

ファイバヒューズにおける 周期的空孔生成の起源

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

TODOROKI.Shin-ichi@nims.go.jp

<http://www.geocities.com/Tokyo/1406/>

Abstract: 単一モードシリカガラスファイバ内を伝搬する光学的放電を観察し、生成した損傷の先頭部分を検討した。1.48 μm のレーザー光を 1.1 W から 9.0 W まで変化させた場合の強度依存性を調べた。尻尾を持つ空隙内に存在する光学的放電^aが周期的空孔を残すことがわかった。この尻尾は光学的放電がコア領域に強く閉じ込められることから生じる。別の周期的空孔生成モードが、ファイバヒューズ伝搬が可能な下限の注入強度付近で見つかった。この場合の光学的放電も、空孔生成周期の間に過渡的な尻尾を生成する。

^a訳註: 続報 [17] でこの考え方が不正確であることに触れる。

OCIS codes: (060.2290) Fiber materials; (060.2400) Fiber properties; (140.3330) Laser damage; (140.3440) Laser-induced breakdown; (350.5340) Photothermal effects; (350.5400) Plasmas.

2005 年 7 月 6 日提出、2005 年 8 月 3 日修正、2005 年 8 月 5 日受理

本論文は、“Origin of periodic void formation during fiber fuse”, Opt. Express **13** [17] 6381–6389 (2005) [© 2005 Optical Society of America] の和訳である。

<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-13-17-6381>

<http://www.geocities.com/Tokyo/1406/node5.html#Todoroki05OEX6381>

References and links

1. R. Kashyap and K. J. Blow, “Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres,” *Electron. Lett.* **24**, 47–49 (1988), 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**, 767–769 (1988), <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), 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), 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**, 1852–1854 (2004), <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ol-29-16-1852>.
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**, 974–976 (2003), <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ol-28-12-974>.
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 (Th4.3.3), (Kista Photonics Research Center, Stockholm, Sweden, 2004).
9. I. A. Bufetov and E. M. Dianov, “Optical discharge in optical fibers,” *Physics-Uspekhi* **48**(1), 91–94 (2005).

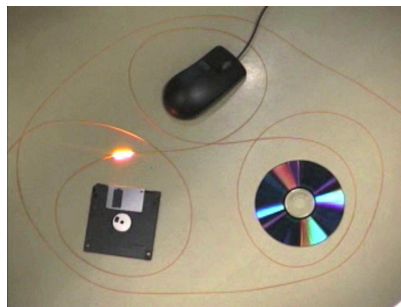
10. I. A. Bufetov, A. A. Frolov, E. M. Dianov, V. E. Fortov, and V. P. Efremov, "Dynamics of fiber fuse propagation," in *OFC/NFOEC 2005 Technical Digest (OTHQ7)*, (Anaheim, 2005).
11. S. Todoroki, "In-situ observation of fiber-fuse propagation," *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 4022–4024 (2005), <http://jjap.ipap.jp/link?JJAP/44/4022/>.
12. S. Todoroki, "Animation of fiber fuse damage demonstrating periodic void formation," *Opt. Lett.* **30**, 2551–2553 (2005), <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ol-30-19-2551>
13. T. J. Driscoll, J. M. Calo, and N. M. Lawandy, "Explaining the optical fuse," *Opt. Lett.* **16**, 1046–1048 (1991), <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ol-16-13-1046>.
14. E. M. Dianov, V. M. Mashinskii, V. A. Myzina, Y. S. Sidoren, A. M. Streltsov, and A. V. Chickolini, "Change of refractive index profile in the process of laser-induced fiber damage," *Sov. Lightwave Commun.* **2**, 293 (1992).
15. D. D. Davis, S. C. Mettler, and D. J. DiGiovanni, "Experimental data on the fiber fuse," in *27th Annual Boulder Damage Symposium: Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1995*, H. E. Bennett, A. H. Guenther, M. R. Kozlowski, B. E. Newnam, and M. J. Soileau, eds., vol. 2714 of *SPIE Proceedings*, pp. 202–210 (SPIE, 1996). (Boulder, CO, USA, 30 Oct. 1995).
16. S. Todoroki, "In-situ observation of fiber-fuse ignition," in *ICONO/LAT 2005 Technical Digest on CD-ROM (LSK3)*, (St. Petersburg, Russia, 2005).
17. S. Todoroki, "Transient propagation mode of fiber fuse leaving no voids," *Opt. Express*, **13**, 9248–9256 (2005), <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-13-23-9248>.

