

ファイバフューズの伝搬モードと伝搬しきい値

轟 眞市†

Modes and Threshold Power of Fiber Fuse Propagation

Shin-ichi TODOROKI†

あらまし 通信用光ファイバ (SMF 及び NZ-DSF) におけるファイバフューズの伝搬速度と損傷形状の供給光強度依存性に基づき、その伝搬モードを次の 3 種類に分類した。供給光強度が小さくなる順に、コア領域に閉じ込められたプラズマがファイバ軸方向に長く広がって伝搬する円筒状モード、その広がりの方が前者より狭い単峰状モード、及び半径方向の広がりが前二者よりも小さい不安定モードである。ファイバフューズの損傷形状としてよく知られた弾丸形状の周期的空孔列は円筒状モードで現れ、単峰状モードでは空孔列が不連続につながりあった線状の損傷が残される。これらの伝搬モードでは、プラズマは半径方向に最大限広がった状態で伝搬するのに対し、不安定モードではそれより狭い領域を伝搬するので、供給光がプラズマに吸収されない比率が大きく、導波路構造の乱れの影響を受けやすい。

キーワード 光ファイバ、ファイバフューズ、伝搬モード、伝搬しきい値

1. ま え が き

伝送媒体の非線形光学効果が顕在化することを回避しつつ、伝送容量を拡大すること—これが現在の光通信技術開発に求められている課題の一つである。その解決策として、伝送媒体中の単位面積当りの光強度を増大させない SDM (空間分割多重) 技術や MDM (モード分割多重) 技術への関心が高まっている [1]。一方、回避すべき現象の中でも致命的な障害をもたらすファイバフューズについては、停止デバイス・装置や高耐性光ファイバの研究開発は進められているものの、現象そのものに対する本質的理解は、その発見 [2] から 25 年が経過しているにもかかわらず、深まっているとは言いがたい。

ファイバフューズとは、シリカガラス製光ファイバが伝送光のエネルギーを消費して連続的に破壊される現象のことである。究極の透明度を達成したはずのシリカガラスが光を吸収するようになる原因は加熱にある。1000°C を超えるあたりから発生する熱分解生成物が伝送光を熱に変換し、雪崩を打って温度上昇した果てにコア領域にプラズマが閉じ込められた状態に至

る。シリカガラスの熱伝導率の低さが災いして、そのプラズマはクラッドを融解する前に光源方向に移動し始め、その軌跡に空孔列を残す (詳しくは総説 [3], [4] を参照)。

光通信システムにとっては、線路上の一点の加熱事故が引き金となって光源に至る区間が全損する危険をはらむことになるので、ファイバフューズが安定に伝搬し得る条件まで光を入力する場合 (例えば波長多重度の拡大やラマン増幅の適用など) には、細心の注意を払った運用が必要となる。その条件を判断する目安として、ファイバフューズの伝搬しきい値、 P_{th} 、が今まで多数報告されているが、その決定方法に明確な取り決めがないために、数値にばらつきが見られる (図 1 参照)。これはすなわち、このばらつきが生じる理由を説明できるほどには、ファイバフューズへの理解が進んでいないことを意味する。

そこで本論文では、ファイバフューズの伝搬状態を実験面から明らかにするために、ファイバフューズの伝搬速度と損傷形状の供給光強度依存性を精密に検討した結果を報告する。伝搬速度の測定自体は今までも報告が数例 [11]~[20] あるが、供給光強度に対してほぼ線形に推移することを確認するとどまっておき、伝搬挙動と結び付けた議論にまでは至っていない。本研究により、伝搬モードが 3 種類に分類できることが

† 物質・材料研究機構、つくば市

National Institute for Materials Science, 1-1 Namiki, Tsukuba-shi, 305-0044 Japan

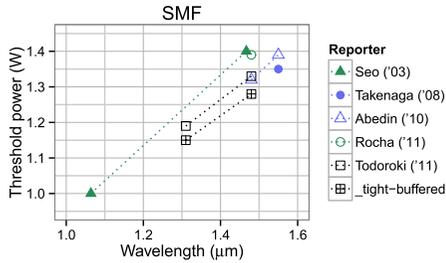


図1 標準的な単一モード光ファイバ (SMF) に対するファイバフューズの伝搬しきい値の波長依存性

Fig. 1 Wavelength dependence of threshold power for fiber fuse propagation through SMF. Source: [5]~[10].

