

ファイバフューズ

轟 眞市

物質・材料研究機構 光材料センター

1 はじめに

「ファイバフューズ」とは、光ファイバが光によって破壊される現象の名前である。光通信用光ファイバが伝搬光のエネルギーを消費しながら連鎖的に自己破壊していくこの現象は、20年以上前に発見された [1]。通信業界で忌み嫌われている現象が、なぜ本書で取り上げられたのか？それは、光ファイバのコアに残された損傷パターンが不思議な造形美を有しているために、材料を扱う人間の心をくすぐるからだと筆者は考える。

「これは何かに使えるのではないか？」

その期待に答える成果が未だに現われていないのは、筆者を含めた材料研究者が描く応用へのイメージの膨らませ方が、まだまだ足りないのかもしれない。本稿がより多くの方々の目に触れることで、思いがけない利用法が出現することを願って、筆を進めることにする。

第2節では、損傷生成に関する材料科学的背景を述べ、第3節では、連続的な損傷パターンが生成するメカニズムを推察し、第4節では、個々の損傷が不思議な形となる理由を考える。

2 なぜ損傷が発生するのか？

詳しい説明は後で述べるので、まずは図1をご覧ください。ファイバフューズ現象を発生させた後に残された空孔列の写真である。モルス信号の様な不規則なパターンの場合もあれば、弾丸状の空孔が等間隔に並んでいるものもある。

この現象を発生させるのは極めて簡単である。数 W のレーザー光を、シリカガラス製単一モード光ファイバに注入し、光ファイバケーブルのどこか 1カ所

を加熱すればよい(図2(1)参照)すると、まぶしく輝く光の点が、光ファイバに沿って光源に向かって走り出す(図2(2)および(図3参照))。その速度は毎秒約 1m であり、注入する光を遮断すれば消滅する(図2(3))。

この輝点の正体は、光ファイバのクラッド(約 60 μm 厚)に閉じ込められたプラズマであり、その温度は数千 K に達しているとの報告がある [2]。しかし、外部からの加熱だけでは、ここまで温度を上昇させることはできない。それを可能たらしめているのは、直径数 μm のコアに注入された数 W のレーザー光と、加熱によって誘起されたシリカガラスの光吸収である。究極の光透過率を達成したシリカガラスであっても、温度が 1000 以上になると僅かに光を吸収するようになり [3] そのエネルギーは熱に変換される。その熱がさらにシリカガラスの光吸収を誘起する、といった正のフィードバックが、高温のプラズマを発生させる原因である。このプロセスの間、光エネルギーは光源方向から供給され続けるので、高温領域はその方向に移動していく。周囲のクラッドが溶ける前に移動してしまうので、コアに閉じ込められたまま安定に伝搬していくのである。

図1に示した4枚の写真は、実は損傷した1本の光ファイバの別々の部分を撮影したものである。まず 1480 nm, 7 W のレーザー光を注入してファイバフューズを発生させ、レーザー光のエネルギーを徐々に絞っていった。その値は、写真 (d) (c) (b) (a) の順に、7 W, 3.5 W, 1.3 W, 1.28 W と推定され、(a) の左上の細長い孔のある場所でファイバフューズは停止・消滅した。空孔列の脇に、2本の平行な境界線が見えるのは、プラズマの通過によって、急熱急冷されたガラスの屈折率が変化した領域である。供給エネルギーが小さくなる程、領域の幅が狭くなっていくのがわかる。