1. 諸言

ファイバヒューズ効果は1980年代遅くに見出された。これは光ファイバの局所的加熱によって発生し、ファイバに沿って光源 (~W) に向かって走る光学的放電を生成する (Fig. 1 参照)。これにより、コア領域は壊滅的に破壊され、周期的な弾丸形状の空孔が残される [1, 2]。近年のレーザー強度の増加 (>kW) により、この現象が発生した後の終止技術が求められるようになった [3, 4, 5]。しかし、空孔生成メカニズムの方は完全に解明されたとは言えず、議論はもっぱら理論的アプローチ [6, 7] か、輝きながら素早く動く (~m/s) 光学的放電を直接観察する幾つかの試み [8, 9, 10, 11] に基づくものに限られている。

最近著者は、ファイバヒューズ損傷の先頭部分が映った多数の写真の統計的解析に基づいて、ファイバヒューズにおける周期的空孔生成のメカニズムを提案した [12]。このモデルでは、光学的放電はファイバのコア領域の長い空隙の中に存在する¹。ファイバヒューズの伝搬のさ中、この移動する空隙はその尻尾を切り離し、それが縮んで周期的空孔の一つとなる。その形状が弾丸状になる理由は、切り離しの最中に起こる、光学的放電の内圧と取り囲むガラスの粘度上昇がバランスの結果であると結論した。

しかし、このモデルは、今までに報告されている非周期的な空孔生成例 [2, 6, 8, 11, 13, 14, 15] には適用することができない。例えば、2.0 W の光 (波長: 1.48 μm) を注入した単



http://www.opticsexpress.org/view_media.cfm?umid=18998

Fig. 1. 9.0 W、1.48 μm のレーザー光の注入によって単一モードシリカファイバ内を伝搬するファイバヒューズのビデオ映像 (1.00 MB)。速度は約 1.2 m/s。

¹ 訳註: 続報 [17] でこの考え方が不正確であることに触れる。

一モードシリカガラスファイバを伝搬する光学的放電は、長くて細い非周期的空孔を残すが、9.0 W の光を注入すると周期的空孔が残る [8, 11]。そこで本論文では、この現象を支配する要素を明らかにするために、光学的放電と生成した空孔の形状の注入光強度依存性を議論する。この様な議論は、生成する空孔のフォトニック構造やマイクロキャビタリとしての有用性を評価するのに役立つ。

2. 実験

2種類の撮影を行なった。移動する光学的放電の超高速ビデオ撮影と、生成した損傷列の静的な光学顕微鏡撮影である。

2.1. 超高速ビデオ撮影

Fig. 2 に本研究に用いた実験設備を示す。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 (1.48 μm) に接続した。もう一方のファイバ端は折曲げて金属板に接触させておき、レーザー光 (≥ 7.0 W) が注入されたらファイバヒューズが発生する様にしておく。7.0 W 以下のエネルギーを供給される光学的放電を発生させるには、ファイバヒューズ点火後に直ちにレーザー強度を絞るようにした。光学的放電の観察は、ファイバの被覆を剥いた区間を通過する時に行ない、適当な倍率のズームレンズを取り付け超高速 CCD カメラ (ultima APX-RS 白黒版, Photron Ltd., 有感波長域: 380–790 nm) を用いた。16 倍もしくは 32 倍の ND フィルタ越しに露光時間 1 μ 秒で、4 μ 秒毎に解像度 128 \times 16 の映像を記録した。

