

周期的空孔生成のメカニズムを示す ファイバヒューズ損傷写真のアニメーション

轟 眞市

物質・材料研究機構 物質研究所
茨城県つくば市並木 1-1

2005 年 4 月 15 日提出、2005 年 6 月 1 日修正、2005 年 6 月 8 日受理

本論文は、“Animation of fiber fuse damage, demonstrating periodic void formation”,
Opt. Lett. **30** [19] 2551–2553 (2005) [© 2005 Optical Society of America] の和訳である。

<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ol-30-19-2551>

<http://www.geocities.com/Tokyo/1406/node5.html#Todoroki050L>

ファイバヒューズ損傷の先頭部分の光学顕微鏡写真を収集し、周期的空孔生成機構を考察した。最初の大きな空孔の先頭と、最初の規則的空孔の先頭との距離が増加する順番に、多数の試料から収集した写真を並べ替えた。その結果、最初の大きな空孔がその尻尾を切り離し、それが収縮して規則的空孔になる過程が浮かび上がった。これにより、規則的空孔が弾丸型になる理由は、光学的放電の内圧と、空孔が切り離される際のそれを取り囲むガラスの粘度上昇とがバランスした結果であることが導かれる。

OCIS codes: 060.2290, 060.2400, 3140.3330, 3140.3440, 350.5340, 350.5400.

ファイバヒューズ効果は 1980 年代末以降良く知られるようになった。光ファイバの局所的加熱によって発生し、生成した光学的放電は光源 (約数 W) に向かって走り始める。これはコア領域の壊滅的な破壊—周期的な弾丸形状の空孔生成—をもたらす^{1,2}。近年のレーザー出力の上昇 (kW 超) は、生成してしまったファイバヒューズの停止法^{3,4,5} の必要性を生み出している。他方、空孔生成メカニズムは完全に理解されたとは言えず、理論的観点からの検討^{6,7} や、まぶしく素早く移動する (毎秒約 1m) 光学的放電の直接観察が数例^{8,9,10} 報告されているにすぎない。本報告では、周期的な弾丸形状の空孔生成の背後にあるメカニズムを示唆する二種類の実験結果を報告する。

第一の結果は、超高速 CCD カメラを使った光学的放電の直接観察^{8,10} である (Fig. 1 上半分参照)。商用の単一モードシリカガラスファイバ (SMF-28, Corning) の一端をラマンファイバレーザ (波長: 1.48 μm) に接続した。もう一端は折曲げて金属板に接触させ、7.0 W のレーザー光の入力によりファイバヒューズが発生するようにした。被覆を剥いた区間を走る光学的放電を、適切なズームレンズを取り付けた CCD カメラ (ultima APX-RS, Photron Ltd., 有感波長域: 380–790 nm) で観察した。ND フィルタ ($\times 16$) 越しに、露光時間 1 μ 秒で、4 μ 秒お

きの画像 (解像度 128×16) を収録した。ファイバは円筒型レンズとして働くので、画像は実際よりも上下方向に拡大されている。光学的放電の速度は、Fig. 1の下半分からわかる様に、 1 m/s と算出された。損傷を受けたファイバを光学顕微鏡で観察し、生成した空孔の間隔は $20.2 \mu\text{m}$ であることが分かった (Fig. 2の右半分を参照)。このことから、空孔 1 つは 20μ 秒おきに生成され、これは写真 5 コマ分に相当することが分かる。Fig. 1下半分に示す光学的放電の先頭部分の断面形状から、光学的放電は、空孔 1 つ生成する間、等速運動していることが分かる。

第二の結果は、損傷の先頭部分の光学顕微鏡写真である。ファイバヒューズの生成の後、 7.0 W のレーザーの電源を落すことで試料を作製した。この時の光学的放電からの光放射が零になるまでの時間は 7μ 秒より短いことを確認した。この数値は、CCD カメラの分解能に近い値である。典型的な画像を Fig. 2の一番上に示す。消失した光学的放電は、以下の 2 つの理由により、最初の大きな空孔にあったと考えられる。第一に、空孔の非対称な形状とその長さ (約 $120 \mu\text{m}$) は、Fig. 1の画像と一致している。この関係は、別のレーザー強度 ($1.5\text{--}9.0 \text{ W}$) で作製した試料についても確かめられている¹¹。第二に、Bufetov ら⁹ や轟¹⁰ によって報告されている様に、 5.9 W 以上で生成された光学的放電とそれに続く空孔の写真には、類似した配置のもの—非対称な発光領域と周期的空孔—が写っている。