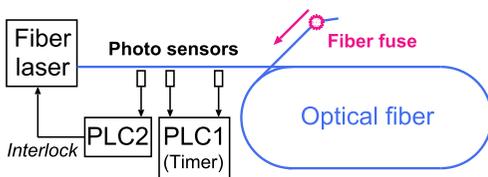


図2 ファイバフューズ速度測定装置. PLC: Programmable logic controller

Fig. 2 Experimental setup for propagation speed measurement.

明らかになり、伝搬しきい値付近の挙動に不安定性が伴うことが分かった。

2. 実験

ファイバフューズ速度測定装置の構成を図2に示す。ファイバレーザ（波長：1480 nm または 1310 nm）に試料となる光ファイバを融着接続し、その経路上に二つの光センサを 80 mm 間隔で設置した。光ファイバは、典型的な単一モード光ファイバ (SMF) として SMF-28e (Corning 社)、及び分散シフト光ファイバ (NZ-DSF) として、LEAF (Corning 社) 及び True-Wave RS (OFS 社) を用いた。被覆層は外径 250 μm の透明アクリル樹脂とした。

フューズがセンサ位置を通過するときに発せられるパルス信号をシーケンサ (PLC) に収容し、内蔵のタイマ (0.1 ms 間隔) で両パルスの時間差を計測した。ここから計算される速度が、超高速カメラによって決定した文献値 [16] とほぼ一致することを確認した。また、もう一つの光センサを直近に配置し、時間差測定の直後にファイバレーザの発振を停止させるようにした。ファイバ内に残された損傷形状を、屈折液に浸した状態で光学顕微鏡観察し、空孔列の各種寸法を測定

した。

ファイバフューズの発生は、7 W の光を注入した光ファイバの出射端を金属に押し当てる方法を用いた。その発生直後にレーザの設定を変更して所定の光強度に到達させた。フューズの速度測定位置での供給光強度を正確に決定するために、フューズ発生前の出射端における光強度、及びレーザ内蔵の光強度モニタの値の経時変化 (7 W から所定の光強度に達するまで) をあらかじめ測定しておき、フューズ停止時 (ほぼ速度測定位置と同じとみなす) の光強度モニタの値と照合して供給光強度を 0.01 W 単位で決定した。

伝搬しきい値の決定に際しては、過去の文献 [5]~[8] に記載の方法とは異なる手順を採用した。すなわち、供給光強度を減少させていく過程でフューズが消滅したときの光強度を採用するのではなく、供給光強度が一定値に保たれた後にフューズが安定に伝搬する最小の値を採用した [9], [10]。

3. 結果

3.1 伝搬速度

図3に、SMF における伝搬速度と供給光強度との関係を示す。両者の値を精密に決めると、単純な比例関係にはないことが分かる。図中の点線は、供給光強度の強い側の4点 (□印) について、最小二乗法でフィッティングしたものであるが、これらの試料に残された損傷形状には一つの共通した特徴がある。図4の (d)~(f) に示すように、空孔列の先端部分に円筒状の区間が含まれているのである。

それ以外の試料における先端の空孔は全体に丸みを帯びており (図4 (a)~(c) 参照)、これに対応して図3における伝搬速度の値は点線から外れ、伝搬しきい値付近ではその傾きが大きくなる (×印)。ここで、先端空孔の最大直径の推移を見てみると (図5 参照)、×印の試料においては、供給光強度の減少に応じて急激に直径が減少していることが分かる。