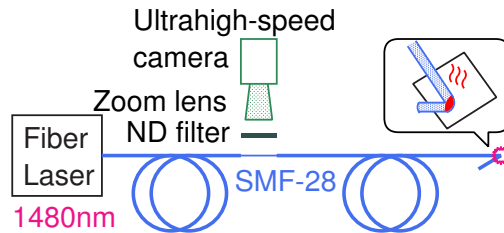


Fig. 2. ファイバヒューズ伝搬の観察に用いた実験設備。

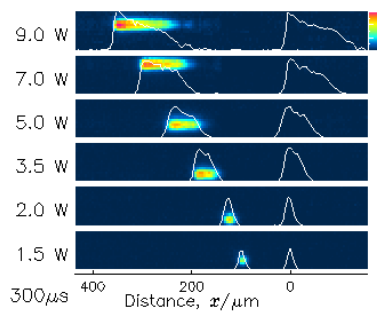
2.2. ファイバヒューズ損傷の観察

試料は、ファイバヒューズを発生させレーザー強度が所定の値に達した後、レーザーの電源を突然落すことで作製した。光学的放電からの放射が零に達するのに要した時間は 7 μs 以下であり [12]、CCD カメラの分解能に近い値である。屈折液に浸した試料の写真をデジタル顕微鏡で撮影した。

3. 結果

3.1. 超高速ビデオ撮影

Fig. 3 に、様々なレーザー強度 (1.5–9.0 W) を注入した光学的放電の伝搬の様子を編集したビデオ映像を示す。Fig. 4 は、このビデオ映像から取り込んだ静止画である。光ファイバ自体がシリンダ型レンズとして働くので、実体よりも縦方向に引き延ばされた像になっている。左列にある横向きの矢印の長さは、光学的放電の速度に比例しており、ビデオの 10 コマ分の時間 (40 μs) に放電が進む距離に相当する。速度 v は、Fig. 5(左) にも赤丸としてプロットしてある。これらの画像から、注入光強度が 2.0 W を超えると、ファイバ軸に沿った強度分布が非対称になることがわかる。9.0 W を注入した光学的放電のみ、



http://www.opticsexpress.org/view_media.cfm?umid=16413

Fig. 3. 1.5 W から 9.0 W までの様々なレーザー光 ($1.48 \mu\text{m}$) を注入したファイバビューズのビデオ映像 (1.64 MB). 元の無彩色スケール映像を彩色スケール映像に変換してある。

