

光ファイバ通信の高入力化に向けた光ファイバの検討

黒河 賢二^{†a)}

Optical Fiber for High-Power Optical Communication

Kenji KUROKAWA^{†a)}

あらまし トラフィックの指数関数的増大に伴う光ファイバ内パワーの増大により、ファイバヒューズ及び曲げ部損傷という二つの深刻な問題の発生が懸念される。この二つの問題への対処に適した光ファイバの検討を行った。ファイバヒューズに関しては、ホールアシストファイバ (HAF) やフォトニック結晶ファイバ (PCF) のファイバヒューズ伝搬しきい値が 20 W 以上であり、従来型 SMF に比べ約 15 倍以上高いことを明らかにした。更に、HAF や PCF におけるファイバヒューズの伝搬停止を高速カメラにて観測し、空孔に起因した停止機構を明らかにした。曲げ部損傷に関しては、これまで報告されてきた曲げ部損傷の危険性について紹介するとともに、ファイバヒューズが発生する危険性について言及した。そして、曲げ部損傷への対策として、HAF や PCF を含む低曲げ損失光ファイバを用い、更に、曲げ部損傷に対し高い耐性を有するポリマー被覆を用いればよいことを述べた。以上の検討の結果、光ファイバ通信の高入力化において空孔を有する HAF や PCF が大変魅力的であることが分かった。

キーワード ファイバヒューズ, ハイパワー, フォトニック結晶ファイバ, ホールアシストファイバ

1. ま え が き

ブロードバンドサービスの進展によるインターネットトラフィックの爆発的増加が予測されることから、今後光ファイバ内の光パワーは益々増加すると考えられる。光パワーの増大に伴い発生が懸念される深刻な問題の代表例としてファイバヒューズ [1], [2] と曲げ損失に起因した曲げ部での損傷 [3] が挙げられる。

ファイバヒューズは、ファイバコアにおける局所的な温度上昇を起因として高輝度な光を放つ高温流体が発生し、光ファイバ内を光源側に向かって伝搬していく現象であり、これまでに多くの実験及び理論的報告がなされている [4]~[19]。伝搬後のコアではボイド等の形成による恒久的破壊が起これ、光が伝搬できなくなるという致命的な問題が発生する。このファイバヒューズの伝搬しきい値 (ファイバヒューズ伝搬を維持する最低パワー) は、従来型の単一モードファイバである SMF や分散シフトファイバ (DSF)

において波長 1550 nm で約 1.2~1.4 W と報告されており [15]、比較的低いパワーで問題が発生する。したがって、ファイバヒューズによって、大容量伝送における光ファイバへの入力パワーが制限される可能性が高い [20]。一方、最近フォトニック結晶ファイバ (Photonic crystal fiber (PCF)) やホールアシストファイバ (Hole-assisted fiber (HAF)) など空孔を有するファイバのファイバヒューズ伝搬しきい値が高いという報告 [7], [16], [18] がなされている。PCF は、従来の単一モードファイバでは実現できない広波長域単一モード特性等を有することから、将来の超大容量伝送用ファイバとしても注目され、これまでフォトニック結晶ファイバを用いた多くの伝送実験報告がなされてきた [21]。また、HAF は低曲げ損失ファイバとして注目されている [22]。

一方、曲げ部での損傷は、作業中のアクシデント等により強い曲げが加わった場合、光ファイバコアから漏れた光が光ファイバ被覆に吸収されることによって発熱し、曲げ部が損傷するというものである [3], [23]~[33]。高入力光下での深刻な曲げ部損傷として 2 種類あることが報告されている。それらは Sikora らによりレジーム 1 (R1) 並びにレジーム 2 (R2) と名づけられている [24]。R1 では、被覆が燃焼し、ガラスの

[†] 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所, つくば市

NTT Access Network Service Systems Laboratories, NTT Corporation, 1-7-1 Hanabatake, Tsukuba-shi, 305-0805 Japan

a) E-mail: kurokawa.kenji@lab.ntt.co.jp

温度が約 1100°C 以上の高温に達するため、ガラスが変形し伝搬光が遮断されてしまうという深刻な損傷が起きる。R2 では、R1 までの高温には達しないため、ファイバ被覆のみが損傷を受ける。すなわち、曲げ部のファイバ被覆が燃焼あるいは気化により消失するが、ガラスの変形は起こらず、わずかな伝送損失増が観測される。このように高入力光下では、曲げ損失に起因してファイバ被覆、更にはファイバ自体が損傷し光が遮断されてしまうという大きな問題が発生する危険性がある。

本論文では、まず、HAF 並びに PCF のファイバヒューズ耐性の高さについて報告する。これまで通信波長帯において HAF 並びに PCF の伝搬しきい値が十数 W 以上であることを報告してきたが、今回、より高い入力パワーにて伝搬特性を調べた。その結果、HAF 並びに PCF はファイバヒューズ伝搬しきい値が 20 W 以上になり、従来型の SMF より伝搬しきい値が一けた以上高くなることが分かった。次に、曲げ部損傷の危険性について紹介するとともに、高入力光下での曲げ部損傷に対する対策方法について言及し、曲げ損失が極めて小さい PCF 及び HAF は曲げ部損傷対策用ファイバとして大変有用であることを述べる。