Fig. 2の一番上に示した写真は、 $20\text{-}\mu$ 秒間の空孔生成サイクルのうちのコマを切りとったにすぎない。他の瞬間の写真は、試料をさらに作製することで捕えることが出来る。多数の顕微鏡写真を収集し、最初の大きな空孔の先頭と、最初の規則的空孔の先頭との距離が増加する順番に並べ替えた (Fig. 2の残りの写真を参照)。この並べ替え操作は、空孔生成サイクル内での時間順の再配列に相当する。なぜなら、上述した様に、光学的放電はこのサイクルの間、等速移動しているからである。この再配列操作を、レーザー強度の異なる ($3.5, 5.0$ および 9.0 W) 別の試料写真についても行ない、同様の結果を得た。

この配列写真は次のような空孔生成プロセスを示唆している様にみえる。最初の大きな空孔が尻尾を切り離し、それが収縮して規則的空孔の先頭に収まるのである。しかし、次の事実注意到注意を払う必要がある。この大きな空孔は、レーザーを止めた後の冷却期間の間に变形した可能性があるのである。しかしながら、以下に述べる理由により、この事実が上述した空孔生成機構を揺るがすとは考えにくい。光学的放電からの発光が完全に消えるまで 7μ 秒以下である。また、シリカガラスの粘性は温度の下降とともに急速に上昇する。コア領域近傍の加熱領域は、冷たくて厚いクラッド層と高分子被覆に囲まれているので、レーザー光を切った直後には、その温度は急速に低下すると考えられる。高温での 20μ 秒間で 1 つの空孔が生成されることを考えれば、それより短い時間での冷却時間のうちに起きる大きな空孔の形状変化は、1 つの空孔生成に要する形状変化よりも規模的に小さいはずである。結論として、Fig. 2はその場観察ではないものの、周期的空孔生成プロセスを議論するに足る構造的特徴を残していると言える。

この空孔生成プロセスにおいて大きな空孔の尾部に生成するガラスの梁に注目すると、規則的空孔がなぜ弾丸のような外観を呈するのかを定性的に理解することができる。Figure 3は、

Fig. 2から抜き出した、空孔とガラスの梁の形状変化を単純化したモデルである。規則的空孔の視点からみれば、Fig. 3の(3)で大きな空孔から切り離され、収縮し(4,5)、形状が固定される(6)。それに対して、ガラスの梁はFig. 3の(a), (b), (c)の順に形を変える。

この動きは光学的放電の内圧とファイバに沿った温度勾配、すなわちガラスの粘性の変化に支配されている。一旦、ガラスの梁が尾部に現れると、それは光学的放電の内圧によって後方押しやられる。光学的放電の先頭からの距離が増えるに従って、温度は下降しガラスの粘性は上昇する。よって、Fig. 3の横矢印に示したガラスと空孔の間の界面の移動距離は小さくなる。結局、切り離された空孔の前面、すなわち最初の大きな空孔の側は、その後面が固化した後に固まる。この時間のずれが弾丸形状を生成する。ガラスの梁の生成は、光学的放電の前面での新しい自由表面の生成に連動している。放電を取り囲む自由表面積の合計を一定に保つために、上述の現象が起こるのである。

今回の結果は、最近の理論的検討や計算機シミュレーションの仕事^{7,12,13,14}に対し、具体的なモデルを提供するものであり、現象の解明の一助になる。

まとめると、ファイバヒューズで発生した損傷の先頭部分の光学顕微鏡写真を多数収集し、ファイバヒューズの最中に生成される周期的空孔生成の過程をうまく再現することができた。この写真は、単一モードシリカファイバにファイバヒューズを発生させた後に、レーザ(1.48 μm , 7.0 W)の電源を落すこと作製した試料から収集したものである。それらを、最初の大きな空孔(光学的放電が在った部分)の先頭と最初の通常空孔の先頭との距離が増加する順番に並べ替えた。この写真はその場観察で得たものではないが、その配列は明らかに空孔生成プロセスを示唆している。最初の大きな空孔が尻尾を切り離し、それが収縮して弾丸型の規則的空孔の先頭に収まるのである。この形状の根源は、切り離された空孔の前部と後部での固化する時間のずれであり、これは光学的放電の内圧とファイバ軸に沿った温度勾配によってもたらされる。

次の方々に謝意を表します。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花香和秀氏、坂巻顯氏、桑原譲二氏、相澤啓助氏。貴重な討論をして下さった、ロシア科学アカデミー一般物理研究所の I. A. Bufetov 博士、継続的なご支援を賜った、物質・材料研究機構の井上悟博士。轟真市の電子メールアドレスと URL は以下の通り。TODOROKI.shin-ichi at nims.go.jp <http://www.geocities.com/Tokyo/1406/>