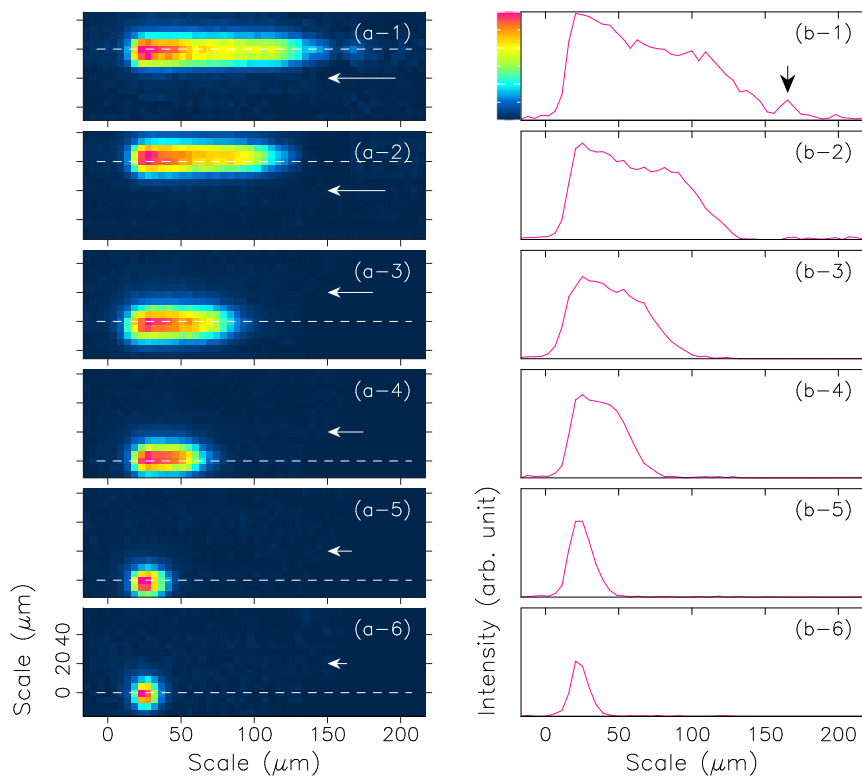


Fig. 4. 超高速ビデオ映像 (Fig. 3) から切り取った静止画像 (a) と、それぞれの画像内の破線に沿った強度分布 (b)。注入レーザー光強度は順に (1) 9.0 W, (2) 7.0 W, (3) 5.0 W, (4) 3.5 W, (5) 2.0 W, および (6) 1.5 W である。各横向き矢印は、光学的放電が $40 \mu\text{s}$ (10 コマ) の間に進む距離である。

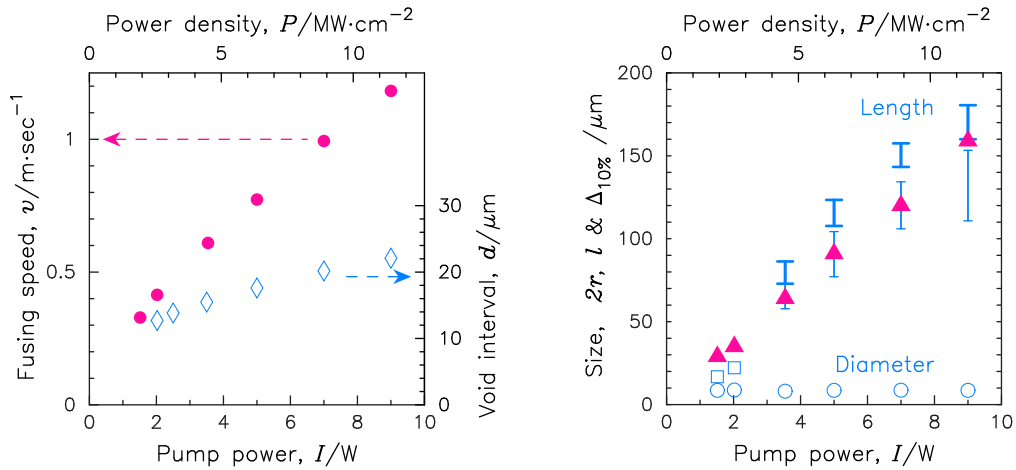


Fig. 5. ヒューズ速度 v と空孔間隔 d の注入強度依存性 (左)、および光学的放電と大きな先頭の空孔に関する様々な寸法の注入強度依存性 (右)。▲: Fig.4 に示したファイバ軸に沿った光学的放電の強度分布の 10% 高さにおける幅 $\Delta_{10\%}$ 、○: 大きな先頭の空孔の直径 $2r$ 、□ および細い縦線: 梁を含まない長さ、太い縦線: 梁を含む長さ。

小さな独立ピークが右に現れ (Fig. 4(b-1) の下向き矢印参照)、その強度は 4 から 5 コマ毎 (16~20 μ s) に零からその最大値まで振動する (Fig. 3 参照)。高さ 10% における強度分布の幅 $\Delta_{10\%}$ を Fig. 5(右) に赤三角としてプロットした。

3.2. ファイバヒューズ損傷の観察

Fig. 6 に、損傷列の典型的画像を示す。2.0 W 以上のレーザー光強度の注入で生成した損傷 (Fig. 6(a)–(d)) は、長くて先が細くなる空孔と、それに続く小さな周期的空孔よりなるが、1.5 W の光で生成したもの (f) は、小さい液滴状の空孔とそれに続く細い空孔からなっている。2.0 W の光で生成したもの (e) は、1.5 W の場合と似ているが、周期的空孔を含む短い区間も存在する。これら周期的空孔の間隔 d を Fig. 5(左) に菱形でプロットした。1.5 W 以下の光で生成した損傷については後で触れる。

