

低曲げ損失ホーリーファイバ

光電子技術研究所 官 寧*1・竹 永 勝 宏*2・鈴木 龍 次*2
愛 川 和 彦*2・姫 野 邦 治*3
光機器事業部 井 添 克 昭*4

Low Bending Loss Holey Fiber

Dr. N. Guan, K. Takenaga, R. Suzuki, K. Aikawa, K. Himeno & K. Izoë

われわれは高屈折率コアの周りに径が異なる空孔を2層配置した、新しい構造をもつホーリーファイバを開発した。このファイバは極小な曲げ径に対しても良好な曲げ損失特性を有するほか、シングルモード動作、および従来のシングルモードファイバと低損失融着接続を実現している。ここでは、ファイバの構成を紹介し、試作したファイバの特性について報告する。

We have developed a novel type of holey fiber which has a conventional raised-index core surrounded by two layers of air-holes with different sizes. The fiber has single-mode operation and shows a low bending loss even for an extremely small bending diameter and a low splicing loss for fusion-splicing to a conventional single-mode fiber. The structure of the fiber and the properties of the fiber will be illustrated in this paper.

1. ま え が き

近年、ブロードバンドアクセスが急速に普及し、FTTH (Fiber-To-The-Home) も本格的に導入が始まり、顕著な伸びを示している。しかし、さらにFTTHを普及させるには、エンドユーザまでの光通信路の構築に膨大な費用がかかる、いわゆる「ラストワンマイル」問題を解決し、アクセス系に用いる物品の低コスト化や工事の容易化による経済性の向上が必要不可欠である。このことから、ドロップケーブル用・宅内配線用の光ファイバには、小さな曲げ径での敷設や余長収納が可能となるようなアクセス系特有の性能が求められている¹⁾。

曲げ損失を低減するためには、伝搬モードの等価屈折率を高くするか、伝搬モード電磁界の分布範囲を抑えればよい。当社は、コアの屈折率を高くし、曲げ半径が通常シングルモードファイバ (Single-Mode Fiber : SMF) の許容半径の半分15mmにおいて、大きな曲げ損失が生じないファイバFutureGuide®-SR15を開発した。さらに、コアから離れた位置にトレンチと呼ばれる屈折率がクラッドよりも低くなる層を設けることにより、曲げ半径7.5mmにおいても大きな曲げ損失が生じずSMFとの接続損失も抑制したファイバを開発してきた²⁾。しかし、通常の光ファイバで、半径5mmのようなさらに小さな曲げ径に対応しようとすると、モードフィールド径 (Mode-Field

Diameter : MFD) を極端に小さくせざるを得ず、通常のSMFとの接続に大きな接続損失が伴ってしまう。

われわれはこの問題を解決するために、ホーリーファイバの技術を適用した。ホーリーファイバは一般に全石英ファイバの断面に空孔を周期的に配置し、その周期性を破る欠陥でコアを形成しているが³⁾、ホールアシスト型ホーリーファイバ (Hole-Assisted Holey Fiber : HA-HF) は従来の高屈折率コアの周りに空孔を配置することにより、従来の光ファイバとホーリーファイバの両方の特性を合わせ持つことができる⁴⁾。また、高屈折率コアの周りに配置されている空孔は、コアとクラッドとの間に等価的に大きな屈折率の差を作り出しているため、MFDを極端に小さくすることなく、曲げ損失を小さく抑えることができる。

HA-HFの構造として、空孔が1層となるタイプ⁵⁾、および2層となるタイプ⁶⁾がすでに提案されている。空孔が1層となるタイプは構造がシンプルであるが、曲げ損失を小さく抑えようとすると、高次モードのカットオフ波長が長波長側に伸び、マルチモードになってしまう問題がある。空孔が2層となるタイプはその問題を解決することができるが、構造が複雑になってしまう。

本報において、新しい構造をもつHA-HFの開発について報告する。ファイバは2層の空孔層をもつが、各層は3つの空孔からなり、異なる層の空孔は異なる空孔径をもつ。この構造を用いることにより、低い曲げ損失および短いカットオフ波長を両立させることができる。また、HA-HFのコアには通常のSMFと同程度のコアを用いることにより、本HA-HFは通常SMFと低損失で接続すること