以上のファイバヒューズ耐性並びに曲げ部損傷についての検討結果より、PCF 並びに HAF が光ファイバ通信の高入力光化に向けて大変魅力的であることが分かった。

2. ホールアシストファイバ (HAF) 及びフォトニック結晶ファイバ (PCF) のファイバヒューズ耐性

2.1 ファイバパラメータと実験系

図 1 に (a) HAF 並びに (b) PCF の断面図を示す。実験に用いた HAF は、6 孔の HAF で、空孔の内接円直径 (c) 及び空孔直径 (d) がそれぞれ 17.1 及び 4.6 μm であった。また、コア径は 9 μm であり、波長 1480 nm におけるモードフィールド径 (MFD) は 9.8 μm であった。また、曲げ損失は、波長 1600 nm において曲げ直径 20 mm の場合、約 0.4 dB/巻であった。一方、PCF は、空孔直径 (d) 及び空孔間隔 (Λ) がそれぞれ 3.1 及び 5.7 μm であり、空孔直径と空孔間隔の比 d/Λ が 0.54 であった。波長 1480 nm における MFD は 5.7 μm であり、空孔数は 60 であった。また、曲げ損失は、波長 1480 nm において曲げ直径 10 mm の場合、0.01 dB/巻以下であった。

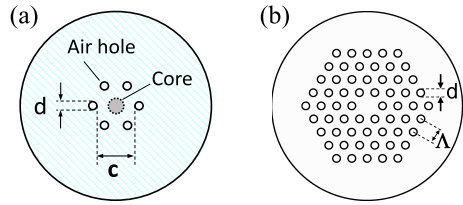


図 1 (a) HAF と (b) PCF の断面図
Fig. 1 Cross-sections of (a) PCF and (b) HAF.

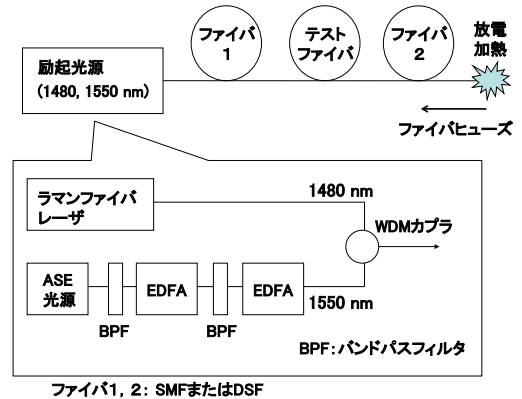


図 2 実験系
Fig. 2 Experimental setup.

図 2 に HAF 並びに PCF におけるファイバヒューズ伝搬特性を測定した実験系を示す。出力が 20 W を超える高出力光源として波長 1480 nm と 1550 nm の 2 波長の高出力光を合波したものをを用いた。波長 1480 nm の光源には、ラマンファイバレーザからの CW 光を用いた。一方、波長 1550 nm の高出力 CW 光は、ASE 光源、半値幅 3 nm の帯域フィルタ、そして高出力エルビウム光ファイバ増幅器 (EDFA) を用いて発生した。2 波長の高出力光は WDM カプラにより合波し、ファイバ 1 を経由してテストファイバに入射した。ファイバヒューズの発生は、ファイバ 2 の出力端において放電過熱により行った。ファイバ 1 及びファイバ 2 については、MFD 整合の観点からテストファイバが HAF の場合は SMF を用い、PCF の場合は DSF を用いた。また、テストファイバとファイバ 2 との接続点近傍でファイバヒューズが停止する様子を高速カメラで観測した。

2.2 実験結果と考察

HAF におけるファイバヒューズ伝搬特性は、HAF の空孔内接円直径 (c) とファイバヒューズ伝搬後に生成されるガラス溶融領域の直径 (D_{melted}) との関係性

に依存することが分かっている [16], [18]. ガラス熔融領域直径 D_{melted} はファイバヒューズの大きさとほぼ等しい. c が D_{melted} より十分大きい場合には, HAF におけるファイバヒューズは, SMF の場合と同様に伝搬する. 一方, c が D_{melted} より十分小さい場合には, ファイバヒューズの伝搬は観測されなかった. 例えば, 本実験に用いた HAF では, 入力パワーが 15.6 W においてもファイバヒューズの伝搬は観測されなかった [18]. 今回, 20 W 以上という更に高い入力パワーでファイバヒューズ伝搬の有無を調べた.

