

ファイバフューズの伝搬挙動

PROPAGATION BEHAVIOR OF FIBER FUSE

轟 眞市

Shin-ichi Todoroki

(独) 物質・材料研究機構 光材料センター

Optronics Materials Center, National Institute for Materials Science

1 まえがき

ファイバフューズに関する研究報告が最初に学術雑誌に掲載されたのは、1988年1月[1]。この直前には、石英系光ファイバの最低損失値がほぼ理論値に近づき、また EDFA が登場するという、その後の光通信の発展にとって重要なマイルストーンが達成された頃であった。

自らが伝送する光(数 W)を消費して、可視光を発生しながら光ファイバが壊れていくこの現象は、見た目がセンセーショナルなだけに、発見当初から注目を浴びていたと思われる。しかし、多くの研究者が参入し始めるのは、今世紀に入ってレーザー光源の強度が飛躍的に増大してからのことであった(図1参照)。

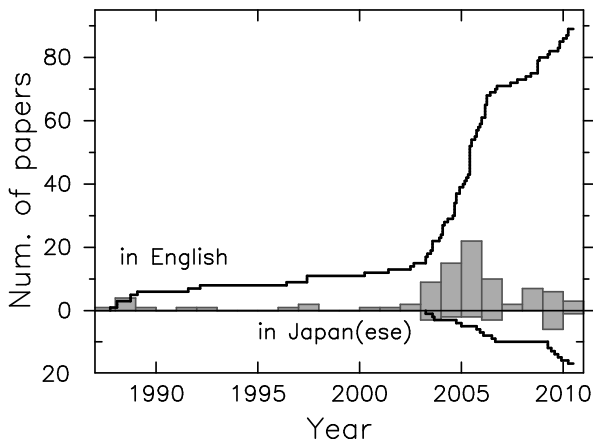


図1 ファイバフューズに関する研究発表数(論文と口頭発表)の推移(国際および国内)。そのリストは http://www.geocities.jp/tokyo_1406/node6.html に記載。

その内容は計算機シミュレーションやその場観察といった基礎的な検討が目立っていたが、2008年以降、日本を中心として、より実用的な技術開発がなされてきた。その概要は、今年3月に OITDA より発行された技術資料[2]にまとめられている。

本発表ではこれを補足すべく、コア部分に閉じ込められたプラズマの伝搬挙動を、マクロな視点およびミクロな視点からまとめてみる。

2 マクロな挙動

ファイバフューズが伝搬する様子を身近な現象で例えるなら、野焼きの炎を思い浮かべるのが良い(図2参照)。炎あるいはプラズマからなる孤立波は、進行方向からエネルギーをもらい、発熱発光を伴う非可逆反応を経て燃えかす、あるいは空孔を残して移動していく。移動する

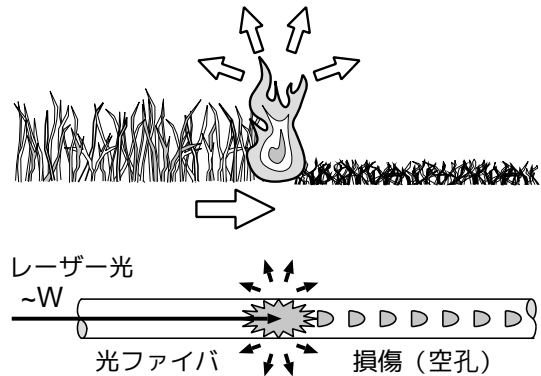


図2 野焼きの炎(上)とファイバフューズ(下)の類似性。矢印はエネルギーの出し入れを表す。

輝点の先端部分では、シリカガラスが熱分解して SiO が発生し[3]、それがレーザー光を吸収して熱に変換され、新たなプラズマが供給されるという反応が起こっていると考えられる。首藤らは、これらの熱の入出力を考慮した非定常熱伝導方程式を解き、そこから得られた熱ピークの伝搬挙動が、実験的に観測されたファイバフューズの伝搬速度と良く一致することを示している[3]。

このような、エネルギーや物質の損失や利得を伴う局所的な構造が、非平衡な開放系において一定期間持続しているものを、散逸ソリトン(dissipative soliton)という[4]。散逸ソリトンは、それを持続させるのに必要な入力を通断つか、過剰に出力させる環境に導くことで消滅する。今までに提案されてきた、ファイバフューズ停止デバイスやシステムは、これら2つのどちらかの手法を取っていると解釈できる。

3 ミクロな挙動

ファイバフューズを特異ならしめているもう一つの特徴は、プラズマが通過した跡に残される、弾丸形状の周期的空孔列である。その起源は、伝搬するプラズマ内に誘起された不安定性と考えられ、Rayleigh 不安定性とする説[5]とプラズマ-ガラス界面に誘起された電荷の反発とする説[6]が提案されている。

一方筆者は、空孔生成メカニズムを実験面から追いかけている。ファイバフューズに供給するレーザー光を瞬断した時に残される空孔列の先端写真(図3下参照)を数多く分析すると、プラズマから空孔が切り離されて押しつぶされるプロセスが見えてくる[7]。しかしこの写真は、プラズマが消滅した後の抜け殻にすぎず、プラズ