空孔が生成するという事は、その周囲は高密度

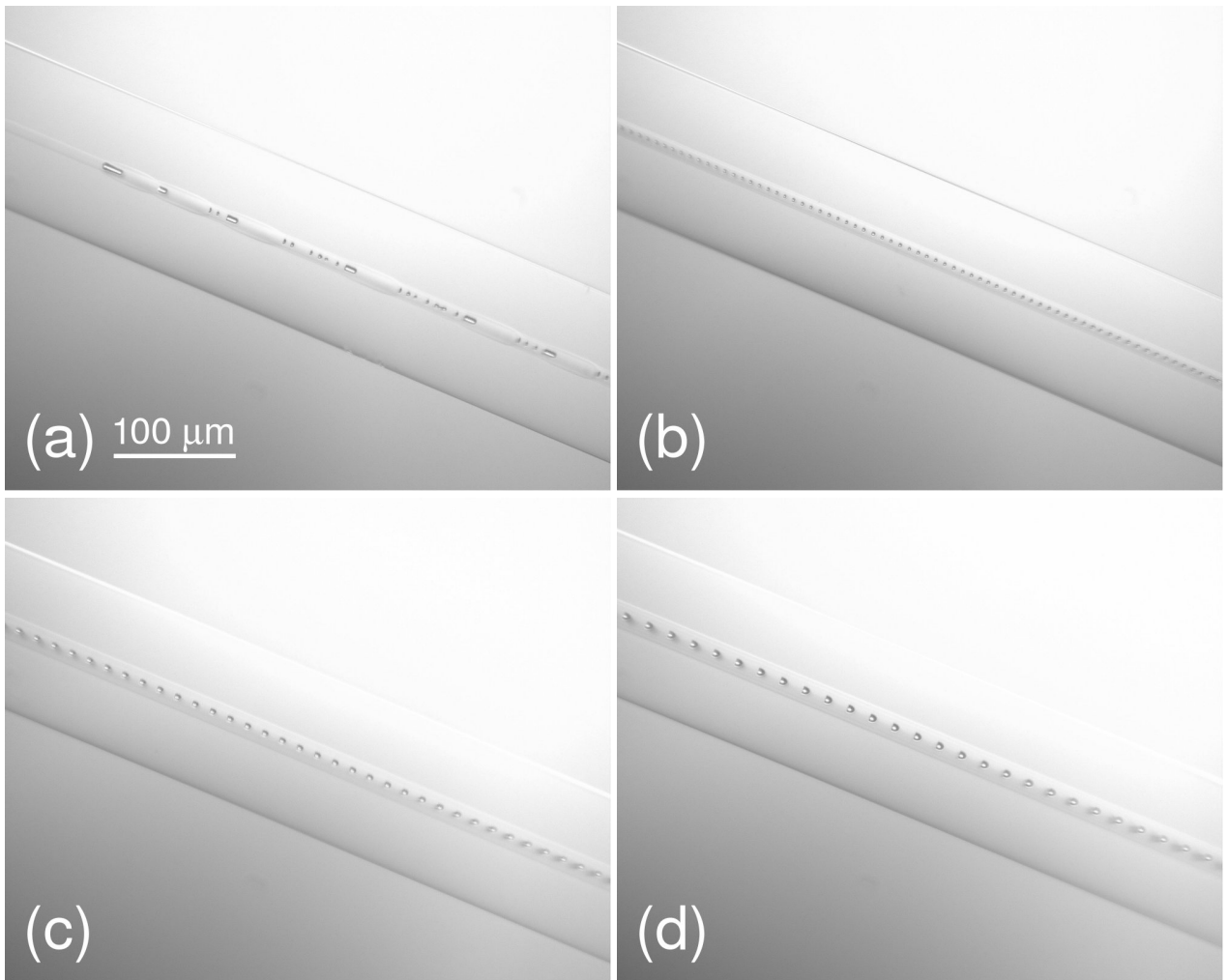


図1: ファイバフューズ現象によって生成された空孔列の写真。シリカガラス製単一モード光ファイバ (Corning SMF-28) に波長 1480nm のレーザー光を左側から注入し、ファイバフューズを発生させて生成したもの。詳細は本文参照。