図 3 に, HAF と SMF の接続点近傍においてファイバヒューズが停止し消滅していく様子を高速カメラで観測した写真を示す. 入力パワーは 21.9 W であり, 露光時間は $2.3 \mu\text{s}$ であった. 図 3(a) から (d) までは 0.1 ms 間隔で撮影したものであり, 図 3(e) は (d) から 0.3 ms 後に撮影されたものである. まず, 図 3(a), (b) に示すように, 右側よりファイバヒューズが接続点に向かって SMF を伝搬してくる. HAF との接続点に到達するとファイバヒューズの先端部分が形を変え始め, 図 3(c) に示すように, ファイバヒューズの先端部分に角が生えたような形に変化した. それから 0.1 ms 後の図 3(d) では, ファイバヒューズが小さくなり消滅しかかっている様子が分かる. その 0.3 ms 後には, 図 3(e) に示すように, 矢印で示す位置でファイバヒューズは完全に停止し消滅した. 接続点からの停止位置までの侵入長は $370 \mu\text{m}$ であった. こうして入力パワー 21.9 W においてもファイバヒューズの伝

搬が SMF との接続点にて停止することが分かった. 本実験に用いた HAF の伝搬しきい値は 15.6 W 以上であることが分かっているので, 本実験結果より, この HAF の伝搬しきい値が 21.9 W 以上であると考えられる. 波長 1550 nm における従来型の SMF の伝搬しきい値が 1.35 W であるので, 本 HAF のファイバヒューズ伝搬しきい値は SMF の 16 倍以上になることが分かった.

ここで, HAF におけるファイバヒューズの伝搬停止のメカニズムについて考える [34]. 図 4 にファイバヒューズの伝搬停止の様子をより高い時間分解能で撮影した写真を示す. このとき, 入力パワーは 12 W であり, 露光時間は $1.0 \mu\text{s}$ であった. 接続点に向かって SMF を伝搬してきたファイバヒューズが HAF との接続点に到達すると, 図 4(a) に示すようにファイバヒューズの先端部分の形が変形し始める. 図 4(a) の左側に HAF の断面図を配置し, 高速カメラ写真の HAF 部分における空孔のおおよその位置を示す. 図 4(a) から $4.8 \mu\text{s}$ 後の図 4(b) では, ファイバヒューズの先端部分は角が生えたような形に変形し, 更に $4.8 \mu\text{s}$ 後の図 4(c) では, その角のような部分がほぼ消滅していることが分かる. ファイバヒューズは高温流体である [2], [13] ことから, 図 4(b) で観測されたファイバヒューズ先端部分の角のような形状は, HAF の空孔への高温流体の噴出を示していると考えられる. 図 4(c) から $43 \mu\text{s}$ 後の図 4(d) では, ファイバヒューズは小

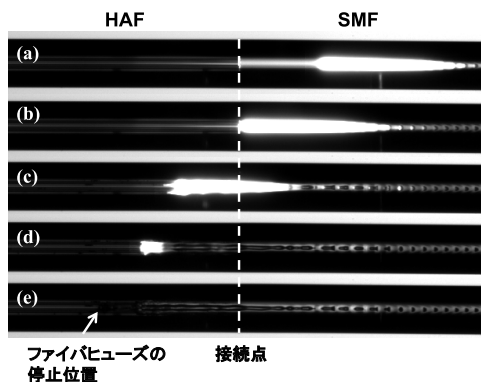


図 3 HAF と SMF の接続点近傍でファイバヒューズが停止する様子 (0.1 ms 間隔. ただし, (d)-(e) は 0.3 ms 間隔. 入力パワーは 21.9 W)

Fig. 3 Fiber fuse termination near the splice point between HAF and SMF (Input power: 21.9 W).

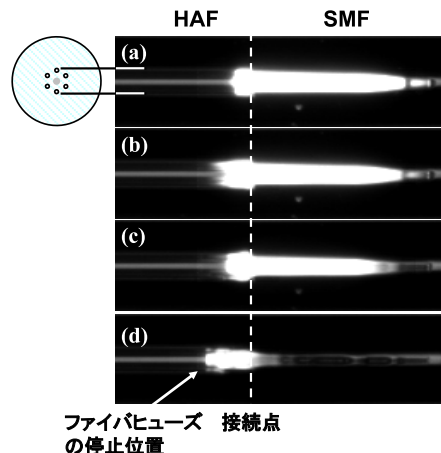


図 4 HAF と SMF の接続点近傍でファイバヒューズが停止する様子 ($4.8 \mu\text{s}$ 間隔. ただし, (c)-(d) は $43 \mu\text{s}$ 間隔. 入力パワーは 12 W)

Fig. 4 Fiber fuse termination near the splice point between HAF and SMF (Input power: 12 W).

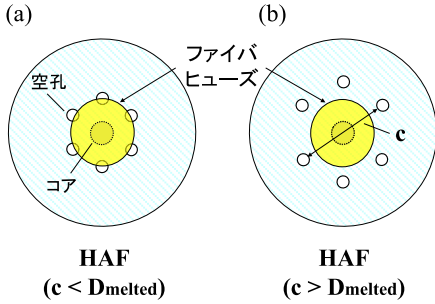


図 5 HAF における空孔位置とファイバヒューズの大きさとの関係

Fig. 5 Relationship between c and diameter of fiber fuse (D_{melted}) in HAF.