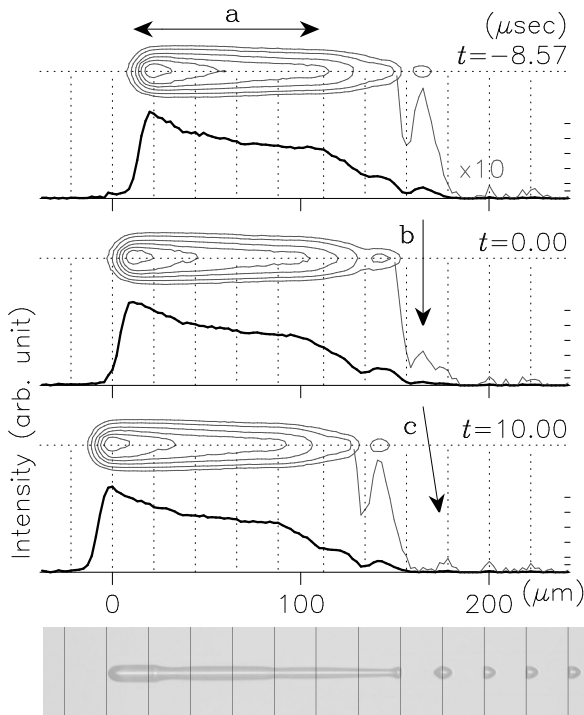


図3 9 W 1480 nm のレーザー光を伝搬する単一モード光ファイバに発生させたファイバフューズのその場観察映像(上)と、生成した空孔列の光学顕微鏡写真。縦線の間隔は $22 \mu\text{m}$ 。

マ内に誘起された不安定性との関係を論ずることはできない。そこで、ファイバフューズを超高速度カメラでその場観察し、発光の強度変調と空孔列との位置関係を明かにした [8]。

図3上の3つのグラフは、プラズマからの可視光発光の強度分布図であり、連続撮影したものの中から抜き出して時間順に並べてある。プラズマの先頭から $2/3$ までの形(図中の矢印 a)は時間によらず一定だが、それより後ろに強度変調パターンが現れることがわかる。それを10倍に拡大した曲線に注目すると、 $t = -8.57$ において観測されたピークは、その位置を変えずに減衰し消滅する(矢印 b)。

一方、プラズマが通過した後に現れる弱い輝点の列は、周期的空孔列からの散乱光であり、図中の点線はそれらに重なるように書き込んである。すると、先ほどの強度変調ピークが消滅した後に現れる輝点の位置は、後方にシフトしていることがわかる(矢印 c)。このシフトする動きは、前述した空孔が押しつぶされる動きに対応していると考えられる。

この推察を裏付けるために、一部の弾丸状空孔の向きが通常とは逆向きになる非定常な条件(プラズマの進行方向に向かってコア径が減少する融着点)[9]下で、その場撮影を行ったところ、その空孔が生成するタイミングでは、プラズマの先頭が融着点に到達し、続いて輝点の位置が逆向きにシフトすることが分かった。

このことから、空孔が生成して押しつぶされるプロセ

スは、プラズマ末尾の変調された発光が消えた後に起きていると結論できる。

謝辞

超高速度ビデオ撮影にご協力頂いた、株式会社フォトロンの相澤啓助氏、三原新氏に深く謝意を表する。

参考文献

- [1] R. Kashyap and K. J. Blow: "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres", *Electron. Lett.*, **24**, 1, pp. 47–49 (1988).
- [2] 光増幅器標準化委員会: "光増幅器 光ファイバヒューズに関する一般情報", Technical report, (財)光産業技術振興協会 (2010). (OITDA 規格 TP(技術資料)、英語題名: General information for optical fiber fuse).
- [3] Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi and R. Nagase: "Fiber fuse phenomenon in step-index single-mode optical fibers", *IEEE J. Quantum Electronics*, **40**, 8, pp. 1113–1121 (2004).
- [4] N. Akhmediev and A. Ankiewicz: "Dissipative solitons in the complex Ginzburg-Landau and Swift-Hohenberg equations", *Dissipative Solitons*, Vol. 661 of Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag, Berlin, pp. 1–17 (2005).
- [5] R. M. Atkins, P. G. Simpkins and A. D. Yablon: "Track of a fiber fuse: a Rayleigh instability in optical waveguides", *Opt. Lett.*, **28**, 12, pp. 974–976 (2003).
- [6] S. I. Yakovlenko: "Mechanism for the void formation in the bright spot of a fiber fuse", *Laser Physics*, **16**, 3, pp. 474–476 (2006).
- [7] S. Todoroki: "Origin of periodic void formation during fiber fuse", *Optics Express*, **13**, 17, pp. 6381–6389 (2005).
- [8] S. Todoroki: "Light and voids of fiber fuse: precise comparison of in situ image and fused fibers", 19th International Laser Physics Workshop: Book of Abstracts, Foz do Iguaçu, Brazil, p. 463 (2010). (9.3.3).
- [9] S. Todoroki: "In situ observation of modulated light emission of fiber fuse synchronized with void train over hetero-core splice point", *PLoS ONE*, **3**, 9, p. e3276 (2008).

追記 (2012/3/16): 電気保護装置としての「ヒューズ」と区別するために、熱で溶けることを表す「フューズ」と表現を改めました。