Fig. 5(左) にプロットされた値、すなわち光学的放電の伝搬速度と空孔間隔から、空孔 1 個が生成されるのに必要な時間を計算することができる。この値は、18.7 μ s (9.0 W) から 31.0 μ s (2.0 W) にわたる。ここで注目すべきは事實は、周期的空孔の顕微鏡写真 (Fig. 6(a)–(d)) は、この空孔 1 個を生成する周期のうちのある 1 場面を収めているにすぎない点である。別の瞬間を捕らえるには、さらに試料を作製すれば良い。そこで、多数の写真を収集し、それらを、先頭の大きな空孔と最初の規則的空孔の距離が大きくなる順に並べ変えてみた。Fig. 7 が、5.0 W の光で生成した損傷の写真を並べ変えたものである。この操作は、空孔生成周期内で時間順に並べ変えることに相当する。なぜなら、光学放電はこの周期内で等速運動しているからである [12]。

これらの顕微鏡写真から、大きい先頭の空孔の長さが空孔生成周期の間に変化することがわかる。先頭の空孔が左側の光源に向かって動くにつれ、空孔の中程にくびれた部分が現れ (Fig. 7(b))、右側に移動していく (c, d)。次に、くびれがつながって梁となることで、大きな空孔を分割し (e)、その梁はさらに右に移動して (f, g, h(=a)) 周期的空孔の一つへと変化する (b)。

そこで、2 種類の空孔長を測定し、Fig. 5(右) にプロットした。ひとつは大きな先頭の空孔における梁を含まない長さ (細い縦線) であり、もうひとつは梁を含んだ長さ (太い縦線) である。この図は他に、1.5 W と 2.0 W の光で生成した先頭の空孔の長さ (四角印) と、空孔の最大直径 $2r$ (丸印) をプロットしてある。

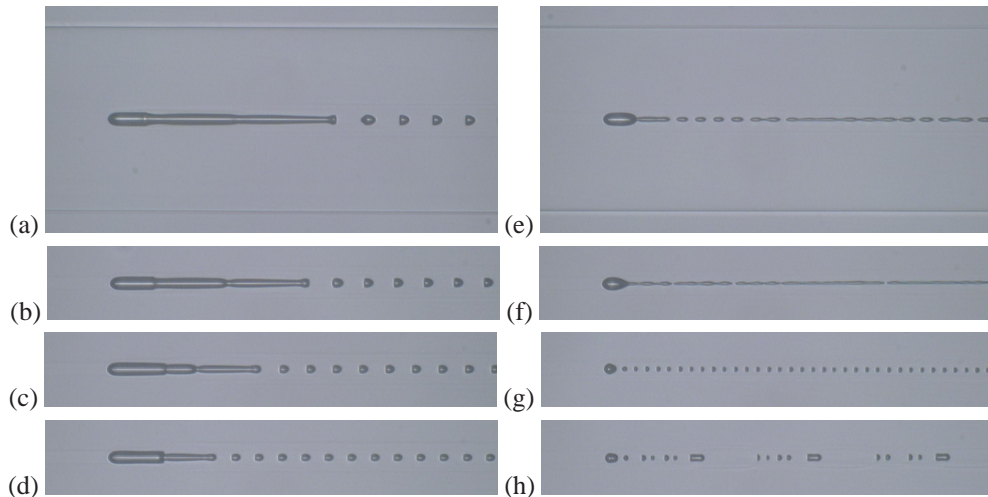


Fig. 6. 単一モードシリカファイバ内に生成したファイバヒューズ損傷の先頭部分の光学顕微鏡写真。注入レーザー光強度は順に、(a) 9.0 W, (b) 7.0 W, (c) 5.0 W, (d) 3.5 W, (e) 2.0 W, (f) 1.5 W, (g) \sim 1.3 W, および (h) \sim 1.2 W。(a) と (e) の上部と下部に横に走る細線は、ファイバの端であり、その直径は $125 \mu\text{m}$ である。(a) と (e) 以外の写真の高さは $50 \mu\text{m}$ である。