*1 光プロセス研究部 (工博)

*2 光プロセス研究部

*3 光プロセス研究部グループ長

*4 光応用製品部

ができる。われわれが試作したファイバは $1.28\mu\text{m}$ となるカットオフ波長および波長 $1.55\mu\text{m}$ において、曲げ半径 5mm で 0.012dB/turn となる曲げ損失を実現している。また、HA-HFと通常SMFとの融着接続損失は平均で 0.05dB 、HA-HF同士の融着接続損失は平均で 0.08dB となっている。

2. ファイバ設計

われわれが開発したHA-HFの構造を図1に示す⁷⁾。クラッドの材料は純石英とし、高屈折率をもつ円形コアの直径を D として、純石英に対する比屈折率差を Δ とする。また、図示のように、コアを囲む空孔は2層からなり、各層の空孔は3個である。外側の空孔は中心コアからみて、ちょうど内側の空孔の間に配置される。内側と外側の空孔の直径をそれぞれ d_1 と d_2 とし、空孔の中心とコアの中心の距離をそれぞれ Λ_1 と Λ_2 とする。

内側層に径の小さい空孔を配置することにより、クラッド領域を大きく占有することなく、内側空孔をコアに近づけることができる。このため、伝搬モードの等価屈折率を下げ、高次モードのカットオフ波長を短くすることができる。また、外側層に径の大きい空孔を配置することにより、基底モードを十分に閉じ込め、低曲げ損失特性を実現させることができる。外側層の空孔の配置は高次モードをも閉じ込める効果があるので、カットオフ波長を長くさせるように機能してしまうが、空孔の配置を最適化することにより、低曲げ損失およびシングルモード動作を両立させることができる。これは、基本モードと高次モードのフィールド分布に違いがあり、空孔配置の隙間を適切に調整することにより、両モードの閉じ込めを選択的に行うことができるからである。

また、このファイバと通常SMFとの接続を考慮し、コアにはSMFと同程度の D および Δ を使用する。実際にHA-HFとSMFとを融着接続するとき、接続部付近の空孔が潰れる。また、メカニカルプライスを使用して接続するとき、空孔が整合剤で塞がれる。いずれの場合も、接続

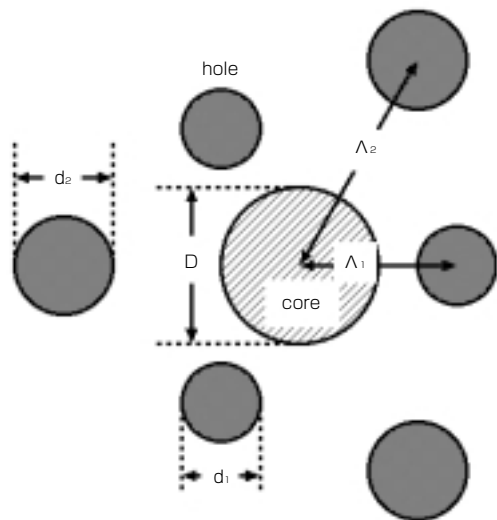


図1 開発したHA-HFの構造
Configuration of developed HA-HF

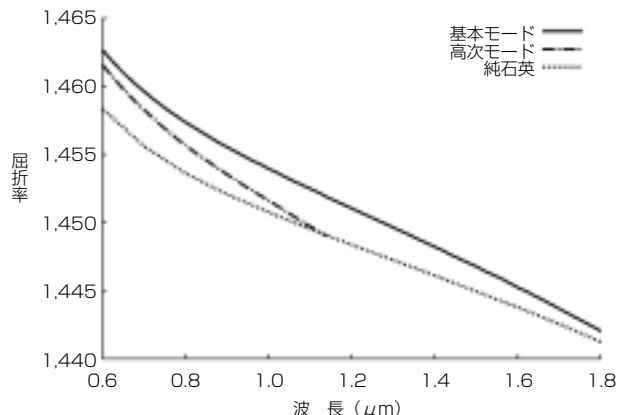


図2 HA-HFの基本モードと高次モードの等価屈折率および純石英の屈折率の波長依存性

Dependence on wavelength of effective indices of fundamental and higher order modes of HA-HF and index of pure silica