さくなり消滅しかかっている。実際、その後、図 4(d)の矢印で示した位置でファイバヒューズ先端は停止し、ファイバヒューズは消滅した。

以上のことより、HAF におけるファイバヒューズの伝搬停止メカニズムは次のように説明できると考えられる。まず、入力パワー 12 W における SMF における D_{melted} は $22.6 \mu\text{m}$ であり、これは本 HAF の c の値である $17.1 \mu\text{m}$ よりもずっと大きい。したがって、SMF を伝搬してきたファイバヒューズの高温流体は、図 5(a) に示すように、HAF に侵入するとすぐ空孔に到達する。と同時に、空孔内へ噴出する。この噴出に伴い、高温流体の圧力と温度の急速な低下が起これ、ファイバヒューズの伝搬が停止してしまうと考えられる。一方、図 5(b) に示すように、 c が D_{melted} より十分大きい場合には、ファイバヒューズの高温流体は空孔には到達せず、空孔への噴出は起これない。したがって、 c が D_{melted} より十分大きい場合には、HAF においてもファイバヒューズの伝搬停止は起これず、これまでの実験で観測されたように SMF の場合と同様に伝搬すると考えられる。

次に、PCF のファイバヒューズ耐性について述べる。これまで、通信波長帯における PCF のファイバヒューズ伝搬しきい値が 14.3 W 以上であることを報告してきたが、今回、20 W という更に高い入力パワーでファイバヒューズ伝搬の有無を調べた。

図 6 に、PCF と DSF の接続点近傍においてファイバヒューズが停止し消滅していく様子を高速カメラで観測した写真を示す。入力パワーは 20.2 W であり、露光時間は $2.3 \mu\text{s}$ であった。図 6(a) から (c) は $70 \mu\text{s}$ 間隔で撮影したものである。また、PCF とのモードフィールド径の整合性を図るために、図 2 における

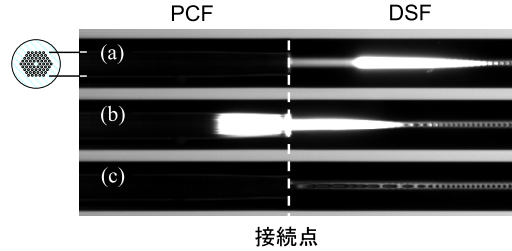


図 6 PCF と DSF の接続点近傍でファイバヒューズが停止する様子 ($70 \mu\text{s}$ 間隔、入力パワーは 20.2 W)

Fig. 6 Fiber fuse termination near the splice point between PCF and DSF (Input power: 20.2 W).

ファイバ 1, 2 として DSF を用いた。図 6(a) に示すように、放電加熱により発生したファイバヒューズが右方向より DSF を伝搬してくる。そして、PCF と DSF の接続点に到達するとほぼ同時に、図 6(b) に示すように激しい噴出が生じた。それから $70 \mu\text{s}$ 後には、図 6(c) に示すようにファイバヒューズが消滅していることが分かる。すなわち、PCF の場合にも HAF と同様に、空孔へ的高温流体の噴出によりファイバヒューズが伝搬を停止し、消滅することが分かった。また、図 6(b) では PCF の空孔全体から発光し、一見、空孔全体が噴出に寄与しているかのように錯覚してしまうが、ファイバヒューズの大きさから、噴出に関与しているのは第 2 層の空孔までと推測され、その外側の空孔が光っているのは、噴出部分から発せられる光が外側の空孔により散乱されたためと考えられる [18]。本実験により、入力パワー 20.2 W においてもファイバヒューズが PCF を伝搬できないことが分かったので、通信波長帯における PCF の伝搬しきい値は 20.2 W 以上になると考えることができる。波長 1550 nm における従来型の SMF の伝搬しきい値が 1.35 W であるので、本 PCF のファイバヒューズ伝搬しきい値は SMF の約 15 倍以上になることが分かった。

HAF 並びに PCF を用いたファイバヒューズ伝搬に関する以上の実験結果より、HAF 並びに PCF の通信波長帯におけるファイバヒューズの伝搬しきい値は 20 W 以上とすることが分かった。この値は SMF の伝搬しきい値の約 15 倍以上であり、従来型ファイバにおいてモードフィールド径を拡大することにより伝搬しきい値を高めるという方式では実現不可能な値であると考えられる。これは、HAF や PCF におけるファイバヒューズ伝搬の停止が、空孔へ的高温流体の噴出という空孔を有するファイバ特有の理由によって引き

起こされるためであると考えられる。なお、空孔コア型フォトニックバンドギャップファイバも非常に高いファイバヒューズ耐性が期待されるが、伝送路として用いるためにはいっそうの低損失化が望まれる。

