空孔アシストファイバにおけるファイバヒューズ現象

光電子技術研究所　　竹永勝宏[1]・谷川庄二[1]・松尾昌一郎[2]・藤巻宗久[3]

Fiber Fuse Phenomenon in Hole-Assisted Fibers

K. Takenaga,　S. Tanigawa,　S. Matsuo,　and　M. Fujimaki

ネットワークトラフィックの増大に伴い，光ファイバ１本あたりの入射光量が増えていくことが予想されている．光ファイバへの入射光量が増えると，伝送路や光源に致命的なダメージをおよぼすファイバヒューズが発生する可能性が大きくなる．そこで当社では，ファイバヒューズ耐性を持つ可能性のある空孔アシストファイバ（HAF）のファイバヒューズの評価を行ったので，その結果を報告する．

In the near future, fibers will be used in optical communication systems under high-power conditions. However, under such conditions, fiber fuse will pose a real danger to the systems. If once the fiber fuse occurs, the core region of a fiber is destroyed catastrophically by optical discharge and the damage propagates along the fiber toward a light source. In this paper, we evaluate the threshold power of fiber fuse propagation in hole-assisted fibers (HAFs).

1．まえがき

ネットワークトラフィックの増大に伴い，伝送媒体である光ファイバのファイバ１本あたりの入射光量が今後増えていくと予想されている．光ファイバへの入射光量の増加に伴い生じる問題の１つとして，ファイバヒューズ[1)2)]という現象が知られている．ファイバヒューズは，ハイパワーの光（数W以上）が入射された光ファイバに1100 ℃以上の局所的な高温部が生じると，そこを起点として光ファイバの導波路破壊が発生する現象で，1980年代後半に知られるようになった[1) 2)]．光ファイバの材料である石英ガラスは，1100 ℃以上で熱誘起光吸収を生じ[3)]，高温部は入射光の光吸収体となり爆発的に温度が上昇して（数千℃）プラズマ状態となる．ファイバヒューズは，光ファイバ中をこのプラズマ状態となった発光が光源に向かって秒速１m程度のスピードで伝搬し，導波路が破壊されていくことになる[4)]．図１に，ファイバヒューズが伝搬しているファイバの写真を示した．明るく輝いている部分がプラズマ状態になった部分であり，その輝点は，光源に向かって伝搬する．図２には，ファイバヒューズが生じた後のファイバの側面写真を示した．ファイバ中心のコア部分に周期的なボイドが形成され，伝送路が破壊されているのがわかる．

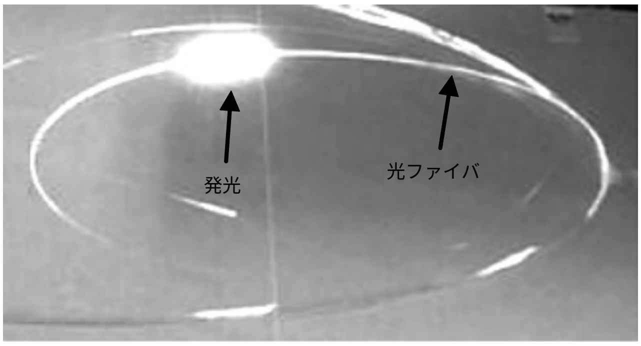


図１　ファイバヒューズ伝搬の様子
Fig. 1. Propagation of a fiber fuse.

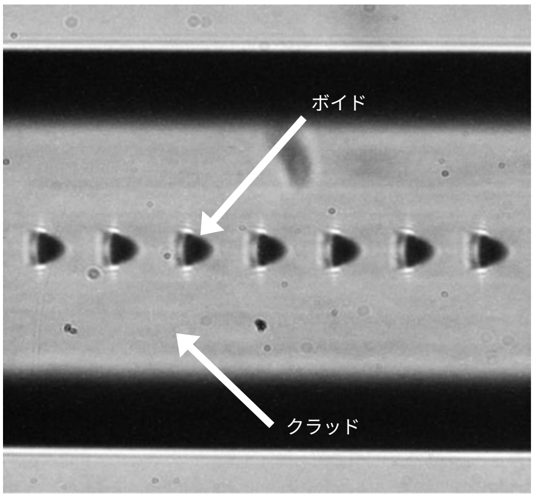


図２　ファイバフューズ発生後のファイバ側面図
Fig. 2. Side view of a fiber after fiber fuse.