1.5 W 以下のレーザー光強度で生成した損傷の形態は、今までのものと完全に異なっており、注入強度に非常に敏感である。1.1–1.4 W の範囲のレーザー光強度を使って 30 個以上の試料を作製した。そのうちの幾つかにおいて、光学的放電は伝搬中に自己停止した。よって、伝搬に必要な注入光強度の下限は、これらの値に近いと考えられる。2 つの典型的な損傷例を Fig. 6(g) と (h) に示す。ほとんどの試料は、Fig. 6(h) の様な状態か、あるいは Fig. 6(f) と (g) の混成、もしくは Fig. 6(g) と (h) の混成の状態であった。Fig. 6(g) の状態の試料を見付けることはまれであつが、得られたすべての写真を、Fig. 7 の場合と同様に並べ変えたものを Fig. 8 に示す。

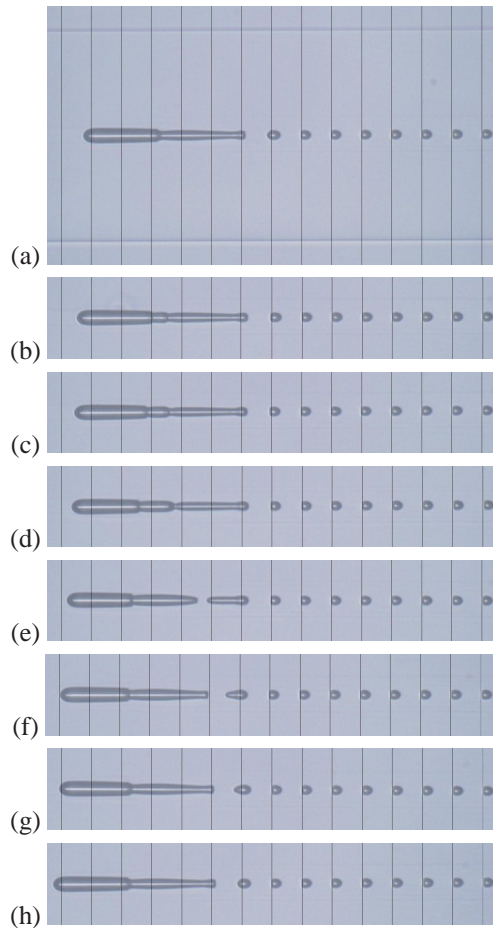
4. Discussion

最初に、光学的放電と大きい最初の空孔の関係を議論し、次に、周期的空孔生成の起源について検討する。

4.1. 光学的放電と大きい最初の空孔

Fig. 6 や Fig. 7, Fig. 8 に示す様にいろいろな空孔の形態が観察されているが、これは移動する光学的放電のその場観察ではないことに注意しなければならない。これらは、レーザー光の供給を突然停止させて (所要時間 $7 \mu\text{s}$ 以下 [12]) 凍結することで見える様になった空隙である。これらの形はこの短い冷却期間の間に変化しているかもしれないが、大きな先頭の空孔の中程に現れるくびれや梁の様な特徴的な構造に影響を及ぼすほど大きな変化はおこっていないと考えられる。その理由を以下に述べる。シリカガラスの粘度は、温度の下降につれて激しく上昇することが知られている。コア領域近くの加熱領域は冷たく厚いクラッド層や高分子被覆に覆われているので、レーザーの電源を切れれば直ちにその温度が低下すると考えられる。高温において空孔 1 個を生成するのに数十 μs の時間が必要であることを考えれば、それより短い冷却時間のさ中大きな空孔が変化する程度は、空孔 1 個を生成する場合に比べて規模的に小さいと考えられる。

