

光ファイバーの自壊連鎖現象 ～ファイバーフューズ～

独立行政法人 物質・材料研究機構 (NIMS) 光材料センター
轟 眞市

ファイバーフューズ現象の発見から今に至る歴史的背景、発生メカニズム、生成する空孔列が特異な形状となる理由を、筆者の最新の研究に触れつつ簡潔にまとめた。

1. 歴史的背景

数 W の光を伝送している光ファイバの一点を加熱すると、図 1 に示すように青白い輝点が発生し、それが光源に向かって静かに走り出す。そのビデオ映像は動画 [1] で見ることができる。このファイバーフューズと呼ばれる現象の最初の報告は、1987 年になされたという。EDFA(Er-doped Fiber Amplifier) が発明された年であり、筆者はまだ大学の四年生だった。国産の光ファイバ製造法である VAD(Vapor-phase Axial Deposition) 法が発明されたのはその 8 年前であり、1986 年には最低損失値が 0.154 dB/km に到達していた。その記録は 16 年間破られることはなかった。

ファイバーフューズの最初の学術論文誌上の報告 [2] を紐解くと、1.064 μm , 2 W の CW レーザー光を単一モード光ファイバ(シリカガラス製)に導いて発生させた、とある。その後、注入する光は可視光でも通信波長帯でも発生すると報告された。その当時なら、極限状況下での

み起こる珍しい現象と認識されていたであろうが、レーザー技術が飛躍的に向上した現在では、誰でも簡単に再現できるようになった。これは、高強度光源と光導波路を組み合わせたアプリケーションの恩恵を受けている社会にとっては、ひとつの脅威となりうる。なぜなら、輝点が走り去った後の光ファイバは、もはや光を通すことができないからである。

2. なぜ輝点が発生するのか？

そもそも光ファイバは、光を減衰させずに遠くまで届けるために開発されたものである。究極の低損失値を達成したシリカガラス製光ファイバが、伝送している光のエネルギーを喰って自らを破壊してしまうのは、奇異に思える。答えは、光吸収率の温度依存性にある。シリカガラスといえども、1000 位まで加熱すれば僅かな光吸収の上昇が観察される。吸収されたエネルギーは熱として放出され、それが温度上昇を引き起こし、光吸収が増大する。

これが光ファイバで起こると、変化は劇的なものになる。直径数 μm の領域で起こる正のフィードバックは、厚さ 60 μm 弱のシリカガラスの壁に閉じ込められたプラズマを発生させる。光源からは絶えずエネルギーが注入されるので、プラズマはその方向に移動を始める。その速度は典型的には毎秒約 1m 程となり、その温度は数千 K 以上という報告がある [3]。

発生した輝点を止めるには、光源からの光の供給を止めるしか無い。さもなければ、プラズマの閉じ込めが効かなくなる場所(例えばコネクタの接合点等)まで走りつづける。発生したファイバーフューズを停止させるデバイスが幾つか提案されており、局所的にクラッド径を小さ

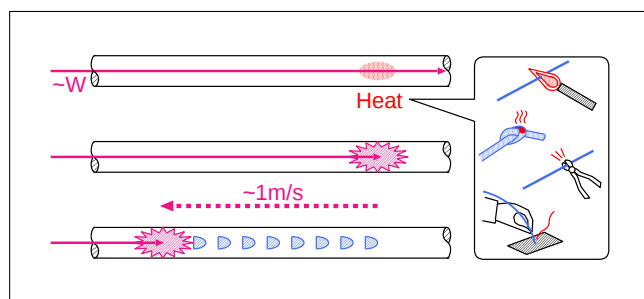


図 1: ファイバーフューズ発生プロセス

とどろき しんいち

くして弱くしたり、モードフィールド径を拡大したり、強制冷却するなどして、プラズマの安定性を破ることで目的を達成している。

以上から、ファイバフューズが安定に発生するためには、光吸収に温度依存性がある材料からなる光導波路で、プラズマが安定に閉じ込められるだけのクラッドの厚みを有するものを用いる必要があることがわかる。実際、フォトニック結晶ファイバ [4] やシリカガラス以外の材料で作られた光ファイバ [5] でも報告例がある。以下、シリカガラス製単一モード光ファイバに限定して話を進める。

3. 軌跡に残された空孔列

輝点が通過した後の光ファイバが光を通さなくなる原因は、コア領域が破壊されてしまうからである。典型的な損傷形状として知られているものは、等間隔に並んだ弾丸形の空孔列である (図 1 参照)。弾丸の向きは、光ファイバを伝搬する光の進行方向と同じである。空孔内には酸素ガスの存在が確かめられており [6]、また空孔の周囲のガラスの屈折率は増加している [7] ことから、高密度化されていることが分かる。