このような傾向は NZ-DSF においても観察された (図6 参照)。

3.2 伝搬しきい値

伝搬しきい値はモードフィールド径 (MFD) と強い相関をもつことが指摘されている [5], [6], [15], [21]~[23]。従来とは異なる方法で決定した今回の伝搬しきい値においても、その関係は確認できた (図7 参照)。3種類のファイバにおける伝搬しきい値 (1310 nm 及び 1480 nm) と MFD (1550 nm におけるカタログ値)

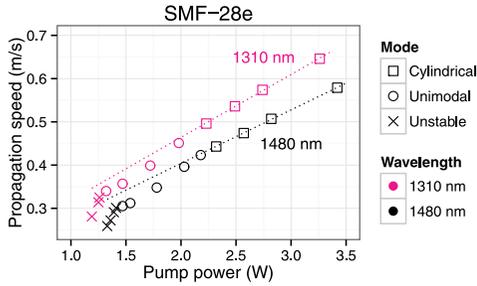


図 3 SMF に発生させたファイバフェーズの伝搬速度の供給光強度依存性

Fig. 3 Pump power dependence of fiber fuse propagation speed in SMF.

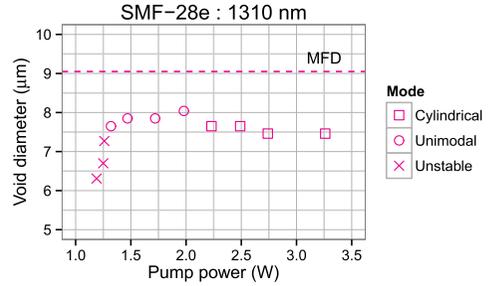


図 5 SMF におけるファイバフェーズ損傷の先頭孔径の供給光強度依存性

Fig. 5 Pump power dependence of top void diameter left after the passage of a fiber fuse in SMF.

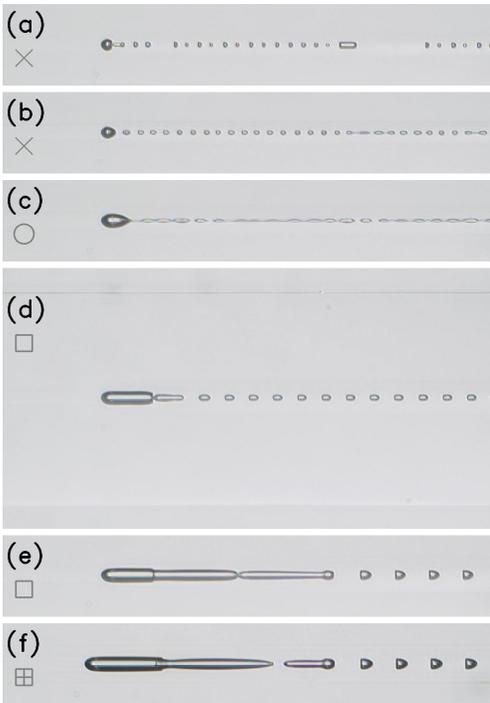


図 4 SMF に 1480 nm の光を供給してできた損傷の形状例. (a) 1.33 W, (b) 1.36 W, (c) 1.54 W, (d) 2.82 W, (e) 7 W, (f) 7 W, タイトバッファ付きファイバ

Fig. 4 Fiber fuse damages left in SMF with and without tight buffer, (f) and (a)–(e), respectively, pumped at 1480 nm.

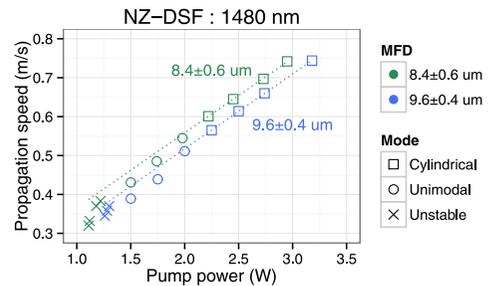


図 6 NZ-DSF に発生させたファイバフェーズの伝搬速度の供給光強度依存性

Fig. 6 Pump power dependence of fiber fuse propagation speed in NZ-DSF.