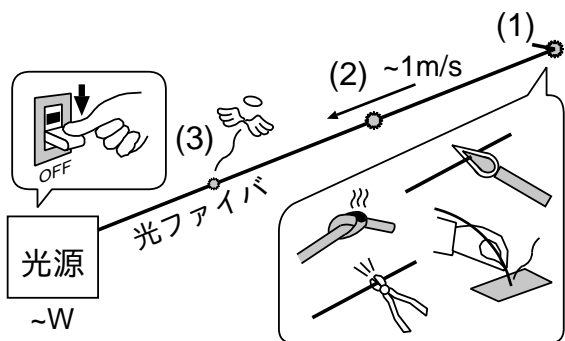


図2: ファイバフューズ現象の(1)発生、(2)伝搬、および(3)停止の位置関係。

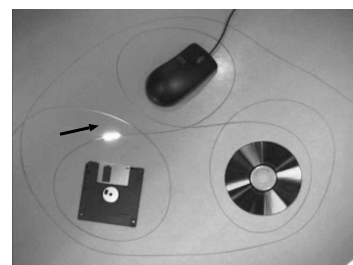


図3: ファイバフューズの伝搬の様子。カメラの露出時間分だけ輝点が矢印の方向移動したので、細長く写っている。この動画は、文献 [11] および YouTube (<http://www.youtube.com/tokyo1406>) に収録されている。

化されており、空孔内には何らかの気体が閉じ込められているはずである。実際、その部分での屈折率が上昇していることが確認されており [4]、また顕微鏡ラマン測定によって空孔内に酸素が存在していることが確かめられている [5]。

現在までにファイバフューズの発生が報告されている波長は、 $0.5 \mu\text{m}$ から $1.5 \mu\text{m}$ までに渡っている。高温で誘起される光吸収の原因としては、1) 点欠陥の生成 (Ge E' 中心)、2) Ge 添加シリカガラスの熱イオン化に伴う電子伝導、および 3) シリカガラスから解離した SiO が考えられている [6]。

3 なぜ空孔列が生成するのか？

その問いに答えるためには、現象のモデル化が必須であるが、未だ決定的なものは定まっていない。レイリー不安定性に基づく説 [7] や、それに異を唱えて、プラズマ周囲に偏在する負電荷による不安定性とする説 [8] が提案されている。

その一方で、経験的なデータの積み重ねが、この現象の発見以来、細々とではあるが続いている。近年では、移動するプラズマを超高速度ビデオ撮影することによって、新しい知見が加わる様になった。筆者はこの仕事に多く関わっている。

図4は、ファイバフューズをその場観察して得た連続写真である [9]。プラズマは長さ約 $150 \mu\text{m}$ の空間に閉じ込められて移動し、その背後には空孔列が生成していることがわかる。この状態において供給光を瞬断し、ファイバフューズが停止した付近の空孔列を光学顕微鏡で撮影したものを図5に示す。複数の写真が掲げているが、どれも同じ条件で発生・停止させたものである。空孔列の先頭には、どれも長さ約 $150 \mu\text{m}$ の空孔が存在し、ここにプラズマが閉じ込められていたことが分かる。

では、なぜ同じ条件で作製した空孔列なのに、さまざまな形状のものが観察されるのか？これは、プラズマから空孔1個が生成されるプロセスを想定すれば、プラズマを停止させたタイミングが異なれば、異なる形状の空孔が凍結される、と考えることができる。図5に示した7枚の写真は、右側の空孔列の位置を揃えた上で、左端の空孔の先頭が遠くなる順に並べている。これらを順に眺めていくと、まるでパラパラマンガの様に、先頭の細長い空孔の尻尾が

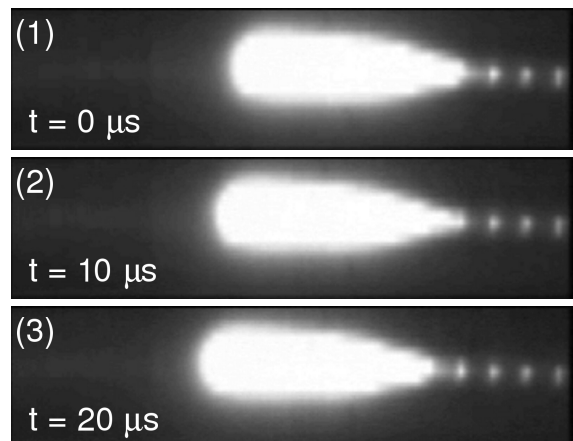


図4: ファイバフューズの直接観察映像。注入光は9W 1480nmであり、写真は可視光のみををとらえている。白く大きく写っているのはプラズマからの発光で過露光になっているが、その右側に空孔列からの散乱光のが写っている。その間隔は約 $22 \mu\text{m}$ 。