次に、レーザーが停止される前に光学的放電がどこに位置していたかを推定する必要が



http://www.opticsexpress.org/view_media.cfm?umid=16414

Fig. 7. 5.0 W のレーザー光の注入により生成した損傷の光学顕微鏡写真とこれらを編集したビデオ映像 (1.58 MB)。縦線の間隔は $17.8 \mu\text{m}$ 。一番下の写真は一番上のものと同じだが、左に $17.8 \mu\text{m}$ ずらしてある。ビデオの再生速度は、5.0 W を注入した光学的放電の伝搬速度に比べて、約 50,000 倍遅くなっている。

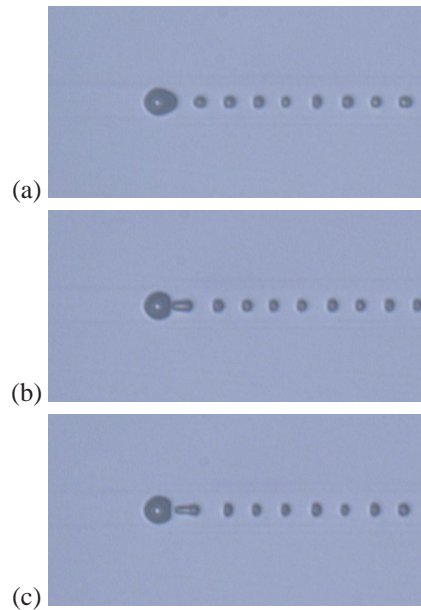


Fig. 8. 約 1.3 W のレーザー光で生成された損傷で、周期的空孔のみを含むものの光学顕微鏡写真。写真の高さは 50 μm 。

ある。以下の理由から、それは最初の大きな空孔の位置にあったと考えられる。Fig. 5(右)に示すように、 $\Delta_{10\%}$ の注入光強度依存性は、大きい先頭の空孔の長さの変化と良く一致している (Fig. 5(右) の縦線と \blacktriangle を比較されたい)。また、Fig. 4(b-1)–(b-4) に示す非対称な強度分布は、Fig. 6(a)–(d) に示す尻尾のついた空隙内の放電からの発光からくるものである。Fig. 5(右) をさらに詳しく検討すれば、 $I = 9.0 \text{ W}$ での $\Delta_{10\%}$ は、細い縦線の外側に位置するのに対し、 $3.5 < I < 7.0$ における $\Delta_{10\%}$ は、縦線の内側にある。これは、9.0 W を供給された光学的放電の発光は、梁を含まない大きな先頭の空孔が位置する領域よりも長い範囲から生じていることを意味している。言い替えれば、発光は切り離された空孔からも生じていると言える。このことは、Fig. 4(b-1) に示されている、9.0 W を注入した光学的放電の強度分布に孤立したピークが見られることにも関係する。このピークの変動周期 (16–20 μs) は、空孔 1 個が生成される周期 18.7 μs と一致している。

Fig. 5(右) は、先頭の空孔の最大直径 $2r$ が、約 8.6 μm と一定値をとることも示している。これは、光学的放電がコア領域に強く閉じ込められており、特に $I \geq 3.5 \text{ W}$ の場合が顕著であることを意味している。 $I \leq 2.0 \text{ W}$ の場合は大きな先頭の空孔の形は液滴状だが、 $I \geq 3.5 \text{ W}$ となると、円筒形の区間を含むようになる。よって、光学的放電の長さは注入光強度の増加に対して線形で変化する。

4.2. 周期的空孔生成の起源

著者によって提案された周期的空孔形成のメカニズム [12] は、Fig. 7 に示したビデオ映像に示されている。ファイバヒューズの伝搬中に、大きな先頭の空孔の中にある光学的放電²は、その尻尾を切り離し (Fig. 7(e) 参照)、それが周期的空孔のひとつとなる。この切り離しによって梁を形成する動作は、光学的放電の先頭において新しい自由表面を形成することの補償にあたる。このようにして、放電を取り囲む表面積の合計を一定に保っているのである。このメカニズムは、Fig. 6(a)–(d) に示す様な、光学的放電が尻尾を有した空隙に存在している場合に成り立つ。