部付近におけるHA-HFのモードフィールドはSMFのそれとほぼ同じになるので、低い接続損失を実現することができる。

われわれは境界要素法⁸⁾を用いてこのファイバを解析した。図2に $D=8.5\mu\text{m}$ 、 $\Delta=0.34\%$ 、 $d_1=5.1\mu\text{m}$ 、 $d_2=8.5\mu\text{m}$ 、 $\Lambda_1=8.5\mu\text{m}$ 、 $\Lambda_2=11.0\mu\text{m}$ とした場合について、HA-HFの伝搬モード（基本モードと高次モード）の等価屈折率および純石英の屈折率を示す。図より、クラッドの屈折率を純石英と仮定した場合のカットオフ波長が $1.13\mu\text{m}$ になることがわかる。同じコアをもち、空孔が存在しないようなステップコアのSMFのカットオフ波長が $1.29\mu\text{m}$ になっていることを考慮すると、ファイバの高次モードの等価屈折率が空孔の接近によって大幅に下げられ、カットオフ波長の伸びを防いでいることがわかる。

図3、図4にはそれぞれ上記ファイバの波長 $1.1\mu\text{m}$ における基本モードおよび高次モードのパワー分布を示す。図中の等高線は 5dB 間隔で書かれている。図により、両者の分布の違いは明らかである。また、このファイバの基本モードの群速度分散特性を図5に示す。

3. 光学特性

前節で述べた設計に基づき、実際にファイバを試作した。ファイバの破断寿命に関わる表面の引っ張り歪みは、曲げ径に比例してファイバ径に反比例する。われわれが開発するHA-HFは 5mm という非常に小さな曲げ半径も対象にしていることから、機械信頼性を考慮してファイバ外径 $80\mu\text{m}$ のファイバも作製した。作製したファイバの断面写真を図6に示す。ファイバの寸法は図2の計算で使用したものと同程度である。また、ファイバの波長 $1.55\mu\text{m}$ における諸光学特性を表1に示す。表に示されるように、 $125\mu\text{m}$ のファイバはカットオフ波長が $1.28\mu\text{m}$ で、曲げ半径 5mm に対して、損失が 0.012dB/turn となっている。この曲げ損失は図7で示されるように、特に小さな曲