1　光ファイバ技術研究部
2　光ファイバ技術研究部グループ長（博士（工学））
3　光ファイバ技術研究部長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説　明
ファイバヒューズ	Fiber Fuse	光ファイバにハイパワーの光を入射した状態で，光ファイバの一部が局所的に高温になると発生する現象．コアにボイドが形成され，伝送路の破壊を伴う
低曲げ損失ファイバ	Bend-Insensitive Fibers	曲げ損失の小さな光ファイバ
HAF	Hole-Assisted Fiber	空孔アシストファイバ 中心のコアの周りに空孔を配置した光ファイバ
トレンチ	Trench	光ファイバの中心コアの周りに設けられた屈折率の低い溝を示す．トレンチ構造を持つファイバは，曲げ損失が小さく低曲げ損失ファイバとして適用されている
MFD	Mode Field Diameter	光ファイバ中を伝搬するモードの電界分布の広がりを直径として表現したもの
C-SMF	Conventional Single-Mode Fiber	国際規格の ITU-T G652 互換のシングルモード光ファイバ
NZ-DSF	Non-Zero Dispersion Sifted Fiber	ノンゼロ分散シフトファイバ
DCF	Dispersion Compensating Fiber	分散補償ファイバ
PON	Passive Optical Network	電話局と加入者宅を結ぶ光ファイバ網において，1 本の光ファイバを途中で分岐させて複数の加入者宅へ引き込む技術

ファイバヒューズの原因となる局所的な温度上昇は，コネクタに付着した異物や局所微小曲げ等の様々な要因で偶発的に起こるため，その予測や制御は困難である．また，ファイバヒューズの伝搬は，一度生じると光源の光を止めるか弱めない限り進み続け，その伝搬に必要な最小の光量は，ファイバヒューズ伝搬しきい値とよばれる．一般的な伝送用ファイバでは伝搬しきい値は光ファイバのモードフィールド径（MFD）に比例するという報告がなされている[5,6]．また,空孔アシストファイバ（HAF）やフォトニック結晶ファイバ等の空孔を内在したファイバでは，ファイバヒューズ伝搬しきい値が一般的な全ガラス光ファイバより高い事例が報告されている[6,7]．

近年，施工性の向上等を目的として，曲げ損失を低減した光アクセス向けの光ファイバ（以下低曲げ損失ファイバ）の開発が旺盛である．低曲げ損失ファイバでは曲げ損失を低減するための様々な手法[8,9,10]が採用されており（図 3），その中には HAF[9]のようにクラッドの一部に空孔を持つ構造のものもある．光アクセス領域でも，PON の分岐数の拡大や映像配信等を考えると，光ファイバへの高パワー入力の可能性が高まると予想される．また，アクセス / 宅内領域では光ファイバが非常に小さい曲げ径で施工されることもありうることから，アクセス領域ではファイバヒューズの発生確率は相対的に高い可能性がある．従って，アクセス用光ファイバである低曲げ損失ファイバのファイバヒューズしきい値を把握することは重要である．特に，前述のとおり，空孔を内在したファイバではファイバヒューズ伝搬しきい値が一般的な全ガラス光ファイバより高いことが知られており，構造の異なるファイバのファイバヒューズ伝搬しきい値は，大きく異なる可能性がある．

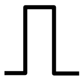
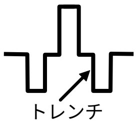
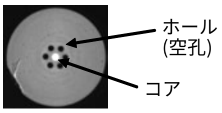
	全ガラス型		空孔型
	単峰 高Δ型	トレンチ型	HAF (Hole-Assisted Fiber)
屈折率 分布 / 断面			

図 3　各種低曲げ損失ファイバの構造模式図
Fig. 3. Illustration of various types of bend-insensitive fibers.