切り離されて、空孔列の一員に収まる様子が浮かび上がってくる。ただし、ここで注意すべきは、この写真はあくまでプラズマが消滅した後に凍結された構造に過ぎない点である。もっとも、その消滅に要した時間は7マイクロ秒程度であったので [10]、プラズマが存在していた時の構造の特徴を保持していると考えて差し支えない。

さて、コアに閉じ込められたプラズマの尾が空孔列生成に大きな役割を果たしているのであれば、次のような予測を立てることができる。供給する光エネルギーを弱くすればプラズマの長さが短くなっていき、最終的に尾と呼べるものが無くなる状態が出現すれば、空孔列の挙動も変化するはずである。波長 1480 nm の場合、 2 W がその条件であり、このとき生成した空孔列には周期性が認められず、超高速度カメラによるその場観察映像でも尾は観察されていない [11]。このことから、プラズマが細長い形を保って伝搬する条件においては、図5に暗示される空孔生成メカニズムは、現象を説明できる良いモデルと考えられる。

なお、さらに供給エネルギーを減少させると 1.3 W で再び周期性が現れるが (図1(b))、 1.28 W で不規則な配列になる (図1(a))。ここで現れる周期性を担うのも、過渡的に現れる「尾」が関与していると考えられる [12]。また、不規則な配列が生成するのは、

プラズマの伝搬の際に、空孔を生成しない伝搬モードが割り込むためと解釈できる [12]。

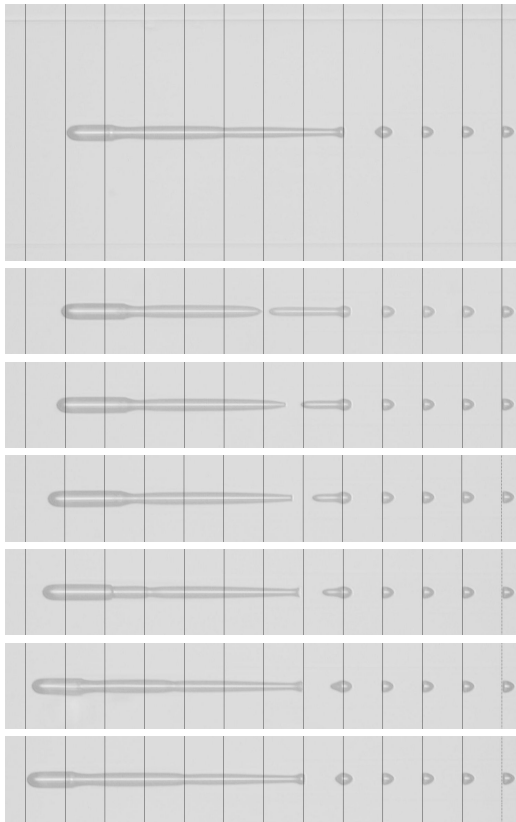


図 5: ファイバフューズが残した空孔列の光学顕微鏡写真。発生条件は図 4 と同一。縦線は後から書き入れたもので、間隔は約 $22 \mu\text{m}$ 。一番下の写真は、一番上の写真を 1 周期ずらしたものである。これらを動画に編集したものは、文献 [11] および YouTube (<http://www.youtube.com/tokyo1406>) に収録されている。

4 なぜ空孔が弾丸の形になるのか？

前節の空孔生成メカニズムを受け入れると、空孔が弾丸状になる理由も説明できる [10]。細長いプラズマにおける長さ方向の温度分布を考えると、進行方向側は光エネルギーの供給を受けているので高温となり、尾の方向に向かって温度が低くなっている。この時、プラズマ周囲のガラス融体の粘度は尾の方向に向かって高くなる。一方、プラズマの温度は数千 K に達しているため、プラズマの周囲には高い圧