3. 曲げ部における損傷

3.1 SMF における曲げ部損傷とファイバヒューズ発生

曲げ部での損傷は、作業中のアクシデント等により強い曲げが加わった場合、光ファイバコアから漏れた光が光ファイバ被覆に吸収されることによって発熱し、曲げ部が損傷するというものである。図7には、曲げ損失による漏れ光を被覆が吸収し、発熱により被覆が酸化し変色を起こした様子を示している。

図7の状態が更に進むと、入力パワーの大きさや曲げの強さに依存してレジーム1 (R1) やレジーム

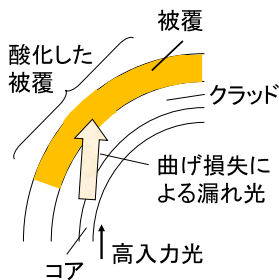


図7 曲げ損失による被覆の酸化

Fig. 7 Bending loss induced oxidization of coating.

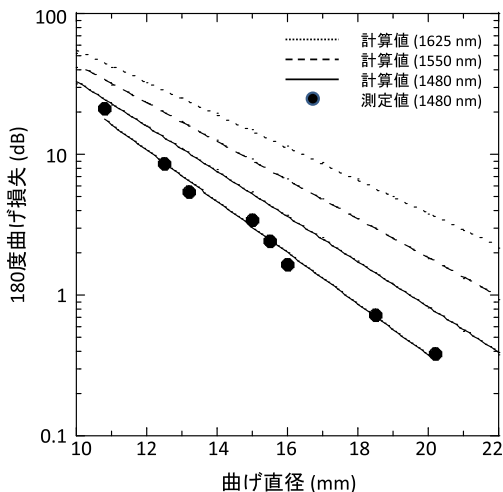


図8 SMF における曲げ損失特性

Fig. 8 Bending-loss in SMF.

2 (R2) の損傷が発生する [24]. 以下に、透明被覆の従来型 SMF における曲げ損傷例を示す。図8に、実験に用いた SMF の曲げ損失特性を示す。黒丸は、波長 1480 nm における 180 度曲げ損失の測定結果を示す。また、実線、破線、点線は、それぞれ波長 1480, 1550, 1625 nm において、実験に用いた SMF のファイバパラメータから計算により求めた曲げ損失特性を示している。

図9に SMF における R1 損傷の例を示す。180 度曲げにより曲げ損失を与え、曲げ直径は 11 mm であった。入力パワーは、入力波長 1480 nm で得られる最大パワーである 9 W を用いた。入力光源にはラマンファイバレーザを用いた。入力開始後、約 24 分で透明被覆に着色 (きつね色) が始まり、その後被覆の酸化が進み黒く変色した。やがて、入力開始から 91 分後に、図9(a) に示すように着火が起きた。着火部分の周りの被覆は酸化により黒く変色しているのが分かる。そして、着火とほぼ同時にファイバの変形が起こり、図9(b) に示すように、ファイバが 180 度に折れ曲がり、被覆が燃焼した。これは Sikora の報告 [24] にあるように、ガラスの温度が高温に達するためガラスが軟化し、軟化した部分が曲げに起因した応力によって変形したものと考えられる。この損傷により伝搬光が完全に遮断されるばかりでなく、図9(b) に示すよ

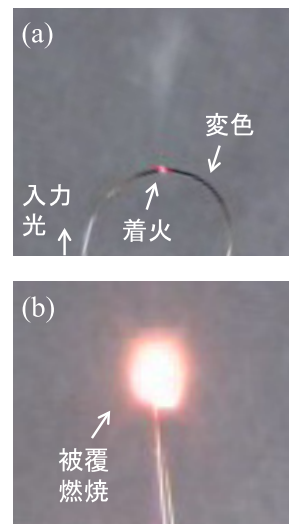


図9 SMF における曲げによる R1 損傷例 (曲げ直径 11 mm, 入力パワー 9 W, 波長 1480 nm)

Fig.9 Example of R1 failure in SMF at bend diameter of 11 mm. Input power was 9 W at 1480 nm.

うに被覆の燃焼を伴うので、延焼の可能性があり大変危険であることが分かる。曲げ直径を 20 mm にした場合には、約 33 時間後に R2 損傷が観測された。この場合には、被覆が酸化により黒く変色した後、更に黒く変色した被覆の一部が気化してなくなり、ガラスの露出が起きた。しかし、図 9 に示したようなガラスの変形は生じなかった。R2 損傷の場合、ガラスの変形は生じないものの被覆の一部がなくなってしまうため、光ファイバの信頼性が低下する。更に、被覆の損傷に際し被覆が燃焼することもあるので危険である。入力パワーが 9 W の場合、R1 損傷と R2 損傷の境界を与える曲げ直径は 16~17 mm であった。

