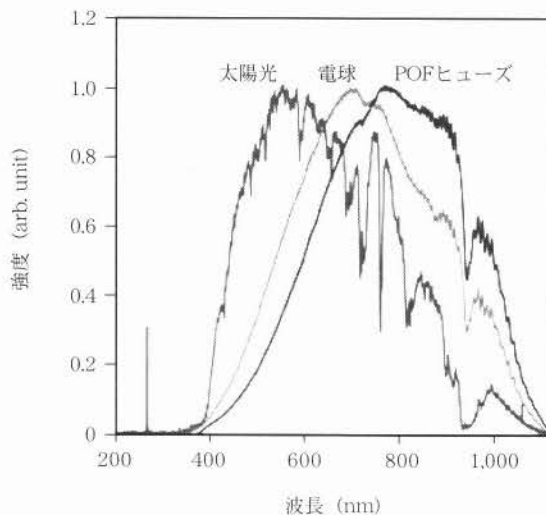


図4 POFヒューズ・太陽光・電球の放射スペクトル

3. 最近の展開

3-1 ヒューズ伝搬停止法⁽⁸⁾

POFの損傷を最小限に抑えるため、意図せず発生したヒューズの伝搬を停止させる手法が望まれる。前節で解明したPOFヒューズ伝搬機構を踏まえると、光の伝搬モードを乱すことでPOFヒューズの伝搬を停止させることができると考えられる。そこで我々は、金属のリングを用いた容易なヒューズ停止法を開発した。

この手法では、写真5のように予めリングをPOFの一部に圧着しておく。圧着強度は、光伝搬損失が生じない程度で十分である。すると、写真6のように、POFヒューズが通過する際、モードが乱され伝搬が停止する。リングを外すと、POFの弾性変形により形状は元に戻る。よって、このような機構を周期的にPOFに設けておくことで、POFヒューズによる損傷を最小限に抑えることができる。なお、ヒューズが通過した後のPOFを加熱によって再生する手法の開発も進行中である。

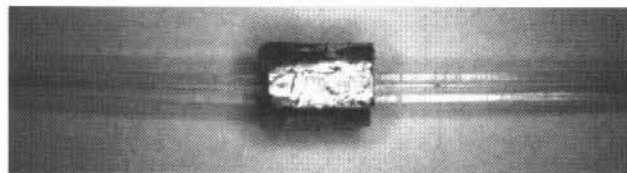


写真5 POFの一部にニッケルのリングを圧着した様子

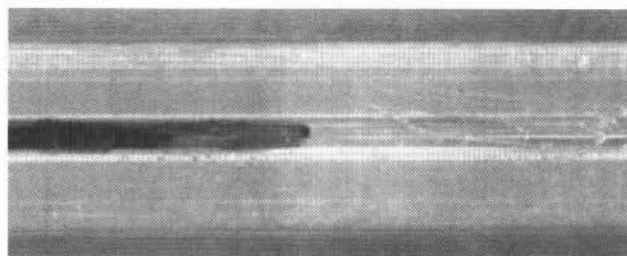


写真6 POFヒューズの伝搬が停止した様子

3-2 リアルタイム遠隔モニタリング⁽¹⁰⁾

ヒューズの停止法と並んで、伝搬中のヒューズ的位置を知ることもPOFシステムの保守・管理上重要である。そこで我々は、POF中のブリルアン散乱⁽⁷⁾を用いて、伝搬するPOFヒューズ的位置をリアルタイムで遠隔検出する手法を開発した。

実験系を図5に示す。POFヒューズの伝搬に伴い、

ブリルアン散乱に寄与するPOFの長さが減少するため、同時にブリルアン散乱スペクトルのピークパワーも低くなる。よって、ピークパワーとPOFヒューズの位置が対応することになる。POFヒューズの伝搬に伴うブリルアン散乱スペクトルの変化を図6に示す。また、スペクトルのピークパワーのPOFヒューズの位置との対応を図7に示す。両者はこの範囲では線形に対応しているため、ブリルアン解析に基づいてPOFヒューズの位置を遠隔で検出できることが示されたといえる。