本検討では，低曲げ損失ファイバを中心として各種光ファイバのファイバヒューズ伝搬しきい値の評価を行った．その結果，HAF が空孔構造に依存したファイバヒューズ伝搬しきい値を示すことがわかった．そこで，HAF における特異なファイバヒューズ伝搬[11,12]を詳細に調査したので，その結果を報告する．

2．ファイバヒューズ伝搬実験

図 4 に，ファイバヒューズの伝搬の観察およびそのしきい値測定の実験系を示す[6]．光源として波長1550 nm の Er ドープファイバレーザ（EDFL，最大出力10 W）を使用した．供試ファイバの光源より遠端側に通常のシングルモードファイバ（C-SMF）を融着接続し，その

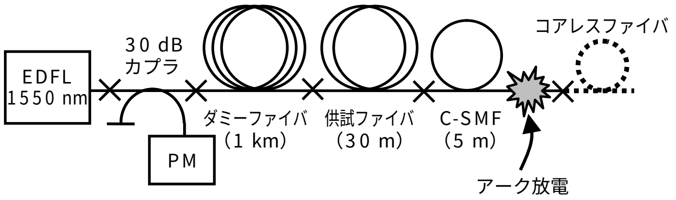


図4　ファイバヒューズ伝搬実験系
Fig. 4. Experimental setup of fiber fuse propagation.

C-SMF の一部をアーク放電で加熱してファイバヒューズを起こした．ファイバヒューズは，供試ファイバとC-SMF の融着接続点を通過して供試ファイバに伝搬する．本実験では，ファイバヒューズ伝搬後のコア付近の破壊の様子を側面から顕微鏡観察をするとともに，ファイバヒューズ伝搬しきい値を測定した．光源のパワーを徐々に落としていき，最終的にファイバヒューズが止まったパワーを伝搬しきい値とした．

低曲げ損失ファイバとさまざまな MFD を有する7種の全ガラス光ファイバ（C-SMF，NZ-DSF，DCF 等）に対して伝搬しきい値の評価を行った．低曲げ損失ファイバとして単峰高Δ型，トレンチ型[10]，HAF の3種類の異なる構造を有する光ファイバを用いた．トレンチ型と HAF に関しては，トレンチや空孔の位置を変えた複数のファイバで測定した．

3. 各種低曲げ損失ファイバのファイバヒューズ伝搬しきい値

図5に，測定した各ファイバのファイバヒューズ伝搬しきい値を，測定ファイバのモードフィールド径（MFD）と対比させた結果を示す．ほとんどの光ファイバに関しては，従来の報告[5]の通り，MFD と伝搬しきい値が比例する結果が得られた．しかしながら，HAF では，他のファイバと同じく MFD に比例するものがある一方で，非常に高い伝搬しきい値（4.3 W）を持つもの[13]もあった．また，図5には示していないが，10 W 程度の入射光ではファイバヒューズが伝播しない（C-SMF との接続点でヒューズの伝搬が止まってしまう）ファイバも存在した．

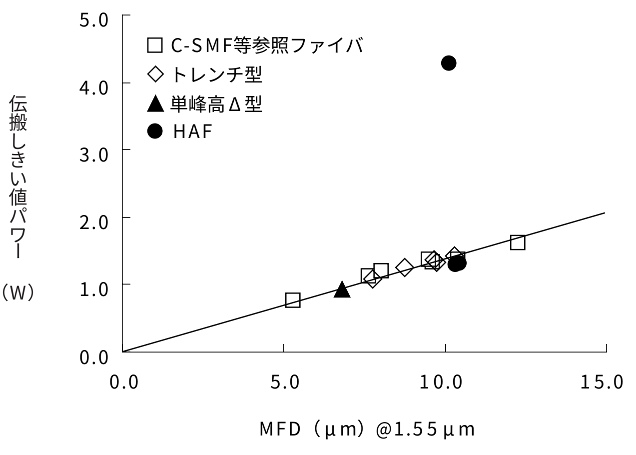


図5　MFD とファイバヒューズ伝搬しきい値
Fig. 5. Threshold powers of fiber fuse as a function of MFD.