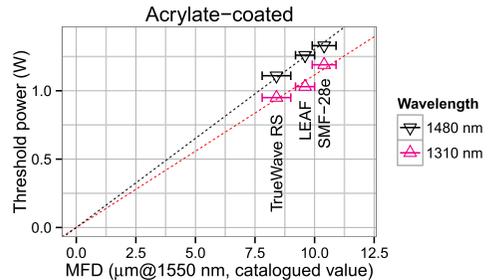


図 7 伝搬しきい値のモードフィールド径依存性

Fig. 7 MFD dependence of threshold power, P_{th} .

は、測定波長が異なるものの、ほぼ線形の相関を示していることが分かる。

なお供給光強度を伝搬しきい値に近づけると、光ファイバ内に見る奇妙な空孔列パターンが残ることが知られている [16]。図 4 (b) に示すようなサイズの小

さい周期的空孔列が現れ、更に供給光を絞ると、弾丸形状の空孔と無空孔区間の対が割り込む構造が現れる (図 4 (a) 参照) [9]。この挙動は、今回検討した全ての種類の光ファイバに現れた。

4. 考 察

4.1 伝搬モードの分類

図 3 及び図 6 に示した伝搬速度の挙動は、次の 3 種類に区別できることが分かる。すなわち、供給光強

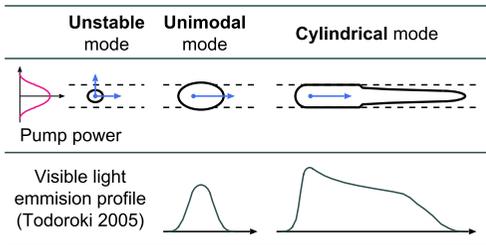


図 8 閉じ込められたプラズマの形態と体積変化自由度 (矢印で図示) で分類したファイバフューズの伝搬モード. 下段はその場観察で得られた可視光発光分布の例 [16]

Fig. 8 Fiber fuse propagation modes based on the shape and volume expansion directions of captured plasma.

度に対する傾きが相対的に大きい区間 (×印), 供給光強度に対して線形に推移する区間 (□印), 及び両者に挟まれた区間 (○印) である.

今までに明らかにされたファイバフューズの挙動の中で, この分類に対応して変化するものに, ファイバフューズの発光強度分布がある [16]. 波長 1480 nm の供給光を受けて SMF 内を伝搬するファイバフューズを超高速カメラでその場観察し, ファイバ軸方向に沿った強度分布を求めると, 1.5 W と 2 W の試料 (○印の区間に相当) ではほぼ対称な単峰状のピークになるのに対し, 3.5 W 以上の試料 (□印の区間に相当) では最大値が進行方向に偏った非対称なピークになる (図 8 の下段参照).

また, 供給光を瞬断した後に残される損傷形状も, 前述の分類に従ってその特徴が変化する. すなわち, 先頭空孔の形に円筒形の区間が含まれ, その背後に周期的空孔列が連なるもの (図 4 (d)~(f), 図 5 の□印), 先頭空孔の形が丸みを帯びていて (図 4 (c)), その最大直径が前述の円筒直径よりも大きいもの (図 5 の○印), 及び先頭空孔の直径が前二者よりも小さいもの (図 5 の×印) である.

本来, 先頭空孔の形状は, 供給光を断つ前の閉じ込められて移動するプラズマの状態と同一視すべきではない. なぜなら数千 K 以上のプラズマが, 供給光を断たれて消滅するまでの間 (本実験装置の場合, 最大 7μ 秒 [24]) に, それを取り囲む溶融ガラスが変形している可能性があるからである. しかし上述した二つの特徴 (円筒形か否か, 及び半径方向の広がり的大小) に関する限り, その場観察の結果とよく対応していることから, 先頭空孔の形状は冷却前のプラズマの状態

を反映していると考えられる.