3-3 工学応用の可能性⁹⁾

ヒューズ通過後のガラス光ファイバ中では、光はほぼ伝搬できないことが知られている。そこで、POFに対してヒューズ通過後の光伝搬損失をカットバック法で調査したところ、約1.4 dB/cmであった(図8)。この値は通信用途には高すぎるが、cmオーダの光伝搬には十分低い値である。一方、炭化した軌跡は導電性を有することから、ヒューズ通過後のPOFは光と電気の両方を通す性質があるといえる。これにより長い

電気光学相互作用長が実現され、スイッチングデバイスなどへの応用が期待される。

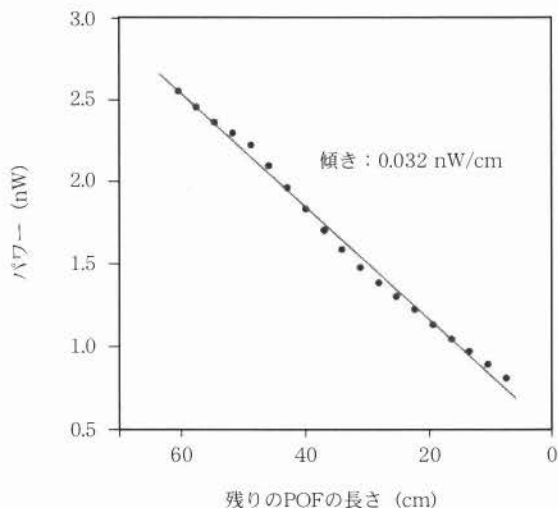


図7 ブリルアン散乱スペクトルのピークパワーとPOFヒューズの位置(残りの長さ)の関係

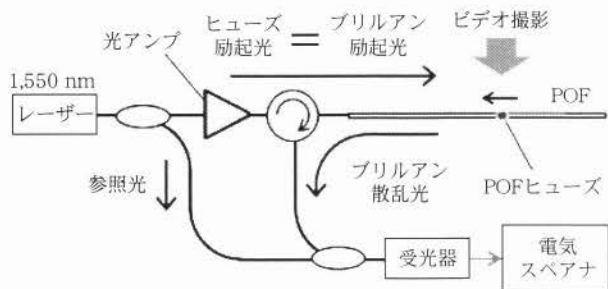


図5 POFヒューズ伝搬のリアルタイム遠隔モニタリングの実験系

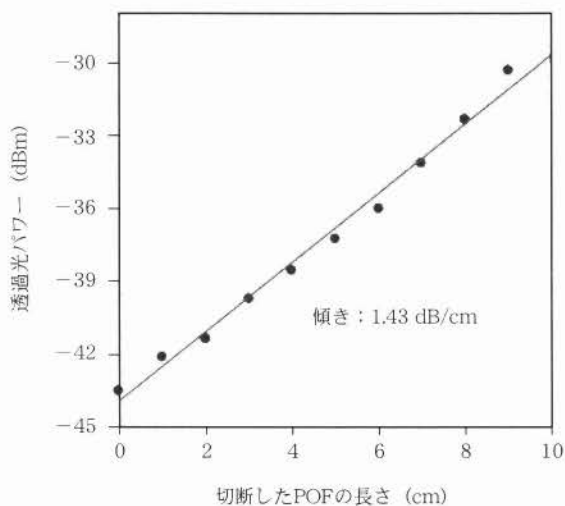


図8 カットバック法によるヒューズ通過後のPOFの伝搬損失の評価

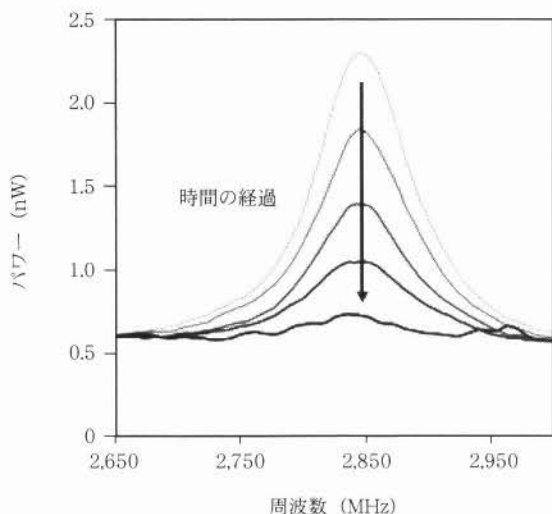


図6 POFヒューズの伝搬に伴う、ブリルアン散乱スペクトルの変化

4. おわりに

本稿では、POFヒューズの特異な性質を明らかにした。2-1節で触れたガラス光ファイバヒューズとは大きく異なり、

- ① ヒューズ伝搬速度は最も遅いときに21.9 mm/sであり、ガラス光ファイバ中の速度よりも1~2桁遅い

- ② 閾値パワー密度は 6.6 kW/cm^2 であり、ガラス光ファイバ中の値よりも180倍小さい
- ③ 伝搬速度の入射光パワー密度への依存係数は $1,590 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MW}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ であり、ガラス光ファイバ中の値よりも170倍大きい
- ④ ヒューズ伝搬後には黒く炭化し、螺旋状に振動する軌跡が残される（条件により、気体発生や爆発による伝搬停止が観測される）
- ⑤ 約 1.4 dB/cm という高い損失ではあるが、ヒューズ伝搬後でも光を多少は通す（炭化した軌跡は導電性を有するため、電気と光の両方を通すといえる）
- ⑥ 輝点は「プラズマ」ではなく熱輻射であるなどの性質を有することを示した。

POFヒューズは、POFに高パワー光を入射して非線形効果（ブリルアン散乱・ラマン散乱・四光波混合など）を調査する際、避けては通れない現象である。その発生・伝搬機構にはまだ多くの未解明な点があり、更なる研究の進展が望まれる。一方で、特異な性質に基づく各種デバイス応用も期待される。

謝辞

POFヒューズの放射スペクトルの測定は、東京工業大学大学院総合理工学研究科の沖野晃俊准教授にご協力頂いた。また、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金の支援により行われた。

＜参考文献＞

- (1) R. Kashyap and K. J. Blow : "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres", *Electron. Lett.* **24**, 47 (1988)