なぜ不思議な形の空孔列が残されるのか? これは、2つの問いに分解できる。(1) なぜ周期的な空孔列が残されるのか? そして、(2) なぜその形状が弾丸状になるのか? である。答えが示されたのは、後者の方が先であった。

発生したファイバフューズを止めるためにレーザー光の注入を停止させると、輝点のあった場所には細長く尾を引いた大きな空孔が残る。同じ条件で停止させてきたこの空孔の光学顕微鏡写真を図 2 の様に並べてみると、周期的に尻尾が切り離され、それが弾丸状に形を変える様子が、まるでパラパラマンガの様に再現できるのである [8]。これら空孔の写真は、プラズマが消える直前の構造を保っていると考えられ、空孔一個を切り離す周期の中で、異なるタイミングで凍結されたものと解釈できる。とすれば、切り離された空孔は急速に冷やされて固まるのであるが、プラズマ本体からの圧力を受けているので、プラズマから遠い方の半球面が先に固まり、近い方の面は押し潰されて平面になってから固まると考えると無理が無い。実際、細長い輝点の尻尾の切り離しに相当する発光強度変調は、超高速撮影でも確かめられている [8, 9]。

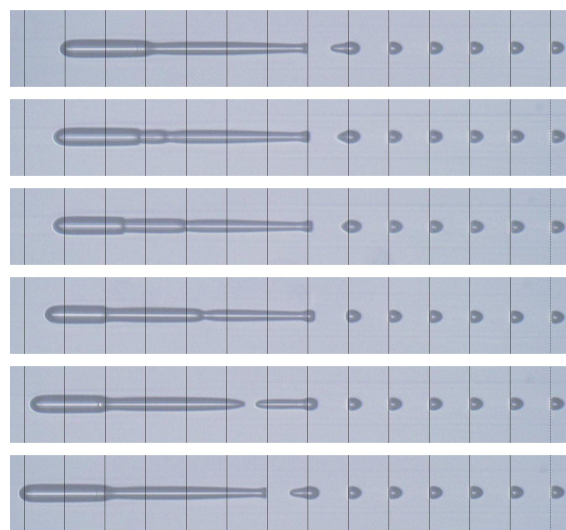


図 2: ファイバフューズが残した空孔列の光学顕微鏡写真。縦線は後から描き入れたもので、間隔は $20\ \mu\text{m}$ 。

前者の問いについては、「輝点であるプラズマとそれを囲むガラス液体との界面に負電荷が濃縮されて不安定性が誘起されるため」とする説が提案されている [10]。

4. 空孔形状は弾丸形だけとは限らない

弾丸形空孔列が生成する条件下でファイバフューズを発生させても、注入するレーザー光を徐々に弱めていくと、空孔の形状が変化してくる。個々の空孔がつながってしまったり、空孔を生成しない短い区間が現れたりするのである [8]。また、光ファイバの長さ方向に伝搬光の強度が変調される様な条件をつくると、弾丸の向きが逆転するという報告もある [11]。人づてに聞いた話だが、ファイバレーザの発振中にファイバの融着点の近くでファイバフューズが発生する現象が多く見られ、生成する弾丸形空孔は、場所によって向きが異なっているという。融着点における光導波構造の変化が光の伝搬モードを乱し、空孔形状の変調を引き起こしたものと考えられる。

そこで筆者は、異なるコア径の単一モード光ファイバ (Corning 社製 SMF-28e と HI1060) を融着した点を通るファイバフューズを超高速カメラで撮影し、残された空孔列と比較してみた。図 3 にその結果をまとめたが、まず元になった動画をオンラインジャーナルである [9] でご覧頂きたい。画面右から左へと、輝点が尾を引きなが