そこでこの 3 種類の伝搬状態を, 図 8 上段に示すような三つの伝搬モードとして命名した. すなわち, 供給光強度が増える順に, 不安定 (unstable) モード, 単峰状 (unimodal) モード, 及び円筒状 (cylindrical) モードである.

4.2 各伝搬モードの挙動

これら 3 種類の伝搬モードの違いは, 入力エネルギーの増大に従って, 閉じ込められたプラズマがどのようにその占有空間を増加させるか, にある. 不安定モードにおける占有空間は他の二つのモードに比べて小さいので, 入力エネルギーが増加すれば占有空間はファイバ軸方向だけでなく, 半径方向にも広がることになる (図 8 上段の矢印参照). 半径方向への広がりが増えれば, 供給光がプラズマに吸収される割合も増える. これが, 供給光強度に対する伝搬速度の傾きが他の二つのモードに比べて大きくなる理由である.

しかし, 半径方向への広がり拡大には限界がある. 供給光の広がりを超えてしまうと, その部分のプラズマはエネルギーを受け取れなくなるからである. そこを境にファイバフューズは単峰状モードへと移行し, 入力エネルギーの増加に対してプラズマはファイバ軸方向にのみ広がるようになる. その占有空間は丸みを帯びているが, あるところを境に円筒を含んだ形状になる (円筒状モード).

不安定モードにおいて供給光強度を絞っていくと, プラズマの断面積が小さくなっていき, プラズマを維持するだけのエネルギー供給が得られなくなった時点でフューズは消滅する. 伝搬しきい値とは, このエネルギーバランスを保つことのできる最小値と理解することができる.

ホールアシストファイバ (HAF) において, クラッドに配置する貫通孔を適切に配置すれば, ファイバフューズが極めて伝搬しにくくなることが知られている [25], [26]. そのメカニズムとして考えられるのは, プラズマを取り囲むガラス融液が貫通孔に接すると, 内部の高い圧力を維持できなくなってプラズマが不安定化することである. よって, 貫通孔の配置場所は, プラズマの半径方向の広がりが最も小さくなる条件, すなわち伝搬しきい値におけるフューズの挙動をもとに設計する必要があることが分かる.

一方, フューズの軌跡に残される空孔列に着目すれば, 等間隔に並んだ空孔列が現れるのは, 円筒状モードと一部の不安定モード (伝搬しきい値近傍) である

(図 4 (b) 及び (d)~(f) 参照). 筆者が前報 [16] で考察したその形成メカニズムは, プラズマの占有空間のうち進行方向とは逆側に尾状の領域が形成され, それが周期的に切り離される, とするものである [16].

両者の中間の条件では, 空孔列が相互につながったり途切れたりするように見える不連続な細長い空孔が現れる (図 4 (c) 参照).

不安定モードのうち伝搬しきい値に極めて近い条件においては, 図 4 (a) に示す無空孔区間が現れるが, この区間においてプラズマはその前後の区間に比べて強い光を発することが知られている [27]. また, その出現頻度は, 供給光強度が小さくなるほど増大する [9], [10]. よってこの出現頻度を見れば, プラズマの安定性を相対的に比較することができる.

この挙動が観察できる例として, 伝搬しきい値付近で伝搬するファイバフューズが融着点を通過するときに残す空孔列が挙げられる. 融着によって伝搬光の閉じ込めが局所的に緩くなった点をフューズが通過すると, エネルギー密度の低下がプラズマのエネルギー状態を不安定化して無空孔区間が発生するようになる. その後, 不安定化が解消されなければ消滅してしまう [9].