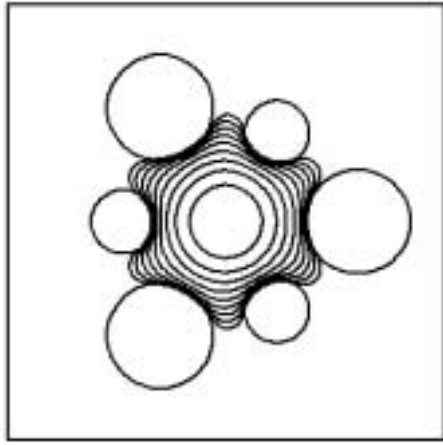


図3 HA-HFの基本モードのパワー分布
Power distribution of fundamental mode of HA-HF

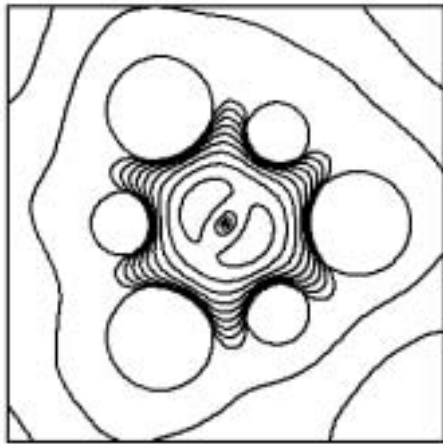


図4 HA-HFの高次モードのパワー分布
Power distribution of higher order mode of HA-HF

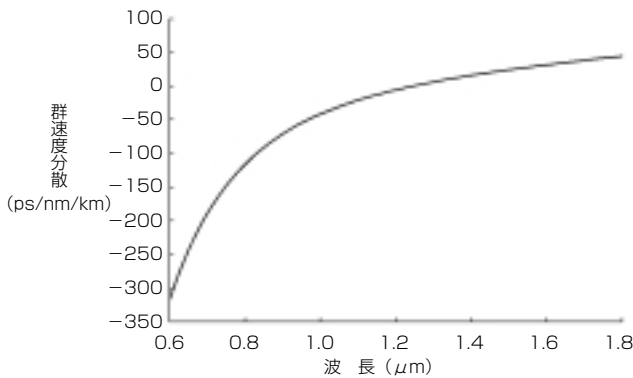
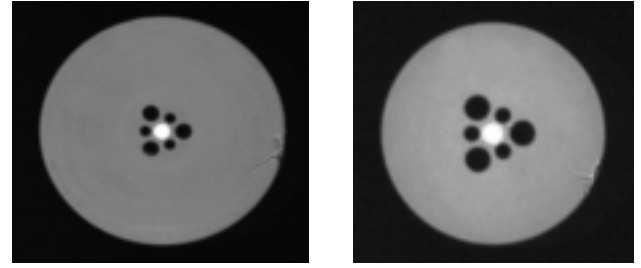


図5 HA-HFの群速度分散特性
Group velocity dispersion dependence on wavelength for HA-HF

げ径に対して通常のSMFより十分低い値である。

また、表1に示されるように、80 μm ファイバは125 μm ファイバとほぼ同じような光学特性を示している。一方で、スクリーニングレベル2%、曲げ半径5mm、曲げ回数10回、使用年数10年の条件における破断確率は、125 μm ファイバが 5×10^{-2} 程度であるのに対して、80 μm ファイバが 5×10^{-6} となり、寿命が大幅に改善することが期待で



(a) 125 μm (b) 80 μm

図6 作製したHA-HFの断面写真
Pictures of cross-section of fabricated HA-HFs

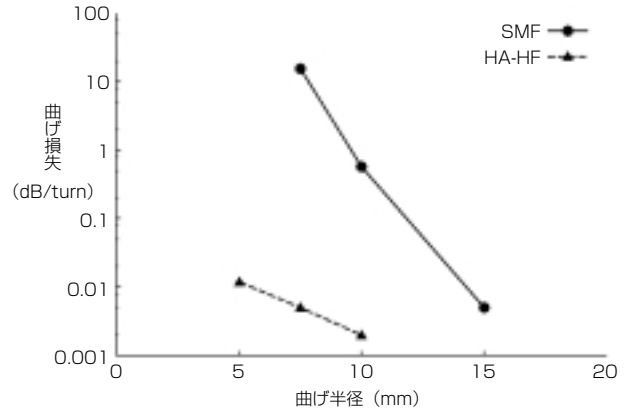


図7 HA-HFと通常SMFの曲げ損失の比較
Bending loss comparison between HA-HF and conventional SMF

表1 波長1.55 μm におけるHA-HFの諸特性
Characteristics of HA-HFs at wavelength of 1.55 μm

ファイバ径 (μm)		125	80
分散 (ps/nm/km)		28.2	29.2
モードフィールド径 (μm)		7.8	7.6
カットオフ波長 (μm)		1.28	1.19
曲げ損失 (dB/turn)	曲げ半径5mm	0.012	0.029
	曲げ半径7.5mm	0.005	0.005
	曲げ半径10mm	0.002	0.004

きる。

4. 接続特性

試作したファイバの波長1.55 μm におけるMFDは、通常のSMFのMFD約10 μm より小さいが、通常SMFと低損失で接続することが可能である。図8はHA-HFと通常SMFの融着接続における損失ヒストグラムを示し、0.05dBの平均接続損失が得られていることがわかる。このような低い接続損失が得られるのは、接続部近傍におけるHA-HFの断面が融着後、ちょうど通常のSMFと同様な構造になっていること、および融着接続器（フジクラ製FSM-40シリーズ使用）に備付けられているスイープ放電機能を用いることにより、HA-HFの接続部に容易にテーパ形状領域を作製することができるからである。図9にはHA-HFとSMFの融着接続の側面写真が示され、緩やかなテーパ形状をはっきりと認識することができる。