以上の結果から，空孔を有する HAF は，他の構造の光ファイバと比較し高いファイバヒューズ耐性が得られる可能性があり，そのファイバヒューズ耐性は構造に依存することがわかった．

4. 空孔アシストファイバ（HAF）におけるファイバヒューズ伝搬

HAF のファイバヒューズ伝搬しきい値が構造により異なる原因を明らかにするために，ファイバ構造とファイバヒューズ伝搬しきい値の関係を評価した．本実験には，図6に示すような，空孔位置の異なる2種類の

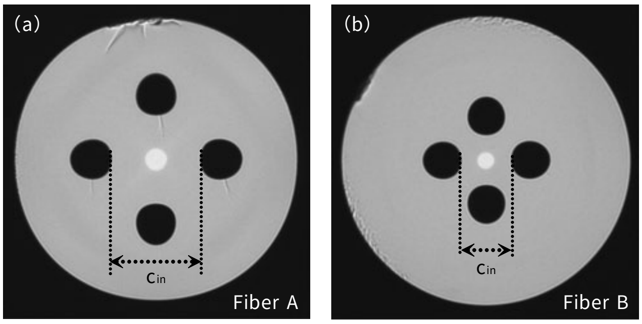


図6　HAF 断面（a）Fiber A，（b）Fiber B
Fig. 6. Cross sections of HAFs : (a) Fiber A. (b) Fiber B.

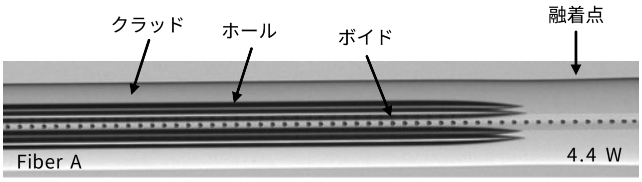


図7　ファイバヒューズ伝搬後の
C-SMF と Fiber A の融着点付近の側面写真
Fig. 7. Side view at splice point of C-SMF and Fiber A
after fiber fuse propagation.

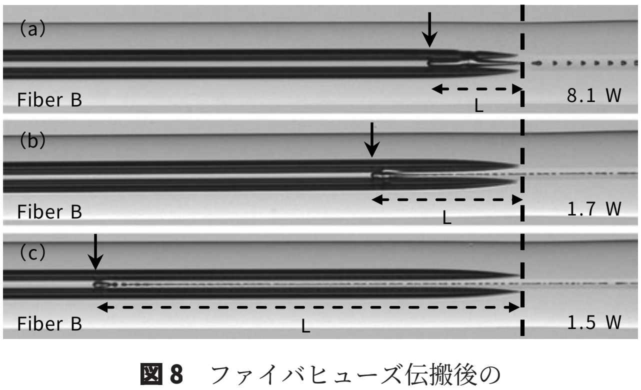


図8　ファイバヒューズ伝搬後の
C-SMF と Fiber B の融着点付近の側面写真
Fig. 8. Side views at splice point of C-SMF and Fiber B
after fiber fuse propagation.

HAF を用いた．Fiber A，B の外径は125 μm で，図中に示した空孔の内接円径 c_{in} はそれぞれ，38.7 μm，21.2 μm であった．また，波長1550 nm での MFD はそれぞれ, 10.8 μm, 10.4 μm で, C-SMF とほぼ同じ値であった．図４に示す実験系を用い，ファイバヒューズが被測定ファイバを伝搬する様子を観察した. Fiber A では, ファイバヒューズ伝搬しきい値は1.5 W で C-SMF とほぼ同じであった．ファイバヒューズ伝搬実験後（4.4 W 入射時）の C-SMF と Fiber A の融着接続点付近の側面写真を図７に示す．ファイバヒューズが Fiber A を伝搬した軌跡である周期的なボイドが確認された．また，Fiber B に入射するパワーを1.5 W ～8.1 W まで振った実験を行った．8.1 W，1.7 W，1.5 W での融着点付近の側面写真を図８（a),（b),（c)にそれぞれ示す．図中の矢印は，ファイバヒューズの止まった位置を示し，空孔の始まる位置（点線）から停止位置までのファイバヒューズが Fiber B に侵入した距離を L として示した．8.1 W では ファイバヒューズが Fiber B に侵入してすぐに止まり, 1.7 W, 1.5 W では, ある距離 Fiber B に侵入して止まった．特に1.5 W では長く侵入して停止した．図９にファイバヒューズが Fiber B に侵入した距離（L）の入射パワー依存性を示した．これを見ると，入射パワー 1.5 W で急激に侵入する距離が長くなっていることが分かる．この結果は，非常に興味深い結果で，入射パワーを上げた方が，破壊が進み Fiber B への侵入距離が長くなるとも考えられるが，実際は入射パワーを下げると Fiber B への侵入距離が伸びている．