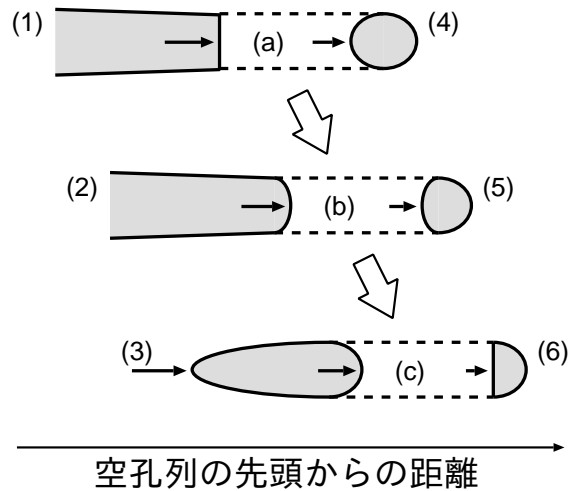


図 6: 切り離されたプラズマの尾が弾丸状空孔に変化するプロセスを説明する模式図。

力がかかっている。尾が切り離されると、プラズマ本体と切り離された尾の間に存在する壁もこの圧力を受け、後方に押しやられることになる (図 5 参照)。

この壁の動きを抽出したものを、図 6 に示す。点線で囲んだ壁 (a) ~ (c) から見れば、粘度の高い右側は流動しにくいことが分かる。また、切り離された空孔 (3) ~ (6) から見れば、粘度の高い右側が、左側より早く固まることが分かる。この様に、粘度勾配下での固化するタイミングの差が、空孔を弾丸状に整形していると考えられる。

この様に、定常状態での空孔生成においては、弾丸の向きが供給光の向きと一致するが、非定常状態では弾丸の向きが逆転する場合もあることが知られている [13]。図 7 は、コア径の異なる光ファイバを融着した点を通るファイバフューズをその場観察し、生成した空孔列と比較したものである。これに対応する動画を、文献 [14] のオンライン版に収録したのでご覧頂きたい。尾の周期的な切り離しがはっきり記録されており、空孔列の周期性が失われているところでは、その挙動が停止しているのがわかる。これは、図 7(2) において、発光強度分布の重ね合わせが濃淡の波を打っていることに対応している。

ここで、図 7(3) の横軸座標 $780 \mu\text{m}$ に位置している弾丸状空孔に注目すると、他の空孔に比べて向きが逆転していることが分かる。これは、プラズマが融着点 (白丸印付近) に近づいていくにつれ、定常状態