図 1 に示した伝搬しきい値の文献値がばらつく理由について考えると, 最も大きな原因は, 供給光強度を一定値に保っていないことであろう. 各文献に記された実験方法に関する情報が限られているので推察することしかできないが, 供給光強度を絞っていきつつ, ファイバフューズが消えた瞬間の強度を正確に決定するのは困難である. 加えて, 不安定モードにあるフューズは, 融着点などの光導波路の構造不正に敏感である. フューズが停止した原因が, 伝搬しきい値に到達したためなのか, 局所的な構造不正によるものなのかを知るには, 停止点に至るまでの空孔列の構造を確認する必要がある.

5. む す び

通信用単一モード光ファイバに発生させたファイバフューズには, 3 種類の伝搬モードがあることを見出した. 円筒状モードと単峰状モードは, 伝搬するプラズマのファイバ軸方向に沿った広がり方が異なり, 前者はその軌跡に周期的空孔列を残す. 不安定モードは, 前二者よりも半径方向の広がり方が狭いので, 供給光を吸収する断面積も小さく, 光導波路の構造不正に敏感である. 不安定モードで伝搬できる最低のエネル

ギーである伝搬しきい値を決める際には, このようなプラズマの不安定性を配慮する必要がある.

文 献

- [1] 盛岡敏夫, 高良秀彦, 久保田寛和, “ハイパワー光伝送の現状と課題,” 2010 信学ソ大 (通信), BS-6-1, Sept. 2010.
- [2] R. Kashyap and K.J. Blow, “Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres,” *Electron. Lett.*, vol.24, no.1, pp.47–49, Jan. 1988.
- [3] S. Todoroki, “Fiber fuse propagation behavior,” in *Selected Topics on Optical Fiber Technology*, ed. Y. Moh, S.W. Harun, and H. Arof, chapter 20, pp.551–570, InTech, Croatia, Feb. 2012. (ISBN 978-953-51-0091-1).
- [4] 轟 真市, “ファイバフューズ: 光通信にとつての眠れる悪魔,” *オプトロニクス*, vol.31, no.4, pp.195–200, April 2012.
- [5] 瀬尾浩司, 西村直也, 椎野雅人, 湯口廉一, 佐々木宏和, “光伝送路における耐ハイパワー特性の評価,” *古河電工時報*, no.112, pp.15–20, July 2003.
- [6] K. Takenaga, S. Omori, R. Goto, S. Tanigawa, S. Matsuo, and K. Himeno, “Evaluation of high-power endurance of bend-insensitive fibers,” *Proc. Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, Feb. 2008. (JWA11).
- [7] K.S. Abedin, M. Nakazawa, and T. Miyazaki, “Back-reflected radiation due to a propagating fiber fuse,” *Opt. Express*, vol.17, no.8, pp.6525–6531, April 2009.
- [8] A.M. Rocha, F. Domingues, M. Facão, and P.S. André, “Threshold power of fiber fuse effect for different types of optical fiber,” 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2011), pp.1457–1549, Stockholm, Sweden, June 2011. (Tu.P.13).
- [9] S. Todoroki, “Threshold power reduction of fiber fuse propagation through a white tight-buffered single-mode optical fiber,” *IEICE Electronics Express*, vol.8, no.23, pp.1978–1982, Dec. 2011.
- [10] S. Todoroki, “Partially self-pumped fiber fuse propagation through a white tight-buffered single-mode optical fiber,” *Proc. Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, March 2012. (OTH4I.4).
- [11] R. Kashyap, “Self-propelled self-focusing damage in optical fibres,” *Lasers '87; Proc. Tenth Int. Conf. Lasers and Applications*, pp.859–866, STS Press, McLean, VA, Jan. 1988. (Lake Tahoe, NV, Dec. 1987).
- [12] D.P. Hand and P. St. J. Russell, “Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: The fiber fuse,” *Opt. Lett.*, vol.13, no.9, pp.767–769, Sept. 1988.
- [13] D.D. Davis, S.C. Mettler, and D.J. DiGiovani, “A comparative evaluation of fiber fuse models,” in *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1996*,