HA-HF同士も同様な機構により低損失で融着接続する

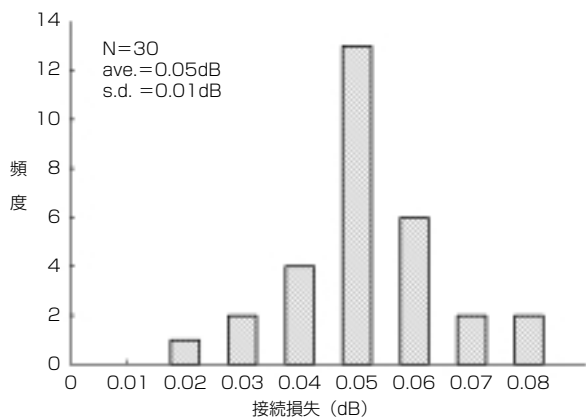


図8 HA-HFと通常SMFの融着接続損失のヒストグラム
Splicing loss histogram for fusion splicing between HA-HF and conventional SMF

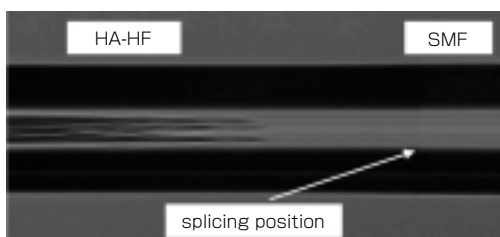


図9 HA-HFと通常SMFの融着接続の側面写真
Side view of fusion splicing between HA-HF and conventional SMF

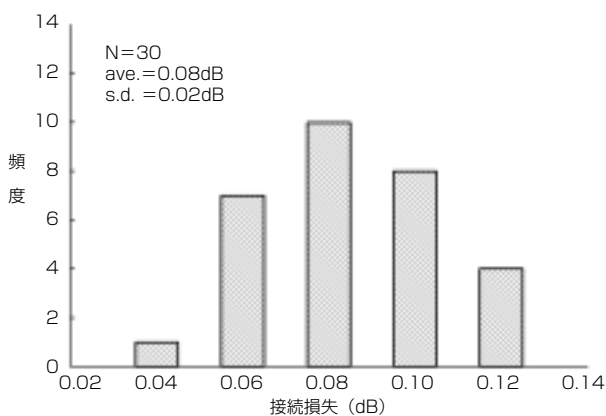


図10 HA-HF同士の融着接続損失のヒストグラム
Splicing loss histogram for fusion splicing between two HA-HFs

ことができる。通常の融着接続方法でも十分低い接続損失が得られるが、融着機のスイープ放電機能を用いて、両方のHA-HFの接続部分をテーパにすることにより、さらに低い接続損失が実現できる。図10にスイープ放電を行った場合におけるHA-HF同士の融着接続の接続損失ヒストグラムを示す。0.08dBの平均損失が実現されていることがわかる。また、その場合の左側および右側部分の側面写真図をそれぞれ図11、図12に示す。

5. 信頼性

ホーリーファイバの実用化に向けては、耐環境特性や

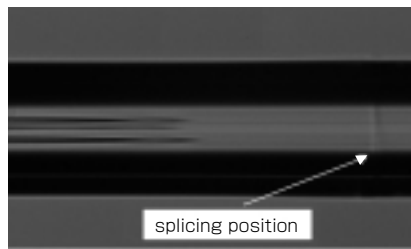


図11 HA-HF同士の融着接続の側面写真（左側）
Side view of fusion splicing between two HA-HFs (left side)

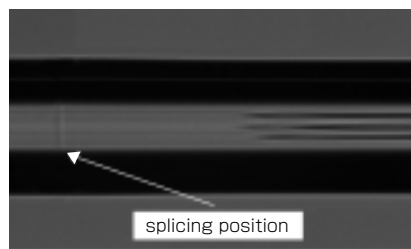


図12 HA-HF同士の融着接続の側面写真（右側）
Side view of fusion splicing between two HA-HFs (right side)