References

1. R. Kashyap and K. J. Blow, "Observation of Catastrophic Self-Propelled Self-Focusing in Optical Fibres," *Electron. Lett.* **24**, 47–9 (1988). URL http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abs_free.jsp?arNumber=8155.
2. D. P. Hand and P. S. J. Russell, "Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse," *Opt. Lett.* **13**(9), 767–769 (1988). URL <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ol-13-9-767>.
3. D. P. Hand and T. A. Birks, "Single-mode tapers as 'fibre fuse' damage circuit-breakers,"

- Electron. Lett. **25**(1), 33–34 (1989). URL http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abs_free.jsp?arNumber=19651.
4. S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, Y. Shuto, and R. Naruse, “Fiber fuse terminator,” in *The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, vol. 1, p. 386 (2003). (W4J-(8)-6, Taipei, Taiwan, 22-26 Jul. 2003), URL http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abs_free.jsp?arNumber=1274838.
 5. E. M. Dianov, I. A. Bufetov, and A. A. Frolov, “Destruction of silica fiber cladding by the fuse effect,” *Opt. Lett.* **29**(16), 1852–1854 (2004). URL <http://ol.osa.org/abstract.cfm?id=80825>.
 6. 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), 974–976 (2003). URL <http://ol.osa.org/abstract.cfm?id=72607>.
 7. S. I. Yakovlenko, “Plasma behind the front of a damage wave and the mechanism of laser-induced production of a chain of caverns in an optical fibre,” *Quantum Electron.* **34**(8), 765–770 (2004).
 8. S. Todoroki, “In-Situ Observation of Fiber-Fuse Propagation,” in *Proc. 30th European Conf. Optical Communication Post-deadline papers*, pp. 32–33 (Kista Photonics Research Center, Stockholm, Sweden, 2004). (Th4.3.3).
 9. I. A. Bufetov, A. A. Frolov, E. M. Dianov, V. E. Fortov, and V. P. Efremov, “Dynamics of Fiber Fuse Propagation,” in *Optical Fiber Communication Conference, 2005. Technical Digest. OFC/NFOEC*, vol. 4 (Anaheim, CA, 2005). (OThQ7), URL http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1501536.
 10. S. Todoroki, “In-Situ Observation of Fiber-Fuse Propagation,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**(6A), 4022–4024 (2005).
 11. S. Todoroki, “Origin of periodic void formation during fiber fuse,” *Optics Express* **13**(17), 6381–6389 (2005). URL <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-13-17-6381>.
 12. Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, and R. Nagase, “Simulation of Fiber Fuse Phenomenon in Single-Mode Optical Fibers,” *J. Lightwave Tech.* **21**(11), 2511–2517 (2003).
 13. 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), 1113–1121 (2004).
 14. R. I. Golyatina, A. N. Tkachev, and S. I. Yakovlenko, “Calculation of Velocity and Threshold for a Thermal Wave of Laser Radiation Absorption in a Fiber Optic Waveguide Based on the Two-Dimensional Nonstationary Heat Conduction Equation,” *Laser Physics* **14**(11), 1429–1433 (2004).

List of Figures

- 1 (上) 単一モードシリカガラスファイバ中を 7.0 W の光を供給されながら進む
光学的放電の写真と強度マッピング。(下) 4μ 秒毎に記録された、写真上の点
線に沿った強度分布曲線。 6
- 2 7.0 W の供給により生成した損傷の光学顕微鏡写真。縦線の間隔は $20\ \mu\text{m}$ 。一
番下の写真は一番上のものと同じだが、左に $20\ \mu\text{m}$ ずらしてある。 7
- 3 ファイバヒューズの最中に生成した空孔の形状変化。 8