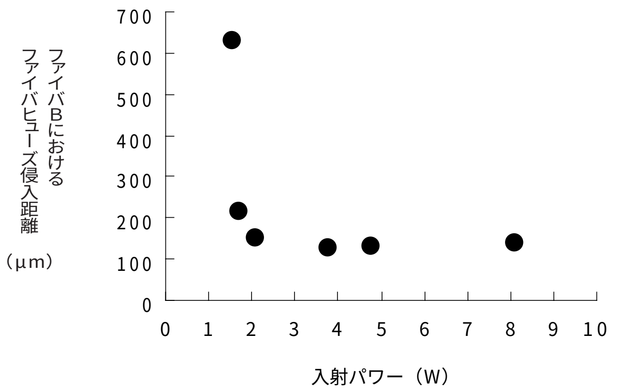


図９　ファイバヒューズ侵入距離の入射パワー依存性
Fig. 9. Penetrated length (L) of HAFs as a function of input power.

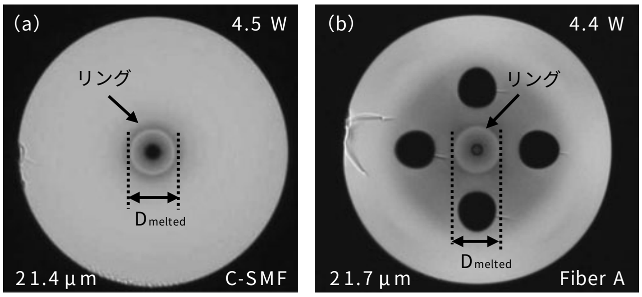


図 10　ファイバヒューズ伝搬後の（a）C-SMF 断面,（b）Fiber A 断面
Fig. 10. Cross sections of the fibers after fiber fuse propagation: (a) C-SMF. (b) Fiber A.

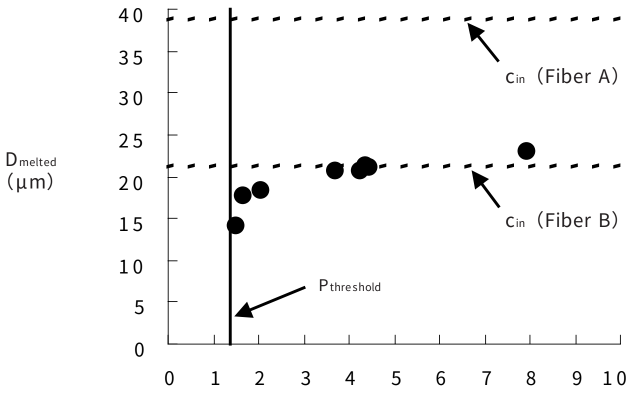


図 11　D_{melted} の入射パワー依存性
Fig. 11. D_{melted} as a function of input power.

ファイバヒューズが Fiber B へ侵入する距離の入射パワー依存性について調べるため，ファイバヒューズ伝搬後の C-SMF と Fiber A の断面を観察した．入射パワー 4.5 W 時の C-SMF の断面を図 10 (a)，入射パワー 4.4 W 時の Fiber A の断面を図 10 (b）に示した．ファイバヒューズによって一度溶けたような痕跡がリングとして，それぞれのファイバに見られる．このリングの直径 D_{melted} を測定したところ，C-SMF，Fiber A でそれぞれ 21.4 μm，21.7 μm とほぼ同じ径であった．C-SMF における D_{melted} の入射パワー依存性を図 11 に示す．図には Fiber A，B の空孔の内接円径 c_{in} と C-SMF のファイバヒューズが止まるしきい値（1.4 W）をそれぞれ点線と実線で示した．図 11 より，入射パワーがしきい値付近まで低下すると，D_{melted} が急激に小さくなることが分かる．さらに，Fiber A のように $D_{melted} \ll c_{in}$ であるとファイバヒューズが HAF 中を伝搬し，Fiber B のように $D_{melted} \geq c_{in}$ であると停止し，$D_{melted} < c_{in}$ では両者の径の差が大きくなるに従って，侵入距離が長くなったと考えられる．このように，ファイバヒューズによって，溶かされる領域の径 D_{melted} と内接円径 c_{in} の大小関係が，ファイバヒューズ伝搬に大きく影響することが分かった．また，ファイバヒューズを停止させるためには，c_{in} を概ね MFD の２倍程度以下（約 20 μm 以下）とする必要があると考えられる．以上の結果から，HAF は空孔位置を最適化することで，ファイバヒューズ耐性の高い伝送用ファイバとなると考えられる．