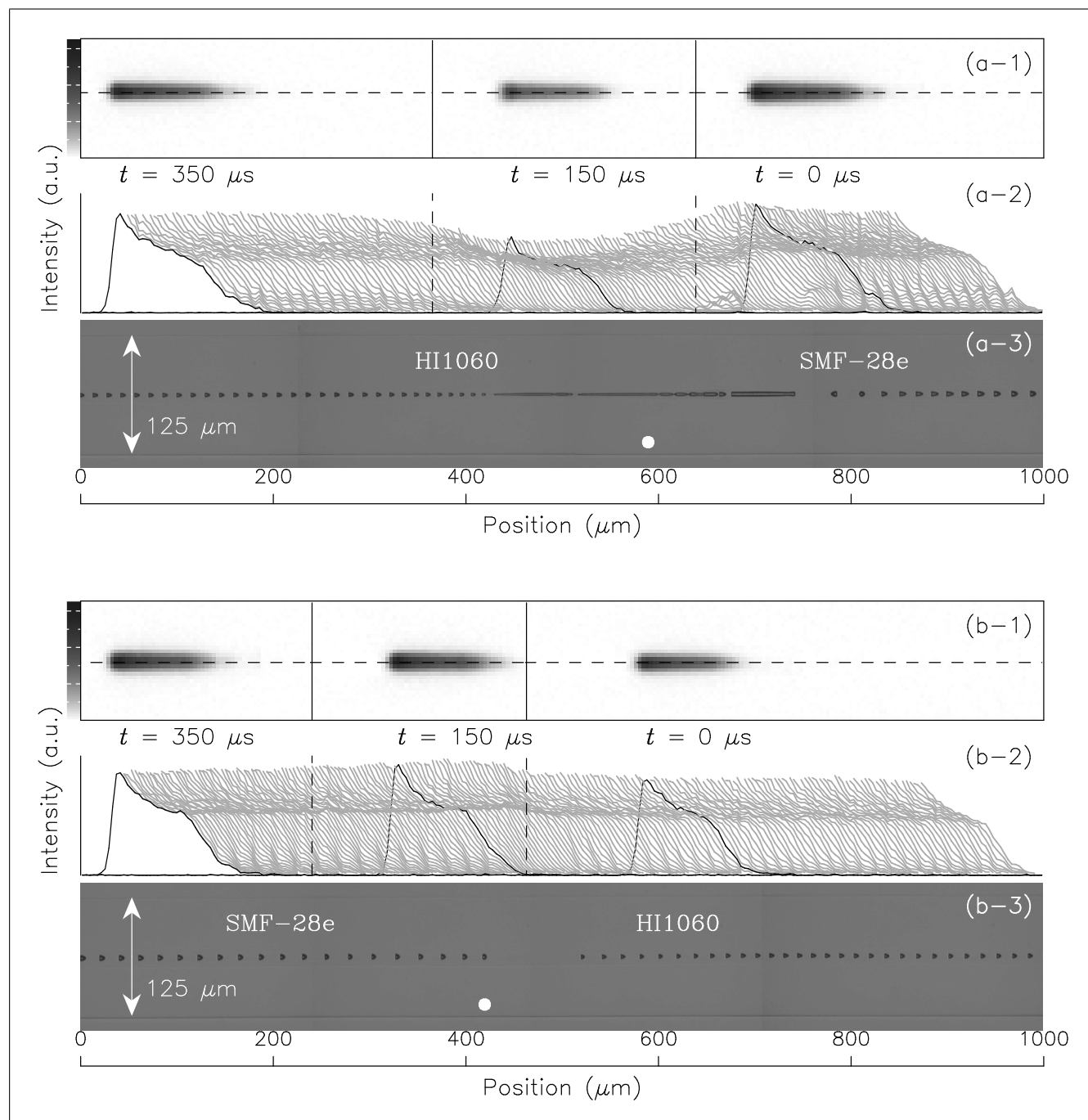


図 3: 1070 nm, 9 W の光を供給したファイバフューズが異径コア融着点 (a) および (b) を通過する時に発する可視光の写真 (上), その写真中の点線に沿った強度分布を 2.78μ 秒間隔で並べたもの (中), および屈折液に浸して撮影した損傷パターンの光学顕微鏡写真。クラッド径は $125 \mu\text{m}$ 。白丸の付近に位置している融着点の前後 (2 本の縦点線で示す) で、ファイバフューズの移動速度の変化が観測された。

ら移動する様子を捕らえたものであり、写真内の白丸付近に融着点が位置している。そこを境に (a) ではコア径が減少し、(b) では拡大する。これに対応して注入光のエネルギー密度が変化するので、輝点の移動速度は (a) では増加し、(b) では減少した。

これは、プラズマの伝搬モードが融着点を境に変化していることを意味しており、過渡期においては周期的空孔生成が停止していることがわかる。各写真の上に、輝点の強度分布を時系列で重ね合わせたものを示したが、周期的空孔が生成している区間では、重ね合わせた曲線に独特の濃淡模様が現れている。これは、先に述べた輝点の尾の周期的な切り離しに対応するものであることは、動画を見ていただければすぐにお分かり頂けると思う。