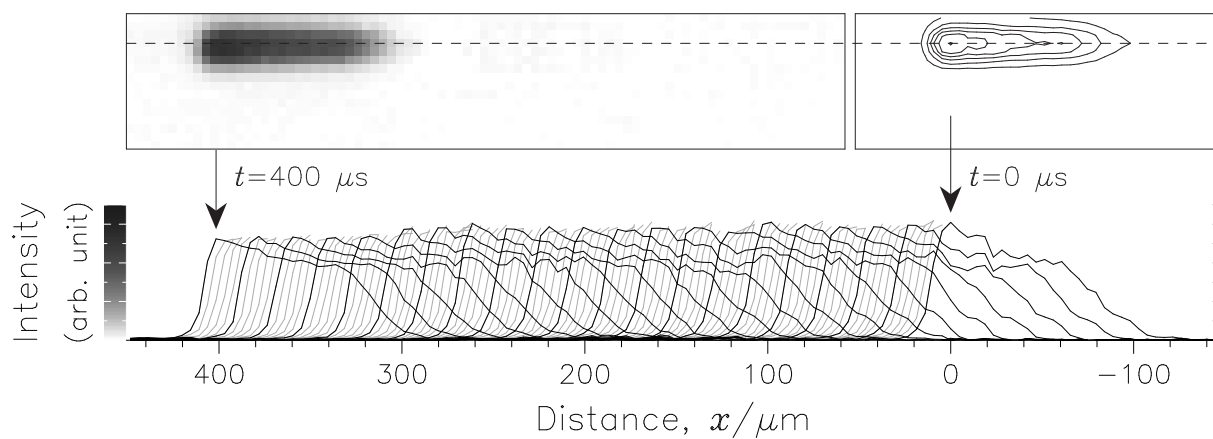


Fig. 1. (上) 単一モードシリカガラスファイバ中を 7.0 W の光を供給されながら進む光学的放電の写真と強度マッピング。(下) 4μ 秒毎に記録された、写真上の点線に沿った強度分布曲線。

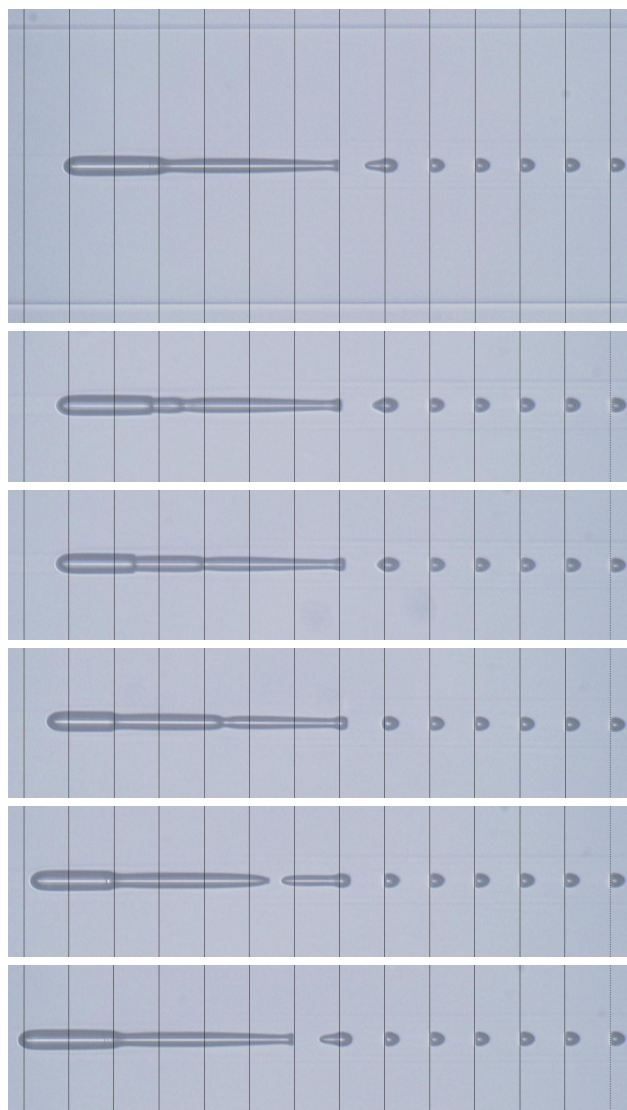


Fig. 2. 7.0 W の供給により生成した損傷の光学顕微鏡写真。縦線の間隔は $20 \mu\text{m}$ 。一番下の写真は一番上のものと同じだが、左に $20 \mu\text{m}$ ずらしてある。

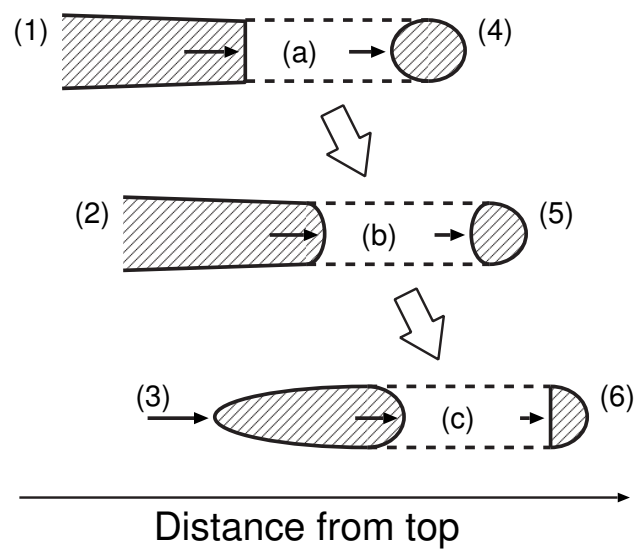


Fig. 3. ファイバビュースの最中に生成した空孔の形状変化。