5. む す び

各種低曲げ損失ファイバのファイバヒューズ伝搬しきい値を測定して HAF との比較を行った．概ね MFD に比例するファイバヒューズ伝搬しきい値が得られたが,

空孔を内在するHAFにおいては高いファイバヒューズ伝搬しきい値を持つものが存在した．HAFの空孔位置とファイバヒューズ伝搬しきい値の関係を調べ，空孔内接円径がMFDのおよそ2倍以下（約20 μm以下）からHAFに特異な高いファイバヒューズ伝搬しきい値が現れることを確認した．本実験よりHAFは，構造を最適化することでファイバヒューズ耐性の高い伝送用ファイバとなると考えられる．将来の伝送容量の拡大（入射光量の拡大）を見越すと，HAFは低曲げ損失ファイバとしてだけでなく，次世代伝送ファイバとして有用である．

参 考 文 献

1） R. Kashyap, K. J. Blow :“ Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres ”, Electron. Lett., Vol. 24, No. 1, pp.47-49, 1988

2） D. P. Hand, P. S. J. Russell :“ Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse ”, Opt. Lett., Vol. 13, No. 9, pp.767-769, 1988

3） R. Kashyap, A. Sayles, G. F. Cornwell :“ Heat flow modeling and visualization of catastrophic self-propagating damage in single mode optical fibers at low powers ”, Proc. SPIE, Vol. 2966, pp. 586 – 591, June 1996

4） Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, R. Nagase :“ Simulation of fiber fuse phenomenon in single-mode optical fibers ”, J. Lightwave Technol., Vol. 21, No. 11, pp.2511-2517, 2003

5） N. Nishimura, K. Seo, M. Shiino, R. Yuguchi :“ Study of high-power endurance characteristics in optical fiber link ”, in Technical Digest of Optical Amplifiers and Their Applications（OAA 2003）, TuC 4, 2003

6） K. Takenaga, S. Omori, R. Goto, S. Tanigawa, S. Matsuo, K. Himeno :“ Evaluation of high-power endurance of bend-insensitive fibers ”, in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference（OFC 2008）, JWA11, San Diego, February 2008

7） E. M. Dianov, I. A. Bufetov, A. A. Frolov, Y. K. Chamorovsky, G. A. Ivanov, I. L. Vorobjev :“ Fiber fuse effect in microstructured fibers ”, Photon. Technol. Lett., Vol. 16, No. 1, pp.180-181, 2004

8） 寺沢良明 , 秋吉俊男 , 花塚真也 , 常石克之 , 上田知彦 , 柿井俊昭 , 石川弘樹 , 坂部至 , 石川真二 , 赤坂信宏 :「小径曲げ対応型アクセス用シングルモード光ファイバ」, SEIテクニカルレビュー , 第163号 , pp.1-4, 2003

9） K. Nakajima, K. Hogari, J. Zhou, K. Tajima, I. Sankawa :“ Hole-assisted fiber design for small bending and splice losses ”, Photon. Technol. Lett., Vol. 15, No. 12, pp.1737-1739, 2003

10） S. Matsuo, M. Ikeda, K. Himeno :“ Bend-Insensitive and Low-Splice-Loss Optical Fiber for Indoor Wiring in FTTH ”, in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference（OFC 2004）, ThI 3, Los Angeles, February 2004

11） K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki, H. Tsuchiya :“ Fiber Fuse Phenomenon in Hole-Assisted Fibers ”, in Proceedings of European Conference on Optical Communication（ECOC 2008）, P.1.14, Belgium, September 2008

12） 竹永勝宏 , 谷川庄二 , 松尾昌一郎 , 藤巻宗久 :「Hole-Assisted Fiberにおけるファイバヒューズ現象」, 2009年電子情報通信学会総合大会 , B-10-23, p.342, March 2009

13） 谷川庄二 , 竹永勝宏 , 松尾昌一郎 :「各種低曲げ損失ファイバのファイバヒューズの評価」, 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会 , BS-7-4, pp.S36-S37, September 2009