この実験から分かることは、閉じ込められたプラズマにも伝搬モードがあり、コア領域に残された空孔列はそのモードを記録したものと解釈できる、という点である。ただし現時点では、空孔列から伝搬の状態を推定できる程には実験データは蓄積されていない。超高速カメラを駆使したプラズマの伝搬状態の理解が進めば、光ヒューズ停止デバイスの性能 (信頼性) 向上に寄与することだろう。

5. おわりに

読みやすさを第一にする一方で、さまざまな内容を盛りこんだので、物足りなさを感じられた方も居られるかもしれない。より詳しい和文の解説を既に幾つか発表しているので、併せてご覧頂きたい。それぞれ視点を変えてまとめた (材料 [12]、撮影 [13]、セレンディビティ [14]、一部を除いて筆者のホームページよりダウンロード可能。 http://www.geocities.jp/tokyo_1406/node5.html)。

ファイバフューズの超高速撮影の仕事に手を染めて以来、成果を分かり易く伝えるための動画の役割の重要性を痛感しており、論文発表においても、ビデオファイルを誰でも閲覧できるオープンアクセスジャーナルを利用する様にしている。先月末に出版された文献 [9] では、読者が注釈や議論、評価をする場をオンラインで提供しているので、併せてご覧頂きたい。ご意見・ご感想を残していただけると幸いです。

最後に、超高速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、近藤圭紘氏、花香和秀氏に謝意を表す。

参考文献

- [1] See <http://www6.ocn.ne.jp/~ofra/Ofra2.html> and http://www.geocities.jp/tokyo_1406/node7.html.
- [2] R. Kashyap and K. J. Blow: "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres", *Electron. Lett.*, **24**, pp. 47–49 (1988).
- [3] E. M. Dianov, V. E. Fortov, I. A. Bufetov, V. P. Efremov, A. E. Rakitin, M. A. Melkumov, M. I. Kulish and A. A. Frolov: "High-speed photography, spectra, and temperature of optical discharge in silica-based fibers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18**, 6, pp. 752–754 (2006).
- [4] E. M. Dianov, A. A. Frolov, I. A. Bufetov, S. L. Semenov, Y. K. Chamorovskii, G. A. Ivanov and I. L. Vorob'ev: "The fibre fuse effect in microstructured fibres", *Quantum Electron.*, **34**, 1, pp. 59–61 (2004).
- [5] E. M. Dianov, I. A. Bufetov, A. A. Frolov, V. G. Plotnichenko, V. M. Mashinskii, M. F. Churbanov and G. E. Snopatin: "Catastrophic destruction of optical fibres of various composition caused by laser radiation", *Quantum Electron.*, **32**, 6, pp. 476–478 (2002).
- [6] R. Kashyap: "High average power effects in optical fibers and devices", *Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks* (Eds. by H. G. Limberger and M. J. Matthewson), Vol. 4940 of SPIE Proceedings, SPIE, pp. 108–117 (2003). (Brugge, Belgium, 28 Oct. 2002).
- [7] E. M. Dianov, V. M. Mashinskii, V. A. Myzina, Y. S. Sidorin, A. M. Streltsov and A. V. Chickolini: "Change of refractive index profile in the process of laser-induced fiber damage", *Sov. Lightwave Commun.*, **2**, pp. 293–299 (1992).
- [8] S. Todoroki: "Origin of periodic void formation during fiber fuse", *Optics Express*, **13**, 17, pp. 6381–6389 (2005).
- [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), e3276 (2008). (和訳付) <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0003276>
- [10] S. I. Yakovlenko: "Physical processes upon the optical discharge propagation in optical fiber", *Laser Physics*, **16**, 9, pp. 1273–1290 (2006).
- [11] I. A. Bufetov, A. A. Frolov, A. V. Shubin, M. E. Likhachev, C. V. Lavrishchev and E. M. Dianov: "Fiber fuse effect: New results on the fiber damage structure", *Proceedings of the 33rd European Conference on Optical Communication*, Vol. 1, Berlin, Germany, IEE's Photonics Professional Network, pp. 79–80 (2007). (Mon 1.5.2).
- [12] 轟 眞市: "ファイバヒューズ—その危うさと怪しさ", *New Glass*, **21**, 2, pp. 45–52 (2006).
- [13] 轟 眞市: "超高速ビデオカメラによるファイバヒューズ発生、伝搬、自然停止の直接観察", *電子情報通信学会技術研究報告 OCS 光通信システム*, **106**, 210, pp. 33–38 (2006). (OCS2006-35).
- [14] 轟 眞市: "試論: 偶然を呼び寄せる技術", *研究開発リーダー*, **5**, 3, pp. 10–12 (2008).