次に、R1 損傷の領域においてファイバヒューズ発生が観測された例を図 10 に示す。図 10 はビデオカメラで撮影されたものである。入力パワーは 9 W で曲げ直径は 13 mm であった。入力開始から約 2 時間後に、図 10 (a) に示すように着火し、着火後 1/6 秒後に図 10 (b) に示すようにガラスの変形が起きた。図 10 (b) における明るい光の線は、ガラスの変形に伴う着火部分の急激な位置変化の残像を表している。図 10 (c) に示すように、図 10 (b) のガラス変形から 1/30 秒後にファイバヒューズが発生し、光源に向かって伝搬した。その後、図 10 (d) に示すように、180 度に折れ曲がったファイバ部分で被覆が燃焼した。このように R1 損傷のある条件下では曲げ部損傷を起因としてファイバヒューズが発生することが分かった。その場合、曲げ部の損傷のみならず、ファイバヒューズ

の伝搬により光源までの光ファイバも損傷してしまうため、曲げ部損傷は光伝送システムに深刻な損傷を与え得ることが分かる。R1 損傷においてファイバヒューズが発生する条件については、今後明らかにしていきたい。

3.2 曲げ部損傷への対策

曲げ部損傷に対する対策としては、大きく分けて次の二つが提案されている。一つは、曲げに起因した漏れ光による被覆の損傷を抑えるために被覆等に工夫を加える方法であり、もう一つは、曲げ部損傷のそもそもの原因である曲げによるコアからの漏れ光量を抑えるため、曲げ損失の小さいファイバを利用するというものである。

これまでに、被覆材の違いにより曲げ部での温度上昇が異なることが報告されている [25], [35]。曲げ部損傷への対策として被覆等に工夫を加える方法については、大きく二つに分けることができる。一つは、クラッドよりも屈折率の低いポリマー被覆を用いることにより曲げによる漏れ光をできるだけクラッド部にとどめておくという方法である [27]。これは、屈折率のより低い第 2 クラッドを新たに付与する方法を用いても実現できる [28]。もう一つの方法は、曲げ部損傷に対して高い耐性を有する被覆を用いるというものである。波長 2140 nm での医学応用を目的に、この波長での吸収係数を下げ、より材質の均一性を高めたポリマー被覆が開発されている。この被覆はクラッドよりも屈折率が低く設計されており、曲げ部損傷に対して非常に高い耐性を有することが報告されている [30]。

次に、曲げ損失の小さいファイバの利用 [15] について述べる。これまでに開発されてきた曲げ損失を低減できるファイバとしては、HAF [22]、PCF [36], [37]、トレンチ型ファイバ [38]、そして、ナノ構造型ファイバ [39] などが挙げられる。近年の FTTx の進展に伴い、曲げ損失特性を改善した低曲げ損失光ファイバの開発と標準化が進み、ITU-T において 5 mm の最小曲げ半径を含むアクセスネットワーク用低曲げ損失 SMF の勧告が発行されている [40]。

以上より、曲げ部損傷の対策としては、上記のような低曲げ損失光ファイバに、曲げ部損傷に対する耐性の高い被覆を施した光ファイバを用いればよいことが分かる。

4. む す び

今後予想される光ファイバ内パワーの増大に際し、

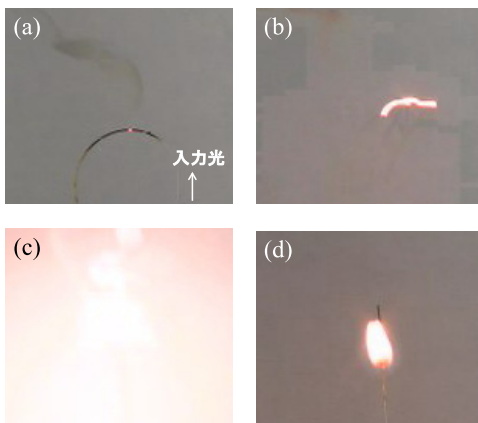


図 10 曲げ部損傷に起因したファイバヒューズ発生 (曲げ直径 13 mm, 入力パワー 9 W)

Fig. 10 Fiber fuse generation in bent SMF. (bend diameter: 13 mm. Input power: 9 W)

発生が懸念される深刻な問題であるファイバヒューズと曲げ部損傷の問題を取り上げ、これらの問題に対処するために有望と考えられる光ファイバについて検討した。ファイバヒューズに関しては、HAFやPCFのファイバヒューズ伝搬しきい値が従来型SMFに比べ約15倍以上高くなることを明らかにした。更に、HAFやPCFにおいてファイバヒューズが伝搬を停止する様子を高速カメラにて観測し、空孔に起因した停止機構を明らかにした。

曲げ部損傷に関しては、これまで報告されてきた曲げ部損傷の危険性について紹介し、更に、曲げ部損傷においてファイバヒューズが発生する危険性があることについて言及した。そして、曲げ部損傷への対策として、HAFやPCFを含む低曲げ損失ファイバを用い、更に、曲げ部損傷に対し高い耐性を有するポリマー被覆を用いればよいことを述べた。