- ed. H.E. Bennett, A.H. Guenther, M.R. Kozlowski, B.E. Newnam, and M.J. Soileau, vol.2966, pp.592–606, SPIE Proc., May 1997. (Boulder, CO, USA, 7 Oct. 1996).
- [14] R.M. Atkins, P.G. Simpkins, and A.D. Yablon, “Track of a fiber fuse: A Rayleigh instability in optical waveguides,” *Opt. Lett.*, vol.28, no.12, pp.974–976, June 2003.
- [15] I.A. Bufetov and E.M. Dianov, “Optical discharge in optical fibers,” *Physics-Uspekhi*, vol.48, no.1, pp.91–94, Jan. 2005.
- [16] S. Todoroki, “Origin of periodic void formation during fiber fuse,” *Opt. Express*, vol.13, no.17, pp.6381–6389, Aug. 2005.
- [17] 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 Photonics Technol. Lett.*, vol.18, no.6, pp.752–754, March 2006.
- [18] M.M. Lee, J.M. Roth, T.G. Ulmer, and C.V. Cryan, “The fiber fuse phenomenon in polarization-maintaining fibers at 1.55 μm ,” *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, May 2006. (JWB66).
- [19] A.M. Rocha, M. Facão, and P.S. André, “Study of fiber fuse effect on different types of single mode optical fibers,” *NOC/OC&I 2010 Proc. 15th European Conference on Networks and Optical Communications and 5th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (ISBN: 9789729341939)*, ed. D. Faulkner, pp.71–75, Universidade do Algarve, Faro-Algarve, Portugal, June 2010. (Presented on June 10).
- [20] K.S. Abedin and M. Nakazawa, “Real time monitoring of a fiber fuse using an optical time-domain reflectometer,” *Opt. Express*, vol.18, no.20, pp.21315–21321, Sept. 2010.
- [21] 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.*, vol.32, no.6, pp.476–478, June 2002.
- [22] H. Takara, H. Masuda, H. Kanbara, Y. Abe, Y. Miyamoto, R. Nagase, T. Morioka, S. Matsuoka, M. Shimizu, and K. Hagimoto, “Evaluation of fiber fuse characteristics of hole-assisted fiber for high power optical transmission systems,” *Proc. 35th European Conference on Optical Communication*, p.312, Sept. 2009. (P1.12).
- [23] 首藤義人, “単一モード光ファイバにおけるファイバビューズの光パワーしきい値の検討,” *信学論 (B)*, vol.J95-B, no.1, pp.1–10, Jan. 2012.
- [24] S. Todoroki, “Animation of fiber fuse damage, demonstrating periodic void formation,” *Opt. Lett.*, vol.30, no.19, pp.2551–2553, Oct. 2005.
- [25] K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki, and H. Tsuchiya, “Fiber fuse phenomenon in hole-assisted fibers,” *Proc. 34th European Conference on Optical Communication*, vol.5, pp.27–28, Sept. 2008. (P.1.14).
- [26] N. Hanzawa, K. Kurokawa, K. Tsujikawa, T. Matsui, K. Nakajima, S. Tomita, and M. Tsubokawa, “Suppression of fiber fuse propagation in hole assisted fiber and photonic crystal fiber,” *J. Lightwave Technol.*, vol.28, no.15, pp.2115–2120, July 2010.
- [27] S. Todoroki, “Transient propagation mode of fiber fuse leaving no voids,” *Opt. Express*, vol.13, no.23, pp.9248–9256, Nov. 2005.

(平成 24 年 6 月 5 日受付, 10 月 22 日再受付)



轟 眞市 (正員)

1988 京大・工学。1990 同大学院工学研究科修士課程了。1993 同大学院工学研究科博士後期課程了。1993 日本電信電話(株)入社。1998 科学技術庁無機材質研究所入所。高強度光を伝搬する光ファイバにおける損傷現象の研究に従事。応用物理学会、及び日本セラミックス協会各会員。