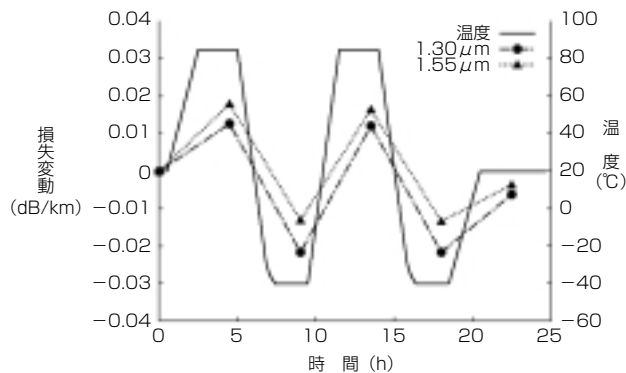


図13 ヒートサイクルにおける損失変動
Loss variation for heat-cycle

機械強度特性の確認が必要となる。

図13は-40℃～85℃のヒートサイクル試験結果を示す。試験には長さ1kmのファイバ径125μmファイバを使用した。図示のように、1.3μmと1.55μmの両波長において、損失変動は0.03dB/km以下であった。また、高温高湿試験（温度85℃、湿度85%、1,000時間）においても、損失変動は波長1.3μmで0.02dB/km以下、波長1.55μmで0.01dB/km以下であった。さらに、ファイバの端面を開放し、高温高湿の環境下24時間放置しても顕著な損失増は観測されなかった。

図14はファイバ径125μmファイバの長尺引張強度試験の結果を示す。試験は歪速度5%/min、試験長10m、サンプル数50本で行われ、破断強度は4.98GPa (F50)であった。また、2点曲げ試験法⁹⁾から得られる動疲労n値は21.2であった。

マイクロバンド試験で、巻張力100gで125μmのHA-HFを#360のサンドペーパーに巻き、波長1.55μmにおける

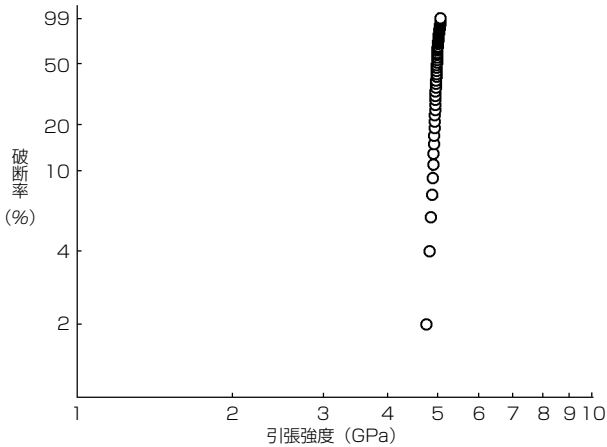


図14 引張強度のワイブルプロット
Weibull plot of tensile strength

損失増を調べたところ、わずか0.003dB/kmであった。これは通常のSMFよりもはるかに良い結果であった。

このように、試作したホーリーファイバはヒートサイクル試験においても、強度試験においても、マイクロバンド試験においても、通常SMFと同程度の特性を示すことが確認できた。

6. む す び

われわれは新しい構造をもつホールアシスト型ホーリーファイバを開発した。試作したファイバを測定することにより、シングルモード動作および極小曲げ径に対する低曲げ損失の実現を確認した。また、試作ファイバは

同種あるいは通常のシングルモードファイバと極めて低い損失で融着接続することができた。さらに、耐環境特性試験と強度試験において、このファイバは従来のシングルモードファイバ並みの特性を示すことを確認した。

参 考 文 献

- 1) 富田ほか：宅内・構内用光配線関連技術の最新動向，信学技報，OFT2004-6, 2004
- 2) 池田ほか：接続損失を低減した低曲げ損失光ファイバ，フジクラ技報，第105号，pp.6-10, 2003
- 3) J. C. Knight, et. al: All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding, Optics Lett., Vol.21, pp.1547-1549, 1996
- 4) T. Hasegawa, et. al: Novel hole-assisted lightguide fiber exhibiting large anomalous dispersion and low loss below 1dB/km, OFC2001, PD5, 2001
- 5) 姚ほか：低損失ホーリーファイバの開発，信学技報，OFT2003-27, 2003
- 6) 西岡ほか：極小径曲げ対応ホーリーファイバの開発，信学技報，OFT2003-63, 2003
- 7) 官ほか：低曲げ損失用ホールアシスト型ホーリーファイバ，信学技報，OFT2004-7, 2004
- 8) N. Guan, et. al: Boundary element method for analysis of holey optical fibers, J. Lightwave Technol., Vol.21, pp.1787-1792, 2003
- 9) 鯉江ほか：光ファイバの疲労特性向上に関する検討，信学技報，OFT2004-1, 2004