以上より、光ファイバ通信の高入力化において発生が懸念されるファイバヒューズや曲げ部損傷の問題への対応に適した光ファイバとして、空孔を有するHAFやPCFが大変魅力的であることが分かった。

文 献

- [1] R. Kashyap and K.J. Blow, "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibers," *Electron. Lett.*, vol.24, no.1, pp.47-49, Jan. 1988.
- [2] 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.
- [3] R.M. Percival, E.S.R. Sikora, and R. Wyatt, "Catastrophic damage and accelerated aging in bent fibres caused by high optical powers," *Electron. Lett.*, vol.36, no.5, pp.414-416, March 2000.
- [4] T.J. Driscoll, J.M. Calo, and N.M. Lawandy, "Explaining the optical fuse," *Opt. Lett.*, vol.16, no.13, pp.1046-1048, July 1991.
- [5] D.D. Davis, S.C. Mettler, and D.J. DiGiovanni, "Experimental data on the fiber fuse," *Proc. SPIE*, vol.2714, pp.202-210, June 1995.
- [6] R.M. Atkins and P.G. Simpkins, "Track of a fiber fuse: A Rayleigh instability in optical waveguides," *Opt. Lett.*, vol.28, no.12, pp.974-976, June 2003.
- [7] E.M. Dianov, I.A. Bufetov, A.A. Frolov, Y.K. Chamorovsky, G.A. Ivanov, and I.L. Vorobjev, "Fiber fuse effect in microstructured fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.16, no.1, pp.180-181, Jan. 2004.
- [8] Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, and R. Nagase, "Fiber fuse phenomenon in step-index single-mode optical fibers," *J. Quantum Electronics*, vol.40, no.8, pp.1113-1121, Aug. 2004.
- [9] E.M. Dianov, I.A. Bufetov, and A.A. Frolov, "Destruction of silica fiber cladding by the fuse effect," *Opt. Lett.*, vol.29, no.16, pp.1852-1854, Aug. 2004.
- [10] S.I. Yakovlenko, "On reasons for strong absorption of light in an optical fibre at high temperature," *Quantum Electron.*, vol.34, no.9, pp.787-789, 2004.
- [11] 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, "Temperature of optical discharge under action of laser radiation in silica-based fibers," *Proc. European Conf. and Exhib. Opt. Commun.*, no.We 3.4.4, Glasgow, Scotland, 2005.
- [12] S. Todoroki, "Origin of periodic void formation during fiber fuse," *Opt. Express*, vol.13, no.17, pp.6381-6389, Aug. 2005.
- [13] S.I. Yakovlenko, "Mechanism for the void formation in the bright spot of a fiber fuse," *Laser Physics*, vol.16, no.3, pp.474-476, 2006.
- [14] N. Akhmediev, P. St. J. Russell, M. Taki, and J.M. Soto-Crespo, "Heat dissipative solitons in optical fibers," *Phys. Lett. A*, vol.372, no.9, pp.1531-1534, Feb. 2008.
- [15] 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 Commun. Conf.*, no.JWA11, San Diego, USA, 2008.
- [16] K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki, and H. Tsuchiya, "Fiber fuse phenomenon in hole-assisted fibers," *Proc. European Conf. and Exhib. Opt. Commun.*, no.P.1.14, Brussels, Belgium, 2008.
- [17] H. Takara, H. Masuda, H. Kanbara, Y. Abe, Y. Miyamoto, R. Nagase, T. Morioka, S. Matsuo, M. Shimizu, and K. Hagimoto, "Evaluation of fiber fuse characteristics of hole-assisted fiber for high power optical transmission systems," *Proc. European Conf. and Exhib. Opt. Commun.*, no.P.1.12, Vienna, Austria, 2009.
- [18] 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, Aug. 2010.
- [19] N. Hanzawa, K. Kurokawa, K. Tsujikawa, K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, and S. Tomita, "Observation of a propagation mode of a fiber fuse with a long-period damage track in hole-assisted fiber," *Opt. Lett.*, vol.35, no.12, 2004-2006, June 2010.
- [20] T. Morioka, "New generation optical infrastructure technologies: "EXAT Initiative" Towards 2020 and Beyond," *Proc. OptoElectronics and Commun. Conf.*, no.FT4, Hong Kong, China, 2009.
- [21] K. Kurokawa, K. Nakajima, K. Tsujikawa, T. Yamamoto, and K. Tajima, "Ultra-wideband WDM