図 6

図 7

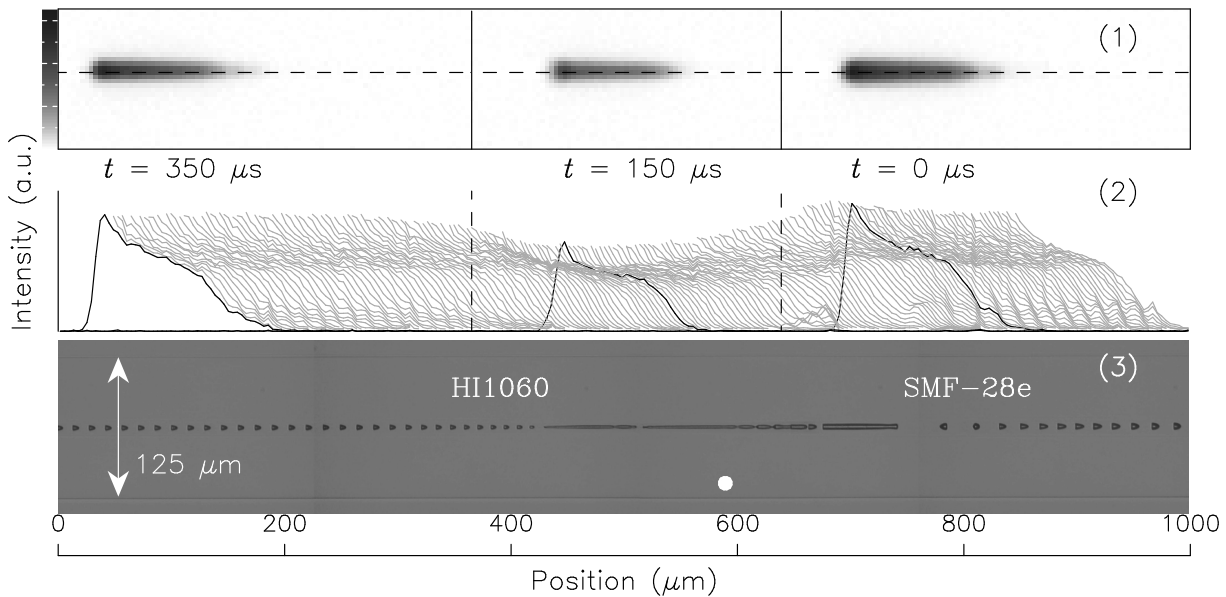


図 7: 1070 nm, 9 W の光を供給したファイバフューズが融着点を通過する時に発する可視光の写真 (1), その写真中の点線に沿った強度分布を 2.78 μ 秒間隔で並べたもの (2), および屈折液に浸して撮影した損傷パターンの光学顕微鏡写真 (3)。クラッド径は 125 μ m。白丸の付近に位置している融着点より左でコア径が小さくなっており、その前後 (2 本の縦点線で示す) で、ファイバフューズの移動速度が増加した。この動画は文献 [14] に収録されている。

が破れた結果と考えられる。これに対応して、発光強度分布の重ね合わせ模様 (図 7(2) 参照) も変化している。空孔を切り離す時に現れた隔壁に働く圧力が、定常状態の破れによって変化したためであろう。

5 おわりに

以上、不思議な造形美が生成される理由を、最近の超高速ビデオ撮影から得られた知見に基づいて解説した。空孔列をうまく利用する応用が現れることを期待し、またそれを目指して精進していくつもりである。ご興味を持たれた方は、既に発表した別の総説 ([15, 16, 17]) や研究裏話 ([18, 19, 20, 21]) もご覧頂ければ幸いである。これらの文書 (ただし [17] を除く) や文献 [10, 11, 12, 14] の和訳はインターネット上で公開しているので、ぜひご参照頂きたい。

参考文献

[1] R. Kashyap and K. J. Blow: “Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical

fibres”, *Electron. Lett.*, **24**, pp. 47–49 (1988).

[2] 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).

[3] R. Kashyap, A. Sayles and G. F. Cornwell: “Heat flow modeling and visualization of catastrophic selfpropagating damage in singlemode optical fibers at low powers”, *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1996* (Eds. by H. E. Bennett, A. H. Guenther, M. R. Kozlowski, B. E. Newnam and M. J. Soileau), Vol. 2966 of *SPIE Proceedings*, SPIE, pp. 586–591 (1997). (Boulder, CO, USA, 7 Oct 1996).

[4] 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).
- [5] 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).
- [6] Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi and R. Nagase: “Evaluation of high-temperature absorption coefficients of optical fibers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16**, 4, pp. 1008-1010 (2004).
- [7] 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).
- [8] 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, pp. 765-770 (2004).
- [9] S. Todoroki: “In-situ observation of fiber-fuse propagation”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 6A, pp. 4022-4024 (2005).
和訳: <http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:33135>
- [10] S. Todoroki: “Animation of fiber fuse damage, demonstrating periodic void formation”, *Opt. Lett.*, **30**, 19, pp. 2551-2553 (2005).
和訳: <http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:33132>
- [11] S. Todoroki: “Origin of periodic void formation during fiber fuse”, *Optics Express*, **13**, 17, pp. 6381-6389 (2005).
和訳: <http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:33045>
- [12] S. Todoroki: “Transient propagation mode of fiber fuse leaving no voids”, *Optics Express*, **13**, 23, pp. 9248-9256 (2005).
和訳: <http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:33045>
- [13] 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).
- [14] 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) 付録に和訳を収録.
- [15] 轟 眞市: “光ファイバーの自壊連鎖現象～ファイバーヒューズ～”, *O plus E*, **30**, 11, pp. 1188-1191 (2008).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 轟 眞市: “先んずれば人を制す、写真撮らばファイバヒューズ”, *電気ガラス*, **35**, pp. 14-18 (2006).
- [19] 轟 眞市: “セレンディピティの磨き方 ファイバヒューズ研究に至った縁と偶然 (3) ファイバヒューズの真剣白刃撮り 天は自ら助くるものを助く”, *工業材料*, **55**, 4, pp. 97-101 (2007).
- [20] 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).
- [21] 轟 眞市: “偶然を呼び寄せてセレンディピティを発揮するには”, *応用物理*, **78**, 7, pp.668-671 (2009).
- 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。