²訳註: 訳註 1 参照。

このメカニズムは、もうひとつの周期的空孔を形成する状況、すなわち $I \sim 1.3 \text{ W}$ (Fig. 6(g) および Fig. 8 参照) の場合にも適用可能である。この場合、尻尾は空孔生成周期の中で過渡的に現れる (Fig. 8(b) 参照)。その後、その尻尾は切り離され (c)、周期的空孔のひとつとなる (a)。

それでは、尻尾の有無は何によってきまるのであろうか？ 著者の考える原因は、先頭の大きな空孔を取り囲むガラスの温度分布である。もし温度が均一であれば、空隙は尻尾を伸ばすよりもむしろ、表面積を最小にするであろう。Fig. 6(e) と (f) はこの範疇に入るように見える。しかし、光学的放電が $I > 2.0 \text{ W}$ の高いエネルギーを受けてコア領域に強く閉じ込められるようになると、このような均一性はもはや保てなくなる。この場合、温度は先頭の空孔から離れるにしたがって減少する。この均一性は、注入エネルギーが小さ過ぎる場合にもまた達成し得ない。後部のガラス温度が前部の温度より低いと、ガラスの粘度は後部の方が高くなる。よって、後部での表面積を減少させる動きの反応性は、前部での新しい表面を作る動きよりも鈍くなる。よって、Fig. 8(b) に示した過渡的な尻尾は、その付近の高い³粘度で達成しうる僅かな塑性流動性に起因する表面減少の遅れを埋め合わせるために現れるのであろう。この説明は、 $I \geq 3.5 \text{ W}$ の場合にも適用できる。尻尾の末尾を囲むガラスの粘度は、先頭の空孔の中程を囲むガラスの粘度よりも高い。よって、表面積を減ずるには、尻尾の末尾での微視的な塑性流動によるよりも、尻尾を切り離す方がより簡単に実現できる。これとは対照的に、取り囲むガラスの粘度がほぼ均一であれば、このような表面積減少の遅れは起こり得ない。結局、ファイバヒューズの周期的空孔生成は、光学的放電が尻尾を伴った空隙内に存在する場合に発生する⁴。

最後に、Fig. 6(h) に示した 2 重周期構造の形成についての触れる必要が有る。この構造を生成するのに要するレーザー光強度がヒューズ伝搬の限界値に近いことを考えると、この構造は、ファイバヒューズの停止と再開の繰返しの結果であると推察される。自己停止した後にファイバヒューズを再開させるには、入射したレーザー光がヶ所に集光される必要が有る。このような状況は、ファイバヒューズ点火現象のその場観察に関する仕事で既に報告されている [16]。光学的放電が出現する前に、暗い輝点が空孔を残さずにゆっくりコア領域を移動する前駆現象が観測された。この輝点がおそらくレーザー入射光の集光点であろう。今回の場合も類似の現象が起きている可能性が有る。よって、Fig. 6(h) に示した無空孔区間は、おそらく自己停止と再点火の間に形成されたものであろう。この伝搬モードのその場観察といった検討が必要である。

5. 結論

ファイバヒューズの光学的放電の形状、および生成した空孔の先頭部分の形状の、注入光強度依存性を検討した。注入レーザー光の急停止の前には、光学的放電は先頭の空隙 (の位置) に存在した。周期的空孔形成は、その空隙が尾を引いている場合に観察された。すなわちヒューズの進行中に、その尻尾は切り離され、収縮し、周期的空孔の一つになる。注入光強度が大きい場合に、光学的放電はコア領域に強く閉じ込められるので、尻尾は永続的に存在する。注入レーザー光強度が、ファイバヒューズ伝搬に必要な下限値に近い場合には、過渡的な尻尾が現れる。両方の場合において、この尻尾は放電の前方面での新しい表面の形成を補償するのに必要な表面積減少の遅れ埋め合わせるために切り離される。この遅れは、後方を取り囲むガラスが前方のガラスよりも粘度が高いために発生する。

謝辞

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、桑原讓二氏。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。

³訳註: 原文の lower は誤り。

⁴訳註: 訳註 1 参照。