- (2) R. Kashyap : "The fiber fuse - from a curious effect to a critical issue: A 25th year retrospective", *Opt. Express* **21**, 6422 (2013)
- (3) S. Todoroki : "Origin of periodic void formation during fiber fuse", *Opt. Express* **13**, 6381 (2005)

- (4) S. Todoroki : *Fiber Fuse—Light-Induced Continuous Breakdown of Silica Glass Optical Fiber* (Springer Japan, 2014)
- (5) M. G. Kuzyk : *Polymer Fiber Optics: Materials, Physics, and Applications* (CRC Press, 2006)
- (6) Y. Koike and M. Asai : "The future of plastic optical fiber", *NPG Asia Mater.* **1**, 22 (2009)
- (7) Y. Mizuno and K. Nakamura : "Experimental study of Brillouin scattering in perfluorinated polymer optical fiber at telecommunication wavelength", *Appl. Phys. Lett.* **97**, 021103 (2010)
- (8) Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, K. Nakamura and S. Todoroki : "Observation of polymer optical fiber fuse", *Appl. Phys. Lett.* **104**, 043302 (2014)
- (9) Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, K. Nakamura and S. Todoroki : "Propagation mechanism of polymer optical fiber fuse", *Sci. Rep.* **4**, 4800 (2014)
- (10) Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka and K. Nakamura : "Spiral propagation of polymer optical fiber fuse accompanied by spontaneous burst and its real-time monitoring using Brillouin scattering", *IEEE Photon. J.* **6**, 6600307 (2014)

【筆者紹介】

水野洋輔

東京工業大学 未来産業技術研究所 助教

田中宏樹

東京工業大学 大学院総合理工学研究科 博士課程3年

中村健太郎

東京工業大学 未来産業技術研究所 教授

林 寧生

東京大学 先端科学技術研究センター 研究員

轟 眞市

(国研)物質・材料研究機構 先端的共通技術部門
先端フォトニクス材料ユニット 主幹研究員