- transmission over PCF,” *J. Lightwave Technol.*, vol.27, no.11, pp.1653–1662, June 2009.
- [22] K. Nakajima, K. Hogari, J. Zhou, K. Tajima, and I. Sankawa, “Hole-assisted fiber design for small bending and splice losses,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.15, no.12, pp.1737–1739, Dec. 2003.
- [23] S.L. Logunov and M.E. Derosa, “Effect of coating heating by high power in optical fibres at small bend diameters,” *Electron. Lett.*, vol.39, no.12, pp.897–898, June 2003.
- [24] E.S.R. Sikora, D.J. McCartney, K. Farrow, and R. Davey, “Reduction in fibre reliability due to high optical power,” *Electron. Lett.*, vol.39, no.14, pp.1043–1044, July 2003.
- [25] N. Nishimura, K. Seo, M. Shiino, and R. Yuguchi, “Study of high-power endurance characteristics in optical fiber link,” *Proc. Opt. Amp. and Appl.*, no.TuC4, Otaru, Japan, 2003.
- [26] K. Kurokawa, C. Fukai, J. Zhou, K. Nakajima, K. Tajima, K. Hogari, and I. Sankawa, “High power tolerance of optical fiber cable,” *Proc. OptoElectronics and Commun. Conf./ Conf. Optical Internet (OECC/COIN2004)*, no.13D1-3, pp.70–71, Yokohama, Japan, 2004.
- [27] I.M. Davis, G.S. Glaesemann, S. Ten, and M.J. Winningham, “Optical fibers resilient to failure in bending under high power,” *Proc. European Conf. and Exhib. Opt. Commun.*, no.We3.4.5, Glasgow, Scotland, 2005.
- [28] C.-K. Chien, D.A. Clark, and G.S. Glaesemann, “Coating failure of bent fiber under high power laser,” *Proc. Int. Wire & Cable Symp.*, pp.373–379, Rhode Island, USA, 2005.
- [29] M. Bigot-Astruc, P. Sillard, S. Gauchard, P. Leroux, and E. Brandon, “Analysis of coating temperature increase in fibers under high power and tight bending,” *Proc. Optical Fiber Commun. Conf.*, no.OFK4, Anaheim, USA, 2006.
- [30] X. Sun, J. Lie, and A. Hokansson, “Study of optical fiber damage under high optical power at 2140 nm,” *Proc. SPIE*, vol.6433, pp.643309–643315, Feb. 2007.
- [31] E.S.R. Sikora, D.J. McCartney, and J.V. Wright, “Impact of coating ageing on susceptibility to high-power damage at fibre bends,” *Electron. Lett.*, vol.43, no.4, pp.208–210, Feb. 2007.
- [32] T. Matsui, K. Nakajima, K. Kurokawa, K. Tajima, K. Shiraki, and I. Sankawa, “Temperature-increase characteristics in bent hole-assisted fiber under high power,” *J. Lightwave Technol.*, vol.25, no.5, pp.1231–1237, May 2007.
- [33] S.L. Logunov, C.-K. Chien, and D.A. Clark, “High power laser damage of standard and bend resistant fibres,” *Electron. Lett.*, vol.45, no.20, pp.1019–1020, Sept. 2009.
- [34] K. Kurokawa, N. Hanzawa, K. Tsujikawa, and S. Tomita, “Hole-size dependence of fiber fuse propagation in hole-assisted fiber (HAF),” *Proc. Microoptics Conf.*, no.H-30, Sendai, Japan, 2011.
- [35] M. Yamada, O. Koyama, Y. Katsuyama, and T. Shibuya, “Heating and burning of optical fiber by light scattered from bubble train formed by optical fiber fuse,” *Proc. Optical Fiber Commun. Conf.*, no.JThA1, Los Angeles, USA, 2011.
- [36] T.A. Birks, J.C. Knight, and P. St.J. Russell, “Endlessly single-mode photonic crystal fiber,” *Opt. Lett.*, vol.22, no.13, pp.961–963, July 1997.
- [37] T. Sorensen, J. Broeng, A. Bjarklev, E. Knudsen, and S.E.B. Libori, “Macro-bending loss properties of photonic crystal fibre,” *Electron. Lett.*, vol.37, no.5, pp.287–289, March 2001.
- [38] K. Himeno, S. Matsuo, N. Guan, and A. Wada, “Low-bending-loss single-mode fibers for fiber-to-the-home,” *J. Lightwave Technol.*, vol.23, no.11, pp.3494–3499, Nov. 2005.
- [39] M.-J. Li, P. Tandon, D.C. Bookbinder, S.R. Bickham, M.A. McDermott, R.B. Desorcie, D.A. Nolan, J.J. Johnson, K.A. Lewis, and J.J. Englebert, “Ultra-low loss single-mode fiber for FTTH,” *Proc. Optical Fiber Commun. Conf.*, no.PDP10, San Diego, USA, 2008.
- [40] ITU-T Recommendation G.657, 2nd ed., 2009.
(平成 24 年 6 月 12 日受付, 10 月 8 日再受付)



黒河 賢二 (正員)

1985 東大・理卒。1987 同大大学院修士課程了。同年 NTT 入社。以来、フェムト秒パルス発生、光ファイバ中の非線形光学現象、超大容量光ファイバの研究に従事。2005–2011 筑波大学連携大学院准教授兼任。現在、NTT アクセスサービスシステム研究所に在籍。博士(理学)。応用物理学会、日本物理学会、IEEE、OSA 各会員。